

TERMoelectric DEVICES FOR MEASURING TEMPERATURE AND FLOW VELOCITY OF GAS MEDIUM

O. Mazurenko

National University of Food Technologies

L. Vorobiov, L. Dekusha

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

Key words:

Measurement

Sensor

Temperature

Heat flow

Flow velocity

Thermo-anemometer

Gaseous medium

Article history:

Received 09.11.2023

Received in revised form
24.11.2023

Accepted 11.12.2023

Corresponding author:

O. Mazurenko

E-mail:

rovgi18-1@ukr.net

Citation: О. Г. Мазуренко, Л. Й. Воробйов, Л. В. Декуша (2023). Термoeлектричні прилади вимірювання температури та швидкості потоку газового середовища. *Наукові праці НУХТ*, 29(6), 53—71. DOI: 10.24263/2225-2924-2023-29-6-6

ABSTRACT

In the food industry, a significant number of heat treatment processes of products are carried out using gaseous media, the value of the main operating parameters of which, namely temperature, relative humidity and flow velocity, must be controlled. From the results of the analysis it was found that, depending on the industry, type of technological process and product, the ranges of values of these parameters of working gaseous media are: the temperature is from minus 36 °C, when quickly freezing meat, to 200 °C when baking bread; relative humidity is from 30% during drying to 95% in food storage rooms; flow velocity is from 0.1 m/s in food storage rooms to 10 m/s during heat treatment of products. At the same time, each of the technological processes, and therefore the control and maintenance of process parameters, has its own characteristics.

The existing methods and means suitable for measuring temperature and flow velocity of gaseous working media in the current ranges of their values were analyzed in the work.

It is shown that in systems for monitoring parameters of convective processing of products, it is desirable to have stationary measuring instruments associated with automated process control systems, and for operational control it is necessary to have mobile means.

The results of comparative testing of domestic and foreign thermoelectric heat flux density sensors are presented. On this basis, it is shown that domestic heat meters are not inferior to imported ones in most respects. It is noted that the sensitivity of domestic thermoelectric sensors of the developed anemometers can be coordinated with the operational characteristics of the automated process control system of the enterprise.

The results of the development of thermo- and thermometric methods and devices for monitoring the speed of gas flows are presented in the article.

At the next stage of methods and devices for measuring parameters characterizing the humidity condition of gaseous media during the thermal processing of food products will be developed.

DOI: 10.24263/2225-2924-2023-29-6-6

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ПРИЛАДИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ШВИДКОСТІ ПОТОКУ ГАЗОВОГО СЕРЕДОВИЩА

О. Г. Мазуренко

Національний університет харчових технологій

Л. Й. Воробйов, Л. В. Декуша

Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

У харчовій промисловості значна кількість процесів термічної обробки продуктів здійснюється з використанням газових середовищ, значення основних робочих параметрів яких (температуру, відносну вологість і швидкість руху) необхідно контролювати. Залежно від галузі промисловості, виду технологічного процесу і продукту діапазони значень цих параметрів робочих середовищ становлять: температура — від мінус 36°C при швидкому заморожуванні м'яса, до 200°C під час випікання хліба; відносна вологість — від 30% при сушінні до 95% в камерах зберігання продуктів; швидкість руху — від 0,1 м/с в камерах зберігання продуктів до 10 м/с під час термічної обробки продуктів. Водночас кожен з технологічних процесів, а отже, контроль і підтримання параметрів процесу, мають свої особливості.

У статті проаналізовано існуючі методи та засоби, які придатні для вимірювання температури, швидкості руху потоків газових робочих середовищ в актуальних діапазонах їх значень. Показано, що в системах контролю параметрів середовищ конвективної обробки продуктів бажано мати стаціонарні засоби вимірювання, пов'язані з АСУ ТП, а для оперативного контролю — мобільні засоби.

Наведено результати порівняльних випробовувань вітчизняних і зарубіжних термоелектричних перетворювачів густини теплового потоку, на підставі яких показано, що вітчизняні тепломіри за більшістю показників не поступаються імпортованим. Відзначено, що чутливість термоелектричних перетворювачів розроблених анемометрів може бути узгоджена з експлуатаційними характеристиками АСУ ТП підприємства. Проаналізовано результати розробок термо- і теплометричного способів та приладів контролю швидкості руху потоків газового середовища.

Результати розробок способів і пристроїв вимірювання вологості газових середовищ термічної обробки продуктів будуть наведені в наступному номері журналу.

Ключові слова: *вимірювання, перетворювач, температура, тепловий потік, швидкість руху, термоанемометр, газове середовище.*

Постановка проблеми. За результатами аналізу більшості, на перший погляд, цілком досконалих та добре відомих способів і засобів вимірювання технологічних параметрів обробки харчових продуктів, часто доводиться констатувати наявність у них невикористаних резервів, передусім це стосується точності і мож-

ливості автоматизувати процес вимірювання, що обумовлює необхідність вдосконалення або навіть розробки принципово нових способів і засобів вимірювання (Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції, 2019).

Так, одним з основним параметрів, який визначає якість та ефективність процесів термічної обробки харчових продуктів у потоці газових середовищ, є температуро-швидкісний стан цих середовищ. Для вимірювання швидкості або витрати повітряного потоку у вентиляційних системах використовують прилади, які називають анемометрами (O'Sullivan та ін., 2014). Існує кілька різновидів анемометрів, що відрізняються принципом дії та вимірюванням різних фізичних величин: перепаду тиску (прилад — дифманометр (Ower, & Pankhurst, 2014), зонд-трубка Піто), електричного опору або сили струму (прилад — термоанемометр (Ikeya, Örlü, Fukagata, & Alfredsson, 2017), зонд, зазвичай нагріта струна, але можуть бути й інші, наприклад, термоплівка (Saremi, Alyari, Feili, & Seidel, 2014), а також частоти обертання, прилад — вимірювач частоти механічного обертання, зонд — крильчатка або чашечки (Burgess, Ellenbecker, & Treitman, 2004).

Кожен з анемометрів має свою сферу застосування залежно від зовнішніх умов, стану повітряного середовища, структури течії та діапазону вимірювання швидкості повітряного потоку. Проте серед різноманіття існуючих видів анемометрів найбільш розповсюдженими в харчовій промисловості є резистивні термоанемометри.

У діапазоні швидкості руху потоку повітря ($0,5 \div 10$) м/с термоанемометри є найбільш точними приладами, тому їх широко використовують у системах автоматизованого керування виробничими процесами. До недоліків резистивних анемометрів слід віднести їхню чутливість до турбулізації потоку повітря (Manshadi, & Esfeh, 2012) і кута натікання потоку на поверхню струни, що вносить похибку в результати вимірювань. Зонди сучасних термоанемометрів виконуються компактними — мінімальний діаметр ($10 \div 15$) мм, що дає змогу проводити точкові вимірювання (Örlü, & Vinuesa, 2017). В основу принципу дії цих пристроїв покладено взаємозв'язок між швидкістю руху потоку робочого середовища та інтенсивністю теплопроводу від нагрітого чутливого елемента пристрою, що омивається цим потоком.

Основним елементом резистивних термоанемометрів є електричний нагрівач — він же чутливий елемент (ЧЕ) пристрою, виконаний у вигляді нитки, циліндра, клину або шару, електричний опір матеріалу якого залежить від температури. З використанням цього нагрівача створюють потрібну для теплообміну різницю температур між потоком робочого середовища та ЧЕ пристрою. За величиною виміряного електричного опору терморезистивного матеріалу визначають температуру нагрівача, інтенсивність теплообміну і отже, руху потоку газового середовища.

Тут же зазначимо, що основним елементом термоелектричного анемометра є термопара, за якою вимірюють температуру тонкої нагрітої нитки (нагрівача), що змінюється залежно від швидкості руху потоку повітря. Таким чином, резистивний термоанемометр фактично являє собою термометр опору (ТО), а термоелектричний анемометр — термопару (ТП). Спрощені електричні та вимірювальні схеми цих пристроїв наведені на рис. 1.

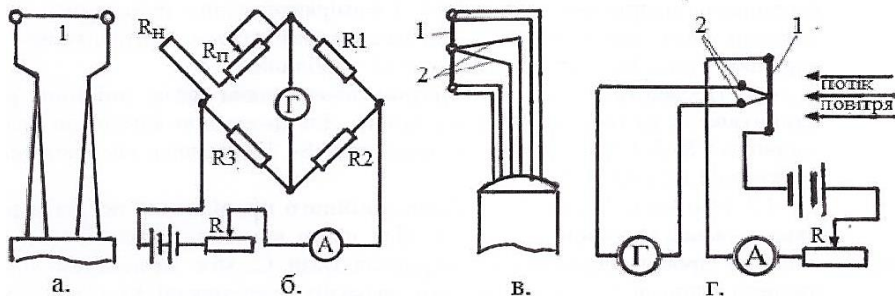


Рис. 1. Спрощені електрична (а) і вимірювальна (б) схеми терморезистивного анемометра та електрична (в) і вимірювальна (г) схеми термоелектричного анемометра: 1 — нагрівач, 2 — термопара

Конструкції ЧЕ обох анемометрів повинні виключати всі види втрат теплоти через нього, крім втрат конвекцією. Для цих пристроїв має бути справедлива залежність:

$$R_n = f(\vartheta_{p.c.}), \quad (1)$$

де R_n — функція активного опору нитки-нагрівача термоанемометра від швидкості руху $\vartheta_{p.c.}$ потоку робочого (газового) середовища (рис. 2).

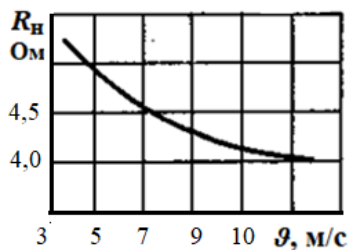


Рис. 2. Залежність опору нитки-нагрівача анемометра від швидкості руху потоку газу

Тепловий баланс нитки-нагрівача анемометра описується рівнянням:

$$I_2 \cdot R_n = \alpha \cdot F \cdot (t_n - t_{p.c.}), \quad (2)$$

де: α — коефіцієнт теплообміну, Вт/(м²·К); F — поверхня вимірювальної нитки, м²; I — сила електричного струму, А; t_n — температура потоку робочого середовища, °С; $t_{p.c.}$ — температура нитки-нагрівача, °С.

Резистивні термоанемометри опору поділяють на ті, що працюють за постійної температури розжарення нитки, та ті, які працюють при постійній силі струму нагрівача. У першому випадку температуру нитки регулюють силою струму, яка залежить від опору реостата R (рис. 1, а), а швидкість руху потоку робочого середовища визначають з рівності:

$$U = I^2 \cdot R_n = A + B \cdot \vartheta_n^p, \quad (3)$$

де U — напруга, В; A , B , p — дослідні коефіцієнти, величина яких вказується в паспортних даних приладів.

Якщо резистивний анемометр працює за постійної сили струму, то для визначення температури потоку робочого середовища здійснюють підбір активного опору R таким чином, щоб сума $R + R_{\pi} = \text{const}$.

Швидкість потоку робочого газового середовища у разі застосування термоелектричного анемометра розраховують за рівнянням:

$$t_{\pi} - t_{\text{н}} = \frac{I^2 \cdot R_{\text{н}} \cdot \nu_{\text{пов}}^{0,4}}{0,81 \cdot \lambda_{\text{пов}} \cdot \pi \cdot d^{0,4} \cdot l} \cdot \nu_{\text{пов}}^{-0,4}, \quad (4)$$

де $\nu_{\text{пов}}$ — кінематична в'язкість повітря, $\text{м}^2/\text{с}$; $\lambda_{\text{пов}}$ — теплопровідність повітря, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; d та l — діаметр і довжина припаяної терморпори, м .

Для виготовлення резистивних термоанемометрів найбільш придатними вважаються терморезистори з негативним термічним коефіцієнтом опору (ТКО), наприклад, типу М85 (Ковальчук, & Лучко, 2011). Їх опір змінюється від 10 кОм при 20°C до ≈ 1 кОм при 100°C . Якщо робочу температуру датчика прийняти рівною 100°C , то за вольт-амперною характеристикою терморезистора типу М85 (рис. 3) для опору 1 кОм вимірювальний струм виходить рівним ≈ 1 мА. На підставі цього конструюють схеми резистивних термоанемометрів (рис. 4, а).

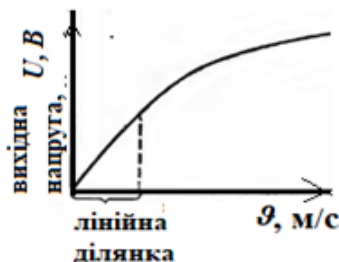


Рис. 3. Характеристика терморезистивного анемометра для умов прямого потоку

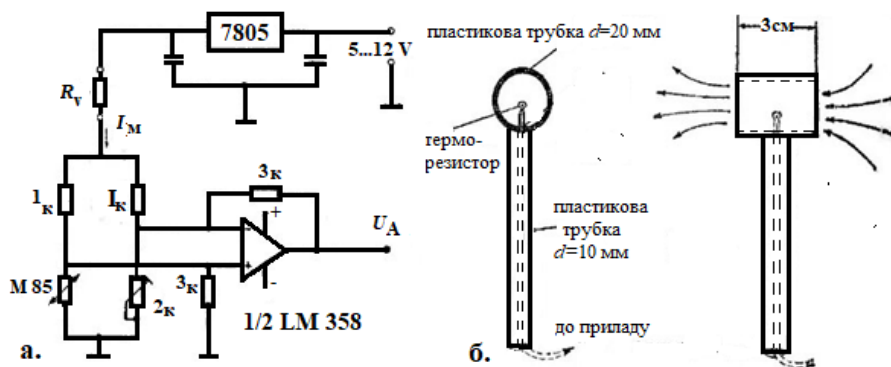


Рис. 4. Електрична вимірювальна схема (а) та механічна будова (б) резистивного анемометра

Опір вимірювального моста становить приблизно 1 кОм. За постійної (регульованої) напруги живлення моста $U_{\text{м}} = 5$ В для струму $I_{\text{м}} = 2$ мА додатковий опір $R_{\text{д}} = 5/2 - 1 = 1,5$ кОм.

Чутливий до потоку газового середовища терморезистор М85 на підставці міститься на осі трубки завдовжки близько 3 см і внутрішнім діаметром близько 2 см (рис. 4, б). Це дає змогу усунути виникнення побічних потоків, здатних спотворити результати вимірювань (Electronoff, 2023).

Недоліками існуючих типів резистивних термоанемометрів є залежність їх показів від температури потоку робочого середовища, а також від фонового теплового випромінювання. Це значно обмежує сферу їх застосування, особливо у харчовій промисловості, де в багатьох технологічних процесах енергетична дія на продукт здійснюється саме при конвективно-радіаційному теплообміні. Крім цього, швидкість руху й температура робочих газових середовищ за час термічної обробки продуктів може коливатися в значних діапазонах, що ускладнює її вимірювання.

Усунути зазначені недоліки можна шляхом використання інших видів перетворювачів температури і швидкості руху потоку газового робочого середовища. На наш погляд, перетворювачів генераторного типу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні анемометри дають змогу проводити одночасне вимірювання температури та швидкості потоку за допомогою додаткового датчика температури (Foss, Peabody, Norconk, & Lawrenz, 2006). Також вони забезпечені низкою допоміжних функцій, що полегшують математичне опрацювання результатів вимірювання, наприклад, усереднення за інтервал часу.

За даними, наведеними в літературі, обсяги вимірювань температури у відсотках до загальної кількості вимірювань, що проводяться, наприклад, у хімічній промисловості, в теплоенергетиці та в ядерній енергетиці, становлять, відповідно, 50%, 33% та 35%. Стосовно теми цієї статті зазначимо, що останнім часом на ринку нашої країни з'явилися нові, у тому числі й імпорتنі засоби вимірювання температури, а також термоелектричні перетворювачі, які в принципі придатні для вимірювання щільності потоку теплоти.

Серед різноманіття існуючих перетворювачів температури значним попитом користуються термометри опору (ТО), зокрема платинові, та термоелектричні термометри — термопари (ТП).

Чутливим елементом (ЧЕ) є резистор, виконаний з металевого дроту або плівки, які мають відому залежність електричного опору від температури, для вимірювання якого потрібно джерело стабілізованого електричного струму.

Найбільш поширеною конструкцією сучасного чутливого елементу ЧЕ дріт'яного платинового ТО (Coastal Wiki, & Souza Dias, 2020) є так звана «вільна від напруги спіраль» (strain-free). Цей ЧЕ (рис. 5, а) являє собою платинову спіраль, чотири відрізки якої укладені в канали трубки з оксиду алюмінію і засипані дрібнодисперсним порошком з оксиду алюмінію високої чистоти. Це забезпечує ізоляцію витків спіралі один від одного, амортизацію спіралі під час термічного розширення і вібраційну міцність приладу. Такі ТО випускаються у багатьох країнах світу і вважаються одним з найнадійніших засобів вимірювання температури.

Плівковий чутливий елемент типу «thin-film» являє собою підкладку товщиною $(0,3 \div 0,6)$ мм, на яку напилена платинова плівка товщиною до декількох сотень нанометрів (рис. 5, б) у вигляді меандру та захисний шар з оксиду алюмінію.

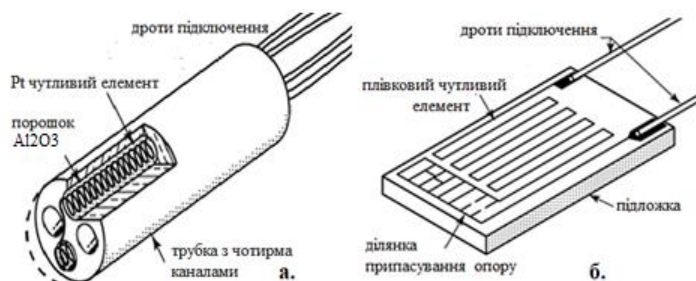


Рис. 5. Конструкція Pt термометра опору: а — дротяного, типу «strain-free»; б — плівкового, типу «thin-film»

Нині плівковий платиновий ЧЕ є найдешевшим сенсором. Його перевагою є малий розмір і маса, що дає змогу встановлювати такі ЧЕ в мініатюрні корпуси й отримувати швидке реагування на зміну температури об'єкта. Завдяки малим розмірам плівкові ЧЕ ТО можуть виготовлятися з підвищеним номінальним опором. Зараз вже виробляються ЧЕ з опором 1000 Ом, що дає змогу значно зменшити вплив опору дротів з'єднання ЧЕ ТО зі вторинним вимірювальним приладом.

Метрологічні характеристики та вартість ТО визначаються класом допуску термометра та його ЧЕ. Найпоширенішим у промисловості є клас В (табл. 1).

Таблиця 1. Клас допуску платинового термометра та його дрового (W) і плівкового (F) чутливих елементів за МЕК 60751(22)

Клас допуску ТО та його ЧЕ	Допуск, °C	Діапазон вимірювань, °C	
		дротовий ТО	плівковий ТО
B, W=F=0,3	$\pm (0,3+0,005 t)$	-196 ÷ 660	-50 ÷ 500

Для вимірювання різниці температур Δt об'єктів зручно використовувати термоелектричні перетворювачі генераторного типу — термопари (Луцик, Буняк, Рудавський, & Стадник, 2003). Термоелементом, термопарою, або термоелектричним термометром називають коло (рис. 6, а), яке складається з двох різних провідників. Згідно з ефектом Зеебека в розімкненому електричному колі (рис. 6, б та в), що складається з послідовно з'єднаних різнорідних провідників, контакти між якими знаходяться при різних температурах ($t_1 > t_2$ — температура, відповідно, «гарячого» і «холодного» спаїв), виникає термо-ЕРС:

$$E = \alpha_3 \cdot \Delta t = \alpha_3 \cdot (t_1 - t_2), \quad (5)$$

де α_3 — коефіцієнт Зеебека.

З результату аналізу рівняння розрахунку термо-ЕРС випливає, що для визначення температури одного зі спаїв термопари (температури дослідного об'єкта) потрібно знати температуру іншого спаю датчика. Для цього «холодний» (опорний) спай термопари розмішують у спеціальному блоці, де незмінно підтримується обумовлена температура.

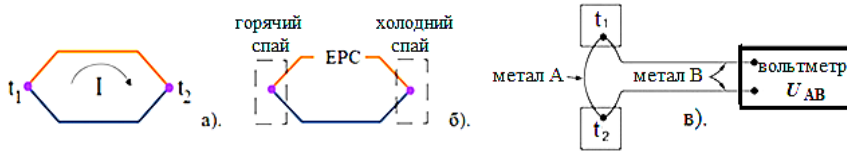


Рис. 6. До ефекту Зесбека

Для вимірювання різниці температур $\Delta t = t_1 - t_2$ зон, в одній з яких знаходиться вторинний перетворювач (прилад вимірювач термо-ЕРС), використовують схему, що представлена на рис. 6, в. Для вимірювання різниці температур $\Delta t = t_1 - t_2$ зон, у жодій з них не знаходиться прилад вимірювач термо-ЕРС, зручно використовувати так звану диференціальну термопару. Це два однакові термоелементи, з'єднані зустрічно за термо-ЕРС ($\Delta E = E_1 - E_2$), яка генерується:

$$\Delta t = (E_1 - E_2) / a_3 = \Delta E / a_3. \quad (6)$$

Для підсилення сигналу, який генерує термопара, можна n таких датчиків з'єднати узгоджено за термо-ЕРС, яку вони генерують ΔE_n , і отримати так звану гіпертермопару. У цьому випадку одержимо:

$$\Delta t = \Delta E / (a_3 \cdot n). \quad (7)$$

В Україні вже майже 60 років розробляються та виготовляються (Федоров, 1987) різні види термоелектричних перетворювачів теплового потоку (ПТП). ПТП, які працюють за принципом «допоміжної стінки», являють собою пластину (диск) за товщині якої розміщена батарея термоелементів (рис. 7) — диференційна плоска спіральна гіпертермопара, виготовлена за гальванічною технологією і залита електроізолюючим компаундом.

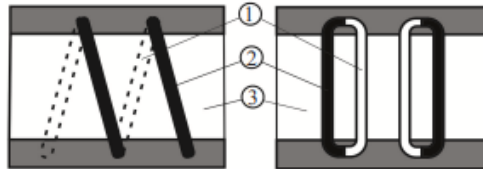


Рис. 7. Спіральний ПТП: 1 — основний термоелектрод; 2 — біметалевий термоелектрод; 3 — електроізолюючий компаунд

Кількість спаїв диференційної термопари на 1 cm^2 поверхні такого ПТП може складати від 500 до 3000 одиниць. При проходженні потоку теплоти через такий перетворювач унаслідок різниці температур між його поверхнями батарея термоелектричних елементів генерує термо-ЕРС e_q , величина якої пропорційна густині теплового потоку q . Тут густину теплового потоку розраховують за формулою:

$$q = K_q \cdot e_q, \quad (8)$$

де K_q — робочий коефіцієнт (величина зворотна чутливості), $[\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мВ})]$.

Значення коефіцієнта K_q визначають за спеціальними методиками з використанням стендів градування ПТП при радіаційному або кондуктивному підводі теплоти (Грищенко, 2017).

З рівняння (8) випливає, що сила вихідного сигналу e_q ПТП визначається чутливістю $1/K_q$ та густиною теплового потоку q , який проходить через перетворювач. В ІТТФ НАН України розроблені технології виробництва ПТП обумовленої чутливості, тобто перетворювачів, які здатні забезпечити силу робочого сигналу теплометричного пристрою який не потрібно підсилювати при передачі вимірювальними каналами в АСУ ТП. Це спрощує схеми вимірювання сигналу батареї термоелектричних елементів перетворювача і, відповідно, вимірювання потрібної фізичної величини. Поряд з цим в останні роки розповсюдження отримали імпортовані напівпровідникові модулі (рис. 8), що призначені для роботи у якості термоелектричних генераторів струму (Анатичук, Михайловський, Струтинська, & Лудчак, 2009), або холодильних елементів на основі ефекту Пельтьє (Анатичук, 1979).

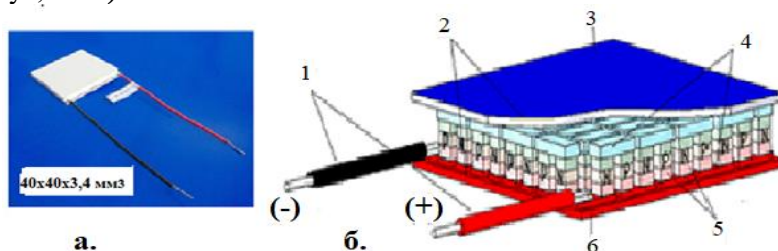


Рис. 8. Зовнішній вигляд (а) та будова (б) термоелектричного модуля

Термоелектричний модуль складається з напівпровідникових елементів р- і n-типу, об'єднаних попарно мідними шинами (комутаційними пластинами) в єдине електричне коло і розташовані між керамічними платами (5 — термоелектричні елементи). Для виготовлення напівпровідникових елементів використовують сплави телуридів і селенідів вісмуту і сурми. Керамічні плати 2 утворюють «гарячу» 6 і «холодну» 3 поверхні термоелектричного модуля. До «гарячої» плити 6 кріпляться вивідні дроти 1 (<https://peltiermodules.com/>).

В Інституті технічної теплофізики НАН України були проведені випробовування трьох типів напівпровідникових модулів щодо можливості їх використання як ПТП (Hotra, Kovtun, & Dekusha, 2021):

- генераторний модуль PG-15-250 розміром $(40 \times 40 \times 3,4) \text{ мм}^3$, який має 200 термоелементів BiTe;

- охолоджувальні модулі Пельтьє TEC1-12703 та TEC1-12706, які мають розмір, відповідно, $(30 \times 30 \times 3,5) \text{ мм}^3$ і $(40 \times 40 \times 3,8) \text{ мм}^3$ та по 127 термоелементів BiSn.

Одночасно визначали метрологічні характеристики серійного біметалевого ПТП, виконаного на замовлення.

Результати визначення деяких метрологічних характеристик пристроїв, при їх випробовуванні як перетворювачів теплового потоку, наведені в табл. 2, де: А — середнє значення коефіцієнта перетворення, K_q , Вт/(м²·мВ); В — найбільша робоча температура, °С; С — стала часу (с) за рівнями 0,63 та 0,95; D — значення коефіцієнта емісії поверхні пристрою ε .

З результатів аналізу отриманих характеристик перетворювачів випливає, що в принципі кожен з них може бути використаний як перетворювач теплового потоку. Водночас кожен з них має як свої переваги, так і свої недоліки. Наприклад,

перевагою модуля TEC1-12706 можна вважати його низьку вартість та високу чутливість (найменше значення коефіцієнта перетворення $K_q = 5,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мВ})$). Але тут потрібно враховувати, що цей біметалевий ПТП був виготовлений на замовлення і за потреби, такий ПТП може бути виготовлений потрібної чутливості, форми та розміру, чого не можна зробити з датчиками, які виготовляються серійно.

Таблиця 2. Результати визначення метрологічних характеристик пристроїв

Пристрій Характеристика	PGM-15-250	TEC1-12703	TEC1-12706	ПТП
A	11	7,5	5,5	32
B	230	138	138	200
C	15/44	16/47	20/57	8/27
D	0,71	0,71	0,71	0,88

До недоліків випробуваних модулів слід віднести їх велику товщину, а отже, великий термічний опір, що відображується на інерційності цих пристроїв. При цьому зазначимо, що стала часу сенсора типу біметалевий ПТП може бути зменшена в рази шляхом підключення коригуючої батареї термоелементів (Декуша, Мазуренко, & Федоров, 1981).

Мета роботи: на основі термоелектричних перетворювачів розробити анемометр для вимірювання розподілення швидкостей потоків газових середовищ, який комплектується портативним вторинним вимірювальним приладом, та анемометр, призначений для використання в системах централізованого контролю параметрів газових середовищ, вихідні сигнали якого не потрібно посилювати для його передачі вимірювальним каналом до АСУ ТП.

Матеріали і методи. Непрямі методи вимірювання неелектричних величин — температури і швидкості руху потоку газового середовища, здійснюються електричними методами, з використанням електричних приладів. Непрямі вимірювання густини теплового потоку здійснюються з використанням методу і приладів теплометрії.

Вимірювання фізичних величин — метод двох вимірювань, або метод надлишкових вимірювань.

Викладення основних результатів дослідження. З метою усунення недоліків, притаманних резистивним термоанемометрам, і використання складних електричних схем для вимірювання неелектричних величин замість терморезисторів — параметричних перетворювачів, як чутливий елемент анемометрів використані термоелектричні, генераторні перетворювачі. Названі вище недоліки резистивних термоанемометрів усунені в конструкціях розробленого диференційного термоелектричного анемометра, чутливим елементом якого є диференційна термопара, а також теплометричного анемометра, чутливим елементом якого є батарея термоелектричних перетворювачів густини теплового потоку.

З метою отримання якомога точніших результатів, вимірювання температури і швидкості руху потоку повітря із застосуванням розроблених анемометрів здійснюються методом надлишкових вимірів (Кондратов, 2012).

Диференційний термоелектричний анемометр (ДТЕА) призначений для «мобільного» контролю розподілення швидкостей потоків газових середовищ. Він комплектується портативним вимірювачем швидкості руху і температури потоків середовищ.

Цей пристрій має два циліндричних чутливих елементи діаметром $d = (0,18 \div 2,0)$ мм і довжиною $l = (10 \div 30)$ мм кожний (рис. 9), які утворені шляхом намотування спіралі нагрівача на диференційну гальванічну термопару.

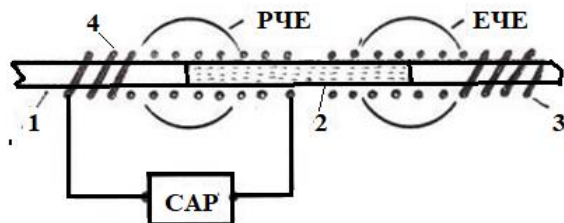


Рис. 9. До будови ДТЕА: 1 — основний термоелектродний дріт; 2 — парний термоелектродний матеріал, нанесений на основний термоелектродний дріт гальванічним способом; 3 та 4 — електричний нагрівач, відповідно РЧЕ та ЕЧ

При вимірах швидкості потоку робочого середовища від системи автоматичного регулювання (CAP) на нагрівач одного з чутливих елементів — робочий чутливий елемент (РЧЕ), подається електрична потужність. На нагрівач другого ЧЕ потужність не подається, він служить еталоном (ЕЧЕ).

Оскільки при вимірах швидкості руху середовища РЧЕ та ЕЧЕ приладу повинні знаходитися в однакових гідродинамічних умовах, то для цього їх розташовують на спеціальних каркасах, конструкції яких визначаються завданнями вимірів. Так, при вимірі швидкості в пристінних прошарках потоку доцільно використовувати конструкції, показані на рис. 10, а, б. При вимірі швидкості ядра потоку пропонується використовувати більш міцну конструкцію каркасу, виконаного у вигляді короткого циліндра (рис. 10, в).

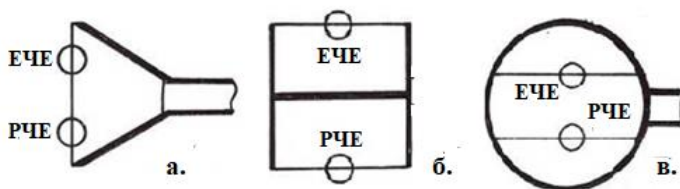


Рис. 10. Розташування чутливих елементів на каркасі приладу

Для системи двох чутливих елементів приладу (двох циліндрів, РЧЕ — 1 та ЕЧЕ — 2) розташованих в однакових гідродинамічних ($\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ — коефіцієнт теплообміну) і теплорадіаційних ($q_1 = q_2 = q_r$ — густина теплового потоку) умовах, на нагрівач одного з яких подається електрична потужність P , справедливі співвідношення:

$$\begin{cases} \pi \cdot d \cdot \alpha \cdot (T_1 - T_{г.с.}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot \pi \cdot d \cdot T_1^4 - q_p \cdot \pi \cdot d \cdot a = P / l \\ \pi \cdot d \cdot \alpha \cdot (T_2 - T_{г.с.}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot \pi \cdot d \cdot T_2^4 - q_p \cdot \pi \cdot d \cdot a = 0, \end{cases} \quad (9)$$

де: $T_1, T_2, T_{г.с.}$ — температура, відповідно, РЧЕ, ЕЧЕ, потоку газового середовища; ε та a — випромінювача та поглинальна здатність поверхонь чутливих елементів приладу; σ — постійна Стефана-Больцмана.

Оскільки гальванічні термопари РЧЕ та ЕЧЕ ввімкнуті між собою диференційно, із системи рівнянь (9) отримаємо робочу залежність приладу:

$$P / l = \pi \cdot d \cdot (T_1 - T_2) \cdot [\alpha + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_1 + T_2) \cdot (T_1^2 + T_2^2)]. \quad (10)$$

Із результатів аналізу цього рівняння випливає, що величина $[\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_1 + T_2) \cdot (T_1^2 + T_2^2)]$ може бути врахована при відомих (вимірних) значеннях T_1 та T_2 . Водночас при малих значеннях діаметра (d) РЧЕ та ЕЧЕ (на практиці до 2,5 мм), коли $\alpha = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_1 + T_2) \cdot (T_1^2 + T_2^2)$, значення цього члена в рівнянні (10) стає настільки малим, що впливом радіаційного потоку енергії на покази приладу можна знехтувати.

Згідно з (Кулинченко, 1990) швидкість руху g повітряного середовища та коефіцієнт теплообміну α пов'язані між собою співвідношеннями:

$$Nu = n \cdot (Re)^m \text{ або } \alpha = n \cdot \lambda \cdot (g / \nu)^m / d^{1-m}, \quad (11)$$

де Nu та Re — числа Нусельта та Рейнольдса; n та m — константи; λ та ν — теплопровідність і кінематична в'язкість повітряного середовища.

З урахуванням виразів (11) приведена до довжини чутливого елемента потужність тепловиділення нагрівача РЧЕ може бути розрахована так:

$$P / l = \pi \cdot d \cdot \Delta T = n \cdot \pi \cdot \Delta T \cdot \lambda \cdot g^m (d / \nu)^m. \quad (12)$$

З результатів аналізу виразу (12) випливає, що вимір швидкості руху потоку газу із застосуванням розробленого ДТЕА можна здійснювати за двома способами. За першим способом, вимірювання швидкості руху потоку газу можна здійснювати при постійній різниці між температурами РЧЕ і ЕЧЕ ($T_1 - T_2 = \Delta T = \text{const}$) ДТЕА, підтримання якої забезпечується використанням САР. При цьому швидкість руху потоку газового середовища можна визначити за величиною електричної потужності нагрівача РЧЕ (рис. 11, а).

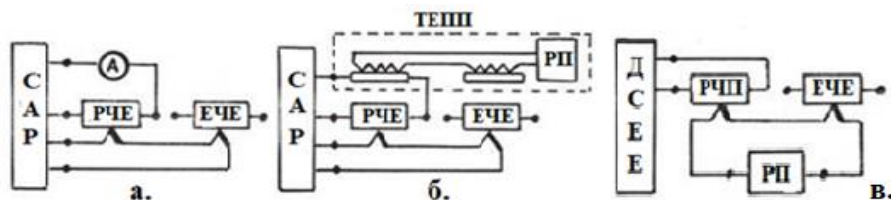


Рис. 11. Електричні схеми ДТЕА

У свою чергу, підведену до нагрівача РЧЕ електричну потужність можна визначати і за допомогою термоелектричного перетворювача потужності ТЕПП (рис. 11, б), який складається з нагрівача, термоелектричного перетворювача густини теплового потоку та регулюючого пристрою (РП).

За другим способом, вимірювання швидкості руху потоку газу пропонується здійснювати при підводі від джерела стабілізованої електричної енергії (ДСЕЕ) до нагрівача РЧЕ ДТЕА постійної електричної потужності. При цьому швидкість руху потоку газового середовища можна оцінити за величиною сигналу диференційної гальванічної термопари пристрою (рис. 11, в).

Результати експериментальних вимірювань швидкості руху газового середовища за першим і другим способами при різних діаметрах чутливих елементів ДТЕА наведені, відповідно, на рис.12 та 13.

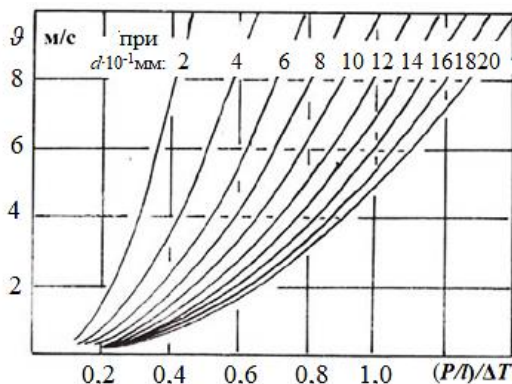


Рис. 12. Залежність виміряної швидкості руху газового середовища від потужності нагрівача РЧЕ ДТЕА при $\Delta T = \text{const}$

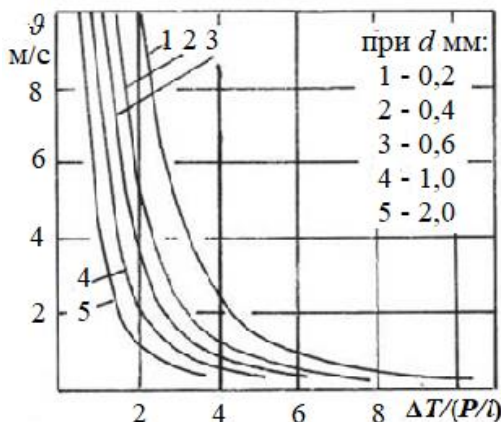


Рис. 13. Залежність виміряної швидкості руху газового середовища від різниці між температурами РЧЕ та ЕЧЕ ДТЕА при $P = \text{const}$ нагрівача РЧЕ

Дані експериментальних досліджень, наведені на рис. 12, свідчать, що розроблений ДТЕА за першим з розглянутих вище способів вимірювання, забезпечує отримання коректних результатів у широкому діапазоні значень швидкості руху газового середовища. Певна річ, зі зменшення діаметра ДТЕА пристрій буде завдавати менших збурень потоку газового середовища, що рухається. Водночас дані, наведені на рис. 12, вказують, що при нагріванні пристрою, при постійній

різниці між температурами його РЧЕ і ЕЧЕ ($T_1 - T_2 = \Delta T = \text{const}$), зі зменшенням діаметра вимірювального пристрою, збільшується його чутливість.

З результатів аналізу даних, наведених на рис. 13, випливає, що в разі нагрівання РЧЕ пристрою, при постійній потужності нагрівача ($P = \text{const}$), коректні результати можуть бути отримані тільки при вимірюванні малих (до 2 м/с) швидкостей руху газового робочого середовища. При цьому разом зі збільшенням діаметра ДТЕА збільшується чутливість пристрою. Оскільки за цим способом не передбачається використання САР, то виміри малих швидкостей можна проводити і тоді, коли протягом технологічного процесу швидкість руху потоку газу змінюється (коливається) з великою частотою.

Друге актуальне питання, яке вирішується в результаті використання розробленого ДТЕА, — це усунення впливу температури (коливання температури) потоку газового середовища на результати вимірювання швидкості його руху.

Як випливає з даних, наведених на рис. 14 та 15, результати вимірювання швидкості руху газового середовища при $\Delta T = \text{const}$, також як і при $P = \text{const}$, залежать від температури потоку. Це пояснюється впливом залежних від температури λ та ν газових середовищ, які входять у рівняння (12).

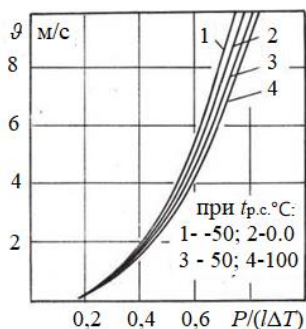


Рис. 14. Залежність вимірюваної швидкості руху потоку газового середовища від температури потоку ($d_{\text{РЧЕ}} = d_{\text{ЕЧЕ}} = 1 \text{ мм}$)

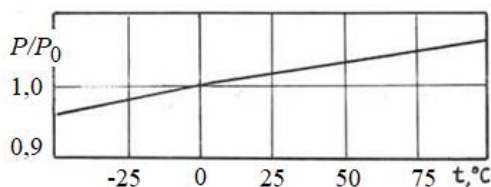


Рис. 15. Залежність приведеної потужності нагрівача РЧЕ приладу від температури газового робочого середовища

Компенсувати вплив температури потоку на результати вимірювання його швидкості руху можна шляхом підтримання під час вимірів постійної різниці потенціалів $\Delta \varphi$, яку генерує диференційна термопара пристрою, що може бути розрахована з рівняння:

$$\Delta \varphi = \rho_1 \cdot \Delta e_{1-2} \cdot \Delta T / (\rho_1 + \rho_2 \cdot s_1 / s_2), \quad (13)$$

де ρ_1 та s_1 , ρ_2 та s_2 — питомий електричний опір і переріз основного (1) та гальванічна нанесеного парного (2) термоелектричних матеріалів (рис. 9); Δe_{1-2} — термо-ЕРС пари термоелектродних матеріалів.

З результатів аналізу рівняння (13) випливає, що при визначенні величини s_2/s_1 (рис. 16) можливо отримати залежність $\Delta\phi$ гальванічної диференційної термопари від температури робочого середовища, яка б компенсувала температурну залежність показів ДТЕА (рис. 15). Так, при використанні термопари копель-мідь градуюють розроблений диференційний термоелектричний анемометр з використанням загальноприйнятої методики і стандартного обладнання.

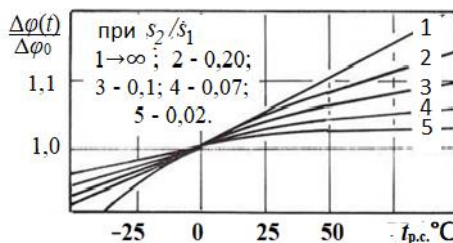


Рис. 16. Залежність приведеної чутливості гальванічної термопари копель-мідь від температури

Теплометричний анемометр призначений для використання в системах централізованого керування швидкістю руху і температурою потоків газових середовищ. Тому параметри пристрою обираються таким чином, щоб його вихідний сигнал не потрібно було б посилювати при передачі вимірювальним каналом в АСУ ТП. В основу роботи теплометричного анемометра покладено закони теплообміну при омивання пластини потоком газового середовища.

У загальному випадку пристрій складається з трьох частин (рис. 17): I — вимірювальний блок; II — блок оперетивної повірки пристрою; III — кінцева частина, які в сукупності мають забезпечити вимірювання швидкості руху потоку газового середовища без збурень потоку.

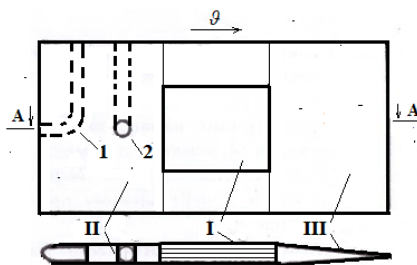


Рис. 17. Зовнішній вигляд теплометричного анемометра

У разі необхідності варто періодично робити калібрування анемометра. У складовій II пристрою можуть бути зроблені отвори — аналоги трубки Прандтля — 1 і трубки Піто — 2 (Яцишин, Попов, & Артемчук, 2014), для вимірювання

з використанням мікроманометра різниці між, відповідно, динамічним P_d і статичним P_c тисками, які створює потік газу, і розрахунку швидкості руху потоку газу за рівнянням:

$$g = \sqrt{2 \cdot (P_d - P_c) / \rho}, \quad (14)$$

де ρ — щільність газу.

Вимірювальний блок I є основним елементом пристрою. Його ЧЕ має розмір $(0,04 \times 0,04 \times \delta) \text{ м}^3$, де $\delta \leq (1,5 \div 2,5) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ — товщина одного з 4 елементів блоку. Будова вимірювального блоку та його електрична схема заміщення наведені на рис. 18.

Датчики температури, ТО або ТП (на рис. 18 не показані), монтуються з обох боків вимірювального блоку I в центрі термоелектричних перетворювачів теплового потоку 2 та 5, безпосередньо під тонким низькоемісійним покриттям 1. Теплометричний анемометр поміщають у повітропровід загального призначення або у спеціальний короб.

Теплообмін між потоком газу і вимірювальним блоком відбувається з обох поверхонь пластини анемометра, при цьому електрична потужність P нагрівача блоку вимірювання (скалярна величина) перетворюється у дві векторні величини (густини теплового потоку q_1 та q_2). Електрична схема заміщення (рис. 18, б) пристрою може мати вигляд двох паралельних гілок. Одну з паралельних гілок утворюють три, включені між собою послідовно, термічні опори (додатковий — $R_d = \delta_d / \lambda_d = 1,5 \cdot 10^{-3} / 0,2 = 7,5 \cdot 10^{-3}$, ПТП — $R_{\text{п}} = \delta_{\text{п}} / \lambda_{\text{п}} = 2 \cdot 10^{-3} / 0,2 = 1 \cdot 10^{-3}$, та опір конвективно-радіаційному теплообміну — $R_{\text{кр}} = 1/\alpha \text{ [м}^2 \cdot \text{К/Вт)]}$, а другу — два термічні опори ($R_{\text{п}}$ та $R_{\text{кр}}$).

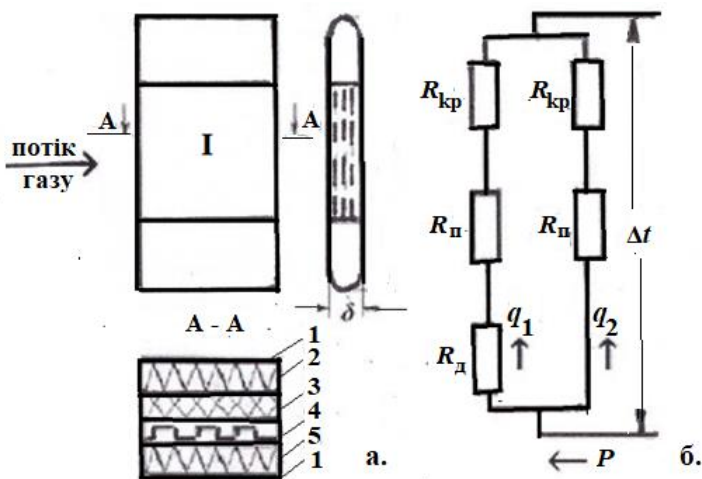


Рис. 18. Вимірювальний блок (а) теплометричного анемометра та електрична схема його заміщення (б): 1 — тонке низькоемісійне покриття (ступінь чорноти $\epsilon < 0,1$); 2, 5 — термоелектричний перетворювач теплового потоку; 3 — додатковий термічний опір; 4 — електричний нагрівач

У результаті розв'язку системи рівнянь, що описують електричну схему заміщення теплометричного анемометра,

$$\begin{cases} (R_d + R_n + R_{kr}) \cdot q_1 = \Delta T \\ (R_n + R_{kr}) \cdot q_2 = \Delta T \end{cases} = \begin{cases} (R_d + R_n + 1/\alpha) \cdot q_1 = \Delta T \\ (R_n + 1/\alpha) \cdot q_2 = \Delta T \end{cases} \quad (15)$$

відносно α при складному конвективно-радіаційному теплообміні одержимо:

$$\alpha = \frac{(q_2 / q_1) - 1}{R_d - [(q_2 / q_1) - 1] \cdot R_n}, \quad (16)$$

де ΔT — різниця між температурами поверхонь пластини приладу і температурою газового середовища $\alpha = \alpha_k + \alpha_r$ — коефіцієнт тепловіддачі, як сума коефіцієнтів тепловіддачі при конвективному $\alpha_k = f(\vartheta)^n$ і радіаційному $\alpha_r = 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^3$ теплообміні (ε та σ — випромінювача поверхонь чутливих елементів приладу та постійна Стефана-Больцмана).

Критеріальне рівняння, яким описують теплообмін при ламінарному перебігу ($Re_{l,r} < 5 \cdot 10^5$) газу, що омиває плоску поверхню, має вигляд (Кулинченко, 1990):

$$Nu = 0,57 \cdot Re^{0,5}, \quad (17)$$

де $Nu = \alpha_k \cdot l / \lambda$ — критерій Нусельта (α_k — коефіцієнт тепловіддачі при конвекційному теплообміні, l — визначальний розмір, λ — коефіцієнт теплопровідності газового середовища; $Re = \vartheta \cdot l / \nu$ — критерій Рейнольдса (ϑ та ν — швидкість руху потоку та кінематична в'язкість газового середовища).

У результаті розрахунку з використанням рівнянь (16) та (17) отримуємо, що при температурі 0°C швидкість руху потоку газового середовища лінійно залежить від результату вимірювання сигналів e_1 та e_2 ПТП анемометра ($q_1 = e_1/K$ та $q_2 = e_2/K$, де $1/K$ — чутливість ПТП, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мВ})$ — рис. 19).

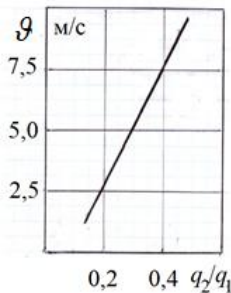


Рис. 19. Результат розрахунку функції $G(q_2/q_1)$

Висновки

1. Розроблений диференційний термоелектричний анемометр, який може працювати з портативним вторинним вимірювальним приладом та призначений для контролю розподілення швидкостей і температури потоків газових середовищ у процесі термічної обробки харчових продуктів.

2. Розроблений теплотричний анемометр, призначений для використання в системах централізованого контролю швидкості руху і температури потоків газових середовищ, вихідний сигнал якого не потрібно посилювати при його передачі вимірювальним каналом в АСУ ТП.

3. Для забезпечення вимірювання всього комплексу параметрів газового середовища в процесах термічної обробки харчових продуктів потрібно проаналізувати існуючі та за потреби розробити нові пропозиції щодо їх вдосконалення або розробки нового типу гігрометра, вихідний сигнал якого не потрібно посилювати при його передачі вимірювальним каналом в АСУ ТП.

Література

Анатичук Л. И. (1979) Термоэлементы и термоэлектрические устройства. (Справочник). Киев: Наукова думка. https://www.studmed.ru/anatychuk-li-termoelementy-i-termoelektricheskie-ustroystva-spravochnik_ea95bb3345d.html.

Анатичук Л. И., Михайловский В. Я., Струтинская Л. Т., Лудчак И. Ю. (2009). Термоэлектрический генератор для питания маломощной электронной аппаратуры газораспределительных станций. *Наука та інновації*, 5 (5), 34—41. <http://scinn.org.ua/sites/default/files/pdf/2009/N5/Anatichuk.pdf>

Грищенко Т. Г. (ред.), Декуша, Л. В., Воробьев Л. Й., Бурова З. А., Ковтун С. И., Декуша О. Л. (2017). Теплометрия: теория, метрология, практика. ISBN 978-966-02-8199-8 Кн. 1: Методы и средства измерения теплового потока. К.: Институт технической теплофизики НАН Украины.

Ковальчук В. В., Лучко Й. Й. (2011). Багатофункціональні тензорезистори (давачі). *Вісник ДНУЗТ*, 39, 72-82.

Кондратов В. Т. (2012). Фундаментальная метрология. Персональный сайт профессора Кондратова В. Т. *Главные научные труды* (2001—2012). <http://kondratov.com.ua/index.php/nauchnye-trudy-111/glavnye-trudy-2001-2012-gg>

Кулинченко В. Р. (1990). Справочник по теплообменным расчетам. К.: Техника. <https://dspace.nuft.edu.ua/jspui/handle/123456789/3178?locale=en>.

Луцик Я. Т., Буняк Л. К., Рудавський Ю. К., Стадник Б. І. (2003). Енциклопедія термометрії. Львів: Видавництво Львівської політехніки. <https://vlp.com.ua/node/350>.

Федоров В. Г. (1987). *Основы тепломассометрии*. К.: Вища школа.

Якість і безпека харчових продуктів: Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції, м. Київ, 20-21 листопада 2019 р. К. : НУХТ. <https://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/30757/1/Drichiktut.pdf>

Яцишин А. В., Попов О. О., Артемчук В. О. (2014). Методи вимірювання параметрів навколишнього природного середовища. *Вісник НТУ «ХПИ»*, 40 (1083), 130—137. <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/05164ae0-4235-495d-9a55-f02362e27d12>.

Burgess, W. A., Ellenbecker, M. J., Treitman, R. D. (2004). Airflow measurement techniques. Ventilation for control of the work Environment. Wiley-Interscience; Hoboken, New Jersey: 440. <https://doi.org/10.1002/0471667056.ch3>.

Coastal Wiki, Souza Dias, (2020). Francisco: Temperature sensors. Available from http://www.coastalwiki.org/wiki/Temperature_sensors.

Electronoff. (2023). Что такое анемометр и что им измеряют? <https://electronoff.ua/academy/post/chto-takoe-anemometr-i-chto-im-izmeryayut.php>

Foss, J. F., Peabody, J. A., Norconk, M. J., Lawrenz, A. R. (2006). Ambient temperature and free stream turbulence effects on the thermal transient anemometer. *Meas. Sci. Technol.*, 17(9), 2519—2526. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/17/9/020>.

Hotra, O., Kovtun S., Dekusha, O. (2021). Analysis of the Characteristics of Bimetallic and Semiconductor Heat Flux Sensors for In-Situ Measurements of Envelope Element Thermal Resistance. Measurement, 109713. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109713> SCOPUS.

Ikeya Y., Örlü R., Fukagata K., Alfredsson P.H. (2017). Towards a theoretical model of heat transfer for hot-wire anemometry close to solid walls. *Intern. J. Heat and Fluid Flow*, 68, 248—256. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2017.09.002>.

Manshadi, M. D., Esfeh, M. K. (2012). A new approach about heat transfer of hot-wire anemometer. *Appl. Mech. and Materials*, 232, 747—751. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.232.747>.

Örlü, R., Vinuesa, R. (2017). Thermal anemometry. In book: Discetti S., Ianiro A. (eds.) *Experimental Aerodynamics*. USA, Florida: CRC Press, 257–304. <https://doi.org/10.1201/9781315371733-12>.

O’Sullivan, J., Ferrua, M., Love R., Verboven, P., Nicolai, B., East, A. (2014). Airflow measurement techniques for the improvement of forced-air cooling, refrigeration and drying operations. *J. Food Eng*, 143, 90—101. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.06.041>.

Ower, E., Pankhurst, R. C. (2014). *The Measurement of Air Flow*. United Kingdom, Oxford: Pergamon.

Saremi, S., Alyari, A., Feili, D., Seidel, H. (2014). A MEMS-based hot-film thermal anemometer with wide dynamic measurement range. *Proc. IEEE Conf. on Sensors (SENSORS’2014)*. Valencia, Spain. 2–5, 420–423. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2014.6985024>.