

**АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ ВИМІРЮВАЧА ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧНОГО ТИПУ
КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДВОФАЗНОГО ПУЛЬСУЮЧОГО ПОТОКУ**
**ANALYTICAL MODEL OF THE MEASURER OF THERMOANEMOMETRIC TYPE OF
KINEMATIC PARAMETERS OF THE TWO-PHASE PULSATING FLOW**

*Дмитрів В. Т., д-р техн. наук, доц., Микийчук 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

Анотація

Приведена структурна і функціональна схеми сенсора термоанемометричного типу для вимірювання одно- і двофазних (рідина + газ) середовищ за пульсуючого характеру потоку. На основі рівняння теплового балансу отримані рівняння для моделювання температури сприймаючих елементів сенсора у залежності від споживаної потужності, характеристик матеріалу елементів сенсора, їх маси і конструкційних розмірів, теплотехнічних характеристик і кінематичних параметрів вимірювального середовища. Розглянуто процес розповсюдження теплового потоку з внутрішнім джерелом теплоти від сприймаючого елемента сенсора з радіусом поперечного перерізу r_E , описаний дифенціальним рівнянням інтенсивності розповсюдження температури з врахуванням теплопровідності вимірювального середовища і матеріалу сприймаючого елемента сенсора. Моделювання температури сприймаючих елементів сенсора і розподілу температурного поля у вимірювальному середовищі виконано з врахуванням коефіцієнту тепловіддачі елементів сенсора і коефіцієнту теплопровідності середовища. Інтенсивність потоку вимірювального середовища приймали від 16,7 до 58,3 грам/с, залежно від діаметру корпусу сенсора розраховували середню швидкість потоку. Коефіцієнт тепловіддачі α 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 у залежності від швидкості потоку вимірювального середовища. Вимірювальним середовищем було молоко з швидкість потоку у межах 2,125-4,0 м/с, внутрішній діаметр корпусу сенсора 14 мм і потужності живлення 15 Вт. Температура на межі температурного поля сприймаючих елементів сенсора коливається у межах від 29,97 град. до 28,38 град, за зміни віддалі межі від холоднішого сприймаючого елемента сенсора у межах 5,02-6,29 мм. Температура на межі температурних полів і віддалі межі поля від сприймальних елементів сенсора є змінною в залежності від інтенсивності потоку (швидкості) вимірювального середовища і його характеристик, віддалі між елементами, потужності живлення елементів сенсора. Обґрунтована віддалі між сприймаючими елементами термоанемометричного сенсора становить 10 мм.

Abstract

The structural and functional diagrams of the thermoanemometric type sensor for the measurement of single- and two-phase (liquid + gas) media 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 r_E 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 coefficients are calculated by the Reynolds, Nusselt, and Prandtl criteria equations. The measuring

medium in the simulation process was water, like a two-phase pulsating flow - milk in a milking machine. The intensity of the flow of the measuring medium was taken from 16,7 to 58,3 grams /s, depending on the diameter of the housing of the sensor was calculated average flow rate. The heat transfer coefficient α was in the range of 60000 to 130000 W/(m²·°C) over the range of velocities of the measuring medium from 2,125 to 4,0 m/s and the internal diameters of the sensor housing 12, 14 and 16 mm. 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. The measuring medium was milk with a flow rate in the range of 2,125 – 4,0 m/s, the inside diameter of the sensor housing 14 mm and a power of 15 W. The temperature at the boundary of the temperature field of the sensing elements of the sensor ranges from 29,97 degrees to 28,38 degrees, for changes in the distance of the boundary from the cooler sensing element of the sensor within 5,02-6,29 mm. The temperature of the elements for measuring milk is higher than for measuring water. This is explained by the thermal characteristics of the measuring environment. The temperature at the boundary of the temperature fields and the distance of the boundary of the field from the sensing elements of the sensor is variable depending on the intensity of flow (velocity) of the measuring medium, the distance between the elements, the type of measuring environment, and the power that feeds the sensor elements. The reasonable distance between the sensing elements of the thermometer is 10 mm.

Ключові слова

Сенсор, температурне поле, термоанемометр, тепловий баланс, критерії подібності, вимірювач, модель

Keywords

Sensor, temperature field, thermoanemometer, thermal balance, similarity criteria, measurer, model

1. Вступ

Використання первинних перетворювачів термоанемометричного типу при вимірюванні витрати набув широкого розповсюдження для однокомпонентних середовищ. Принцип термоанемометричного вимірювання масового потоку середовища заснований на впливі потоку рідини (в більшості випадків потік газу) на теплопередачу нагрівного елемента (Baker, R.C.) [1]. Однак, удосконалення методів термоанемометричних вимірювань йде в напрямку удосконалення конструкції та орієнтації у вимірювальному середовищі сенсорів, а також існує проблема їх калібрування (Hardy J. E. і ін.) [2]. Тепловий сенсор потоку зазвичай містить терморезистивний елемент, який нагрівається електричним струмом, що забезпечує підвищення температури чутливого елемента по відношенню до вимірювального середовища. А постійна різниця температур між сприймаючим елементом і вимірювальним середовищем (потік рідини або газу) підтримується мостовою схемою ввімкнення сенсора, що забезпечує зміну потужності нагріву в залежності від масової витрати вимірювального середовища. Інший варіант роботи термоанемометра полягає в тому, що тепловий дисперсійний масовий витратомір працює з постійною потужністю нагріву сенсора, а різниця температур змінюється в залежності масовою витратою вимірювального середовища. Принципи роботи, конструювання та застосування промислових теплових масових витратомірів описані Olin J.G. [3].

На інтервал вимірювання масової втрати термоанемометричного вимірювача впливає конструкція датчика, його положення в потоці та характер потоку. Badarlis A. et al. провели оптимізацію положення сенсора в потоці і запропонували конструкцію сприймаючого елемента [4]. Baker R.C. і Gimson C. досліджували вплив ексцентричності розміщення елемента, конструкції та розмірів сприймаючого елемента [5]. Вплив характеру потоку вимірювального середовища на параметри сенсора проаналізовано Gibson J. [6]. Klemen Rupnik і ін. представлено новий метод вимірювання для ідентифікації типу газу в масовому тепловому витратомірі [7]. Artur Sebula провів аналітичний та чисельний розрахунок моделі розподілу температури уздовж теплового витратоміра [8]. Широкий спектр досліджень проводився для теплових витратомірів масової витрати газу Farzaneh-Gord M. і ін. [9]. Тому актуальною задачею є розроблення аналітичної моделі функціонування термоанемометричного вимірювача, яка б уможливила моделювання температурних полів сенсорів вимірювальної системи.

2. Недоліки

Розглянемо характер транспортування багатофазних середовищ, наприклад рідина + газ, або молоко + повітря у доїльному апараті, коли потік є пульсуючим з частотою пульсацій що відповідає частоті роботи пульсатора доїльного апарата, співвідношення молоко і повітря є змінним у процесі доїльного апарата, характер наростання й спадання швидкості транспортування нестабільний. Тоді нестабільність потоку середовища одночасно створює динамічний характер зміни температури самого середовища, якого і вимірюємо швидкість. Існуючі технічні й програмні рішення не враховують як початкову температуру середовища, так і зміну температури у процесі 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, враховуючи при цьому де-яку невизначеність параметрів температурних і градієнта втрати тиску.

Нами розроблений сенсор термоанемометричного типу, однак сприймаючі елементи були розміщені безпосередньо на стінці сенсора шляхом гальванічного нанесення [10]. Це збільшувало втрати теплової енергії, відповідно і споживаної потужності електричної схеми термоанемометричного вимірювача.

3. Мета роботи

Метою досліджень є розроблення аналітичної моделі термоанемометричного вимірювача кінематичних параметрів двофазного пульсуючого потоку для моделювання температурних полів сенсорів, що уможливить збільшення динамічного інтервалу вимірювальних швидкостей і зменшення споживаної потужності вимірювання.

4. Аналітична модель термоанемометричного вимірювача

Для зменшення потужності споживання і постійної часу сенсора, запропонована нова конструкція, яка розміщує сприймаючі елементи на віддалі від стінок корпусу з врахуванням товщини пограничного шару середовища [11]. Функціональна схема, яка реалізує сенсор термоанемометричного типу для вимірювання параметрів двофазного пульсуючого потоку наведена на рис. 1.

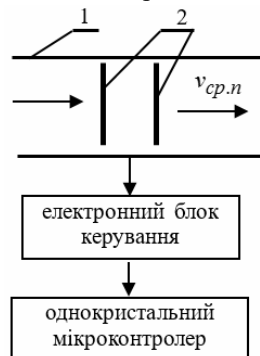


Рис. 1. Структурна схема сенсора термоанемометричного типу:
 1- корпус сенсора; 2 – сприймальні елементи
 Fig. 1. Structural diagram of the sensor of thermoanemometric type:
 1 – sensor corps; 2 - receptive elements

4.1. Математична модель температури сенсорів

Розглянемо розподіл температури у середовищі сенсора, враховуючи що сприймальні елементи не мають контакту з внутрішньою поверхнею корпусу сенсора. Розподіл температурного поля на зовні приймемо рівним нулю. Відповідно кількість теплоти, що виділиться від сприймальних елементів буде витрачатись на розігрів елементів сенсора і на нагрів середовища (нагрів двофазного потоку). Загальну схему розподілу теплоти через температури наведено на рис. 2.

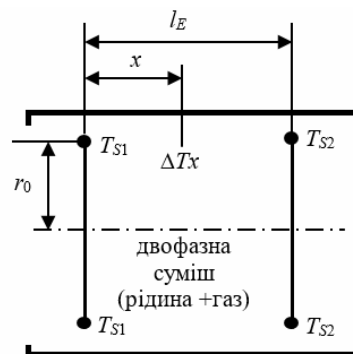


Рис. 2. Схема розподілу температури сенсора:
 T_{S1} , T_{S2} – температура першого і другого сенсора; ΔT_x – температура на межі температурних полів; T_{C1} , T_{C2} – температура середовища у температурному полі сенсорів; l_E – віддаль між сенсорами; r_0 – радіус розміщення по колу сенсорів

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

Функціонування системи термоанемометричного вимірювача описується залежністю (1)

$$Q = \alpha \cdot S \cdot (T_E - T_C) = I^2 \cdot R_t, \quad (1)$$

де Q – кількість теплоти; α – коефіцієнт тепловіддачі; S – площа поверхні тепловіддачі сенсорів вимірювача, що омиваються потоком середовища; T_E, T_C – температура, відповідно сенсора і вимірювального середовища; I – сила струму; R_t – опір сенсора при температурі T_E .

Для запропонованої схеми (рис. 2) присутні два джерела теплоти від першого і другого сенсора. Запишемо рівняння теплового балансу для одного із сенсорів у наступному вигляді :

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

де Q_E – кількість теплоти, що виділяється сенсором; Q_C – кількість теплоти, що поглинається потоком суміші; Q_{PE} – кількість теплоти, що затрачається на розігрів сенсора.

Кількість теплоти, що поглинається потоком суміші, наприклад молоко-повітряною сумішшю, для першого сенсора (рис. 2), визначимо залежністю (3)

$$Q_C = \alpha \cdot S \cdot (T_{S1} - T_{C1}), \quad (3)$$

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

$$S = 4 \cdot \pi^2 \cdot r_0 \cdot r_E, \quad (4)$$

де r_E – радіус поперечного перерізу сприймального елемента сенсора.

Кількість теплоти, що необхідно для розігріву сенсора до температури T_{S1} розраховуємо за залежністю (5)

$$Q_{PE} = m_E \cdot C_E \cdot (T_{S1} - T_{C1}), \quad (5)$$

де C_E – теплоємність матеріалу, з якого виготовлений сенсор; m_E – маса сенсора, $m_E = 2 \cdot \pi^2 \cdot r_0 \cdot r_E^2 \cdot \rho_E$; ρ_E – густина матеріалу сенсора.

Процес тепловіддачі у повздовжньому напрямку циліндричного простору в першому наближенні будемо вважати адіабатичним, $dQ/dx = 0$.

Тоді рівняння теплового балансу (2) з врахуванням залежностей (1), (3) і (5) набуде вигляду рівняння (6)

$$I^2 \cdot R_{E1} = \alpha \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot r_0 \cdot r_E \cdot (T_{S1} - T_{C1}) + 2 \cdot \pi^2 \cdot r_0 \cdot r_E^2 \cdot \rho_E \cdot C_E \cdot (T_{S1} - T_{C1}). \quad (6)$$

З рівняння (6) визначимо температуру сенсора за розігріву його силою струму I :

$$T_{S1} = \frac{I^2 \cdot R_{E1}}{\alpha \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot r_0 \cdot r_E + 2 \cdot \pi^2 \cdot r_0 \cdot r_E^2 \cdot \rho_E \cdot C_E} + T_{C1}, \quad (7)$$

і аналогічно, рівняння температури для другого сенсора буде мати вигляд (8)

$$T_{S2} = \frac{I^2 \cdot R_{E2}}{\alpha \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot r_0 \cdot r_E + 2 \cdot \pi^2 \cdot r_0 \cdot r_E^2 \cdot \rho_E \cdot C_E} + T_{C12}, \quad (8)$$

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

Рівняння (7) і (8) моделюють температуру сприймальних елементів сенсора в залежності від сили струму напруги живлення, характеристики матеріалу і конструкційних параметрів сенсора, а також попередньої температури і коефіцієнта тепловіддачі вимірювального середовища.

Для конструювання термоанемометричного вимірювача необхідно мати компоновку сенсорів у корпусі, яка залежить від фізико-технологічних факторів процесу вимірювання.

4.2. 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 обґрунтовується таким чином, щоб температурні поля від двох елементів не впливали на температуру одного з них. Можна припустити, що існує така межа розподілу температурних полів, де температура є на 10 ÷ 15 % нижча від температури холоднішого елемента сенсора.

Розглянемо процес розповсюдження теплового потоку з внутрішнім джерелом теплоти, що рівномірно розподілене по периметру циліндра з елементом сенсора з радіусом поперечного перерізу r_E .

Інтенсивність об'ємного виділення теплоти q_V можна розрахувати за залежністю

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

де q – кількість теплоти, що виділять сприймальним елементом сенсора від проходження електричного струму; ΔV – приріст об'єму простору вимірювального середовища, у якому розповсюджується тепловий потік, $\Delta V = \pi \cdot x \cdot (r_0 + x)^2$; x – віддаль розповсюдження теплового потоку від джерела – сприймального елементу сенсора.

Враховуючи, що потік вимірювального середовища є вздовж осі, тоді диференціальне рівняння інтенсивності розповсюдження температури запишемо наступним чином:

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

де λ - коефіцієнт теплопровідності вимірювального середовища.

Розв'яжемо рівняння (10)

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

Постійну інтегрування визначимо з граничних умов, за $x = 0$, $T = T_{S1}$ для першого сприймаючого елементу сенсора, відповідно для другого сприймаючого елементу - $T = T_{S2}$. Тоді постійна інтегрування C_1 буде становити:

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

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

Постійну інтегрування C_2 визначимо з граничних умов, як для постійної інтегрування C_2 :

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

Тоді рівняння (12) після нескладних перетворень набуде вигляду :

$$T = T_{S1} - \frac{q}{\lambda \cdot \pi \cdot r_0} \cdot \left[\ln \frac{r_0 + x}{r_0} + \ln \frac{r_0}{(r_0 + x)^{(1+x/r_0)}} - \ln \left(\frac{x}{r_0} \right)^{\frac{x}{r_0}} + \frac{x}{r_0} \right]. \quad (13)$$

Якщо прийняти, що віддаль між сприймаючими елементами сенсора l_E , то віддаль розповсюдження теплового потоку від другого сприймаючого елементу сенсора відповідно буде $l_E - x$, а температура елементу відповідно T_{S2} . Враховуючи, що відношення опорів сприймаючих елементів сенсорів є $R_{E1}/R_{E2} = 1/4$, тоді для другого сприймаючого елементу сенсора рівняння (13) набуде вигляду :

$$T = T_{S2} - \frac{4 \cdot q}{\lambda \cdot \pi \cdot r_0} \cdot \left[\ln \frac{r_0 + l_E - x}{r_0} + \ln \frac{r_0}{(r_0 + l_E - x)^{(1+(l_E-x)/r_0)}} - \ln \left(\frac{l_E - x}{r_0} \right)^{\frac{l_E - x}{r_0}} + \frac{l_E - x}{r_0} \right]. \quad (14)$$

Отримані рівняння (13) і (14) розраховують розподіл температурного поля від сприймаючих елементів сенсора у вимірювальному середовищі.

5. Результати і обговорення

Для моделювання температури сприймаючих елементів сенсора і розподілу температурного поля у вимірювальному середовищі, необхідно знати коефіцієнт тепловіддачі елементів сенсора і коефіцієнт теплопровідності середовища. Для розрахунку даних коефіцієнтів використаємо критеріальні рівняння, в основу яких входять критерії подібності, гідродинамічної **Re** (Рейнольдса), теплові – **Nu** (Нусельта), **Pr** (Прандтля).

Вимірювальне середовище в процесі моделювання використовували воду і як двофазний пульсуючий потік – молоко у доїльному апараті. Інтенсивність потоку вимірювального середовища приймали від 16,7 до 58,3 грам/с, що залежно від діаметру корпусу сенсора буде різною швидкість потоку.

Для визначення усередненого коефіцієнту тепловіддачі елементів сенсора, з врахуванням експериментальних даних, що описуються рівнянням Міхеєва [12] та теоретичних рішень для локальних даних [13], використали наступне рівняння

$$Nu = 0,021 \cdot Re_C^{0,8} \cdot Pr_C^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_C}{Pr_E} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_l, \quad (15)$$

де ε_l – гідродинамічний коефіцієнт, враховує відношення ширини тепловіддачі елемента сенсора до діаметру простору в перерізі, у якому розміщено елемент сенсора, $\varepsilon_l = 1,9$ [12]; Pr_C – критерій Прандтля, що розраховується за параметром вимірювального середовища; Pr_E – критерій Прандтля, що розраховується за параметром матеріалу вимірювального елемента сенсора [13].

Критерій Прандтля розраховуємо за залежністю

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

де μ – динамічна в'язкість; C_p – питома теплоємність.

Розрахунок коефіцієнта тепловіддачі проводили за наступних допущень : теплофізичні властивості вимірювального середовища постійні у часі; вимірювальне середовище є Ньютонівським. Параметри для розрахунку критерію Прандтля наведено у табл. 1, матеріал сприймаючих елементів сенсора – нікель.

Таблиця 1. Значення параметрів для розрахунку критерію Прандтля
Table 1. Value of parameters for calculation of Prandtl criterion

Температура, °C	$\mu \cdot 10^{-6}$, Па · с	λ_C , Вт/(м · °C)	λ_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: у табл. 1 індекс C – відноситься до вимірювального середовища, E – до матеріалу елементів сенсора

Коефіцієнт тепловіддачі α є в 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.

Результати моделювання температури сприймальних елементів сенсора наведено на рис. 3

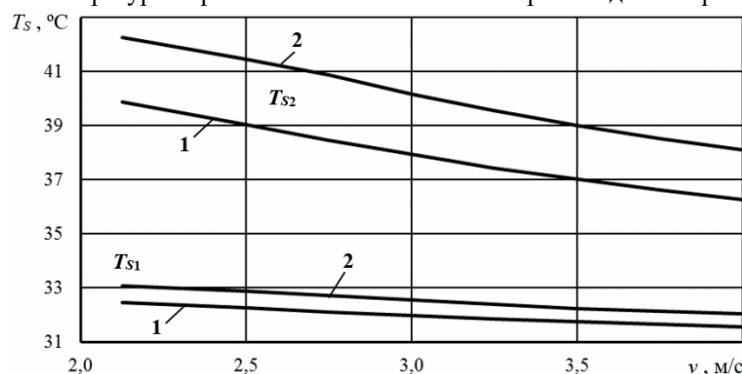


Рис. 3. Зміна температури сприймальних елементів сенсора в залежності від швидкості потоку вимірювального середовища за напруги живлення 3 В і сили струму 5 А:

1 – молоко; 2 – вода

Fig. 3. Changing the temperature of the sensing elements of the sensor depending on the flow velocity of the measuring medium at a supply voltage of 3 V and a current of 5 A:

1 – milk; 2 – water

Важливо визначити межу температурних полів від двох сприймаючих елементів сенсора, де температура буде однаковою. Графічним методом визначимо 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.

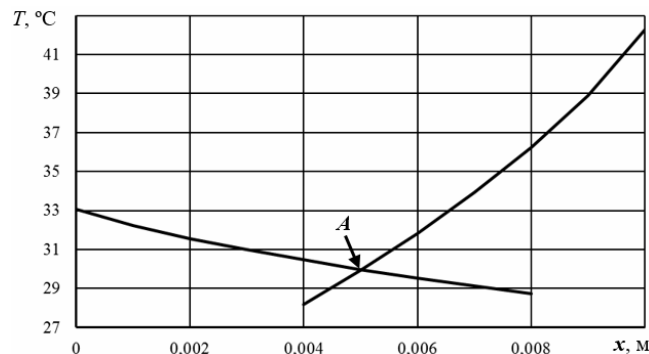


Рис. 4. Зміна температурного поля між сприймаючими елемента термоанемометричного сенсора в напрямку потоку вимірювального середовища:

x – віддаль від елемента; A – площина межі температурних полів

Fig. 4. Changing the temperature field between the sensing elements of the thermoanemometric sensor in the direction of flow of the measuring medium:

x – distance from the element; A – the plane of the boundary of the temperature fields

Нами промодельовано зміну температури на межі температурного поля і її віддаль від елементів у залежності від швидкості потоку вимірювального середовища (рис. 5). Вимірювальним середовищем було молоко з інтенсивністю потоку у межах 16,7 – 58,3 грам/с, або швидкість потоку у межах 2,125 – 4,0 м/с, внутрішній діаметр корпусу сенсора 14 мм і потужності живлення 15 Вт.

Температура на межі температурного поля сприймаючих елементів сенсора коливається у межах від 29,97 град. до 28,38 град, за зміни віддалі межі від холоднішого сприймаючого елемента сенсора у межах 5,02-6,29 мм.

В режимі реального часу межа температурного поля буде динамічною, зміщення в напрямку потоку відбуватиметься у залежності від кількості і інтенсивності вимірювального середовища, а також характеру руху.

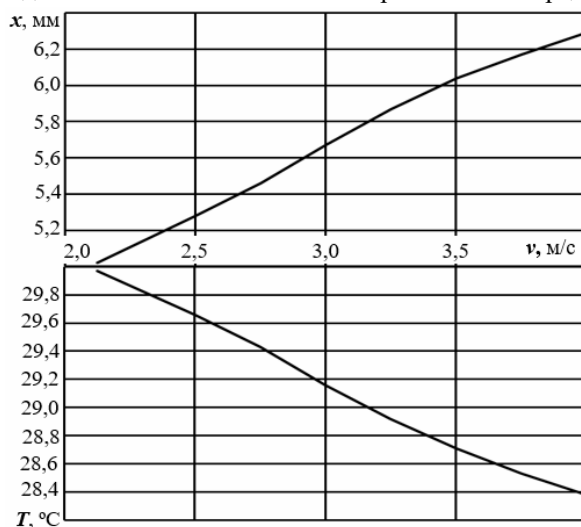


Рис. 5. Залежність температури T на межі температурних полів і її віддалі x від швидкості потоку вимірювального середовища:

x – віддаль межі температурного поля від сприймаючого 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 flow velocity of the measuring medium:

x – the distance of the boundary of the temperature field from the sensing element with a lower temperature

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

6. Висновки

Аналіз моделювання температури сприймаючих елементів сенсора показує, що температура елементів за вимірювання молока буде вищою ніж за вимірювання води. Це пояснюється теплотехнічними характеристиками вимірювального середовища.

Температура на межі температурних полів і віддалі межі поля від сприймальних елементів сенсора є змінною в залежності від інтенсивності потоку (швидкості) вимірювального середовища, віддалі між елементами, виду вимірювального середовища, а також потужності, якою живляться елементи сенсора.

Обґрунтована віддалі між сприймаючими елементами термоанемометричного сенсора становить 10 мм.

Література

- [1] Baker R. C. Flow measurement handbook: industrial designs, operating principles, performance, and applications. Cambridge University Press, New York, 2000. 524 p.
- [2] Hardy J. E., Hylton J. O., McKnight T. E. Empirical correlations for thermal flowmeters covering a wide range of thermal-physical properties. In: National Conference of Standards Labs (NCSL), 1999. [online] [30.01.2018]. Available at: <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/30/048/30048008.pdf>.
- [3] Olin J. G. Industrial Thermal Mass Flowmeters, Part 1: Principles of Operation. Measurements and Control, vol. 193, 1999. 16 p. [online] [30.01.2018]. Available at: <http://www.sierrainstruments.com/prnews/mnc.pdf>.
- [4] Badarlis A., Kumar V., Pfau A., Kalfas A. Novel sensor geometry for liquids serving in dispersion thermal flow meters. In: SENSOR+TEST Conferences 2011 – SENSOR Proceedings, 2011, pp. 78-83.
- [5] Baker R.C., Gimson C. The effects of manufacturing methods on the precision of insertion and in-line thermal mass flowmeters. Flow Measurement and Instrumentation, 12, no. 2, 2001, pp.113-121.
- [6] The effect of gas properties and installation effects on thermal mass flowmeters. Report no. 2002/53, 2003. [online] [30.01.2018]. Available at: http://www.tuvnel.com/x90lbm/Report_FDMS03.pdf.
- [7] Klemen Rupnik, Jože Kutin, Ivan Bajsić. A Method for Gas Identification in Thermal Dispersion Mass Flow Meters. Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, 60/9, 2014, pp. 607-616. [online] [30.01.2018]. Available at: http://en.sv-jme.eu/data/upload/2014/09/08_2014_1889_Rupnik07.pdf
- [8] Artur Cebula. Experimental and numerical investigation of thermal flow meter. Archives of thermodynamics, 36/3, 2015, pp. 149-160. [online] [30.01.2018]. Available at: http://at.czasopisma.pan.pl/images/data/at/wydania/No_3_2015/aoter-2015-0027.pdf
- [9] Farzaneh-Gord M., Parvizi S., Arabkoohsar A., Machado L., Koury R. Potential use of capillary tube thermal mass flow meter to measure residential natural gas consumption. J. Nat. Gas Sci. Eng. 22, 2015, pp. 540-550
- [10] Dmytriv V., Dmytriv I. Thermo-anemometer measuring of two-phase pulsating flows applying to the cyber-physical system of milk production. V International Scientific Congress "Agricultural Machinery 2017". Varna, BULGARIA, Year I, Vol. 1/1, 2017, pp. 85-87. [online] [30.01.2018]. Available at: <http://www.agrimachinery.net/sbornik/1-2017.pdf>.
- [11] Dmytriv Vasyli, Dmytriv Ihor, Dmytriv Taras. Research in thermo-anemometric measuring device of pulse flow of two-phase medium. 17th International Scientific Conference: ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT. Jelgava, Latvia, University of Life Sciences and Technologies Faculty of Engineering. Proceedings, Vol. 17, May 23-25, 2018. Pp. 898-904. DOI:10.22616/ERDev2018.17.N200
- [12] Беляев Н.М. Основы теплопередачи. К.: Вища школа, 1989. 243 с.
- [13] Кулинченко В.Р. Справочник по теплообменным расчетам. К.: Техника, 1980. 165 с.

References

- [1] Baker R. C. Flow measurement handbook: industrial designs, operating principles, performance, and applications. Cambridge University Press, New York, 2000. 524 p.
- [2] Hardy J. E., Hylton J. O., McKnight T. E. Empirical correlations for thermal flowmeters covering a wide range of thermal-physical properties. In: National Conference of Standards Labs (NCSL), 1999. [online] [30.01.2018]. Available at: <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/30/048/30048008.pdf>.
- [3] Olin J. G. Industrial Thermal Mass Flowmeters, Part 1: Principles of Operation. Measurements and Control, vol. 193, 1999. 16 p. [online] [30.01.2018]. Available at: <http://www.sierrainstruments.com/prnews/mnc.pdf>.
- [4] Badarlis A., Kumar V., Pfau A., Kalfas A. Novel sensor geometry for liquids serving in dispersion thermal flow meters. In: SENSOR+TEST Conferences 2011 – SENSOR Proceedings, 2011, pp. 78-83.
- [5] Baker R.C., Gimson C. The effects of manufacturing methods on the precision of insertion and in-line thermal mass flowmeters. Flow Measurement and Instrumentation, 12, no. 2, 2001, pp.113-121.
- [6] The effect of gas properties and installation effects on thermal mass flowmeters. Report no. 2002/53, 2003. [online] [30.01.2018]. Available at: http://www.tuvnel.com/x90lbm/Report_FDMS03.pdf.
- [7] Klemen Rupnik, Jože Kutin, Ivan Bajsić. A Method for Gas Identification in Thermal Dispersion Mass Flow Meters. Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, 60/9, 2014, pp. 607-616. [online] [30.01.2018]. Available at: http://en.sv-jme.eu/data/upload/2014/09/08_2014_1889_Rupnik07.pdf
- [8] Artur Cebula. Experimental and numerical investigation of thermal flow meter. Archives of thermodynamics, 36/3, 2015, pp. 149-160. [online] [30.01.2018]. Available at: http://at.czasopisma.pan.pl/images/data/at/wydania/No_3_2015/aoter-2015-0027.pdf
- [9] Farzaneh-Gord M., Parvizi S., Arabkoohsar A., Machado L., Koury R. Potential use of capillary tube thermal mass flow meter to measure residential natural gas consumption. J. Nat. Gas Sci. Eng. 22, 2015, pp. 540-550
- [10] Dmytriv V., Dmytriv I. Thermo-anemometer measuring of two-phase pulsating flows applying to the cyber-physical system of milk production. V International Scientific Congress "Agricultural Machinery 2017". Varna, BULGARIA, Year I, Vol. 1/1, 2017, pp. 85-87. [online] [30.01.2018]. Available at: <http://www.agrimachinery.net/sbornik/1-2017.pdf>.
- [11] Dmytriv Vasyli, Dmytriv Ihor, Dmytriv Taras. Research in thermo-anemometric measuring device of pulse flow of two-phase medium. 17th International Scientific Conference: ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT. Jelgava, Latvia, University of Life Sciences and Technologies Faculty of Engineering. Proceedings, Vol. 17, May 23-25, 2018. Pp. 898-904. DOI:10.22616/ERDev2018.17.N200
- [12] Belyaev N.M. Basics of teпоpodachi. K. : High school, 1989. 243 с.
- [13] Kulinchenko V.R. Directory of heat exchange calculations. K. : Technology, 1980. 165 с.

Дані про авторів

Дмитрів Василь Тарасович
Доктор технічних наук, доцент
Професор кафедри «Механіка та автоматизація машинобудування»
Національний університет «Львівська політехніка»
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013
E-mail: Dmytriv_V@ukr.net
Контактний тел.: +38 050 37 24 275
Кількість статей у загальнодержавних базах даних – 195
Кількість статей у міжнародних базах даних – 25
Номер ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9361-6418>

Vasyl Dmytriv
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor
Department of Mechanics and Automation of Mechanical Engineering
Lviv Polytechnic National University
Bandera str., 12, Lviv, Ukraine, 79013
E-mail: Dmytriv_V@ukr.net
Contact tel.: +38 050 37 24 275
The number of articles in national databases – 195
The number of articles in international databases – 25
Number ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9361-6418>

Микийчук Микола Миколайович
Доктор технічних наук, професор
Кафедра «Інформаційно-вимірювальні технології»
Національний університет «Львівська політехніка»
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013
E-mail:
Контактний тел.: +38 067
Кількість статей у загальнодержавних базах даних –
Кількість статей у міжнародних базах даних –
Номер ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0591-6304>

Mykola Mykyuchuk
Doctor of Technical Sciences, Professor
Department of Information Measurement Technologies
Lviv Polytechnic National University
Bandera str., 12, Lviv, Ukraine, 79013
E-mail:
Contact tel.: +38 067
The number of articles in national databases –
The number of articles in international databases –
Number ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0591-6304>

Дмитрів Ігор Васильович
Кандидат технічних наук, доцент кафедри
Кафедра «Експлуатації та ремонту автомобільної техніки»
Національний університет «Львівська політехніка»
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013
E-mail: Dmytriv_Ihor@ukr.net
Контактний тел.: +38 098 41 45 927
Кількість статей у загальнодержавних базах даних – 48
Кількість статей у міжнародних базах даних – 13
Номер ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5107-7273>

Ihor Dmytriv
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Department of Automobile Technology Operation and Repair
Lviv Polytechnic National University
Bandera str., 12, Lviv, Ukraine, 79013
E-mail: Dmytriv_Ihor@ukr.net
Contact tel.: +38 098 41 45 927
The number of articles in national databases – 48
The number of articles in international databases – 13
Number ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5107-7273>

Дмитрів Тарас Васильович
студент
Кафедра «Інформаційно-вимірювальні технології»
Національний університет «Львівська політехніка»
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013
E-mail:
Контактний тел.:
Кількість статей у загальнодержавних базах даних – 2
Кількість статей у міжнародних базах даних – 1
Номер ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4102-3685>

Taras Dmytriv
Student
Department of Information Measurement Technologies
Lviv Polytechnic National University
Bandera str., 12, Lviv, Ukraine, 79013
E-mail:
Contact tel.:
The number of articles in national databases – 2
The number of articles in international databases – 1
Number ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4102-3685>