

УДК 681.5.03

ЗДОРЕНКО В.Г.<sup>1</sup>, СЕБКО К.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Київський національний університет технологій та дизайну

<sup>2</sup>Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОАНЕМОМЕТРА НА ОСНОВІ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛОВОГО ПОТОКУ МИКРОХВИЛЬОВОЇ КАМЕРИ

**Мета.** Метою статті є дослідження раціонального режиму роботи термоанемометра за динамічними характеристиками та похибками вимірювань, під час реалізації процесу сушіння горіхової сировини в мікрохвильовій камері.

**Методика.** Використано методику дослідження інформативних параметрів теплового потоку, для визначення раціонального режиму роботи термоанемометра та скорочення часу теплової обробки горіхової сировини.

**Результати.** Надано теоретичне обґрунтування та алгоритм визначення динамічних характеристик термоанемометра при зовнішньому синусоїдальному впливі температури теплового потоку, наведено алгоритми визначення миттєвих значень прирощень температури чутливого елемента термоанемометра в процесі сушіння горіхової сировини.

**Наукова новизна.** Полягає у тому, що знайшли подальший розвиток теоретичні положення роботи термоанемометра у напрямку досліджень характеристик теплового перехідного процесу обробки горіхової сировини, все це надає змогу щодо визначення діапазонів зміння сигналів теплового пристрою, які відповідають межам зміння інформативних характеристик рухомого теплового потоку, надає змогу здійснювати вибір вимірювальної апаратури, встановити раціональні за похибками і чутливостями режими роботи термоанемометрів та автоматизованих пристроїв, які їх використовують.

**Практична значимість.** Запропоновані алгоритми визначення інформативних параметрів теплового потоку під час дослідження перехідного процесу передачі тепла від рухомого потоку повітря до чутливого елемента перетворювача, знайдені результати похибок вимірювань швидкості  $V$  рухомого теплового потоку надають змогу для розрахунків, конструювання та створення вимірювальних автоматизованих пристроїв, які використовують термоанемометри, у харчовій та переробній промисловості, приладобудуванні та хімічному машинобудуванні.

**Ключові слова:** горіхова сировина, мікрохвильова камера, динамічні характеристики, тепловий потік, інформативні параметри, швидкість потоку, температура чутливого елемента, стала часу, стаціонарне та нестаціонарне рішення, похибки непрямих вимірювань.

**Вступ.** Однією з основних проблем харчової промисловості України у сучасних ринкових умовах є збільшення обсягів виробництва з постійними вимогами підвищення якості продукції, що випускається. Вирішення цього завдання можливе як за рахунок вдосконалення та оптимізації існуючих технологічних процесів, так і за допомогою широкого впровадження нових методів виробництва та контролю харчової продукції. Стабільний розвиток харчової промисловості безпосередньо залежить від якості кінцевого продукту [1]. На теперішній час в таких галузях вітчизняної промисловості як харчова і переробна — широко застосовуються мікрохвильові технології [1-3]. При цьому, мікрохвильові технології охоплюють такі важливі промислові процеси як сушіння і пастеризація продовольчої сировини та харчових продуктів, теплову обробку продовольчої сировини та ін. Найважливішими для виготовлення кондитерських виробів є продукти рослинного походження, такі як арахіс, мигдаль, волоські горіхи, кеш'ю та інша горіхова сировина [1]. Основними способами обробки горіхової сировини є високотемпературна сушка (до 160 °C) та обсмажування. У зв'язку з ро-

зширенням асортименту кондитерських виробництв підвищуються вимоги до якості готової продукції, що нерозривно пов'язано з удосконаленням технології виробництва як безпосередньо кондитерських виробів, так і основних інгредієнтів, що входять до складу виробів. При цьому, операції сушіння і обсмажування дозволяють підвищити поживну цінність і скоротити втрати у продукті цінних поживних речовин і вітамінів в процесі обробки [1]. Слід визначити, що для підвищення якості теплової обробки горіхової сировини, важливе значення мають методи та засоби вимірювань швидкості потоку повітряного теплоносія та температури, тобто параметрів оптимізації робочих режимів мікрохвильової камери. У свою чергу, температура та швидкість теплового потоку пов'язані з теплопровідністю, температуропровідністю, діелектричною проникністю та іншими характеристиками сировини, що оброблюється [2, 3]. Слід визначити, що вказані характеристики державними службами віднесено до нормативних та базових показників технологічних процесів обробки харчової сировини. При цьому, технологічний процес сушіння горіхової сировини включає до себе операції пов'язані з вимірюванням та регулюванням двох основних параметрів – вологості та температури, ця задача вирішується за допомогою застосовування спеціальних вимірювальних пристроїв [2, 3]. Під час обробки експериментальних даних необхідно враховувати кількість енергії, яка може бути перетворена в залежності від матеріалу (який підлягає обробці) в теплову, тобто в корисний тепловий потік, який залежить від КПД камери та магнетрона [2-10]. Таким чином, дослідження ефективних методів вимірювання інформативних характеристик теплового потоку, а також визначення раціональних режимів роботи вимірювальних теплових пристроїв та скорочення часу теплової обробки горіхової сировини є важливою науково-практичною проблемою. Слід визначити, що підвищення продуктивності відповідного обладнання може бути досягнуто шляхом вдосконалення метрологічного забезпечення, а також за рахунок підвищення швидкості обробки харчової сировини та автоматизації процесу контролю показників нормативних документів, які встановлюються на конкретну продукцію.

**Постановка завдання.** Метою статті є дослідження раціонального режиму роботи термоанемометра за динамічними характеристиками та похибками вимірювань, під час реалізації процесу сушіння горіхової сировини в мікрохвильовій камері.

Для досягнення мети, була зроблені наступна постановка конкретних завдань:

1. Надати теоретичне обґрунтування та алгоритм визначення динамічних характеристик термоанемометра при зовнішній синусоїдальній зміні температури теплового потоку.
2. Навести алгоритми визначення миттєвих значень прирощень температури  $\Delta t_n$  чутливого елемента (нитки термоанемометра), при синусоїдальному змінненні за часом прирощенні температури теплового потоку.
3. На основі загальної теорії похибок, визначити систематичні похибки непрямих вимірювань швидкості теплового потоку  $\delta V/V$ .

**Результати дослідження.** На (рис.1.), з урахуванням результатів робіт [2-11], наведено схему включення термоанемометра, яка включає до себе пристрій для лінеаризації характеристик теплового потоку. Змінний опір  $R_3$  передбачено для регулювання струму  $I_1$ . Для компенсації температурної похибки застосовують опір  $R_d$ . Зразкові апаратурні засоби, які складаються з двох опорів  $R_1$  та  $R_2$ , є необхідними для виконання умов рівноваги моста. В живильну діагональ моста вмикаємо компенсуючий пристрій  $R_k$ , який знаходиться в тих же температурних умовах, що і перетворювач  $R_n$ , але не обдувається тепловим потоком, при

цьому, компенсаційний перетворювач розташований в теплопровідній трубці з діаметром  $d$ . За допомогою вольтметра  $B$ , визначають падіння напруги на опорі  $R_k$ . Гальванометр  $\Gamma$  застосовують у якості нуль-індикатора, який передбачено для реєстрації рівноваги моста. Компенсуючий пристрій являє собою порцелянову трубку всередині якої знаходиться платиновий дріт [3]. Далі приймають умову, що температура теплового потоку  $\Delta\theta_\theta$  змінюється за періодичним законом (синусоїдально за часом).

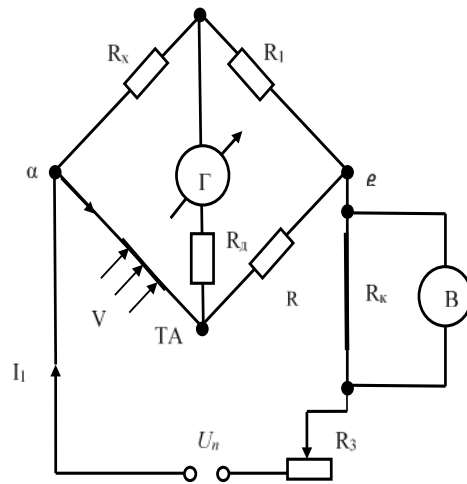


Рис.1. Схема включення термоанемометра для вимірювання швидкості  $V$  та температури  $t$  теплового потоку

В цьому випадку диференціальне рівняння для визначення температури чутливого елемента термоанемометра (нитки, яка знаходиться на шляху рухомого теплового потоку), має наступний вигляд:

$$\tau_n \Delta\theta_n' + \Delta\theta_n = \Delta\theta_{me} \sin(\omega_\theta t - \varphi_\theta) \quad (1)$$

де  $\Delta\theta_{me}$  – амплітудне значення приросту температури теплового потоку;  $\omega_\theta$  – циклічна частота змінення температури  $\Delta\theta_\theta$ ;  $\varphi_\theta$  – фазовий кут зсуву, поміж припошеннями робочої температури магнетрону та температури теплового потоку  $\Delta\theta_m$  і  $\Delta\theta_\theta$ .

Сталу часу  $\tau_n$ , яку знаходять за формулою [2]:

$$\tau_n = \frac{m_n c_n}{G_{Tnn}} \quad (2)$$

де  $G_{Tnn}$  – теплова провідність матеріалу нитки;  $m_n$  – маса нитки;  $c_n$  – питома теплоємність матеріалу нитки.

Далі знаходимо розв'язок рівняння (1) у вигляді двох частин. Стаціонарна, загальна частина розв'язку  $\Delta\theta_\theta^*$ , має наступний вигляд:

$$\Delta\theta_\theta^* = \Delta\theta_{me} e^{j\omega_\theta t} e^{-j\varphi_\theta} \quad (3)$$

Застосувавши символічний метод операцій з комплексними числами [12], запишемо диференціальне рівняння (1) у вигляді:

$$\tau_n \frac{d(\Delta\theta_{me} e^{j\omega_\theta t})}{dt} + \Delta\theta_{me} e^{j\omega_\theta t} = \Delta\theta_{me} e^{j\omega_\theta t} e^{-j\varphi_\theta} \quad (4)$$

де  $\Delta\theta_{m\epsilon}$  – амплітудне значення приросту температури чутливого елементу термоанометра.

Знайшовши похідну в (4), маємо:

$$j\omega_{\epsilon}\tau_n e^{j\omega_{\epsilon}t} \Delta\theta_{mn} + \Delta\theta_{mn} e^{-j\omega_{\epsilon}t} = \Delta\theta_{m\epsilon} e^{j\omega_{\epsilon}t} e^{-j\varphi_{\epsilon}} \quad (5)$$

Скоротивши в співвідношенні (5) обидві його частини на  $e^{j\omega_{\epsilon}t}$ , перепишемо (5) у вигляді:

$$j\omega_{\epsilon}\tau_n \Delta\theta_{mn} + \Delta\theta_{mn} = \Delta\theta_{m\epsilon} e^{-j\varphi_{\epsilon}} \quad (6)$$

Амплітудне значення приросту температури нитки на підставі (6), можна визначити зі співвідношення:

$$\Delta\theta_{mn} = \frac{\Delta\theta_{m\epsilon}}{1 + j\omega_{\epsilon}\tau_n} \quad (7)$$

Виходячи з формули (7), отримаємо модуль приросту  $\Delta\theta_{mn}$ :

$$|\Delta\theta_{mn}| = \frac{\Delta\theta_{m\epsilon}}{|1 + j\omega_{\epsilon}\tau_n|} = \frac{\Delta\theta_{m\epsilon}}{\sqrt{1 + \omega_{\epsilon}^2 \tau_n^2}} \quad (8)$$

Для визначення фазового кута зсуву  $\varphi_n$ , поміж прирощеннями температур  $\Delta\theta_{\epsilon}$  і  $\Delta\theta_n$ , необхідно чисельник та знаменник (7) помножити на комплексно-спряжену величину  $|1 - j\omega_{\epsilon}\tau_n|$ , звідси:

$$\Delta\theta_{mn} = \frac{\Delta\theta_{m\epsilon}}{1 + \omega_{\epsilon}^2 \tau_n^2} (1 - j\omega_{\epsilon}\tau_n) \quad (9)$$

Далі фазовий кут зсуву  $\varphi_n$  визначають з виразу:

$$\varphi_n = \arctg(-\omega_{\epsilon}\tau_n). \quad (10)$$

де знак «-» характеризує відставання кута  $\varphi_n$  порівняно з кутом  $\varphi_{\epsilon}$ .

З урахуванням (9) стаціонарний розв'язок диференціального рівняння (1), набуває вигляду:

$$\Delta\theta_n^* = \frac{\Delta\theta_{m\epsilon}}{\sqrt{1 + \omega_{\epsilon}^2 \tau_n^2}} \sin(\omega_{\epsilon}t - \varphi_{\epsilon} - \varphi_n). \quad (11)$$

Для знаходження частинного нестационарного рішення рівняння (1), запишемо вираз (1) у наступному вигляді:

$$\tau_n \Delta\theta_n' + \Delta\theta_n = \Delta\theta_{\epsilon}. \quad (12)$$

де знаком «штрих» позначено похідну  $\Delta\theta_{\epsilon}$  за часом  $t$ .

При цьому повний розв'язок рівняння (11), запишемо у вигляді:

$$\Delta\theta_n = \Delta\theta^* + \Delta\theta^{**}. \quad (13)$$

де  $\Delta\theta^*$  і  $\Delta\theta^{**}$  - загальні (стаціонарні) та частинні (нестационарні) рішення рівняння (1). При цьому, частинні рішення рівняння (1), знаходять при умові дорівнювання нулю правої частини (1), тобто:

$$\tau_n \Delta\theta_n' + \Delta\theta_n = 0. \quad (14)$$

Далі необхідно скласти характеристичне рівняння, у такому випадку:

$$\tau_n K + 1 = 0, \quad (15)$$

при цьому:

$$\Delta \theta_n' = K. \quad (16)$$

Звідси випливає, що

$$K = -\frac{1}{\tau_n}. \quad (17)$$

Таким чином, частинне рішення запишемо у вигляді експоненти:

$$\Delta \theta_n^{**} = A e^{-\frac{t}{\tau_n}}. \quad (18)$$

З урахуванням (11) і (18), повне рішення рівняння (1), запишемо у вигляді:

$$\Delta \theta_n = \Delta \theta^* + \Delta \theta^{**} = \frac{\Delta \theta_{ms}}{\sqrt{1 + \omega_n^2 \tau_n^2}} \sin(\omega_n t - \varphi_s - \varphi_n) + A e^{-t/\tau_n}. \quad (19)$$

Використовуючи початкові умови, які полягають у тому, що при  $t = 0$  приріст температури чутливого елемента термоанемометра  $\Delta \theta_n = 0$ , одержимо на підставі (19) співвідношення для визначення узагальненого коефіцієнта  $C_1$ , при цьому:

$$0 \approx \Delta \theta_n^* + \Delta \theta_n^{**} = \frac{\Delta \theta_{ms}}{\sqrt{1 + \omega_n^2 \tau_n^2}} \sin(\varphi_s + \varphi_n) + C_1, \quad (20)$$

звідси:

$$C_1 = -\frac{\Delta \theta_{ms}}{\sqrt{1 + \omega_n^2 \tau_n^2}} \sin(\varphi_s + \varphi_n). \quad (21)$$

Отже, з урахуванням (19)-(21), знайдемо вираз для миттєвих значень прирощення  $\Delta \theta_n$  температури нитки термоанемометра при синусоїдальному змінненні за часом прирощення температури теплового потоку. У такому випадку маємо:

$$\Delta \theta_n = \frac{\Delta \theta_{ms}}{\sqrt{1 + \omega_n^2 \tau_n^2}} \sin[\omega_n t - (\varphi_s + \varphi_n)] + \frac{\Delta \theta_{ms}}{\sqrt{1 + \omega_n^2 \tau_n^2}} \sin(\varphi_s + \varphi_n) e^{-t/\tau_n}, \quad (22)$$

або, спростивши (22):

$$\Delta \theta_n = \frac{\Delta \theta_{ms}}{\sqrt{1 + \omega_n^2 \tau_n^2}} [\sin[\omega_n t - (\varphi_s + \varphi_n)] + e^{-t/\tau_n} \sin(\varphi_s + \varphi_n)]. \quad (23)$$

Далі визначимо температуру, нитки термоанемометра у відповідності з загальним нестационарним рівнянням теплового балансу [3-12]. Нехтуючи складовими в рівнянні теплового балансу перетворювача: пов'язаними з: потоком потужності, що йде від тіла, (потік обумовлений переносом тепла через теплопровідність самого тіла), з потоком потужності, що віддається тілом (це потік, який пов'язано з теплопровідністю середовища навколо тіла), з потоком потужності що йде від тіла до середовища, який пов'язано з конвекцією середовища (що оточує тіло), з потоком потужності, що уноситься від тіла через випромінювання у вигляді електромагнітних хвиль [3-12], маємо нестационарне рівняння для нитки, яку розташовано на шляху теплового потоку, у вигляді:

$$P_n \approx mc \frac{d\theta}{dt}, \quad (24)$$

де  $mc$  – потік потужності, який визначає теплоємність тіла;  $d\theta/dt$  – похідна температури за часом.

Звідси визначимо температуру нитки:

$$\theta = \int_{t_1}^{t_2} \frac{P_n}{mc} dt, \quad (25)$$

де  $t_1$  і  $t_2$  - початковий і кінцевий час нагрівання нитки.

Вважаючи величини  $P_n$ ,  $m$  і  $c$  постійними та незалежними від температури і часу, одержимо вираз:

$$\theta = \frac{P_n}{mc} (t_2 - t_1). \quad (26)$$

При цьому, температура  $\theta$  лінійно залежить від часу  $t$ , отже задавшись часом нагрівання  $\Delta t$ , маємо:

$$\Delta t = t_2 - t_1. \quad (27)$$

Далі прийнявши  $t_1 \approx 0$ , знайдемо за формулою (25) при відомих  $P_n$ ,  $m$  і  $c$  температуру нитки термоанемометра. Оскільки нитка має невеликий діаметр  $d_n$ , в межах  $0,2 \leq d_n \leq 1,2$  мм і електричний струм прогріває її за всією довжиною  $l_n$ , вона досить швидко нагрівається до температури  $\theta$ , що визначається формулою (25). Тому при розрахунках величин температури  $\theta$ , час  $\Delta t$  нагрівання нитки можна прийняти 0,5 - 1 с. Результати розрахунків сталих часу нитки термоанемометра  $\tau_n$  та  $\tau_{tn}$  рухомого теплового потоку, складають  $\tau_n = 0,59$  с та  $\tau_{tn} = 0,6$  с - відповідно, тобто чисельні значення сталих часу  $\tau_n$  і  $\tau_{tn}$  є практично сумірними.

Користуючись формулою для визначення похибок непрямих вимірювань, отримаємо вираз для розрахунку відносної систематичної похибки непрямого вимірювання швидкості теплового потоку  $V$ , який обдуває чутливий елемент термоанемометра. Формула для визначення похибок непрямих вимірювань, у загальному випадку, має наступний вигляд [3]:

$$\frac{\delta a}{a} = \frac{f^{x \cdot x}}{a} \cdot \frac{\delta x}{x} + \frac{f^{y \cdot y}}{a} \cdot \frac{\delta y}{y} + \frac{f^{z \cdot z}}{a} \cdot \frac{\delta z}{z} + \dots + \frac{f^{t \cdot t}}{a} \cdot \frac{\delta t}{t}. \quad (28)$$

Причому, функція  $a$  є функцією багатьох змінних  $a = f(x, y, z, \dots, t)$ , де  $x, y, z, \dots, t$  аргументи функції  $a$  [3].

Для залежності швидкості  $V$  теплового потоку від значення падіння напруги  $U_k$  на компенсуючому пристрої, тобто  $V = f(U_k)$ , маємо:

$$\frac{\delta V}{V} = \frac{\delta V}{\delta U_k} \cdot \frac{U_k}{V} \cdot \frac{\delta U_k}{U_k}, \quad (29)$$

або

$$\frac{\delta V}{V} = \frac{1}{\frac{\delta U_k}{\delta V}} \cdot \frac{U_k}{V} \cdot \frac{\delta U_k}{U_k}. \quad (30)$$

де відношення  $\delta V / \delta U_k$  є значенням чутливості термоанемометра  $\frac{\delta V}{\delta U_k} = S_1$ .

Оскільки залежність  $U_k = f(V)$  є лінійною, то чутливість  $S_1$  – постійна величина для всіх точок  $V$ .

Звідси:

$$\frac{\delta V}{V} = \frac{1}{S_1} \cdot \frac{U_k}{V} \cdot \frac{\delta U_k}{U_k}, \quad (31)$$

$$K = \frac{1}{S_1} \cdot \frac{U_k}{V}, \quad (32)$$

де  $K$  коефіцієнт впливу.

Далі знайдені чисельні значення систематичних похибок вимірювань при різних швидкостях повітряного потоку, складають відповідно:

$$\begin{aligned} V = 10 \text{ м/с:} \quad \frac{\delta V}{V} &= \frac{1}{0,018} \cdot \frac{1,1}{10} \cdot 0,91 = 5,56\% \\ V = 15 \text{ м/с:} \quad \frac{\delta V}{V} &= \frac{1}{0,018} \cdot 5 \cdot 0,83 = 3,69\% \\ V = 20 \text{ м/с:} \quad \frac{\delta V}{V} &= \frac{1}{0,018} \cdot \frac{1,29}{20} \cdot 0,78 = 2,79\% \\ V = 25 \text{ м/с:} \quad \frac{\delta V}{V} &= \frac{1}{0,018} \cdot \frac{1,39}{25} \cdot 0,72 = 2,22\% \\ V = 30 \text{ м/с:} \quad \frac{\delta V}{V} &= \frac{1}{0,018} \cdot \frac{1,48}{30} \cdot 0,68 = 1,86\% \\ V = 35 \text{ м/с:} \quad \frac{\delta V}{V} &= \frac{1}{0,018} \cdot \frac{1,57}{35} \cdot 0,64 = 1,59\% \\ V = 40 \text{ м/с:} \quad \frac{\delta V}{V} &= \frac{1}{0,018} \cdot \frac{1,66}{40} \cdot 0,6 = 1,38\% \end{aligned}$$

Таким чином, зменшення похибки вимірювань швидкості  $V$  пояснюється тим, що зі зростанням  $V$  збільшується значення  $U_k$ . Слід визначити, що в формулі (31), значення напруги  $U_k$  – зростає значно повільніше, ніж в знаменнику швидкість  $V$ . Всі ці фактори знижують відносну систематичну похибку непрямого вимірювання швидкості теплового потоку, тобто  $\delta V / V$ . Будемо вважати, що зведена похибка вимірювання швидкості теплового потоку визначається кінцем шкали термоанемометра, тобто дорівнює:  $V = 40$  м/с. Результати визначення залежності похибки  $\delta V / V$  від швидкості  $V$ , наведено в табл. 1 та відображено на (рис.1).

Таблиця 1

Залежність похибки  $\delta V / V$  від швидкості  $V$

| $V; \text{м/с}$    | 10   | 15   | 20   | 25   | 30   | 35   | 40   |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\delta V / V; \%$ | 5,56 | 3,69 | 2,79 | 2,22 | 1,86 | 1,59 | 1,38 |

При цьому, за динамічними характеристиками та похибками вимірювань, найбільш раціональним є режим сталого опору нитки термоанемометра, тобто режим який відповідає умові:

$$I^2 c_2 = \xi(v_1) S (c_1 - \theta_{cp}), \quad (33)$$

де  $I$  – струм;  $\xi$  – коефіцієнт конвекції;  $S$  – площа поверхні нитки;  $\theta$  – температура середовища, яке оточує нитку термоанемометра;  $c_1$  та  $c_2$  – сталі коефіцієнти за опором та температурою нитки термоанемометра:

$$\begin{cases} \Omega_{nv1} = \text{const} = c_2, \\ \theta_{nv1} = \text{const} = c_1 \end{cases}, \quad (34)$$

де  $\Omega_{nv1}$  та  $\Delta\theta_{nv1}$  – опір та температура нитки термоанемометра при прирощенні температури  $\Delta\theta_1$ .

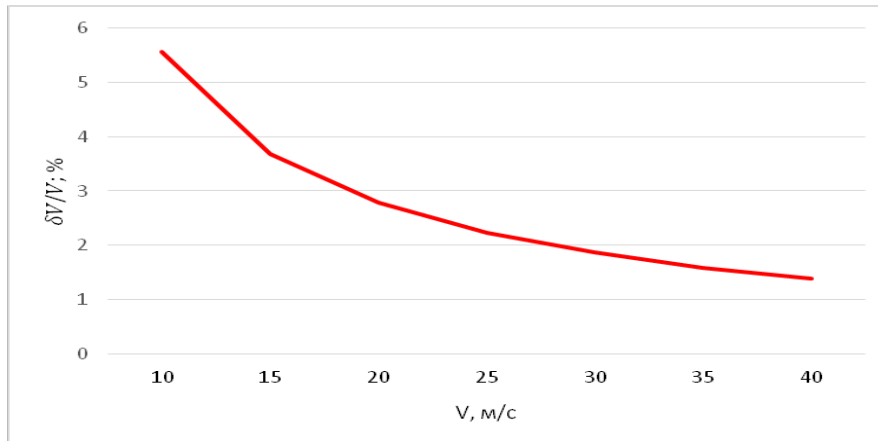


Рис. 1. Залежність похибки вимірювань  $\delta V/V$  від швидкості теплового потоку,  $\delta V/V = f(V)$

Таким чином, досліджено характеристики теплового перехідного процесу під час сушіння горіхової сировини в мікрохвильовий камері, визначено систематичні похибки вимірювань швидкості повітряного потоку в діапазоні від 10 до 40 м/с. Знайдені сталі часу термоанемометра  $\tau_n$  та  $\tau_{tn}$  рухомого теплового потоку.

**Висновки.** Таким чином, дану роботу присвячено дослідженню метода вимірювання інформативних характеристик теплового потоку, для визначення раціонального режиму роботи термоанемометра та скорочення часу теплової обробки горіхової сировини. При цьому, кількість тепла, яка передається чутливому елементу тепловим потоком, залежить від фізичних характеристик рухомого середовища, геометричних розмірів і орієнтування чутливого елемента – нитки термоанемометра, зі зростанням температури нитки - чутливість термоанемометра збільшується. В рамках дослідження сформульованої наукової і практичної проблеми, надано теоретичне обґрунтування та алгоритм визначення динамічних характеристик термоанемометра при зовнішній синусоїдальній зміні температури теплового потоку, наведено алгоритми визначення миттєвих значень прирощень температури чутливого елемента термоанемометра. Оскільки чисельні значення сталих часу  $\tau_n$  і  $\tau_{tn}$  є практично сумірними, виникає можливість контролю миттєвих значень температури теплового потоку.

Досліджено алгоритми визначення похибок вимірювання функції багатьох аргументів, яка пов'язує сигнали термоанемометра з характеристиками теплового потоку. На основі загальної теорії похибок непрямих вимірювань в досліджуваному діапазоні змінення швидкості  $V$ , визначено відносні систематичні похибки непрямих вимірювань швидкості теплового потоку  $\delta V/V$ . При цьому, за динамічними характеристиками та похибками вимірювань при обдуванні рухомим тепловим потоком горіхової сировини, найбільш раціональним є режим сталого опору нитки термоанемометра. Перспективи подальших досліджень полягають у створенні керованих автоматизованих систем спільних вимірювань параметрів готової продукції при реалізації мікрохвильових технологій пов'язаних з тепловою обробкою харчової сировини.

### Література

1. Пономарьов С.Х., Сирохман Н.М. Безпека харчових продуктів: навч. посібник. Київ. Лібро, 2006. 224 с.
2. Кудрін О.Б., Данько В.П. Дослідження параметрів повітряного середовища в об'ємі холодильних камер для збереження овочів. Сучасні проблеми холодної техніки та технології. Збірник тез доповідей XI Всеукраїнської науково-технічної конференції. Одеса: ОНАХТ, 2017. 243 с
3. Маєвський С.М., Серий К.М. Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г. В.Карпенка, 2011. 116 с.
4. Безвесильная Е. Н., Ильченко А. В., Ткачук А. Г. Разработка математической модели термоанемометрического расходомера для измерения расхода биологического топлива. Харків: Технологічний аудит та резерви виробництва, 2014. № 5/1(19). С.4-8.
5. Безвесільна О.М., Шавурський Ю.О. Експериментальні дослідження термоанемометричного витратоміру біопалива. Вісник Інженерної академії України, 2011. №1. С. 61-67.
6. Обух І. Я., Яцук Ю.В. Олеськів Т.М. Інваріантний до температури довкілля термоанемометр для побудови газових лічильників. Східно-Європейський журнал передових технологій. Харьков, 2009. С. 4-10.
7. Кузнецов Д.Н., Лебедев В.Н., Перебейнос В.В. Исследование импульсного термоанемометра с термопарой в качестве термочувствительного элемента. Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. Донецьк: ДонНТУ, 2012. №23 (201). С. 170-176.
8. Фединець В.О., Кулик О.М. Дослідження умов теплообміну первинного перетворювача температури, суміщеного з трубою повного тиску в тепловому лічильнику. Львів: Науковий вісник НЛТУ України. Сер. Технологія та устаткування лісо-виробничого комплексу, 2014. С.1-7.
9. Fedynets V., Vasyukivskyi I., Yusyuk Y. Optimization of Gas Dynamical Subsystem of Transducers for Measurement of Gas Flow Temperature. Energy Eng. Control Syst., 2016, Vol. 2, pp. 43 – 48.
10. Фединець В.О. Особливості вимірювання температури газових потоків. Львів: Науковий вісник НЛТУ України. Сер. Механіка та машинобудування, 2013. Вип.23. С.148-152.
11. Матіко Ф.Д., Федоришин Р.М. Дослідження впливу температурного режиму потоку природного

### References

1. Ponomarev S.H., Sirohman N.M. Food safety: textbook. manual. Kiev. Libro, 2006. 224 p.
2. Kudrin O.B. , Danko V.P. Investigation of air parameters in the volume of refrigeration chambers for vegetable storage. Modern problems of refrigeration equipment and technology. Collection of abstracts of the XI All-Ukrainian scientific and technical conference. Odessa: ONAHT, 2017. 243 p
3. Mayevsky S.M. , Gray K. M. Physical methods and means of control of environments, materials and products. Lviv: Physico-Mechanical Institute named after GV Karpenko, 2011. 116 p.
4. Bezvesilnaya E.N., Ilchenko A.V., Tkachuk A.G. Development of a mathematical model of a thermoanemometric flowmeter for measuring the consumption of biological fuel. Kharkiv: Technological audit and production reserves, 2014. № 5/1 (19). P.4-8.
5. Bezvesilna O.M., Shavursky Y.O. Experimental studies of thermo-nemometric biofuel flowmeter. Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine, 2011. №1. Pp. 61-67.
6. Obukh I. J., Jatsuk J.V. Oleskiv T.M. Invariant to ambient temperature thermoanemometer for construction of gas meters. Eastern European Journal of Advanced Technologies. Kharkov, 2009. P. 4-10.
7. Kuznetsov D.N., Lebedev V.N., Perebeinos V.V. Investigation of a pulsed thermoanemometer with a thermocouple as a thermosensitive element. Scientific works of Donetsk National Technical University. Series: Computer technology and automation. Donetsk: DonNTU, 2012. №23 (201). P. 170-176.
8. Fedinets V.O., Kulik O.M. Investigation of the heat exchange conditions of the primary temperature converter combined with the full pressure tube in the heat meter. Lviv: Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine. Ser. Technology and equipment of the forest production complex, 2014. P.1-7.
9. Fedynets V., Vasyukivskyi I., Yusyuk Y. Optimization of Gas Dynamical Subsystem of Transducers for Measurement of Gas Flow Temperature. Energy Eng. Control Syst., 2016, Vol. 2, pp. 43 - 48.
10. Fedinets VO Features of measuring the temperature of gas flows. Lviv: Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine. Ser. Mechanics and Mechanical Engineering, 2013. Issue 23. P.148-152.

газу на точність вимірювання його витрати методом змінного перепаду тиску. Львів: Вісник Національного університету «Львівська політехніка»: Сер. Автоматика, вимірювання та керування, 2007. № 574. С. 29-38.

12. Левченко Т.В. Загальна електротехніка з основами автоматики: навчальний посіб. Київ: Аграрна освіта, 2010. 358 с.

11. Matiko F.D., Fedoryshyn R.M. Investigation of the influence of the temperature regime of natural gas flow on the accuracy of measuring its flow by the method of variable pressure drop. Lviv: Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic": Ser. Automation, measurement and control, 2007. № 574. P. 29-38.

12. Levchenko T.V. General electrical engineering with the basics of automation: a textbook. Kyiv: Agrarian Education, 2010. 358 p.

ZDORENKO V.

alzd123@meta.ua

ORCID: 0000-0001-6508-4290

Kyiv National University of Technologies & Design

SEBKO K.

proff935@gmail.com

ORCID: 0000-0001-8451-062X

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОАНЕМОМЕТРА НА ОСНОВЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА МИКРОВОЛНОВОЙ КАМЕРЫ

ЗДОРЕНКО В.Г.<sup>1</sup>, СЕБКО К.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Київський національний університет технологій та дизайну

<sup>2</sup>Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

**Целью статьи** является исследование рационального режима работы термоанемометра в соответствии с динамическими характеристиками и погрешностями измерений, при реализации процесса сушки орехового сырья в микроволновой камере.

**Методика.** Использована методика исследования информативных параметров теплового потока, для определения рационального режима работы термоанемометра и сокращения времени тепловой обработки орехового сырья.

**Результаты.** Приведено теоретическое обоснование и алгоритм определения динамических характеристик термоанемометра при внешнем синусоидальном воздействии температуры теплового потока, приведены алгоритмы определения мгновенных значений приращений температуры чувствительного элемента термоанемометра в процессе сушки орехового сырья.

**Научная новизна.** Заключается в том, что получили дальнейшее развитие теоретические положения работы термоанемометра в направлении исследований характеристик теплового переходного процесса обработки орехового сырья, все это дает возможность для определения диапазонов изменения сигналов теплового устройства, которые соответствуют диапазонам изменения информативных характеристик движущегося теплового потока, а также позволяет осуществлять выбор измерительной аппаратуры, установить рациональные в соответствии с погрешностями и чувствительностями режимы работы термоанемометров и автоматизированных устройств, которые их используют.

**Практическое значение.** Предложенные алгоритмы определения информативных параметров теплового потока при исследовании переходного процесса передачи тепла от движущегося потока воздуха к чувствительному элементу преобразователя, найденные результаты погрешностей измерений скорости  $V$  движущегося теплового потока, дают возможность для расчетов, конструирования и создания измерительных автоматизированных устройств, которые используют термоанемометры в пищевой и перерабатывающей промышленности, приборостроении и химическом машиностроении.

**Ключевые слова:** ореховое сырье, микроволновая камера, динамические характеристики, тепловой поток, информативные параметры, скорость потока, температура чувствительного элемента, постоянная времени, стационарное и нестационарное решение, погрешности косвенных измерений.

---

## THE RESEARCH OF METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE THERMO ANEMOMETER BASED ON THE MEASUREMENT CONTROL OF THE HEAT FLOW OF THE MICROWAVE CAMERA

ZDORENKO V.G.<sup>1</sup>, SEBKO K.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kiev National University of Technology and Design

<sup>2</sup>National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

**Purpose.** The purpose of the article is to study the rational operation of the hot-wire anemometer in accordance with the dynamic characteristics and measurement errors, when implementing the process of drying raw nuts in an industrial microwave chamber.

**Methodology.** The technique of studying the informative parameters of the heat flow was used to determine the rational mode of operation of the hot-wire anemometer and to reduce the time of heat treatment of nut raw materials.

**Results.** The characteristics of the thermal transient process of drying raw nut materials in a microwave chamber are investigated. Theoretical substantiation and an algorithm for determining the dynamic characteristics of the hot-wire anemometer under the external sinusoidal effect of the heat flow temperature are given, algorithms for determining the instantaneous values of the temperature increments of the hot-wire anemometer sensitive element in the process of drying nut raw materials are given. On the basis of the general theory of errors of indirect measurements in the investigated range of variation of the rate  $V$  of the heat flow, the values of the relative systematic errors of indirect measurements of the rate of heat flow in the range from 10 to 40 m / s were determined. It was found that in accordance with the dynamic characteristics and measurement errors when blowing a moving heat flow of nut raw materials, the most rational is the mode of constant resistance of the hot-wire anemometer. Solutions of the differential equation describing the dynamic heat process when the temperature of the moving heat flow changes according to the periodic law, i.e. stationary, non-stationary and complete. The results of calculating the constant times of the hot-wire anemometer thread  $\tau_n$  and  $\tau_{mn}$  of the moving heat flow, respectively, were  $\tau_n = 0.59$  s and  $\tau_{mn} = 0.6$  s, the time constant of the hot-wire anemometer is practically commensurate with the thermal time constant of the moving stream blowing over the nut raw material.

**Scientific novelty.** It consists in the fact that the theoretical position of the hot-wire anemometer has been further developed in the direction of researching the characteristics of the thermal transient process of processing nut raw materials, all this makes it possible to determine the ranges of changes in the signals of the thermal device, which correspond to the ranges of change in the informative characteristics of the moving heat flow, and also allows the selection measuring equipment, establish rational operating modes of hot-wire anemometers and automated devices that use them in accordance with errors and sensitivities.

**Practical value.** The proposed algorithms for determining the informative parameters of the heat flow in the study of the transient process of heat transfer from the moving air flow to the sensitive element of the transducer, the results of the errors in measuring the velocity  $V$  of the moving heat flow, make it possible to calculate, design and create measuring automated devices that use hot-wire anemometers in food and processing industry, instrument making and chemical engineering.

**Key words:** raw nuts, microwave chamber, dynamic characteristics, heat flow, informative parameters, flow rate, temperature of the sensitive element, time constant, stationary and non-stationary solution, indirect measurement errors.