

# ФАКТОРИ ІНЕРЦІЙНОСТІ РІДИННИХ МІКРОТЕРМОМЕТРІВ З ТОНКИМИ КАПІЛЯРАМИ

## INERTITY FACTORS OF MICROTHERMOMETERS WITH THIN CAPILLARIES

*Мельник Х. Л., аспірант*

*Національний університет «Львівська політехніка», Україна; e-mail: hrustuna\_levytska@ukr.net*

*Khrystyna Melnyk, PhD student*

*Lviv Polytechnic National University, Ukraine; e-mail: hrustuna\_levytska@ukr.net*

<https://doi.org/>

**Анотація.** Рідинні мікро- і нанотермометри виготовляють на основі капілярів, заповнених рідиною. Важливим є вид рідини (вода, спирт, ртуть тощо), кут нахилу термометра і відповідно, капіляра, його внутрішній діаметр. Нині потреба у мікро- і нанотермометрах з невисокою інерційністю і відповідно з малим діаметром капіляра зростає, а інформації щодо їх інерційності, необхідної, зокрема, для медицини стає недостатньо. Час їх теплової інерції достатньо малий, оскільки тепла рівновага термометра і контрольованого об'єкта встановлюється надзвичайно швидко. Проте насправді переміщення рідини в капілярі термометра, що визначає відлік значення температури, внаслідок зміни термодинамічних умов під час вимірювання не є настільки швидким, щоб задовольнити метрологів. Досвід вивчення спонтанного проникнення рідин у пористі мікро- і наноканали природних структур обмежується переважно працями, що фіксують істотність впливу початкових умов на швидкість проникнення.

У роботі розглянуто особливості заповнення капілярів різних внутрішніх діаметрів за різних кутів нахилу, що дає змогу опрацювати питання технології виготовлення та використання вказаних термометрів, і отже, прогнозувати тривалість встановлення показів мікро- і нанотермометрів з термочутливою рідиною під час вимірювання, не обмежуючись розглядом лише теплових процесів.

Для цього скористались законом Жюрена та рівняннями Вашборна й Босанке. На швидкість заповнення капіляра впливають в'язкість рідини, поверхневий натяг, довжина заповненої частини капіляра та його радіус. Оскільки в'язкість рідини незначно збільшується із підвищенням тиску й експоненційно зменшується із підвищенням температури, то вона обернено пропорційна до швидкості проникнення або переміщення меніска стовпчика термометра. Ми проаналізували вплив зазначених чинників на метрологічні параметри мікро- і нанотермометрів, що сприяє їх ефективнішому виготовленню та використанню.

**Ключові слова:** рідинний мікотермометр, стала теплової інерції, тривалість встановлення показів термометра, рівняння Вашборна, градувальні характеристики.

**Abstract.** Micro- and nanothermometers with liquid-phase sensitive elements are made on the basis of capillaries filled with liquid. Important is the kind of liquid (water, alcohol, mercury, etc.), the angle of inclination of the thermometer capillary, and its internal diameter. Currently the need for micro- and nanothermometers with low inertia and accordingly with the small diameter of the capillary is increasing, and information about their inertia, which is necessary, in particular, for medicine, becomes insufficient. The time of their thermal inertia is rather small, since the thermal equilibrium of the thermometer and the controlled object is set extremely fast. However, in reality, the movement of a liquid in a capillary of a thermometer, which determines the readout of the temperature value, due to the change in the thermodynamic conditions during the measurement, is not so rapid to satisfy the metrologists. The experience of studying the spontaneous penetration of liquids in porous micro- and nanochannels of natural structures is limited mainly by works that capture the significance of the influence of initial conditions.

The features of filling capillaries of different internal diameters at different angles of inclination are considered in this paper. It enables to work out the technology of manufacturing and application of these thermometers, and thus to predict the duration of setting the micro- and nanothermometers' indications not limiting by thermal inertia.

For this purpose, the Washburn's and Bosanquet equations are considered. Rate of filling the capillary is affected by fluid viscosity, surface tension, length of the filled capillary, and its diameter. Since the viscosity of the liquid increases slightly with pressure and decreases exponentially with temperature, it is inversely proportional to the rate of liquid penetration or to the rate of moving meniscus. It was analyzed the impact of these factors on the micro- and nanothermometers' performance that promotes their efficient production and application.

**Key words:** Microthermometer, Liquid-Phase Sensitive Element, Thermal Inertia, Duration of Setting the Indications, Washburn's Equation, Calibration Characteristics.

### Вступ

Існує чимало різних видів термометрів, що відрізняються використанням залежностей різних властивостей речовини від температури. Поширеними вважають рідинні термометри, легкі у

виконанні та використанні. Їх масово застосовують тому, що вони не потребують допоміжних приладів та джерел енергії. Серед рідинних термометрів вирізняються ртутні термометри та термометри із нертутним заповненням (спиртові, ксилолові,

толуолові, які використовують для вимірювання температур  $-200$  °С) тощо. Під час їх виготовлення використовують капіляри з діаметром каналу від 100 мкм і вище. Під час перевірки й експлуатації таких термометрів уникають вимірювань за доволі низьких температурах, оскільки у вузьких капілярах стовпчик ртуті рухається нерівномірно, стрибкоподібно, а у разі зниження вимірюваної температури може розірватися.

Стала теплової інерції термометрів визначається інтенсивністю теплообміну термометра з вимірюваним середовищем. Термометр, поміщений у рідке середовище з високим коефіцієнтом теплообміну, характеризуватиметься меншою сталою порівняно із таким самим термометром, встановленим на повітрі. Експериментальні дані щодо деяких мікротермопар, близьких за розмірами та, отже, за сталою теплової інерції, до досліджуваних мікротермометрів, наведені у [1, 2]. Свій вплив чинить теплоємність термочутливого матеріалу та інших матеріалів конструкції термометра  $c_{therm}$ . Ці параметри детально описано у [3], де показано, що методична складова похибки вимірювання температури визначається співвідношенням їх лінійних розмірів (за співмірних значень їхніх масово-теплофізичних характеристик та характеристик вимірюваного об'єкта  $c_{therm} r_{therm} = c_{ob} r_{ob}$ , де  $d$  – питома густина матеріалу):

$$dT_{met} = \frac{v_{therm}}{V_{ob}} \left( \frac{T_{therm}}{T_x} - 1 \right), \quad (1)$$

де  $v_{therm}$  та  $V_{ob}$  – об'єм матеріалу термометра та вимірюваного об'єкта відповідно;  $T_x$  – температура, що встановлюється у термометрі внаслідок його теплообміну з вимірюваним об'єктом (якщо  $V_{ob} \gg v_{therm}$ , вона близька до температури останнього).

### Недоліки

Сучасні технології, зокрема лікування ракових захворювань, потребують виготовлення і використання термометрів малих розмірів (мікротермометри з капілярами діаметрів, меншими від 100 мкм), до прикладу, для опромінення малорозмірного операційного поля високочастотними електромагнітними хвилями. Тому для вимірювання температури в таких специфічних умовах придатні, передусім, рідинні мікротермометри [4]. Мікротермометри, виготовлення яких описано у [5], повинні відзначатись малими розмірами та швидким встановленням показів під час вимірювання. Виникає низка проблем, зокрема проблема інерційності термометра, оскільки закономірності заповнення рідиною

капілярів недостатньо вивчені й не всі рідини відповідають вимогам. Разом з тим, рідинному мікротермометру лінійних розмірів  $\sim 100$  мкм притаманні специфічні риси, пов'язані із розмірними ефектами та їх наслідками. Адже зі зменшенням перетину каналу капіляра зростає відносне значення сили тертя термочутливого матеріалу об стінки, що діє на стовпчик під час його руху по капіляру. Крім того, ускладнюється технологія виготовлення самого термометра, позаяк ті самі сили створюють труднощі у разі заповнення його капіляра термочутливою рідиною.

### Мета роботи

Мета роботи полягає у вивченні аспектів заповнення капілярів мікротермометрів різними термочутливими рідинами (на етапі виготовлення), а також у дослідженні характеристик інерційності термометрів, пов'язаних не тільки із теплофізичними параметрами теплообміну, але й з рухом рідини по капіляру внаслідок зміни температури термометра під час його використання за призначенням.

## 1. Конструкції, матеріали та характеристики термометрів

### 1.1. Макротермометри

Розглянемо засади роботи рідинного термометра. Завдяки тепловому розширенню збільшується об'єм термометричної рідини у резервуарі. Стовпчик рідини у капілярі піднімається, і цю зміну можна простежити за допомогою шкали. Зворотний процес відбувається у разі зниження температури. У випадку зміни контрольованої температури об'єм термочутливої рідини змінюється поступово, оскільки для встановлення теплової рівноваги між нею та контрольованим середовищем потрібен час. Конструкція термометра забезпечує однозначну залежність між вимірюваною температурою і висотою стовпчика рідини. Отже, довжина стовпчика рідини слугує мірою вимірюваної температури, а верхній кінець стовпчика – меніск – визначає зчитувані покази температури. Зміна об'єму, залежно від температури для будь-якої рідини або твердого тіла характеризується коефіцієнтом об'ємного теплового розширення  $\beta$ , 1/К. Середнє значення  $\beta$  у температурному інтервалі  $0 - t$  обчислюють за виразом:

$$\beta = \frac{V_t - V_0}{V_0 T}, \quad (2)$$

де  $V_t$  і  $V_0$  – об'єми, що відповідають температурам  $T$  і  $0$  °С. У скляному рідинному термометрі при зміні температури змінюється не тільки об'єм термочутливої рідини, але й об'єм скляного резервуара.

Коефіцієнти об'ємного розширення  $\beta$  рідини та скла значно відрізняються:  $1,81 \times 10^{-4} (\text{°C})^{-1}$  для ртуті;  $10,6 \times 10^{-4} (\text{°C})^{-1}$  для спирту та  $0,25 \times 10^{-4} (\text{°C})^{-1}$  для скла. Тому в термометрі спостерігається лише видима зміна об'єму рідини, що дорівнює різниці змін об'ємів рідини і резервуара (та частково капіляра) термометра. У зв'язку з цим під час розрахунку конструкції термометра використовують так званий видимий коефіцієнт розширення термометричної рідини в склі  $\beta_I$ .

Вважаючи, що розміри кулястого контейнера для рідини діаметра  $D$  у нижчій частині термометра практично не змінюються з температурою, тоді як сама рідина збільшується в об'ємі, приріст об'єму рідини переміщується в термометричну трубку діаметра  $d$ . Це дає змогу зв'язати пропорційністю зміни розміру стовпчика  $\Delta h$  термометра із приростом температури  $\Delta T$ . До прикладу, для  $\alpha_V = 10^{-4} \text{ 1/K}$  та  $D=10d$  отримано рівняння градуовальної характеристики макротермометра [6]:

$$\Delta h = 0,067d \Delta T = A \Delta T, \text{ мм,}$$

де  $A$  – чутливість термометра, що включає внутрішній діаметр капіляра. Як видно, чутливість макротермометра знижується зі зменшенням діаметра капіляра.

### 1.2. Мікротермометри

У зв'язку з розвитком науки дедалі популярнішими стають біо- та нанотехнології. Це потребує розроблення високоточних технологій вимірювання температури із застосуванням мікротермометрів. Найпоширеніші мікротермометри з тонким прозорим капіляром, замкнутим з одного кінця (довжина до 100 мкм і діаметр близько 0,1...1,0 мкм). Як температурочувливий елемент використовують термочувливу рідину (воду, спирт, ртуть та галій), якою заповнюють внутрішній простір капіляра (рис. 1).

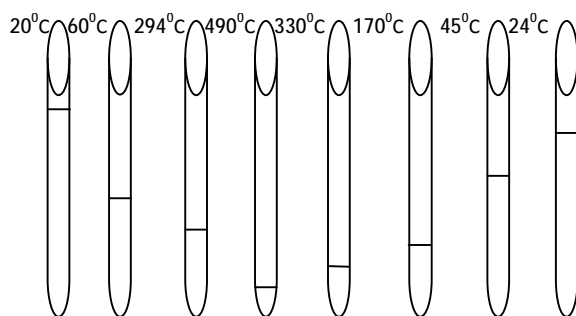


Рис. 1. Мікротермометр на основі заповненої галієм нанотрубки

Fig. 1. Microthermometer produced on the basis of the capillary filled with gallium

Під час нагрівання на вільній поверхні стовпчика галію утворюється шар оксиду, завдяки властивостям якого фіксується довжина металічного стовпчика; його наявність є зручною для вимірювань. Проте мініатюрність мікротермометрів визначає потребу в оптичному засобі для зчитування показів.

### 1.3. Дослідження характеристик термометрів

У праці [6] ми здійснили термодинамічний аналіз роботи згаданих термометрів на основі визначення сукупності чинників впливу, зумовлених дією різних термодинамічних сил і потоків на термочувливу субстанцію термометра у разі зменшення його розмірів у мікро- і нанообласть. Вони призводять до формування градуовальної характеристики й до її зміни внаслідок дії функції впливу. Остання формує інструментальну складову похибки термометра за умови зміни термодинамічного стану термочувливої речовини.

Якщо у рідинного макротермометра визначальною термодинамічною силою є сила, зумовлена об'ємним розширенням термочувливої рідини, то у рідинного мікротермометра маємо справу зі зміщенням стовпчика рідини відносно певної позначки внаслідок зміни сили поверхневого натягу цієї рідини у разі зміни температури. Визначена залежність зазначеного зміщення від температури слугує підставою для формування градуовальної характеристики. За умови нехтування впливом механічного ступеня вільності й процесів перенесення, зумовлених ним, отримуємо два взаємозв'язані чинники – поверхневий натяг і температуру, що визначають вигляд градуовальної характеристики рідинного мікро- і нанотермометра. Правило Етвеша та рівняння Релея–Шільда визначають залежність поверхневого натягу будь-якої чистої рідини від температури: за ними коефіцієнт поверхневого натягу є лінійною функцією температури. Отже, врахувавши їх, отримуємо рівняння градуовальної характеристики мікро(нано-)термометра із капіляром, заповненим термочувливою рідиною:

$$\Delta h = \frac{4\sigma'}{\rho d} \left( \frac{N_A}{V} \right)^{2/3} (T_c - \theta - T) = C(T_c - \theta - T), (4)$$

де  $C$  – стала;  $T_c$  – критична температура, за якої коефіцієнт поверхневого натягу рідини зменшується до нуля. Для прикладу, для води ця температура становить 547 К. Як видно, у сталу  $C$  градуовальної характеристики цього термометра входить розмір визначального конструктивного елемента, а саме внутрішній діаметр термометричної трубки  $d$ .

Зазначимо, що, коли термометр використовується в зоні дії градієнта температури, то виникає ефект термокапілярної течії [7–8]. Він полягає у

появі різниці поверхневого натягу і, отже, різниці капілярного тиску в рідині, що призводить до перенесення самої рідини або пухирців газу в нерівномірно нагрітому середовищі. Цей чинник може виявитися істотним у формуванні додаткового джерела похибки термометрів у наносвіті. У всякому разі, він уже використовується у нанотехнологіях під час створення нанодвигунів [9], рушійною силою яких слугує ефект термокапілярної течії.

Дія сил поверхневого натягу проявляється вже у звичайних термометрах викривленням меніска. Важливою для макро-, мікро- та нанотермометрів вважається так звана капілярна стала  $a$  як величина, що описує характеристичні розміри системи:  $L < a$ , за яких істотними стають капілярні явища (капілярне всмоктування, капілярний рух рідини, капілярна конденсація тощо):

$$a = \sqrt{\frac{2\sigma}{(r_1 - r_2)g}}, \quad (5)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння;  $r_1, r_2$  – відповідно густина рідини і густина газу над нею. Для води за температури 293 К капілярна стала становить, для прикладу, 3,8 мм. Значимо, що:

$$a^2 = hd / 2, \quad (6)$$

де  $h$  і  $d$  – висота і діаметр стовпчика рідини у капілярній трубці.

Для визначення домінування тих чи інших сил у конструкції рідинного термометра, у разі зменшення його розмірів у мікро-, а далі й у нанообласть, доцільно скористатися введеним безрозмірним критерієм – числом Бонда  $Bo$ :

$$Bo = rgd^2 / \sigma, \quad (7)$$

Якщо  $Bo < 1$ , – домінують капілярні сили; а якщо  $Bo > 1$  – гравітаційні сили.

**Динаміка проникнення рідини в капілярні трубки** розглядається в тому випадку, коли ефекти інерції незначні. Випадку проникнення рідини в горизонтальні капіляри притаманні істотніші тривалості. Асимптотичне рішення визначає максимальну тривалість встановлення показів мікро- та нанотермометром. Воно описується рівнянням Лукаса–Вашборна, що, як видається, є граничним випадком достатньо значних тривалостей витримки (горизонтальний капіляр). Спрощене рівняння Вашборна, виведене для переміщення рідини в капілярній циліндричній трубці за відсутності гравітаційного поля, є доволі точним у випадку, коли капілярна сила все ще значно перевищує сили тягіння. Воно виглядає так:

$$L^2 = \frac{\gamma r \cos(\varphi)}{4\eta}, \quad (8)$$

де  $t$  – час,  $L$  – відстань,  $\gamma$  – поверхневий натяг,  $\eta$  – динамічна в'язкість,  $\varphi$  – кут між рідиною і твердим тілом.

Під час виведення рівняння Вашборна інерцію рідини ігнорують як незначну, що дає радше істотну швидкість  $dl/dt$  для малих значень  $t$ . Оскільки у моделі Лукаса–Вашборна інерція рідини ігнорується, це призводить до безперервності її ламінарного потоку за незмінних поточних умов Пуазейля. Останні не враховують ефектів масоперенесення, що призводять до прискорення потоку перенесення у точках зміни внутрішньої геометрії капіляра. Удосконалене рівняння Вашборна, що враховує інерцію рідини [10], назване **рівнянням Босанке**. Це диференціальне рівняння другого порядку в часових похідних. Воно описує рух рідини в тонкій капілярній трубці або у пористому матеріалі, який можна сприймати як сукупність капілярів.

Використовуючи позначення  $x$  для відстані, яку проходить рідина, і припускаючи, що рух повністю зумовлений силами поверхневого натягу, без прикладеного тиску до обох кінців капілярної трубки, рівняння Босанке можна подати як:

$$\frac{d}{dt} \left( \pi r^2 \rho x \frac{dx}{dt} \right) + 8\pi \eta x \frac{dx}{dt} = 2\pi \gamma r \cos \theta, \quad (9)$$

Це рівняння вивчає початковий рух рідини за порівняно малої тривалості експерименту, наближеної до 0:

$$x^2(t) - x^2(0) = \frac{2b}{a} \left[ t - \frac{1}{a} (1 - e^{-at}) \right], \quad (10)$$

де  $a = \frac{8\eta}{\rho r^2}$ ,  $b = \frac{\gamma r \cos \theta}{\rho r}$ . За цієї умови визначається початкова позиція меніска, що, як видно з рівняння, пропорційна до часу. Зрештою, рівняння розкладається до відомої форми Лукаса–Вашборна, що відтворює залежність зсуву меніска від часу і в'язкості [11]. Остання незначно збільшується із підвищенням тиску і зменшується із підвищенням температури за експоненціальним законом. Для прикладу, динамічний коефіцієнт в'язкості описується рівнянням:  $\eta = A * 10^{B/(T-C)}$ , де  $B$  та  $C$  – сталі.

## Результати і обговорення

Щоб визначити висоту піднімання рідини у капілярі, використовують закон Жюрена: висота підняття рідини у капілярі пропорційна до коефіцієнта поверхневого натягу рідини й обернено пропорційна до радіуса капіляра і густини рідини (табл. 1, рис. 2):

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}, \quad (11)$$

За нахилу капіляра висоту заповнення розраховують за формулою (табл. 2):

$$h = l \sin \varphi. \quad (12)$$

Таблиця 1

## Висота заповнення капіляра водою, спиртом та ртуттю за радіусів капілярів 0,1; 0,5 та 1 мкм

Table 1

Height of capillary filling by water, alcohol and mercury at the radiuses of capillaries 0.1; 0.5 and 1  $\mu\text{m}$ 

Радіус капіляра $r$ , мкм	Висота підняття води $h_1$ , мкм(нм)	Висота підняття спирту $h_2$ , мкм(нм)	Висота підняття ртутті $h_3$ , мкм(нм)
0,1	2,94(2940)	1,122(1122)	1,41(1410)
0,5	2,21(2210)	0,841(841)	1,058(1058)
1	1,47(1470)	0,5608(5608)	0,705(7050)

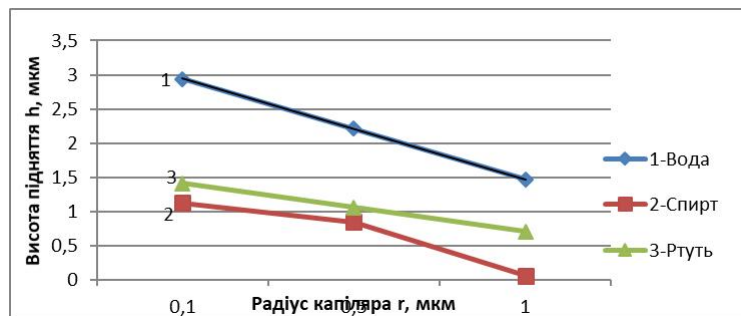


Рис. 2. Висота заповнення капіляра водою, спиртом та ртуттю за радіусів капілярів 0,1; 0,5 та 1 мкм

Fig. 2. Height of capillary filling by water, alcohol and mercury for capillaries of 0.1; 0.5 and 1  $\mu\text{m}$  radiuses

Таблиця 2

Висота заповнення капіляра водою, спиртом та ртуттю за його нахилу на  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  та  $90^\circ$ 

Table 2

Height to filling the capillaries by water, alcohol and mercury at its inclination on  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  and  $90^\circ$ 

Кут нахилу $\varphi^0$	Висота заповнення капіляра водою $h_{11}$ , мкм	Висота заповнення капіляра спиртом $h_{21}$ , мкм	Висота заповнення капіляра ртуттю $h_{31}$ , мкм
$30^\circ$	20	25	22,5
$60^\circ$	34,64	43,3	38,97
$90^\circ$	40	50	45

Таблиця 3

Швидкість наповнення капілярів різного діаметра водою, спиртом, ртуттю за їх горизонтального розташування ( $0^\circ$ )

Table 3

Speed of capillaries filling by water, alcohol and mercury at  $0^\circ$  depending on their radius

Швидкість наповнення капілярів різних радіусів термочутливою речовиною за $0^\circ$								
Вода								
$r_1$ , мкм	$z$ , мкм	$dz/dt$ , мкм/с	$r_2$ , мкм	$z$ , мкм	$dz/dt$ , мкм/с	$r_3$ , мкм	$z$ , мкм	$dz/dt$ , мкм/с
0,1	15	13,42	0,5	15	67,114	1	15	134,228
	20	10,067		20	50,336		20	100,671
	40	5,034		40	25,168		40	50,336
Спирт								
$r_1$ , мкм	$z$ , мкм	$dz/dt$ , мкм/с	$r_2$ , мкм	$z$ , мкм	$dz/dt$ , мкм/с	$r_3$ , мкм	$z$ , мкм	$dz/dt$ , мкм/с
0,1	15	3,41	0,5	15	17,07	1	15	34,14
	20	2,56		20	12,80		20	25,61
	40	1,28		40	6,40		40	12,80
Ртуть								
$r_1$ , мкм	$z$ , мкм	$dz/dt$ , мкм/с	$r_2$ , мкм	$z$ , мкм	$dz/dt$ , мкм/с	$r_3$ , мкм	$z$ , мкм	$dz/dt$ , мкм/с
0,1	15	5,13	0,5	15	25,67	1	15	51,33
	20	3,85		20	19,25		20	38,50
	40	1,93		40	9,62		40	19,25

Швидкість наповнення капіляра визначається поверхневим натягом  $\sigma$  і в'язкістю  $\mu$  рідини, радіусом капіляра  $r$  і довжиною заповненої частини капіляра  $z$  і описується рівнянням :

$$\frac{dz}{dt} = r\sigma \cos \theta / 4\mu z. \quad (13)$$

Як бачимо, швидкості заповнення капілярів діаметра 1,0 мкм водою у горизонтальному положенні становлять 50–134 мкм/с, спиртом – 13–34 мкм/с, ртуттю – 19–51 мкм/с. Це означає, що рідинний мікротермометр завдовжки 100 мкм за умови майже повного заповнення капіляра 1,0 мкм, коли він змінює покази (довжину заповненої частини капіляра) на 10 мкм, характеризується часом встановлення показів 0,20–0,07 с для води, 0,80–0,30 с для спирту та 0,5–0,02 с для ртуті. В разі зменшення діаметра капіляра у десять разів, тобто до 0,1 мкм, час встановлення показів термометра тієї самої довжини зростає у десять разів, позаяк швидкість заповнення зменшується на порядок. Для ртуті він може досягати 5,0 с, що може не задовольняти потрібні вимоги часу встановлення показів термометра.

Справді, за певний час, що визначається сталою температурної інерції, термометр, поміщений у середовище з іншою температурою, повинен встановити власні покази, відчутно змінивши рівень відліку в капілярі. Тому вищеописані параметри радше характеризують спроможність виконання мікро- і нанотермометра із певних конструктивних матеріалів (добір капіляра, підбір термочутливої речовини, їх взаємне змочування та проникнення згаданої рідини в капіляр), переміщення останньої залежно від положення капіляра термометра у просторі (горизонтальне, похиле, вертикальне), правильний вибір співвідношення довжини і діаметра капіляра, тобто узгодження заповнення рідиною (капілярна стала  $a$ ), оптимізацію конструкції під певне значення сталої земного тяжіння (число Бонда  $Bo$ ) тощо.

Отже, швидкість заповнення капіляра термометра не повністю характеризує його інерційні характеристики. Коректним підбиранням діаметра капіляра можна досягти співмірності впливу теплофізичних характеристик, що у мікротермометрів визначають сталу теплової інерції, та впливу характеристик, зумовлених рухом термочутливої рідини внаслідок зміни сили поверхневого натягу, із температурою, що, зі свого боку, визначають час встановлення показів термометра. Час установлення показів, оцінений за особливостями теплообміну для конструкції мікро- і нанотермометра, становить мікросекунди, тоді як за переміщенням рідини у капілярі на один–два порядки вищий, залежно від діаметра капіляра.

## Висновки

1. Розвиток контактної нанотермометрії потребує дослідження різних видів мікро- і нанотермометрів, що відрізняються видом термочутливої рідини. Теплофізичні параметри визначають його час установлення показів. Що менші лінійні розміри (діаметр та довжина) капіляра, то меншою є теоретична тривалість установлення показів, яка не перевищує 0,001 с для нанотермометрів.

2. Насправді рух рідини у капілярі мікро- і нанотермометра залежить від зміни сили поверхневого натягу рідини, яку використовуємо як термочутливу. Тому, в міру зменшення діаметра капіляра, для мікротермометра визначальним параметром стає швидкість переміщення рідини у капілярі, описувана рівняннями Босанке і Вашберна.

3. Кількісний критерій застосування тих чи інших видів мікротермометрів із наповненням капілярів різними термочутливими рідинами з метою досягнення найшвидшого встановлення показів під час їх використання необхідно виробити у найближчому майбутньому.

## Подяка

Автори висловлюють вдячність колективу кафедри інформаційно-вимірвальних технологій Національного університету «Львівська політехніка» за надану допомогу та всемірне сприяння у підготовці статті.

## Література

- [1] S. Yatsyshyn, B. Stadnyk, Ya. Lutsyk, "Research in Nanothermometry. Part 8. Summary", *Sensors & Transducers*, vol. 144, iss. 9, p. 1–15, 2012.
- [2] P. Skoropad, B. Stadnyk, S. Yatsyshyn, H. Pol'ova, "Development of Noise Measurements, Part 7. Coriolis Mass Flowmeter and its Errors", *Sensors & Transducers*, vol. 158, iss. 11, p. 249–254, 2013.
- [3] B. Stadnyk, S. Yatsyshyn, O. Kozak, "Research in Nanothermometry. Part 2. Methodical Error Problem of Contact Thermometry", *Sensors & Transducers*, vol. 140, iss. 5, p. 8–14, 2012.
- [4] S. Yatsyshyn, B. Stadnyk, R. Samchenko, "CNT nanosensors in the tumors treatment", *Int. J. Biosen. Bioelectron.*, vol. 2, iss. 6, p. 188–189, 2017.
- [5] X. Yang, Z. Zhou, F. Zheng et al, "High sensitivity temperature sensor based on a long, suspended single-walled carbon nanotube array", *Micro & Nano letters, IET*, vol. 5, iss. 2, p. 157–161, 2010.
- [6] S.Yatsyshyn, B. Stadnyk, Ya. Lutsyk, "Research in Nanothermometry. Part 3. Characteristics of the Thermometers with liquid- and solid-phase sensitive elements", *Sensors & Transducers*, vol. 140, iss. 5, p. 15–23, 2012.
- [7] G. Khaidarov, A. Khaidarov, A. Mashek, "The physical nature of liquid surface tension", *vestnik St.Petersburg Un., ser. 4: Physics and Chemistry*, iss. 1, p. 3–8, 2011.

[8] [http://www.ppsi.ethz.ch/fmi/xsl/eqi/eqi\\_property\\_details\\_en.xml?node\\_id=1113](http://www.ppsi.ethz.ch/fmi/xsl/eqi/eqi_property_details_en.xml?node_id=1113)

[9] Powering nanotechnology devices with novel surface energy generators, *Nanowerk Nanotechn. Spotlight*, March 5, 2010.

[10] E. Washburn, *The Dynamics of Capillary Flow*, *Phys. Rev.*, vol. 17 (3), 273, 1921.

[11] H. Akima, "A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures", *Journ Ass. Comp. Mach.*, vol. 17, no. 4, p. 589–602, 1970.

## References

[1] S. Yatsyshyn, B. Stadnyk, Ya. Lutsyk, "Research in Nanothermometry. Part 8. Summary", *Sensors & Transducers*, vol. 144, iss. 9, p. 1-15, 2012.

[2] P. Skoropad, B. Stadnyk, S. Yatsyshyn, H. Pol'ova, "Development of Noise Measurements, Part 7. Coriolis Mass Flowmeter and its Errors", *Sensors & Transducers*, vol. 158, iss. 11, p. 249-254, 2013.

[3] B. Stadnyk, S. Yatsyshyn, O. Kozak, "Research in Nanothermometry. Part 2. Methodical Error Problem of Contact Thermometry", *Sensors & Transducers*, vol. 140, iss. 5, p. 8-14, 2012.

[4] S. Yatsyshyn, B. Stadnyk, R. Samchenko, "CNT nanosensors in the tumors treatment", *Int. J. Biosen. Bioelectron.*, vol. 2, iss. 6, p. 188-189, 2017.

[5] X. Yang, Z. Zhou, F. Zheng et al, "High sensitivity temperature sensor based on a long, suspended single-walled carbon nanotube array", *Micro & Nano letters, IET*, vol. 5, iss. 2, p. 157-161, 2010.

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

[7] G. Khaidarov, A. Khaidarov, A. Mashek, "The physical nature of liquid surface tension", *vestnik St.Petersburg Un., ser.4: Physics and Chemistry*, iss. 1, p. 3-8, 2011.

[8] [http://www.ppsi.ethz.ch/fmi/xsl/eqi/eqi\\_property\\_details\\_en.xml?node\\_id=1113](http://www.ppsi.ethz.ch/fmi/xsl/eqi/eqi_property_details_en.xml?node_id=1113)

[9] Powering nanotechnology devices with novel surface energy generators, *Nanowerk Nanotechn. Spotlight*, March 5, 2010.

[10] E. Washburn, *The Dynamics of Capillary Flow*, *Phys. Rev.*, vol. 17 (3), 273, 1921.

[11] H. Akima, "A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures", *Journ Ass. Comp. Mach.*, vol. 17, no. 4, p. 589–602, 1970.