

УДК 637.125.65:681.32

ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧНИЙ ВИМІРЮВАЧ ПУЛЬСУЮЧИХ ПОТОКІВ ДВОФАЗНИХ СЕРЕДОВИЩ

*В. Дмитрів, к.т.н., І. Дмитрів, асистент, І. Максимів.
Львівський національний аграрний університет*

Ключові слова: тепловий вимірювач, пульсуючий потік, двофазне середовище, температура, доїльний апарат.

Розглянуто схему та особливості функціонування термоанемометричного вимірювача двофазного потоку на прикладі транспортування молока з включеннями повітря в процесі роботи доїльного апарата. Наведена математична модель на основі рівняння теплового балансу, що дає змогу моделювати температури сприймальних елементів датчика та їх взаємне розміщення в потоці вимірюваного середовища.

Постановка проблеми. Використання первинних перетворювачів термоанемометричного типу для вимірювання витрати набуло широкого розповсюдження для однокомпонентних середовищ. Однак удосконалення методів термоанемометричних вимірювань відбувається в напрямі вдосконалення конструкції біметалічних термоелементів [1; 2].

Якщо проаналізувати характер транспортування багатофазних середовищ, наприклад молоко+повітря у доїльному апараті, такий рух є пульсуючим з частотою пульсацій, що відповідає частоті роботи пульсатора доїльного апарата, співвідношення молока і повітря є змінним у процесі доїння, і характер наростання й спадання швидкості транспортування нестабільний.

Режим транспортування молока доїльним апаратом є адекватним режиму молоковіддачі корови. Тому вимірювання потоку молока в доїльному апараті повинно відповідати інформативно реальному фізіологічному процесу молоковіддачі корови, що має забезпечувати адекватну реакцію з боку доїльного апарата.

Для реалізації цієї задачі необхідно мати вимірювач пульсуючих потоків двофазних середовищ, який би не спотворював інформацію про характер молоковіддачі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналізуючи конструкції теплових витратомірів [3-5] для вимірювання потоку середовищ з частотно-часовими характеристиками, підвищення точності вимірювання

забезпечують удосконаленням системи обробки інформації, використовуючи мікропроцесорні елементи.

Відомі вимірювачі проточного типу, що не спотворюють потік середовища та не вимагають чіткої орієнтації у просторі. До них можна зарахувати вимірювачі на принципі ядерно-магнітного резонансу [6], ультразвукові й теплові витратоміри [7].

Однак розроблені витратоміри є складні за схемотехнікою, розроблені для конкретних середовищ, які суттєво різняться за фізико-хімічними і динамічними характеристиками від молоко-повітряної суміші, що транспортується доїльним апаратом. До недоліків слід віднести залежність характеристик вимірювання від температури середовища.

Найбільш придатним для вимірювання пульсуючих потоків багатофазних середовищ є розроблений тепловий вимірювач, який реалізує принцип термоанемометра [8].

Постановка завдання. Завдяки дослідження – моделювати взаємне розміщення елементів термоанемометра залежно від теплових і кінематичних характеристик вимірюваного середовища.

Виклад основного матеріалу. За основу конструкції термоанемометра взяли розроблений тепловий вимірювач кількості молока [8], змінивши матеріал корпусу та конструкцію сприймальних елементів та їх взаємне розміщення відносно корпусу.

За основу математичної моделі можна прийняти модель проточного термоанемометричного вимірювача інтенсивності молоковіддачі [9].

Для уточнення математичної моделі термоанемометра врахуємо ту особливість розміщення сприймальних елементів відносно корпусу вимірювача, що відсутній їх безпосередній контакт.

Термоанемометр для вимірювання потоку (рис.1), який реалізує даний метод, складається з прямої ділянки проводу, всередині якого розміщені сприймальні елементи датчика. Для реалізації вимірювача кількості потоку середовища найбільш доцільним є використання мостової схеми вимірювання зміни напруги та перетворення її в дискретний цифровий сигнал. Сприймальні елементи працюють у режимі заданого розбалансу напруг мостової схеми. Вимірюється розбаланс напруги, що виникає в результаті відбору тепла, і змінюється опір елементів через зміну швидкості руху потоку.

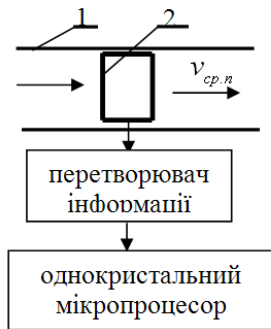


Рис. 1. Схема вимірювача потоку двофазного середовища (молоко+повітря) в доїльному апараті: 1- корпус датчика, розміщений в розрізі молочного шланга; 2 – сприймальні елементи датчика.

Змодуємо процес тепловиділення сприймальними елементами залежно від швидкості проходження молока повз них. На рис. 2 наведено схему розподілу теплового потоку.

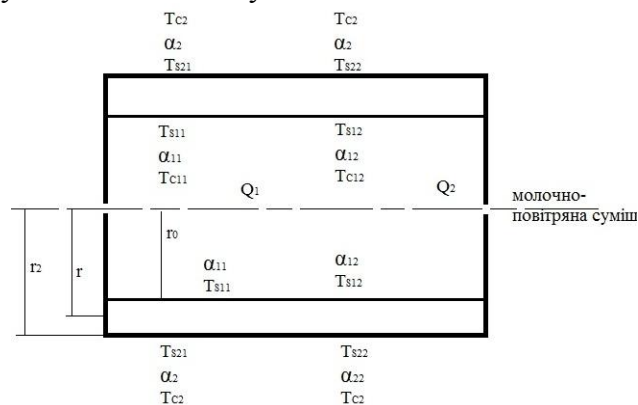


Рис. 2. Схема розподілу температур первинного перетворювача.

Присутні два джерела виділення теплоти Q_1 і Q_2 , від розірваного і цілого кілець відповідно. У результаті руху суміші присутній конвективний теплообмін. На зовнішній межі циліндра присутня стаціонарна теплопровідність. Рівняння теплового балансу сприймального елемента запишеться в такому вигляді [9]:

$$Q_K = Q_C + Q_{CT} + Q_K, \quad (1)$$

де Q_K – кількість теплоти, що виділяється сприймальним елементом; Q_C – кількість теплоти, що забирається потоком суміші; Q_{CT} – кількість теплоти, що виділяється назовні і в корпус; Q_K – кількість теплоти, що затрачається на розігрів кілець.

Кількість теплоти, що виділяється на стінці циліндра, визначимо виходячи з наступних умов: температура на внутрішній поверхні стінки

циліндра дорівнює T_{S_1} , на зовнішній поверхні стінки циліндра рівна $-T_{S_2}$.
Тоді кількість теплоти визначимо таким чином:

$$Q_1 = \frac{\lambda(T_{S_1} - T_{S_2})}{N_{n1}}, \quad (2)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності; N_{n1} – приведена товщина стінки.

Визначимо приведену товщину стінки з наступних умов:
 $n = r; n_1 = r_0; n_2 = r_2; S(n) = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l$. Тоді

$$N_{n1}^n = \int \frac{dr}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot l} = \frac{l}{2 \cdot \pi \cdot l} \ln \frac{r}{r_0}; N_{n2}^n = \frac{l}{2 \cdot \pi \cdot l} \ln \frac{r_2}{r_0}. \quad (3)$$

Підставивши значення параметрів (2) у рівняння (1) одержимо

$$Q_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot l \cdot \lambda \cdot (T_{S_1} - T_{S_2})}{\ln \frac{r_2}{r_0}}. \quad (4)$$

Кількість теплоти, віднесена до одиниці довжини циліндра:

$$q_1 = \frac{Q_1}{l} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot (T_{S_1} - T_{S_2})}{\ln \frac{r_2}{r_0}}. \quad (5)$$

Кількість теплоти, що конвективно відбирається на зовнішній поверхні корпусу вимірювача, становитиме

$$Q_2 = \alpha_2 \cdot S_2 \cdot (T_{S_2} - T_{C_2}), \quad (6)$$

де α_2 – коефіцієнт тепловіддачі повітря; S_2 – площа контакту зовнішньої поверхні з повітрям, $S_2 = 2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot l$; r_2 – зовнішній радіус корпусу вимірювача.

Кількість теплоти, що виділяється на зовнішній поверхні циліндричного корпусу, віднесена до одиниці довжини цього ж циліндричного корпусу, становитиме

$$q_1 = \frac{Q_2}{l} = 2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot \alpha_2 \cdot (T_{S_2} - T_{C_2}). \quad (7)$$

Визначимо температуру T_{S_2} , скориставшись рівняннями (6) і (7) і граничними умовами II роду на поверхні S_1 . Одержимо систему рівнянь, яка після нескладних перетворень буде також:

$$\begin{cases} T_{S2} = \frac{q_1}{2\pi \cdot r_2 \cdot \alpha_2} + T_{C2}; \\ q_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda}{\ln \frac{r_2}{r_0}} \cdot T_{S1} - \frac{q_1 \cdot \lambda}{\ln \frac{r_2}{r_0} \cdot r_2 \cdot \alpha_2} - \frac{T \cdot 2 \cdot \pi \cdot \lambda}{\ln \frac{r_2}{r_0}}; \\ q_1 = \frac{Q_{CT}}{2 \cdot \pi \cdot r_0}; \end{cases} \quad (5)$$

З (8) одержимо таке рівняння теплового потоку через стінку:

$$Q_{CT} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda}{\ln \left(\frac{r_2}{r_0} \right)} \cdot (T_{S1} - T_{C2}) \cdot \left(\frac{l}{2 \cdot \pi \cdot r_0} + \frac{\lambda}{\ln \left(\frac{r_2}{r_0} \right) \cdot r_2 \cdot \alpha_2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_0} \right)^{-1}; \quad (9)$$

Кількість теплоти, що відводиться молоком у процесі переміщення повз сприймальні елементи

$$Q_C = \alpha_1 \cdot S_1 \cdot (T_{S1} - T_{C1}), \quad (10)$$

де α_1 – площа поверхні сприймального елемента, що взаємодіє з молоком;

S_1 – коефіцієнт тепловіддачі рідини.

$$S_2 = 2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot l_k, \quad (11)$$

де l_k – ширина сприймального елемента первинного перетворювача.

Кількість теплоти, що відводиться молоком, віднесена до одиниці довжини циліндричного корпусу запишеться так:

$$q_{1k} = \frac{Q_C}{l_k} = \alpha_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot (T_{S1} - T_{C1}). \quad (12)$$

Кількість теплоти, що необхідна для нагріву сприймального елемента первинного перетворювача до температури T_{S1}

$$Q_k = m \cdot C_k \cdot (T_{S1} - T_{C1}), \quad (13)$$

де C_k – теплоємність матеріалу сприймального елемента; m – маса сприймального елемента, $m = 2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot l_k \cdot \Delta h_k \cdot \rho_k$ б; l_k – ширина сприймального елемента; Δh_k – товщина сприймального елемента; ρ_k – густина матеріалу сприймального елемента.

Процес тепловіддачі у поздовжньому напрямі циліндра в першому наближенні можна вважати адіабатичним, тобто $dQ/dx = 0$.

Тоді рівняння теплового балансу набуде вигляду

$$I^2 R = \alpha_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot l_k \cdot (T_{S1} - T_{C1}) + 2 \cdot \pi \cdot r_1 \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda}{\ln \frac{r_2}{r_0}} \cdot (T_{S1} - T_{C1}) \times$$

$$\times \left(1 + \frac{\lambda}{r_2 \alpha_2 \ln \frac{r_2}{r_0}} \right)^{-1} + m \cdot C_k \cdot (T_{S1} - T_{C1}). \quad (14)$$

З рівняння (7) визначимо температуру сприймального елемента первинного перетворювача за розігріву його силою струму I :

$$T_{S1} = \left[I^2 R + \alpha_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot l_k \cdot T_{C1} + \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot \lambda \cdot r_0}{\ln \frac{r_2}{r_0}} \cdot T_{C1} \cdot \left(1 + \frac{\lambda}{r_2 \alpha_2 \ln \frac{r_2}{r_0}} \right)^{-1} + m \cdot C_k T_{S1} \right] \times$$

$$\times \left[\alpha_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot l_k + \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot \lambda \cdot r_0}{\ln \frac{r_2}{r_0}} \cdot \left(1 + \frac{\lambda}{r_2 \alpha_2 \ln \frac{r_2}{r_0}} \right)^{-1} + m \cdot C_m \right]$$

де T_{S1} – температура розігріву сприймального елемента (кільця), град.; T_{C1} – температура молока, град.; T_{C2} – температура навколишнього середовища, град.; I – сила струму живлення сприймальних елементів, А; R – опір сприймальних елементів, Ом; r_0 – внутрішній радіус корпусу перетворювача, м; r_2 – зовнішній радіус корпусу перетворювача, м; λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу корпусу перетворювача, Вт/(м·град.); α_1 – коефіцієнт тепловіддачі молока, Вт/(м²·град.); α_2 – коефіцієнт тепловіддачі повітря, Вт/(м²·град.).

Визначення температури кільця і розподілу температурного поля в потоці вимагає наявності значень коефіцієнтів тепловіддачі α_1 , α_2 . Для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі використаємо критеріальні рівняння, в основу яких входять критерії гідродинамічної подібності Re (критерій Рейнольдса), теплової подібності: Nu (критерій Нусельта), Pe (критерій Пекле), Gr (критерій Грацгоффа) та Pr (критерій Прандтля) [9].

Розміщення сприймальних елементів всередині циліндричного корпусу первинного перетворювача 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 корпусу. Відстань обґрунтовується

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

Розглянемо процес розповсюдження теплового потоку з внутрішнім джерелом теплоти, що рівномірно розподілена по периметру циліндра з шириною не більше ніж 0,2 мм. Для цього визначимо інтенсивність об'ємного виділення теплоти

$$q_v = \frac{q}{\Delta V}, \quad (16)$$

де q_v – інтенсивність об'ємного виділення теплоти, Вт/м³; q – кількість теплоти, що виділяється елементом за рахунок проходження електричного струму, $q = I^2 \cdot R$, Вт; ΔV – приріст об'єму, в якому розповсюджується

тепловий потік, $\Delta V = \left(\frac{\pi \cdot x^2}{2} \right) \cdot (2 \cdot \pi(r_0 + x))$, м³; $\frac{\pi \cdot x^2}{2}$ – площа поперечного

перерізу на відстані X від джерела теплоти; $2 \cdot \pi(r_0 + x)$ – довжина кола на відстані X від джерела теплоти.

Відома температура елемента (джерела теплоти), температура буде змінюватися тільки вздовж осі X . Тоді диференціальне рівняння в розглядуваному випадку запишеться [9]:

$$\frac{d^2 T}{dX^2} + \frac{q}{\lambda \cdot \pi^2 \cdot X^2 \cdot (r_0 + X)} = 0. \quad (17)$$

Граничні умови при $X=0$ маємо $T = T_{s1}$, T_{s2} (температура суцільного і розрізаного кільця відповідно, з рівняння (15)).

Після інтегрування рівняння (17) одержимо

$$T = \frac{q \cdot X^2}{2\lambda \cdot \pi^2 \cdot r_0} - \frac{q \cdot X^2}{\lambda \cdot \pi^2 \cdot r_0^2} \ln\left(\frac{r_0}{X} + 1\right) - \frac{q}{\lambda \cdot \pi^2 \cdot r_0 \ln(r_0 + X) + C_1 X + C_2}. \quad (18)$$

Сталі інтегрування визначаємо з таких граничних умов: при $X=0, T=T_{s1}$ для суцільного кільця і $T=T_{s2}$ для розрізаного кільця. Температуру кілець визначаємо з рівняння (15). Підставивши початкові умови в рівняння (18), одержимо:

$$\begin{aligned} & \text{- для першого сприймального елемента} \quad C_2 = T_{s1} + \frac{q \cdot \ln \cdot r_0}{\lambda \cdot \pi^2 \cdot r_0}; \\ & \text{- для другого сприймального елемента} \quad C_2 = T_{s2} + \frac{4 \cdot q \cdot \ln \cdot r_0}{\lambda \cdot \pi^2 \cdot r_0}. \end{aligned}$$

Стала інтегрування C_1 рівняння (10) наближається до нуля, а тому можна прийняти що $C_1=0$.

Рівняння (18) для першого сприймального елемента

$$T = T_{S1} + \frac{q}{\lambda \cdot \pi^2 \cdot r_0} \cdot \ln\left(\frac{r_0}{r_0 + X}\right) - \frac{q \cdot X}{\lambda \cdot \pi^2 \cdot r_0} \left(\frac{X}{2} + \frac{1}{r_0} \cdot \ln\left(\frac{r_0}{X} + 1\right)\right), \quad (19)$$

- для другого сприймального елемента

$$T = T_{S1} + \frac{4 \cdot q}{\lambda \cdot \pi \cdot r_0} \cdot \ln\left(\frac{r_0}{r_0 + X}\right) - \frac{4 \cdot q \cdot X}{\lambda \cdot \pi \cdot r_0} \left(\frac{X}{2} + \frac{1}{r_0} \cdot \ln\left(\frac{r_0}{X} + 1\right)\right). \quad (20)$$

Результати моделювання наведено на рис. 3.

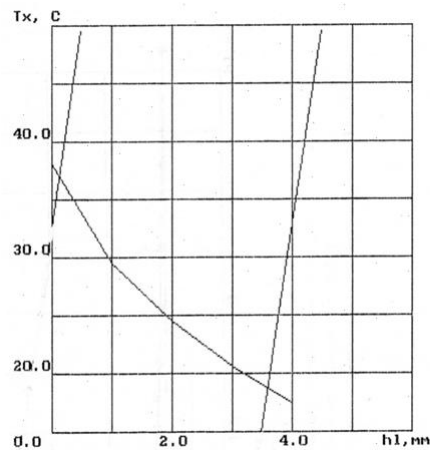


Рис.3. Залежність температури в площині перетину температурних полів кільць від відстані між ними.

Висновки. За напруги живлення 3,0 В й інтенсивності молоковіддачі $2,0 \div 1,0$ л/хв температура в площині розподілу теплових полів сприймальних елементів змінюватиметься від 37°C до 20°C при зміні відстані між кільцями від 0,3 мм до 3,3 мм.

За критичних умов охолодження (вважати, що температурні процеси проходять адіабатично) і напруги живлення 0,75 В (у режимі слідкування) оптимальна відстань між сприймальними елементами становити 10.5 мм.

Бібліографічний список

1. Романченко А. Ф. Расширение функциональных возможностей термоанемометрических датчиков нестационарного энергетического состояния [Электронный ресурс] /А. Ф. Романченко, А. Н. Кудрин // Исследовано в России: – 2001. – С. 579-586. – Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/artikles/2001/050.pdf>.
2. Перспективы термоанемометрических методов измерения расхода газа или жидкости [Электронный ресурс] /М. А. Ураксеев, А.Ф. Романченко,

Д. Р. Абдрашитова, С. А. Шилов // Исследовано в России. – 2001. – С. 587-593. – Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/artikles/2001/051.pdf>.

3. Пат. США 5218866. Способ и устройство для измерения скорости потока среды // Реферативный журнал “Изобретения стран мира”. – 1995. – № 3.

4. Пат. Японии 6054252. Тепловой датчик расхода воздуха с импульсным управлением // Реферативный журнал “Изобретения стран мира”. – 1997. – № 14.

5. Пат. Франции 2728071. Массовый расходомер с нитью накала // Реферативный журнал “Изобретения стран мира”. – 1997. – № 20.

6. Жерновой А. И. Ядерно-магнитные расходомеры / Жерновой А. И. – Л. : Машиностроение, 1985. – 135 с.

7. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества / Кремлевский П. П. – Л. : Машиностроение, 1989. – 702 с.

8. А.с. 1783303 СССР, МКИ G01F1/68. Тепловой измеритель количества молока / В. М. Сиротюк, В. Ю. Воробкевич, В. Т. Дмытрив [и др.]. – № 4872042-10 ; заявл. 12.07.90 ; Опубл. 23.12.92, Бюл. № 47.

9. Дмитрів В.Т. Математична модель проточного термоанемометричного вимірювача інтенсивності молоковіддачі / В. Т. Дмитрів // Вісник Львівського державного аграрного університету : агроінженерні дослідження. – 1997. – № 1. – С. 49-58.

Dmytriv V., Dmytriv I., Maksymiv I.. Hot-film measuring pulsating flow of two-phase media.

The scheme and the peculiarities of hot-wire two-phase flow meter for example, transport of milk with inclusions of air during operation of the milking machine. The above mathematical model based on the heat balance equation, allows to model perceiving temperature sensor elements and their relative position in the flow of the medium

Keywords: heat meter, pulse flow, two-phase medium, temperature, milking machines.

Дмытрив В., Дмытрив И., Максимив И. Термоанемометрический измеритель пульсирующих потоков двухфазных сред.

Рассмотрена схема и особенности функционирования термоанемометрического измерителя двухфазного потока на примере транспортировки молока с включениями воздуха в процессе работы

доильного аппарата. Приведенная математическая модель на основе уравнения теплового баланса, позволяет моделировать температуры воспринимающей элементов датчика и их взаимное расположение в потоке измеряемой среды

Ключевые слова: тепловой измеритель, пульсирующий поток, двухфазная среда, температура, доильный аппарат.