

АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ ВИМІРЮВАЧА ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧНОГО ТИПУ КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДВОФАЗНОГО ПУЛЬСУЮЧОГО ПОТОКУ

ANALYTICAL MODEL OF THE MEASURER OF THERMOANEMOMETRIC TYPE OF KINEMATIC PARAMETERS OF THE BIPHASIC PULSING FLOW

*Дмитрів В. Т., д-р техн. наук, доц., Микійчук М. М., д-р техн. наук, проф.,
Дмитрів І. В., канд. техн. наук, Дмитрів Т. В., студент
Національний університет "Львівська політехніка", Україна; e-mail: Dmytriv_V@ukr.net*

*Vasyl Dmytriv, Dr. Sc., As.-Prof., Mykola Mykyuchuk, Dr. Sc., Prof.,
Ihor Dmytriv, PhD, Taras Dmytriv, student
Lviv Polytechnic National University, Ukraine; e-mail: Dmytriv_V@ukr.net*

<https://doi.org/10.23939/istcmtn2019.03>.

Анотація. Наведено структурну і функціональну схеми сенсора термоанемометричного типу для вимірювання одно- і двофазних (рідина + газ) середовищ за пульсуючого характеру потоку. На основі рівняння теплового балансу отримано рівняння для моделювання температури сприймальних елементів сенсора залежно від споживаної потужності, характеристик матеріалу елементів сенсора, їх маси і конструкційних розмірів, теплотехнічних характеристик і кінематичних параметрів вимірювального середовища. Розглянуто процес поширення теплового потоку із внутрішнім джерелом теплоти від сприймального елемента сенсора із радіусом поперечного перерізу r_E , описаний диференціальним рівнянням інтенсивності поширення температури з урахуванням теплопровідності вимірювального середовища і матеріалу сприймального елемента сенсора. Моделювання температури сприймальних елементів сенсора і розподілу температурного поля у вимірювальному середовищі виконано з урахуванням коефіцієнта тепловіддачі елементів сенсора і коефіцієнта теплопровідності середовища. Інтенсивність потоку вимірювального середовища приймали від 16,7 до 58,3 г/с, залежно від діаметра корпусу сенсора розраховували середню швидкість потоку. Коефіцієнт тепловіддачі a був у межах від 60000 до 130000 Вт/(м²·°C) за діапазону швидкостей вимірювального середовища від 2,125 до 4,0 м/с і внутрішніх діаметрів корпусу сенсора 12, 14 і 16 мм. Наведено результати моделювання зміну температури на межі температурного поля і її віддалі від елементів залежно від швидкості потоку вимірювального середовища. Вимірювальним середовищем було молоко зі швидкістю потоку у межах 2,125–4,0 м/с, внутрішній діаметр корпусу сенсора 14 мм і потужність живлення 15 Вт. Температура на межі температурного поля сприймальних елементів сенсора коливалася у межах від 29,97 град. до 28,38 град, за зміни віддалі межі від холоднішого сприймального елемента сенсора у межах 5,02–6,29 мм. Температура на межі температурних полів і віддалі межі поля від сприймальних елементів сенсора змінювалася залежно від інтенсивності потоку (швидкості) вимірювального середовища і його характеристик, віддалі між елементами, потужності живлення елементів сенсора. Обґрунтована віддалі між сприймальними елементами термоанемометричного сенсора становить 10 мм.

Ключові слова: сенсор, температурне поле, термоанемометр, тепловий баланс, критерії подібності, вимірювач, модель.

Abstract. The structural and functional diagrams of the thermoanemometric type sensor for measuring the mono- and biphasic (liquid + gas) medium by the pulsating nature of the flow are presented. The temperature distribution in the sensor environment is considered and the sensing elements are not in contact with the inner surface of the sensor body. On the basis of the heat balance equation, the equations were obtained to simulate the temperature of the sensing elements of the sensor, depending on the power consumption, the characteristics of material of the sensor elements, their mass and design dimensions, the thermal and technical characteristics and the kinematic parameters of the measuring environment. The results of temperature modeling of the sensing elements for measuring the flow of milk and water are presented. The process of heat flux propagation with an internal heat source from the sensing element of the sensor with a cross-sectional radius is considered, described by the differential equation of the intensity of the temperature propagation taking into account the thermal conductivity of the measuring medium and the material of the sensing element of the sensor. The equation for modeling the temperature at the boundary of the temperature field distribution of the sensing elements of the thermoanemometric sensor was obtained. The results of temperature modeling at the boundary of the temperature fields of sensor elements are presented. The simulation of the temperature of the sensing elements of the sensor and the distribution of the temperature field in the measuring environment is made taking into account the coefficient of heat transfer of the sensor elements and the coefficient of thermal conductivity of the medium. The results of modeling the temperature change at the boundary of the temperature field and its distance from the elements depending on the flow velocity of the measuring medium are presented.

Key words: Sensor, Temperature field, Thermoanemometer, Thermal balance, Similarity criteria, Measurer, Model.

Вступ

Використання первинних перетворювачів термоанемометричного типу для вимірювання витрат набуло великого поширення для однокомпонентних

середовищ. Принцип термоанемометричного вимірювання масового потоку середовища оснований на впливі потоку рідини (здебільшого це потік газу) на теплопередачу нагрівного елемента [1]. Однак методи термоанемометричних вимірювань удоско-

налюються у напрямку удосконалення конструкції та орієнтації у вимірвальному середовищі сенсорів, існує також проблема їх калібрування [2]. Тепловий сенсор потоку зазвичай містить терморезистивний елемент, який нагрівається електричним струмом, що забезпечує підвищення температури чутливого елемента щодо вимірвального середовища. А постійна різниця температур між сприймальним елементом і вимірвальним середовищем (потік рідини або газу) підтримується мостовою схемою ввімкнення сенсора, що забезпечує зміну потужності нагрівання залежно від масової витрати вимірвального середовища. Інший варіант роботи термоанемометра полягає у тому, що тепловий дисперсійний масовий витратомір працює із постійною потужністю нагрівання сенсора, а різниця температур змінюється залежно від масової витрати вимірваного середовища. Принципи роботи, конструювання та застосування промислових теплових масових витратомірів описано в [3].

На інтервал вимірювання масової втрати термоанемометричного вимірювача впливає конструкція датчика, його положення в потоці та характер потоку. У [4] здійснено оптимізацію положення сенсора в потоці та запропоновано конструкцію сприймального елемента. Baker R.C. і Gimson C. досліджували вплив ексцентричності розміщення елемента, конструкції та розмірів сприймального елемента [5]. Вплив характеру потоку вимірвального середовища на параметри сенсора проаналізовано в [6]. У [7] представлено новий метод вимірювання для ідентифікації типу газу в масовому тепловому витратомірі. Artur Sebula виконав аналітичний та числовий розрахунок моделі розподілу температури уздовж теплового витратоміра [8]. Широкий спектр досліджень здійснено для теплових витратомірів масової витрати газу у [9]. Тому актуальним завданням є розроблення аналітичної моделі функціонування термоанемометричного вимірювача, яка б уможливила моделювання температурних полів сенсорів вимірвальної системи.

Недоліки

Розглянемо характер транспортування багатозфазних середовищ, наприклад рідина + газ, або молоко + повітря у доїльному апараті, коли потік пульсує з частотою пульсацій, що відповідає частоті роботи пульсатора доїльного апарата, співвідношення молока і повітря змінне у процесі роботи доїльного апарата, характер наростання й зниження швидкості транспортування нестабільний. Тоді нестабільність потоку середовища одночасно створює динамічний характер зміни температури самого середовища, швидкість якого ми вимірюємо. Відомі технічні й програмні рішення не враховують як початкову температуру середовища, так і зміну температури під час вимірювання. Аналогічні

технічні рішення термоанемометрів розраховані на вимірювання однофазного середовища, рідини або газу. Тому застосування їх для двофазних потоків призводить до значних похибок вимірювання, а калібруванням неможливо враховувати широкий спектр динамічних змін параметрів потоку, зважаючи на певну невизначеність температурних параметрів і градієнта втрати тиску.

Ми розробили сенсор термоанемометричного типу, однак сприймальні елементи були розміщені безпосередньо на стінці сенсора гальванічним нанесенням [10]. Це збільшувало втрати теплової енергії, а відповідно і споживаної потужності електричної схеми термоанемометричного вимірювача.

Мета роботи

Мета досліджень – розробити аналітичну модель термоанемометричного вимірювача кінематичних параметрів двофазного пульсуючого потоку для моделювання температурних полів сенсорів, що уможливить збільшення динамічного інтервалу вимірвальних швидкостей і зменшення споживаної потужності вимірювання.

1. Аналітична модель термоанемометричного вимірювача

Для зменшення потужності споживання і сталої часу сенсора запропоновано нову конструкцію, з розміщенням сприймальних елементів на віддалі від стінок корпусу з урахуванням товщини пограничного шару середовища [11]. Функціональну схему, яка реалізує сенсор термоанемометричного типу для вимірювання параметрів двофазного пульсуючого потоку, наведено на рис. 1.

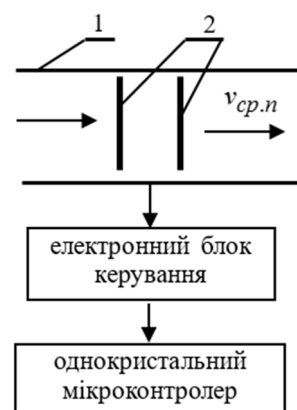


Рис. 1. Структурна схема сенсора термоанемометричного типу:
1 – корпус сенсора; 2 – сприймальні елементи

Fig. 1. Structural diagram of the sensor of thermocouple type:
1 – is the sensor's housing; 2 – are the sensitive elements

1.1. Математична модель температури сенсорів

Розглянемо розподіл температури у середовищі сенсора, враховуючи, що сприймальні елементи не контактують із внутрішньою поверхнею корпусу сенсора. Температурне поле назовні приймемо рівномірним. Відповідно кількість тепла, що виділяється від сприймальних елементів, витрачається на розігрівання елементів сенсора і на нагрівання двофазного потоку. Загальну схему розподілу температур наведено на рис. 2.

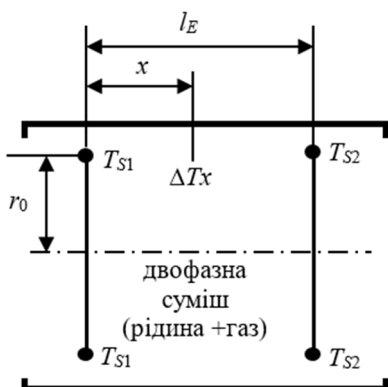


Рис. 2. Схема розподілу температур сенсора:
 T_{S1} , T_{S2} – температура першого і другого сенсора;
 ΔTx – температура на межі температурних полів;
 T_{C1} , T_{C2} – температура середовища у температурному полі сенсорів; l_E – відстань між сенсорами; r_0 – радіус розміщення сенсорів по колу

Fig. 2. The scheme of distribution of sensor temperature:
 T_{S1} , T_{S2} are the temperature of the first and the second sensors;
 ΔTx are the temperature at the boundary of the temperature fields; T_{C1} , T_{C2} are the medium temperatures of the sensors temperature field; l_E is the distance between sensors; r_0 is the radius of placement of sensors in a circle

Функціонування системи термоанемометричного вимірювача описується залежністю (1):

$$Q = \alpha S (T_E - T_C) I R_i \quad (1)$$

де Q – кількість тепла; α – коефіцієнт тепловіддачі; S – площа поверхні тепловіддачі сенсорів вимірювача, що омиваються потоком середовища; T_E , T_C – температура, відповідно, сенсора і вимірюваного середовища; I – сила струму; R_i – опір сенсора за температури T_E . В запропонованій схемі (рис. 2) є два джерела тепла від першого і другого сенсора. Запишемо рівняння теплового балансу для одного із сенсорів у такому вигляді:

$$Q_E = Q_C + Q_{PE} \quad (2)$$

де Q_E – кількість тепла, що виділяє сенсор; Q_C – кількість тепла, що поглинається потоком суміші; Q_{PE} – кількість тепла, що витрачається на розігрівання сенсора.

Кількість тепла, що поглинається потоком, до прикладу, молоко-повітряної суміші для першого сенсора (рис. 2), визначаємо залежністю:

$$Q_C = \rho_E S v (T_C - T_E) \quad (3)$$

де S – площа поверхні сприймального елемента сенсора, для поперечного перерізу у вигляді круга, та отримаємо:

$$Q_C = \rho_E \pi r_E^2 v (T_C - T_E) \quad (4)$$

де r_E – радіус поперечного перерізу сприймального елемента сенсора.

Кількість тепла, необхідного для розігрівання сенсора до температури T_{S1} , розраховуємо за:

$$Q_E = C_E m_E (T_{S1} - T_E) \quad (5)$$

де C_E – теплоємність матеріалу, з якого виготовлений сенсор; m_E – маса сенсора, ρ_E – густина матеріалу сенсора.

Процес тепловіддачі у повздовжньому напрямку циліндричного простору в першому наближенні вважаємо адіабатичним, $dQ/dx = 0$. Тоді рівняння теплового балансу (2) з урахуванням залежностей (1), (3) і (5) набуде вигляду:

$$C_E m_E (T_{S1} - T_E) = \rho_E \pi r_E^2 v (T_C - T_E) I R_i \quad (6)$$

Звідси визначаємо температуру сенсора за розігрівання його струмом I :

$$T_{S1} = T_E + \frac{C_E m_E (T_{S1} - T_E)}{\rho_E \pi r_E^2 v I R_i} \quad (7)$$

Аналогічно рівняння температури для другого сенсора набуде вигляду:

$$T_{S2} = T_E + \frac{C_E m_E (T_{S2} - T_E)}{\rho_E \pi r_E^2 v I R_i} \quad (8)$$

де R_{E1} , R_{E2} – відповідно, опір першого і другого елементів сенсора.

Рівняння (7) і (8) моделюють температуру сприймальних елементів сенсора залежно від струму напруги живлення, характеристики матеріалу і конструкційних параметрів сенсора, а також попередньої температури і коефіцієнта тепловіддачі вимірюваного середовища. Для конструювання термоанемометричного вимірювача необхідне компонування сенсорів у корпусі, що залежить від фізико-технологічних факторів процесу вимірювання.

1.2. Математична модель температурного поля сенсора

Розміщення сприймальних елементів сенсора всередині циліндричного корпусу вимірювача на деякій віддалі від внутрішньої поверхні характеризується відстанню між ними, яка залежить від потужності, що підводиться до мостової схеми, і теплотехнічних характеристик середовища та матеріалу сприймальних елементів сенсора. Відстань обґрунтовано тим, щоб температурні поля від двох елементів не впливали на температуру одного з них. Можна припустити, що існує така межа розподілу температурних полів, де температура на 10÷15 % нижча від температури холоднішого елемента сенсора.

Розглянемо процес поширення теплового потоку із внутрішнім джерелом теплоти, що рівномірно розподілене по периметру циліндра, із елементом сенсора з радіусом поперечного перерізу r_E . Інтенсивність об'ємного виділення тепла q_V можна розрахувати так:

$$q_V = q/\Delta V, \quad (9)$$

де q – кількість тепла, що виділяє сприймальний елемент сенсора унаслідок проходження електричного струму; ΔV – приріст об'єму вимірюваного середовища, у якому поширюється тепловий потік, $\Delta V = \pi \cdot x \cdot (r_0 + x)^2$; x – віддаль поширення теплового потоку від джерела – сприймального елемента сенсора. Враховуючи, що потік вимірювального середовища спрямований вздовж осі, запишемо диференціальне рівняння інтенсивності поширення температурного поля:

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{q}{\lambda \cdot \pi \cdot x \cdot (r_0 + x)^2}, \quad (10)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності вимірюваного середовища. Розв'яжемо рівняння (10)

$$\frac{dT}{dx} = -\frac{q}{\lambda \cdot \pi} \cdot \left[\frac{1}{r_0(r_0+x)} - \frac{\ln(r_0+x)}{r_0^2} + \frac{\ln x}{r_0^2} \right] + C_1. \quad (11)$$

Сталу інтегрування визначимо з граничних умов, за $x=0$, $T=T_{S1}$ для першого чутливого елемента сенсора, відповідно для другого чутливого елемента – $T=T_{S2}$. Тоді стала інтегрування C_1 становить:

$$C_1 = \frac{q}{\lambda \cdot \pi} \cdot \frac{1 + \ln r_0}{r_0^2}.$$

$$T = -\frac{q}{\lambda \cdot \pi} \cdot$$

$$\cdot \left[\frac{\ln(r_0+x)}{r_0} - \frac{1}{r_0^2} \cdot \left((r_0+x) \cdot \ln(r_0+x) - r_0 + x - x \cdot \ln \frac{x}{r_0} \right) \right] + C_2. \quad (12)$$

Сталу інтегрування C_2 визначаємо з граничних умов:

$$C_2 = T_{S1} + \frac{q}{\lambda \cdot \pi} \cdot \left(\frac{\ln r_0}{r_0} - \frac{1}{r_0^2} \cdot (r_0 \cdot \ln r_0 - r_0) \right).$$

Тоді рівняння (12) після нескладних перетворень набуває вигляду:

$$T = T_{S1} - \frac{q}{\lambda \cdot \pi \cdot r_0} \cdot$$

$$\cdot \left[\ln \frac{r_0+x}{r_0} + \ln \frac{r_0}{(r_0+x)^{(1+x/r_0)}} - \ln \left(\frac{x}{r_0} \right)^{\frac{x}{r_0}} + \frac{x}{r_0} \right] \quad (13)$$

Якщо прийняти, що віддаль між сприймальними елементами сенсора l_E , то віддаль поширення теплового потоку від другого сприймального елемента сенсора відповідно є $l_E - x$, а температура елемента відповідно T_{S2} . Оскільки відношення опорів приймальних елементів сенсорів $R_{E1}/R_{E2} = 1/4$, то для другого сприймального елемента сенсора рівняння (13) набуває вигляду:

$$T = T_{S2} - \frac{4 \cdot q}{\lambda \cdot \pi \cdot r_0} \cdot$$

$$\left[\ln \frac{r_0 + l_E - x}{r_0} + \ln \frac{r_0}{(r_0 + l_E - x)^{(1+l_E-x/r_0)}} - \right.$$

$$\left. - \ln \left(\frac{l_E-x}{r_0} \right)^{\frac{l_E-x}{r_0}} + \frac{l_E-x}{r_0} \right]. \quad (14)$$

За отриманими рівняннями (13) і (14) розраховують розподіл температурного поля від сприймальних елементів сенсора у вимірюваному середовищі.

Результати й обговорення

Для моделювання температури сприймальних елементів сенсора і розподілу температурного поля у вимірюваному середовищі необхідно знати коефіцієнт тепловіддачі елементів сенсора і коефіцієнт теплопровідності середовища. Для розрахунку цих коефіцієнтів використаємо критеріальні рівняння, в які входять критерії подібності, гідродинамічні – **Re** (Рейнольдса), теплові – **Nu** (Нусельта), **Pr** (Прандтля). Як вимірюване середовище для моделювання використовували воду, а як двофазний пульсуючий потік – молоко у доїльному апараті. Інтенсивність потоку вимірюваного середовища приймали від 16,7 до 58,3 грам/с, що залежало від діаметра корпусу сенсора.

Для визначення усередненого коефіцієнта тепловіддачі елементів сенсора, з урахуванням експериментальних даних, що описуються рівнянням Міхєєва [12], та теоретичних рішень для локальних даних [13], використали таке рівняння:

$$\text{Nu} = 0,021 \cdot \text{Re}_C^{0,8} \cdot \text{Pr}_C^{0,43} \cdot \left(\frac{\text{Pr}_C}{\text{Pr}_E} \right)^{0,25} \cdot \epsilon_l, \quad (15)$$

де ϵ_l – гідродинамічний коефіцієнт, що враховує відношення ширини елемента тепловіддачі сенсора до діаметра простору в перерізі, у якому розміщено елемент сенсора, $\epsilon_l = 1,9$ [12]; **Pr_C** – критерій Прандтля, який розраховують за параметром вимірюваного середовища; **Pr_E** – критерій Прандтля, що розраховують за параметром матеріалу вимірювального елемента сенсора [13]. Критерій Прандтля розраховуємо за:

$$\text{Pr} = \mu \cdot C_p / \lambda, \quad (16)$$

де m – динамічна в'язкість; C_p – питома теплоємність. Розрахунок коефіцієнта тепловіддачі виконано за таких допущень: теплофізичні властивості вимірюваного середовища незмінні у часі; вимірюване середовище є ньютонівським. Параметри для розрахунку критерію Прандтля наведено у таблиці, матеріал сприймальних елементів сенсора – нікель.

Коефіцієнт тепловіддачі α у межах від 60000 до 130000 Вт/(м²·°C) за діапазону швидкостей вимірюваного середовища від 2,125 до 4,0 м/с і внутрішніх діаметрів корпусу сенсора 12, 14 і 16 мм.

Результати моделювання температури сприймальних елементів сенсора наведено на рис. 3.

Важливо визначити межу температурних полів від двох сприймальних елементів сенсора, де температура однакова. Графічним методом знайдемо значення віддалі x , прирівнявши рівняння (13) і (14) між собою. Віддаль між сприймальними елементами прийняли $l_E = 10$ мм. Результати моделювання наведено на рис. 4.

Значення параметрів для розрахунку критерію Прандтля

Value of parameters for calculation of Prandtl criterion

Температура, °C	$m \cdot 10^{-6}$, Па · с	I_C , Вт/(м · °C)	I_E , Вт/(м · °C)	C_C , Дж/(кг · °C)	C_E , Дж/(кг · °C)
МОЛОКО					
30	1332,9	0,5220	90,32	3919,0	444
40	1041,4	0,5510	89,25	3931,6	
50	853,9	0,5800	88,17	3893,9	
60	707,9	0,6038	87,10	3882,0	
70	623,7	0,6148	86,03	3852,0	
80	559,8	0,6380	84,95	3852,0	
ВОДА					
30	801,5	0,6159	90,32	4174	444
40	653,3	0,6322	89,25	4174	
50	549,4	0,6461	88,17	4174	
60	469,4	0,6577	87,10	4179	
70	406,1	0,6658	86,03	4187	
80	355,1	0,6728	84,95	4195	

Примітка. Індекс C стосується вимірюваного середовища, E – матеріалу елементів сенсора.

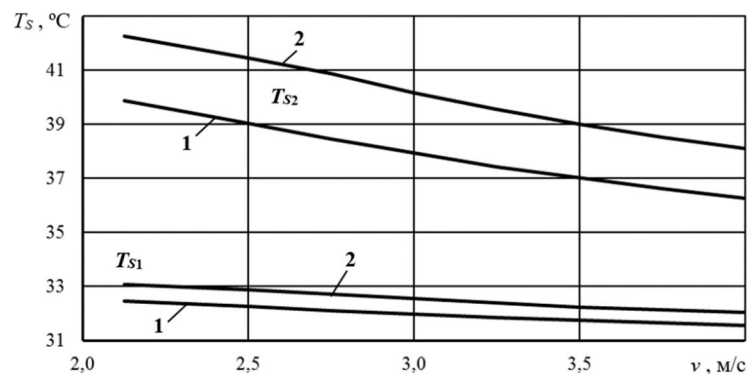


Рис. 3. Зміна температури сприймальних елементів сенсора залежно від швидкості потоку вимірюваного середовища за напруги живлення 3 В і сили струму 5 А:
1 – молоко; 2 – вода

Fig. 3. Changing the temperature of the sensitive elements of the sensor depending on the flow velocity of the measuring medium at a supply voltage 3 V and a current 5 A: 1 – is the milk; 2 – is the water

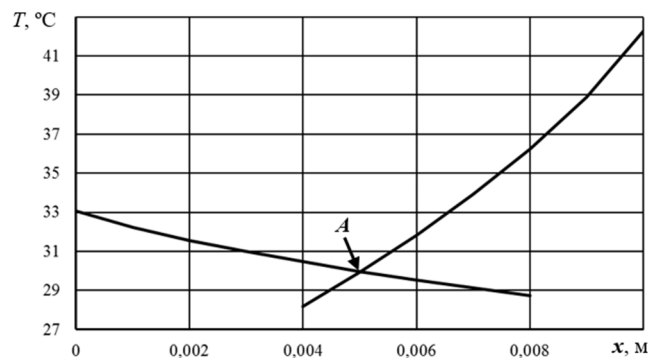


Рис. 4. Зміна температурного поля між сприймальними елементами термоанемометричного сенсора в напрямку потоку вимірювального середовища: x – віддаль від елемента; A – площина межі температурних полів

Fig. 4. Changing the temperature field between the sensitive elements of the thermoanemometric sensor at the direction of flow of the measuring medium: x – is the distance to element; A – is the plane of the boundary of the temperature fields

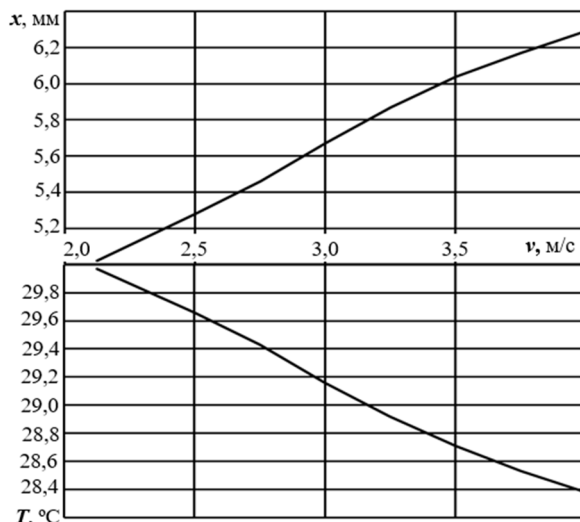


Рис. 5. Залежність температури T на межі температурних полів і її віддалі x від швидкості потоку вимірюваного середовища: x – віддалі межі температурного поля від сприймального елемента з нижчою температурою

Fig. 5. The dependence of the temperature T on the boundary of the temperature fields and its distance x from the velocity of the measuring flow: x is the distance of the boundary of the temperature field from the sensitive element of the lower temperature

Ми змоделювали зміну температури на межі температурного поля і її віддалі від елементів залежно від швидкості потоку вимірюваного середовища (рис. 5). Вимірюваним середовищем є молоко з інтенсивністю потоку в межах 16,7–58,3 грам/с, або швидкістю потоку у межах 2,1–4,0 м/с, внутрішній діаметр корпусу сенсора 14 мм і потужність живлення 15 Вт.

Температура на межі температурного поля сприймальних елементів сенсора коливається у межах від 29,97 К до 28,38 К за зміни віддалі межі від холоднішого сприймального елемента сенсора у межах 5,02–6,29 мм. У режимі реального часу межа температурного поля є динамічною; зміщення в напрямку потоку відбувається залежно від інтенсивності вимірювального середовища, а також характеру руху.

Компенсування динамічного коливання межі температурного поля можна виконати схемою вимірювання, використовуючи компенсацію зворотного зв'язку за напругою у схемі керування потужністю живлення сприймальних елементів термоанометричного сенсора. Використовується змінний струм у кілогерцовому діапазоні.

Висновки

Аналіз моделювання температури сприймальних елементів сенсора показує, що за умови вимірювання молока їхня температура є вищою, ніж за умови вимірювання води. Це пояснюється тепло-технічними характеристиками вимірюваного середовища.

Температура на межі розділу температурних полів і віддалі межі поля від сприймальних елементів сенсора змінна, залежно від швидкості потоку вимірюваного середовища, віддалі між елементами, виду вимірюваного середовища, а також потужності живлення елементів сенсора.

Для запропонованої конструкції обґрунтовано віддалі між сприймальними елементами термоанометричного сенсора, що становить 10 мм.

Подяка

Автори висловлюють глибоку вдячність колективу кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Національного університету "Львівська політехніка" за допомогу в підготовці статті.

Конфлікт інтересів

Конфлікт інтересів під час написання, підготовки та опублікування статті відсутній.

Список літератури

- [1] R. C. Baker, *Flow measurement handbook: industrial designs, operating principles, performance, and applications*. New York: Cambridge University Press, 2000.
- [2] J. E. Hardy, J. O. Hylton, T. E. McKnight, Empirical correlations for thermal flow meters covering a wide range of thermal-physical properties. In: *Nat. Conf. Stand. Labs*, 1999. [Online] [30.01.2018]. Available: http://www.iaea.org/inis/collection/NCL_CollectionStore/Public/30/048/30048008.pdf.

- [3] J. G. Olin. "Industrial Thermal Mass Flow meters, Part 1: Principles of Operation". *Measurements and Control*, vol. 193, 1999.
- [4] A. Badarlis, V. Kumar, A. Pfau, A. Kalfas. "Novel sensor geometry for liquids serving in dispersion thermal flow meters.", In: *SENSOR+TEST Conferences 2011 – SENSOR Proceedings*, pp. 78–83, 2011.
- [5] R. C. Baker, C. Gimson, "The effects of manufacturing methods on the precision of insertion and in-line thermal mass flow meters", *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 12, no. 2, pp. 113–121, 2001.
- [6] Rep. No. 2002/53, *The effect of gas properties and installation effects on thermal mass flow meters*, 2003. [Online]. Available: http://www.tuvnel.com/_x90lbn/Report_FDMS03.pdf.
- [7] K. Rupnik, J. Kutin, I. Bajsić, "A Method for Gas Identification in Thermal Dispersion Mass Flow Meters", *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, vol. 60, no. 9, pp. 607–616, 2014. [Online] Available: http://en.svjme.eu/data/upload/2014/09/08_2014_1889_Rupnik07.pdf
- [8] A. Cebula, "Experimental and numerical investigation of thermal flow meter", *Archives of thermodynamics*, vol. 36, no. 3, pp. 149–160, 2015.
- [9] M. Farzaneh-Gord, S. Parvizi, A. Arabkoohsar, L. Machado, R. Koury, "Potential use of capillary tube thermal mass flow meter to measure residential natural gas consumption", *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 22, pp. 540–550, 2015.
- [10] V. Dmytriv, I. Dmytriv, "Thermo-anemometer measuring of two-phase pulsating flows applying to the cyber-physical system of milk production", in *Proc. V Int. Sc. Cong. "Agricultural Machinery 2017"*. Year I, vol. 1/1, pp. 85–87. Varna, Bulgaria, 2017.
- [11] V. Dmytriv, I. Dmytriv, T. Dmytriv, "Research in thermo-anemometric measuring device of pulse flow of two-phase medium", in *Proc. 17th Int. Sc. Conf: Engineering for rural development*, vol. 17, May 23–25, pp. 898–904, 2018, Jelgava, Latvia: Un. *Life Sciences and Techn.*
- [12] Н. М. Беляев, *Основы теплопередачи*. Киев, Украина: Вища школа, 1989.
- [13] В. Р. Кулинченко, *Справочник по теплообменным расчетам*. Киев, Украина: Техника, 1980.
- [2] J. E. Hardy, J. O. Hylton, T. E. McKnight. "Empirical correlations for thermal flow meters covering a wide range of thermal-physical properties", In: *Nat. Conf. Stand. Labs*, 1999. [Online] [30.01.2018]. Available: <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/30/048/30048008.pdf>.
- [3] J. G. Olin. "Industrial Thermal Mass Flow meters, Part 1: Principles of Operation", *Measurements and Control*, vol. 193, 1999.
- [4] A. Badarlis, V. Kumar, A. Pfau, A. Kalfas. "Novel sensor geometry for liquids serving in dispersion thermal flow meters.", In: *SENSOR+TEST Conferences 2011 – SENSOR Proceedings*, pp. 78–83, 2011.
- [5] R. C. Baker, C. Gimson, "The effects of manufacturing methods on the precision of insertion and in-line thermal mass flow meters", *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 12, no. 2, pp. 113–121, 2001.
- [6] Rep. No. 2002/53, *The effect of gas properties and installation effects on thermal mass flow meters*, 2003. [Online]. Available: http://www.tuvnel.com/_x90lbn/Report_FDMS03.pdf.
- [7] K. Rupnik, J. Kutin, I. Bajsić. "A Method for Gas Identification in Thermal Dispersion Mass Flow Meters", *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, vol. 60, no.9, pp.607-616, 2014. [Online] Available: http://en.svjme.eu/data/upload/2014/09/08_2014_1889_Rupnik07.pdf
- [8] A. Cebula, "Experimental and numerical investigation of thermal flow meter", *Archives of thermodynamics*, vol. 36, no. 3, pp. 149–160, 2015.
- [9] M. Farzaneh-Gord, S. Parvizi, A. Arabkoohsar, L. Machado, R. Koury. "Potential use of capillary tube thermal mass flow meter to measure residential natural gas consumption", *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 22, pp. 540–550, 2015.
- [10] V. Dmytriv, I. Dmytriv, "Thermo-anemometer measuring of two-phase pulsating flows applying to the cyber-physical system of milk production", in *Proc. V Int. Sc. Cong. "Agricultural Machinery 2017"*. Year I, vol. 1/1, pp. 85–87. Varna, Bulgaria, 2017.
- [11] V. Dmytriv, I. Dmytriv, T. Dmytriv, "Research in thermo-anemometric measuring device of pulse flow of two-phase medium", in *Proc. 17th Int. Sc. Conf: Engineering for rural development*, vol. 17, May 23–25, pp. 898–904, 2018, Jelgava, Latvia: Un. *Life Sciences and Techn.*
- [12] N. Belyaev, *Heat Transfer Basics*. Kyiv, Ukraine: High school, 1989.
- [13] V. Kulinchenko, *Handbook of heat exchange calculations*. Kyiv, Ukraine: Technique, 1980.

References