

УДК 621.3.08:543.257.1.08

HEAT THERMOELECTRIC DEVICES FOR MEASURING HUMIDITY AND TEMPERATURE OF GASEOUS MEDIA

O. Mazurenko

National University of Food Technologies

L. Dekusha, S. Ivanov

Institute of Engineering Thermophysics of Ukraine National Academy of Sciences

Key words:

*Humidity
Temperature
Gaseous medium
Sensor
Parametric
Generator*

Article history:

Received 10.01.2024
Received in revised form
26.01.2024
Accepted 13.02.2024

Corresponding author:

O. Mazurenko

E-mail:

rovgi18-1@ukr.net

Citation: О. Г. Мазуренко
Л. В. Декуша, С. О. Іва-
нов (2024). Тепло термо-
електричні пристрої вимі-
рювання вологості і темпе-
ратури газових середовищ.
Наукові праці НУХТ,
30(1), 91—104.
DOI: 10.24263/2225-2924-
2024-30-1-10

ABSTRACT

A major share of humidity measurements in industry and everyday life is the measurement of air humidity. Thus, in the food industry, a significant number of technological processes of products are carried out using gaseous media, the values of the parameters of which, such as temperature, rate of motion, humidity and others, must be controlled, since the optimal conditions for their processing are different for various products. For example, in food storage rooms it is usually desirable to maintain a stable temperature (about 0 °C) and a very high relative humidity (85÷90)%, and in some cases even higher. At the same time, a change in storage conditions towards higher humidity can lead to the appearance of mold, and a decrease in humidity will lead to a loss of product mass due to evaporation.

Modern methods for measuring the humidity of gases are varied, the most widely used methods are characterized by the use of the condensed phase, in particular the effect (reaction) of water vapor in the gas phase on condensed systems.

The classification of these methods is given in the paper. It is noted that methods based on changes in electrical conductivity or the amount of electricity required for quantitative electrolysis of condensed moisture became widely used.

The results of the development of a method and thermal and thermoelectric devices for measuring the humidity and temperature of the gaseous medium of thermal processing of food products are presented.

DOI: 10.24263/2225-2924-2024-30-1-10

ТЕПЛОТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ПРИСТРОЇ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ І ТЕМПЕРАТУРИ ГАЗОВИХ СЕРЕДОВИЩ

О. Г. Мазуренко

Національний університет харчових технологій

Л. В. Декуша, С. О. Іванов

Інститут технічної теплофізики НАН України

Основна частина вимірювань вологості у промисловості та в побуті припадає на вимірювання вологості повітря. Так, у харчовій промисловості значна кількість процесів технологічної обробки продуктів здійснюється з використанням газових середовищ, значення параметрів яких (температуру, швидкість руху, вологість тощо) необхідно контролювати, оскільки для різних продуктів оптимальні умови їх обробки є різними. Наприклад, у камерах зберігання харчових продуктів рекомендовано підтримувати стабільні температуру (близько 0 °C) і висушку відносну вологість (85% і вище залежно від типу продукту). При цьому перевищення рекомендованих значень вологості газу може призвести до появи цвілі, а зниження вологості призведе до втрати маси продукту внаслідок випаровування.

Сучасні методи вимірювання вологості газів численні й різноманітні, однак найбільш широко використовуються методи, для яких характерне використання конденсованої фази, зокрема впливу (реакції) водяної пари газової фази на конденсовані системи.

У статті розглянуто класифікацію цих методів. Зазначено, що широкого застосування набули методи, засновані на зміні електропровідності або кількості електрики, потрібної для кількісного електролізу сконденсованої вологи. Наведено результати розробок методу й теплотермоелектричних приладів вимірювання вологості й температури газового середовища термічної обробки харчових продуктів.

Ключові слова: вологість, температура, газове середовище, перетворювач, параметричний, генераторний.

Постановка проблеми. Інформацію про вологість різноманітних газових середовищ, передусім повітря, потребують практично всі напрямки життєдіяльності людини: від сільського господарства і харчової промисловості до медицини. Необхідність моніторингу параметрів газового середовища спонукала до появи різних методів і засобів вимірювання вологості й температури газів. Проте невпинний розвиток промисловості, а також поява нових завдань та умов для моніторингу параметрів газу потребує розвитку нових методів і засобів контролю цільових величин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Так, прогнозоване зростання популяції людства, яке випереджає швидкість збільшення площ орних земель, необхідних для задоволення майбутніх потреб у продовольстві, підвищує вимоги до ефективності наявних сільськогосподарських ресурсів. Альтернативою традицій-

ним методам ведення сільського господарства є вирощування сільськогосподарських культур у контрольованому середовищі, наприклад, у теплицях (Думанський, & Корольков, 2023) або системах з використанням елементів гідро- та аеропоніки (Imran Ali Lakhari, Jianmin Gao, Tabinda Naz Syed, Farman Ali Chandio, & Noman Ali Buttar, 2018), які, зазвичай, є більш продуктивними та використовують ресурси ефективніше, ніж традиційне сільське господарство (Rabbi, Chen, & Sethuvenkatraman, 2019; Sharma, Acharya, Kumar, Singh, & Chaurasia, 2018).

Разом з вирішенням потреб у продовольстві необхідно забезпечити здоров'я населення, тобто розвиток медицини і здоровий побут кожної людини (Осадчук, Савицький, & Жагловська, 2014). Так, наприклад, дослідження дихання людини є перспективним напрямком, що має потенціал для досягнення неінвазивного методу контролю фізичного здоров'я людини. Це забезпечується використанням гнучких датчиків вологості для визначення поведінки дихання, наприклад, безперервності, частоти (Tai, Wang, Duan, & Jiang, 2020). І хоча існує багато методів вимірювання вологості газового середовища (повітря), а також різноманітних засобів вимірювання, реалізованих на їх основі, вимірювання вологості газових середовищ, у тому числі повітря, поки що не є сталим напрямом вимірювальної техніки і пошук нових методів продовжується (Кононов, Кононова, & Олексюк, 2021). Це обумовлено тим, що в одному випадку потрібні прилади для вимірювання невеликої кількості вологи в повітрі, в іншому — потрібно фіксувати невеликий діапазон значень вологості, в третьому — виникає необхідність контролю вологості в широкому температурному діапазоні. Особливість цього параметра повітря полягає в тому, що волога в повітрі може знаходитися у трьох фазах: газоподібній (водяна пара), рідкій (вода) і твердій (лід).

Вищезначені фактори сприяють неперервній розробці нових засобів вимірювання температури й вологості повітря. Наприклад, спроектовано прилад для вимірювання температури та вологості на платформі Arduino ATmega328P (Wibawa, & Putra, 2022). Мікроконтролер ATmega328P опрацьовує дані, що є вихідними даними датчика DHT22, який отримує сигнали у вигляді температури та вологості.

Розвиток промисловості ставить перед науковцями завдання щодо підвищення точності вимірювання й отримання достовірної інформації про контрольований параметр — температуру і вологість газового середовища термічної обробки різноманітних об'єктів. Це завдання особливо актуальне для технологічних процесів харчової промисловості (Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції, 2019) та сільського господарства (Kotner, & Challa, 2003), адже похибка вимірювання чи недостовірність отриманої інформації (Кузик, Балицька, & Ярицька, 2011) може призвести до збільшення втрат сировини або випуску неякісного продукту.

Методи вимірювання вологості поділяються на прямі й непрямі. У прямих методах проводиться безпосередній поділ вологого матеріалу на суху речовину і вологу. У непрямих методах, більш поширених, вимірюється величина, функціонально пов'язана з вологістю повітря. Для встановлення залежності між вологістю повітря і вимірюваною величиною прилади, які реалізують непрямі методи, вимагають попереднього калібрування, але саме ці прилади широко використовують в АСУ ТП (Nilsson, Lars-Olof (Ed.), 2018).

На практиці вологість повітря характеризують низкою параметрів, більшість з яких пов'язані між собою рівняннями (Яворський, Детлаф, & Лебедев, 2007):

1. *Абсолютна вологість* α — маса водяної пари, що міститься в одиниці об'єму повітря, інакше кажучи, це густина ρ водяної пари в повітрі, (г/м³, кг/м³).

2. *Парціальний тиск вологого повітря (газу)* $p_{\text{вп}}$ за певної температури, вимірюється в гектопаскалях (гПа).

3. *Тиск насичення* $p_{\text{н}}$ — максимально можливий парціальний тиск насиченої водяної пари [гПа] за певної температури. Тиск насичення пов'язаний з температурою повітря (газу) формулою Магнуса:

$$p_{\text{нт}} = p_0 \cdot 10^{[a \cdot t / (b+t)]}, \quad (1)$$

де p_0 — тиск насичення при температурі 0 °С; t — температура за шкалою Цельсія; a і b — константи (для води $a = 7,63$; $b = 241,9$).

4. *Відносна вологість повітря* φ — це відношення абсолютної вологості повітря за певної температури до густини насиченої водяної пари за тієї ж температури, або відношення парціального тиску водяної пари в газовому середовищі за певної температури до тиску насиченої водяної пари за цієї самої температури, а також відношення густини вологого повітря за певної температури до густини насиченої водяної пари, за тієї ж температури:

$$\varphi = p_{\text{вп}} / p_{\text{н.с}} \quad \text{або} \quad \varphi = \rho_{\text{вп}} / \rho_{\text{н}}. \quad (2)$$

5. *Температура точки роси* t_p , К, або T_p , К — температура, за якої водяна пара, що міститься в повітрі, стає насиченою, і φ досягає 100%:

$$\varphi = 1, \quad \text{тобто} \quad p_{\text{вп}} = p_{\text{н}}. \quad (3)$$

В абсолютній більшості промислових і побутових приладів для визначення вологості повітря (газів) використовують параметричні перетворювачі, що ускладнює засоби вимірювання, особливо пов'язані з АСУ ТП (Лукінюк та ін., 2017). Отже, удосконалення існуючих або розробка нових методів і приладів вимірювання вологості повітря (газів) та функціонально пов'язаних з вологістю фізичних величин є актуальним завданням. На нашу думку, у таких приладах доцільніше використовувати генераторні перетворювачі, зокрема термоелектричні перетворювачі густини теплового потоку і температури термоелектричного типу.

Для визначення вологості повітря на практиці переважно застосовують психрометричний метод, гігроскопічний метод і метод точки роси, при чому психрометричний метод є найпоширенішим.

Психрометричний метод — це непряме вимірювання вологості газів, засноване на залежності зниження температури (охолодження) змоченого твердого тіла від вологості навколишнього газового середовища. Пристрої, за допомогою яких реалізується цей метод, — психрометри, отримали найбільше розповсюдження у промисловості та побуті.

Загалом, психрометр (гігрометр психрометричний) складається з двох перетворювачів температури (ПТ). Чутливий елемент (ЧЕ) одного з ПТ пристрою обгорнутий капілярно-пористим матеріалом, що зволожується дистильованою водою. Випаровування води з матеріалу, яке відбувається шляхом поглинання необхідної для цього теплоти з навколишнього повітря, спричиняє охолодження цього чутливого елемента до рівноважного значення температури T_m — так званої

«термодинамічної температури мокрого термометра». Відповідно, під температурою мокрого чутливого елемента перетворювача розуміють температуру, якої набуває вологе повітря в результаті його адіабатичного насичення (зволоження).

Другий ПТ психрометра використовується для вимірювання температури вологого повітря (середовища) $T_{\text{вп}}$, яке досліджується, відповідно так званої, тобто «температури сухого термометра» T_c . Отже, чим нижча відносна вологість повітря, тим інтенсивніше проходить процес випаровування, тим більша різниця в показках сухого та мокрого ПТ пристрою.

За результатами розрахунку ентальпії вологого повітря на «вході» і на «виході» з психрометра, відповідно, при температурах сухого $T_{\text{вп}}=T_c$ та мокрого T_m термометрів пристрою отримано формулу визначення парціального тиску водяної пари $p_{\text{вп}}$ у вологому повітрі, яка описує залежність між значеннями обох термометрів, і тиском пари:

$$p_{\text{н.м}} - p_{\text{ср}} = A \cdot p_6 \cdot (T_c - T_m), \quad (4)$$

де A — стала психрометра, приймається рівною 0,0007947 при $p_A=1000$ гПа.

У результаті ділення обох частин рівняння (4) на величину парціального тиску насиченої пари $p_{\text{н.с}}$ при T_c температурі сухого термометра отримаємо рівняння розрахунку відносної вологості дослідного повітря:

$$\varphi = [p_{\text{н.м}} - A \cdot p_A \cdot (T_c - T_m)] / p_{\text{н.с}}. \quad (5)$$

Оскільки значення порційного тиску насиченого пару p_c та p_m однозначно визначаються температурами, відповідно, сухого і мокрого термометрів психрометра, то при $A = \text{const}$, можна отримати залежність:

$$\varphi = f(t_c - t_m, t_c). \quad (6)$$

З використанням цієї залежності, розраховуються психометричні таблиці. Оскільки константа A залежить від умов відведення теплоти від термометрів у зовнішнє середовище, її величина, а отже, і психометричні таблиці, можуть відрізнятися між собою. Але принцип дії всіх психрометрів однаковий.

Як ПТ у психрометрах використовують ртутні та спиртові термометри розширення, манометричні термометри та різні види електричних термометрів (опору, термістори, термопарі).

Термометри розширення використовують у так званих стаціонарних (типу Августа) та аспіраційних (типу Асмана) психрометрах (рис. 1). Конструктивно між собою ці види психрометрів відрізняються лише наявністю вентилятора в аспіраційних психрометрах, який продукує потік повітря зі швидкістю близько 2 м/с, що інтенсифікує процес випаровування вологи з чутливого елемента мокрого термометра пристрою.

Психрометри з манометричними й електричними перетворювачами температури можна використовувати для дистанційного вимірювання відносної вологості газових середовищ і вимірювальними каналами передавати результат в АСУ ТП.

На рис. 2 приведений електричний психрометр фірми Ultrakust з електростимульованим обдуванням сухого і мокрого електричних термометрів. Циркуляція повітря в такому пристрої здійснюється за допомогою вентилятора, що приводиться в дію пружинною механічною системою (у найпростіших моделях) або електродвигуном (у моделях з безперервним надходженням води).

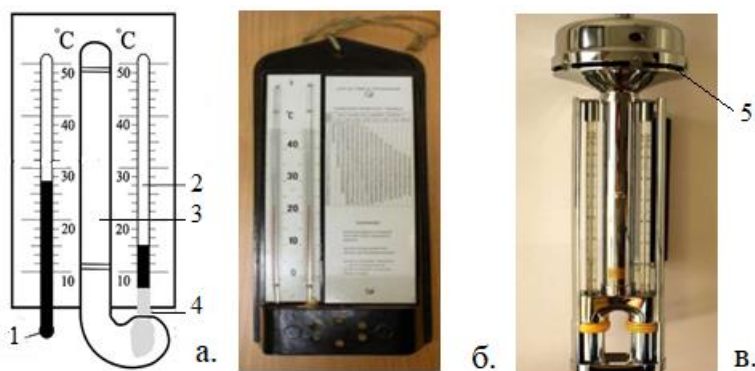


Рис. 1. Будова психрометра (а), зовнішній вигляд стаціонарного (б) і аспіраційного (в) психрометрів: 1 та 2 — сухий і мокрий термометри; 3 — балон з водою; 4 — тканина з водою; 5 — вентилятор

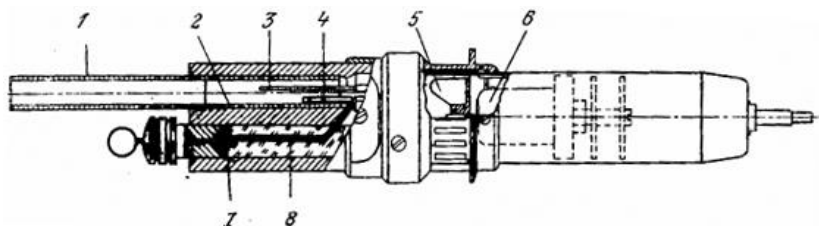


Рис. 2. Електричний психрометр конструкції фірми Ultrakust:
1 — трубка обдування; 2 — металева гільза; 3 та 4 — сухий і мокрий електричні термометри; 5 — двигун вентилятора; 6 — вентилятор; 7 — резервуар із дистильованою водою; 8 — вологий матеріал

Важливою перевагою психрометрів — висока відтворюваність результатів вимірювань і незначна інерційність при простоті будови цих приладів. Чутливість психрометра залежить тільки від чутливості ПТ.

За температури повітря вище 0°C психрометри працюють із похибкою $\pm(1\div 2)\%$. Верхня межа вимірювання обмежена тим, що температура мокрого термометра повинна бути менша за температуру кипіння води.

За температури повітря нижче 0°C точність показів психрометрів різко знижується через кристалізацію води для мокрого термометра. При цьому виникають труднощі із забезпеченням безперервного підведення досліджуваного вологого повітря до поверхні чутливого елемента мокрого термометра і у визначенні фазового стану води на цій поверхні. Це є джерелом невизначеності результату вимірювання, оскільки парціальні тиски над поверхнею перехолодженої рідини та льоду відрізняються.

Недоліками психрометрів також є залежність їхніх показів від зміни швидкості руху середовища, атмосферного тиску, додаткового підведення теплоти до поверхні випаровування випромінюванням і відведення теплоти по висоті термометра теплопровідністю.

Гігроскопічний метод ґрунтується на здатності деяких матеріалів змінювати свої властивості (форму, розміри, електропровідність тощо) внаслідок поглинання води з повітря в кількості, пропорційній його відносній вологості.

В електролітичних гігрометрах складовою чутливого елемента (ЧЕ) вимірювального перетворювача є електроліт — найчастіше хлористий літій, LiCl . При вимірюваннях зміна вологості повітря (газу) викликає зміну кількості води, що міститься в чутливому до води елементі перетворювача, тобто зміну концентрації електроліту у ЧЕ та відповідну зміну його електричних властивостей — опору або ємності.

Вимірювальні схеми електролітичних гігрометрів — це варіанти мостових вимірювальних схем. До недоліків електролітичних гігрометрів слід віднести нестабільність їх калібрувальних характеристик, а також вплив температури і концентрації розчиненої речовини на їхні показання.

Конструктивно, електролітичні перетворювачі можуть бути без підігріву електроліту (рис. 3, а) або з підігрівом (рис. 3, б). І якщо за будовою вони принципово не відрізняються, то відмінність за принципом дії у них суттєва.

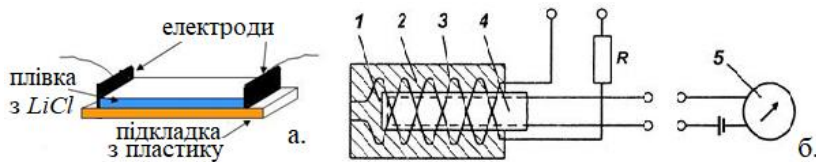


Рис. 3. Гідролітичний гігрометр без підігріву (а) та з підігрівом (б)

Так, у разі підключення електродів гігрометра до джерела змінної напруги в розчині електроліту діятиме електричний струм, який нагріває його і викликає випаровування води. Після випаровування води струм, що проходить між електродами, різко зменшується, оскільки провідність кристалічного LiCl значно нижча за провідність розчину, і, відповідно, знижується температура перетворювача. Одночасно хлорид літію, який має високу гідрофільність, знову адсорбує водяну пару з повітря, що призводить до збільшення сили струму і температури перетворювача. Так автоматично підтримується режим, що відповідає рівноважному стану між парціальним тиском парів води в аналізованому газі та парціальним тиском пари над насиченим розчином електроліту. Ця рівновага настає за температури, безпосередньо пов'язаної з тиском пари і також із температурою точки роси. Отже, у цій системі регулювання здійснюється за допомогою самого хлориду літію. Приклад конструкції перетворювача цього типу наведено на рис. 3, б.

Чутливий елемент приладу являє собою тонкостінну трубку з нержавіючої сталі, покриту скловатою 2, що просочена розчином хлористого літію. На зовнішню поверхню скловати намотані ізольовані одна від одної спіралі 3 (електроди) зі срібного дроту. Щоб уникнути поляризації, спіралі живляться змінним струмом. Зверху на елемент надягають металеву трубку із сітчастою вставкою, яка затримує сильні газові струмені. Всередині трубки 1 поміщається малоінерційний термометр опору 4, до якого підключений вимірювальний прилад 5.

Мета дослідження: розвиток методу вимірювання температури і вологості газових середовищ з використанням термоелектричних перетворювачів температури і густини теплового потоку, а також розробка засобів вимірювання як елементів системи централізованого контролю параметрів газових середовищ для реалізації запропонованого методу на практиці.

Матеріали і методи. Непрямі методи вимірювання температури потоку повітря передбачають застосування методів термометрії з використанням термоелектричних перетворювачів температури (Луцик, Буняк, Рудавський, & Стадник, 2003).

Непрямі вимірювання густини теплового потоку і потоку маси вологи, що випаровується, здійснюються з використанням методів і приладів тепломасометрії (Федоров, 1987).

Вимірювання комплексів фізичних величин здійснюються методом двох вимірювань, або методом надлишкових вимірювань.

Викладення основних результатів дослідження. Для усунення недоліків вимірювання параметрів вологого повітря, що властиві параметричним перетворювачам, які використовуються в психрометричних і сорбційних гігрометрах, а також у конденсаційних приладах, у розроблених пристроях вимірювання здійснюється з використанням термоелектричних перетворювачів температури, густини теплового потоку (ПТП), а також тепломасомірів (Грищенко 2017), що суттєво спрощує схеми передачі їх сигналів до АСУ ТП (Бабак, 2017).

З метою підвищення точності результатів вимірювання параметрів вологого повітря при розробці теплометричних гігрометрів враховували можливість здійснення надлишкових вимірювань (Щербань, & Корогод, 2021) та одержання додаткової інформації про параметри вологого повітря (Shcherban та ін., 2019).

Оскільки в розроблених приладах вологість газового середовища визначається з використанням термоелектричних перетворювачів теплового потоку (ПТП), наведено рівняння теплового балансу поверхні ПТП приладу, на яку в результаті теплообміну з вологим середовищем діє тепловий потік сумарною густиною q_{Σ} :

$$q_{\Sigma} = \alpha_k \cdot (T_{\text{п}} - T_{\text{сп}}) + r \cdot \beta_p \cdot (P_{f(T_{\text{п}})} - P_{\text{сп}}) + a \cdot q_{\text{дж}} + a_{\text{ф}} \cdot q_{\text{ф}} + \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{\text{п}}^4 \quad (7)$$

Рівняння (7) є сумою складових густини теплових потоків:

- конвективного теплообміну $q_k = \alpha_k \cdot (T_{\text{п}} - T_{\text{вп}})$, де α_k — коефіцієнт конвективного теплообміну, $T_{\text{п}}$ та $T_{\text{вп}}$ — температура, відповідно, поверхні теплообміну (ПТП) та вологого повітря;

- масообміну $q_j = r \cdot \beta_p \cdot (p_{T_{\text{п}}} - p_{\text{вп}})$, де r — прихована теплота випаровування, β_p — коефіцієнт масообміну, $p_{T_{\text{п}}}$ та $p_{\text{вп}}$ — парціальний тиск як функція температури теплообміну та парціальний тиск вологого повітря;

- фонового випромінювання $q_{\text{ф}} = a_{\text{ф}} \cdot q_{\text{дж}}$, де $a_{\text{ф}}$ та $q_{\text{ф}}$ — коефіцієнт поглинання поверхнею теплообміну (ПТП) фонового випромінювання та густина фонового випромінювання джерела теплової енергії;

- радіаційного теплообміну з джерелом теплового випромінювання $q_p = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{\text{п}}^4$, де ε — випромінювальна здатність поверхні чутливого елемента приладу; σ — стала Стефана-Больцмана.

Теплотермоелектричний гігрометр (ТТЕГ). Вологість повітря з використанням розробленого пристрою ТТЕГ визначається за результатами вимірювання теплоти випаровування з поверхні «зволожених» ПТП і показів «сухих» ПТП з розташованими на їх поверхні, відповідно, «зволоженими» і «сухими» ЧЕ ПТ, тому розроблений прилад назвали теплотермоелектричний гігрометр (ТТЕГ).

Для контролю параметрів вологого повітря (рис. 4, а) пристрій ТТЕГ (І) розміщують на ділянці повітропроводу (ІІ) таким чином, щоб усі його вимірювальні перетворювачі знаходилися в однакових гідродинамічних умовах. З метою вирівнювання потоку повітря й усунення збурень від роботи витяжного вентилятора ділянка повітропроводу зі змонтованим ТТЕГ з обох боків обмежена решітками (ІІІ). Для забезпечення процесу вимірювання параметрів вологого повітря первинні перетворювачі ТТЕГ об'єднані у дві однакові групи (рис. 4, б).

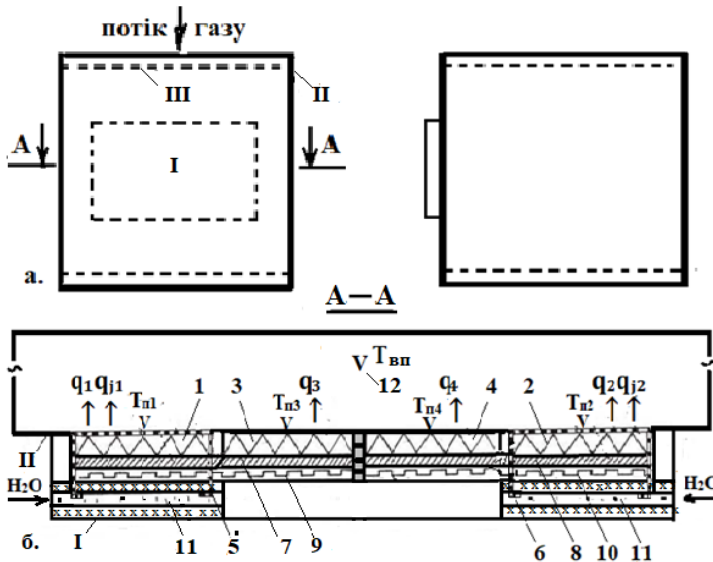


Рис. 4. Теплотермоелектричний гігрометр

Першу групу утворюють ПТП (1 і 3), з розміщеними на їх поверхні ЧЕ (T_{n1} і T_{n3}) ПТ. До другої групи відносяться ПТП 2 та 4, з розміщеними на їх поверхні ЧЕ (T_{n2} і T_{n4}) ПТ. З метою вирівнювання температури перетворювачі першої групи розташовані на високотеплопровідній пластині 7, а другої групи — на пластині 8.

Один з ПТП кожної з цих груп, зокрема ПТП 1 та ПТП 2, вкрито шаром капілярно-пористого матеріалу 5 та 6, у який вмонтовано ЧЕ ПТ, відповідно, T_{n1} та T_{n2} . Ці матеріали, а отже, вкриті ним ПТП і ЧЕ ПТ постійно звожуються через дренажні канали 11. Це так звані «мокрі» перетворювачі ТТМП. Відповідно, ПТП 3 і 4 зі змонтованими на їх поверхні ЧЕ T_{n3} і T_{n4} ПТ — це «сухі» перетворювачі пристрою.

Для утворення потрібної температури випаровування води з поверхонь звожених ПТП встановлено електричні нагрівники (Анатичук, & Михайловський, 2008), або термоелектричні теплообмінники, що працюють на основі ефекту

Пельтье (Анатичук, 1979). Кожен з цих теплообмінних пристроїв, 9 та 10, під'єднано до двох індивідуальних регуляторів напруги. Один з регуляторів забезпечує стабільність температури випаровування води з поверхонь «мокрих» ПТП, а другий — підтримує задану різницю температур між групами перетворювачів ТТМП. При цьому різницю між температурами поверхонь випаровування води обирають з міркувань забезпечення рівності коефіцієнтів масовіддачі для обох груп термоелектричних перетворювачів пристрою. Зазвичай, вона становить $(2 \div 15)$ К. Для вимірювання температури $T_{\text{вп}}$ вологого повітря, що досліджується, використовується термopар 12.

Густини теплового потоку q_1 і q_2 , які вимірюються за допомогою «мокрих» ПТП пристрою, можуть бути описані рівняннями:

$$q_1 = \alpha_{\Sigma} \cdot (T_{\text{п1}} - T_{\text{вп}}) + q_{j1} \quad \text{та} \quad q_2 = \alpha_{\Sigma} \cdot (T_{\text{п2}} - T_{\text{вп}}) + q_{j2}, \quad (8)$$

де α_{Σ} — сумарний ефективний коефіцієнт теплообміну при конвективному і радіаційному теплообміні.

З використанням «сухих» ПТП, 3 та 4, пристрою, вимірюються густини теплового потоку:

$$q_3 = \alpha_{\Sigma} \cdot (T_{\text{п3}} - T_{\text{вп}}) \quad \text{та} \quad q_4 = \alpha_{\Sigma} \cdot (T_{\text{п4}} - T_{\text{вп}}). \quad (9)$$

Оскільки електричні нагрівники пристрою підтримують температуру першої групи вимірювальних перетворювачів більшою за температуру другої групи і більшою за температуру вологого повітря $T_{\text{п1}} > T_{\text{п2}} > T_{\text{вп}}$ та $T_{\text{п3}} > T_{\text{п4}} > T_{\text{вп}}$, то $q_1 > q_2$, $q_{j1} > q_{j2}$ та $q_3 > q_4$. З урахуванням цього в результаті підстановки — $q_3 - q_4 = \alpha_{\Sigma} \cdot (T_{\text{п3}} - T_{\text{п4}})$ у рівняння (8) та виконання перетворень:

$$q_1 = q_3 + \frac{T_{\text{п1}} - T_{\text{п3}}}{T_{\text{п3}} - T_{\text{п4}}} \cdot (q_3 - q_4) + q_{j1} \quad \text{та} \quad q_2 = q_4 + \frac{T_{\text{п2}} - T_{\text{п4}}}{T_{\text{п3}} - T_{\text{п4}}} \cdot (q_3 - q_4) + q_{j12}; \quad (10)$$

$$q_{j1} = q_1 - q_3 - \frac{T_{\text{п1}} - T_{\text{п3}}}{T_{\text{п3}} - T_{\text{п4}}} \cdot (q_3 - q_4) \quad \text{та} \quad q_{j2} = q_2 - q_4 - \frac{T_{\text{п2}} - T_{\text{п4}}}{T_{\text{п3}} - T_{\text{п4}}} \cdot (q_3 - q_4) \quad (11)$$

одержимо рівняння розрахунку густини потоку маси j , що випаровується з поверхні «мокрих» ПТП:

$$j_1 = q_{j1} / r_{\text{Тп1}} \quad \text{та} \quad j_2 = q_{j2} / r_{\text{Тп2}}. \quad (12)$$

З іншого боку, густина потоку маси, що випаровується з поверхні тіла, може бути визначена за формулою Дальтона:

$$j = \beta_p \cdot (p_{\text{п}} - p_{\text{вп}}) \cdot P_{\text{на}} / P_{\delta}, \quad (13)$$

де β_p — коефіцієнт масовіддачі віднесений до різниці парціальних тисків; $p_{\text{п}}$ і $p_{\text{вп}}$ — парціальні тиски водяної пари біля поверхні випаровування і у вологому повітрі, що досліджується; $P_{\text{на}}$ і P_{δ} — нормальний і діючий атмосферний тиск.

У результаті розв'язання системи рівнянь,

$$\begin{cases} j_1 = \beta_p \cdot (p_{\text{п1}} - p_{\text{вп}}) \cdot P_{\text{на}} / P_{\delta} \\ j_2 = \beta_p \cdot (p_{\text{п2}} - p_{\text{вп}}) \cdot P_{\text{на}} / P_{\delta} \end{cases}, \quad (14)$$

які описують густину потоків маси, що випаровується з двох поверхонь розподілу фаз, що знаходяться в однакових гідродинамічних умовах стосовно вологого по-

вітря, яке досліджується, але мають різні температури ($T_{п1} \neq T_{п2}$) відносно парціального тиску водяної пари у повітрі, отримаємо:

$$p_{вп} = p_{п1} - (p_{п1} - p_{п2}) / (1 - j_2 / j_1). \quad (15)$$

Прийнявши, що $r_1 = r_2$, після підстановки рівняння (12) в (15) отримаємо:

$$p_{вп} = p_{п1} - (p_{п1} - p_{п2}) / (1 - q_{j2} / q_{j1}). \quad (16)$$

Значеннями парціальних тисків насиченої водяної пари біля поверхонь випаровування, $p_{п1}$ і $p_{п2}$, при температурах $T_{п1}$ і $T_{п2}$, які необхідні для визначення $p_{вп}$ за рівнянням (15) або (16), можуть бути розраховані за формулою Ардена Бака (Buck, 1981):

$$p_{н.вп}(t) = 6,1121 \exp \left[\frac{(18,678 - t / 234,5) \cdot t}{257,4 + t} \right], \quad (17)$$

де t — температура у градусах Цельсія.

За формулою Ардена Бака можна також розрахувати значення парціального тиску насиченої водяної пари $p_{н.вп}$ у вологому повітрі при температурі $t_{вп}$ і далі, відносна вологість повітря:

$$\varphi = p_{вп} / p_{н.вп}. \quad (18)$$

Точка роси як певна межа температури повітря, нижче за яку водяна пара, що міститься в повітрі, перенасичується і перетворюється на рідину визначається тільки двома параметрами: температурою і відносною вологістю повітря ($t_{вп}$, φ). Що вища відносна вологість, то вища і ближча до фактичної температури повітря точка роси. Що нижча відносна вологість, то точка роси нижча за фактичну температуру повітря.

Ступінь впливу температури і відносної вологості повітря — функції $f(t_{вп}, \varphi)$, на величину температури точки роси t_p може бути визначена так:

$$f(t_{вп}, \varphi) = \frac{a \cdot t_{вп}}{b + t_{вп}} + \ln(\varphi / 100), \quad (19)$$

де $a = 17,37$, $b = 237,7$ — константи.

Температура точки роси у діапазоні $t_p = (0 \div 50)^\circ\text{C}$, при $t_{вп} = (0 \div 60)^\circ\text{C}$ і $\varphi = (1 \div 100)\%$, з похибкою $\pm 0,4^\circ\text{C}$ може бути розрахована за формулою:

$$t_p = \frac{b \cdot f(t_{вп}, \varphi)}{a - f(t_{вп}, \varphi)}, \quad (20)$$

або визначена за допомогою психрометричних таблиць.

Гідролітичний теплометричний гігрометр (ГТГ). Для контролю параметрів вологого повітря ГТГ в повітропроводі встановлюється як ТТЕГ (рис. 4, а). Для забезпечення процесу вимірювання параметрів вологого повітря СТГ має (рис. 5) два ПТП, 1 та 2, що вкриті шаром капілярно-пористого матеріалу, 5 та 6, у який вмонтовані ЧЕ ТП, відповідно, $T_{п1}$ та $T_{п2}$. Цей матеріал, 5 та 6, а також вкриті їм ПТП і ЧЕ ТП постійно зволожуються рідиною що подається у дренажні канали 9 та 10. Це так звані «мокрі» перетворювачі СТГ. Відповідно, ПТП 3 зі змонтованими на його поверхні ЧЕ $T_{п3}$ — це «сухі» перетворювачі пристрою. Для вимірювання температури повітря $T_{вп}$ використовується термоелектричний перетворювач температури 4.

На відміну від ТТЕГ в ГТГ усі ПТП перебувають при однаковій температурі,

що забезпечується спільними для перетворювачів нагрівачем 8 і пластиною 7, виготовленою з високотеплопровідного матеріалу. В ГТГ, різниця парціальних тисків випаровування вологі з поверхні «мокрих» ПТП, 1 та 2, забезпечується використанням для їх зволоження розчинів солі, тиск пари над насиченим розчином яких нижчий за тиск пари над чистою водою за тієї самої температури (рис. 6).

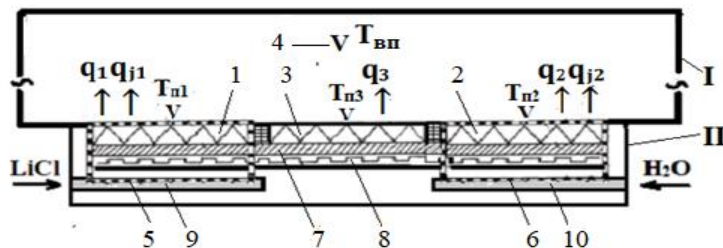


Рис. 5. Гідролітичний теплометричний гігрометр

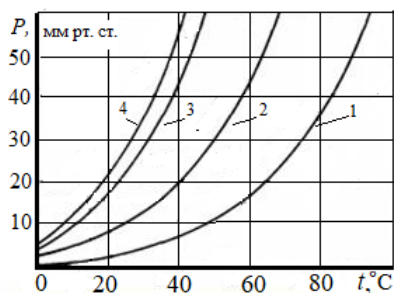


Рис. 6. Криві залежності тиску пари від температури для води та насичених розчинів солей: 1 — LiCl , $\varphi=12\%$; 2 — MgCl_2 , $\varphi=33\%$; 3 — NaCl , $\varphi=75\%$; 4 — H_2O , $\varphi=100\%$

Для ГТГ, як і для ТТЕГ, густини теплового потоку q_1 і q_2 , які вимірюються за допомогою так званих «мокрих» ПТП пристрою, можуть бути описані рівнянням (8). Для контролю вологості повітря за використанням ГТГ, як і за допомогою ТТЕГ, сумарний ефективний коефіцієнт теплообміну α_Σ є сумою коефіцієнтів теплообміну при конвективному α_k і радіаційному α_r теплообміні. У загальному випадку α_Σ може бути визначений за результатами показів «сухих» перетворювачів пристрою:

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha_{\text{k}} + \alpha_{\text{D}} = q_3 / (T_{\text{II3}} - T_{\text{BI}}). \quad (21)$$

З результатів аналізу рівняння (21) випливає, що для зменшення впливу радіаційного теплообміну на точність визначення α_{Σ} потрібно, щоб температура джерел випромінювання мало відрізнялась би від температури повітря, вологість якого досліджується. Цього можна досягнути шляхом зменшення теплообміну ділянки повітропроводу, де розташований гігрометр, з навколишнім середовищем, наприклад, шляхом використання ізоляції.

Після підстановки (8) в (21) і перетворення, отримуємо:

$$q_{i1} = q_1 - q_3 \cdot (T_{n1} - T_{\text{нп}}) / (T_{n3} - T_{\text{нп}}) \quad \text{та} \quad q_{i2} = q_2 - q_3 \cdot (T_{n2} - T_{\text{нп}}) / (T_{n3} - T_{\text{нп}}). \quad (22)$$

Далі, за формулами (12)—(20) розраховують потрібні характеристики вологого повітря.

Серед переваг запропонованих засобів вимірювання є використання чутливих елементів генераторного типу, які надають можливість тривалого автономного використання приладів у системі централізованого контролю параметрів газових середовищ, та вихідні сигнали яких не потребують посилення при їх передачі вимірювальним каналом до АСУ ТП.

Станом на сьогодні запропонований у статті метод вимірювання вологості і температури газових середовищ проходить перевірку на лабораторних стендах з метою підтвердження на практиці можливості використання термоелектричних перетворювачів теплового потоку для моніторингу вологості газових середовищ. Результати дослідження, метрологічні характеристики пристрою, а також експериментальні дані вимірювання в натурних умовах планується надати у наступній статті.

Висновки

На основі аналізу існуючих методів визначення відносної вологості повітря з'ясовано, що для метеорологічних і мікрокліматичних досліджень навколишнього середовища найбільш часто використовується психрометричний метод.

Для контролю вологості повітря в промислових повітропроводах тривалої дії запропоновано метод визначення температури і вологості газового середовища з використанням перетворювачів теплового потоку, а також розроблено теплоермоелектричний гігрометр для реалізації такого методу на практиці, що дозволить проводити довготривалі вимірювання в централізованих системах контролю газових середовищ. Згідно з методом, параметри повітря визначаються за результатами вимірювання теплоти випаровування з поверхні «вологих» і показів «сухих» перетворювачів теплового потоку з розташованими на їх поверхні, відповідно, «вологими» і «сухими» чутливими елементами перетворювачів температури.

Для контролю вологості повітря в повітропроводах періодичної дії розроблено гідролітичний теплотричний гігрометр.

Література

Анатичук Л. І. (1979) *Термоелементи і термоелектричні пристрої*: довідник. К.: Наукова думка.

Анатичук Л. І., Михайловський В. Я. (2008). Термоелектричний генератор для автономних опалювальних систем на газовому паливі. *Наука та інновації*, 4(6), 31—37.

Бабак В. П. (2017). *Теоретичні основи інформаційно-вимірювальних систем*. К.: Ун-т новітніх технологій; НАУ.

Грищенко Т. Г. (ред.), Декуша, Л. В., Вороб'єв Л. Й., Бурова З. А., Ковтун С. И., Декуша О. Л. (2017). *Теплометрия: теория, метрология, практика*. Кн. 1: Методы и средства измерения теплового потока. К.: Институт технической теплофизики НАН Украины.

Думанський О. В., Корольков О. С. (2023). *Аналіз методів вимірювання температури та вологості повітря в теплиці*. Матеріали XIX Міжнародного форуму молоді. Харків: ДБТУ. Взято з: <https://repo.btu.kharkov.ua/handle/123456789/37613>.

Щербань, В. Ю., & Корогод, Г. О. (2021). Представлення узагальнених математичних моделей методів надлишкових вимірювань. Інформаційні технології в науці, виробництві та підприємстві.

Кононов В. Б., Кононова О. А. Олексюк В. В. (2021). Методи та принципи побудови засобів вимірювання вологості середовища. *Системи управління, навігації та зв'язку*, 2 (64), 31-33. Взято з: https://www.researchgate.net/publication/367863344_METODI_TA_PRINCIPI_POBUDOWI_ZASOBIV_VIMIRUVANNA_VOLOGOSTI_SEREDOVISA/fulltext/63dae44e62d2a24f92e7d8d9/METODI-TA-PRINCIPI-POBUDOWI-ZASOBIV-VIMIRUVANNA-VOLOGOSTI-SEREDOVISA.pdf.

Кузик А. Д., Балицька В. О., Ярицька Л. І. (2011). Підвищення точності визначення відносної вологості повітря психрометричним методом. *Науковий вісник НЛТУ України*, 21(11), 126—129. Взято з: <file:///C:/Users/moogo/Downloads/pidvischennya-tochnosti-viznachennya-vidnosnoyivologosti-povityrya-psihrometrichnim-metodom.pdf>

Луцик Я. Т., Буняк Л. К., Рудавський Ю. К., Стадник Б. І. (2003). *Енциклопедія термометрії*. Львів: Видавництво Львівської політехніки.

Осадчук О. В., Савицький А. Ю., Жагловська О. М. (2014). Прилад для вимірювання вологості повітря чистих кімнат. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, 4. С. 60—63. Взято з: file:///C:/Users/moogo/Downloads/Vchnu_tekh_2014_4_12.pdf.

Лукінюк М. В., Лисенко В. П., Лукін В. Є., Гладкий А. М., Шворов С. А., Руденський А. А., Заверткін А. А. (2017). Технічні засоби автоматизації (Частина 1). Ніжин: Видавець ПП Лисенко М.М. Взято з: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/49745/1/Tekhnichni_zasoby_avtomatyz_chast_1.pdf.

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

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

Яворський Б. М., Детлаф А. А., Лебедев А. К. (2007). *Довідник з фізики для інженерів та студентів вищих навчальних закладів*. Тернопіль: Навчальна книга — Богдан.

Arden L. Buck. New equations for computing vapor pressure and enhancement factor. *American Meteorological Society* (1981). Взято з: https://en.wikipedia.org/wiki/Arden_Buck_equation.

Imran Ali Lakhia, Jianmin Gao, Tabinda Naz Syed, Farman Ali Chandio & Noman Ali Buttar (2018). Modern plant cultivation technologies in agriculture under controlled environment: a review on aeroponics. *Journal of Plant Interactions*, 13(1), 338—352. DOI: 10.1080/17429145.2018.1472308.

Korner O., Challa H. (2003). Process-based humidity control regime for greenhouse crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, 39 (3), 173—192. Взято з: https://www.researchgate.net/publication/222398568_Process-based_humidity_control_regime_for_greenhouse_crops.

Nilsson, Lars-Olof (Ed.). (2018). Methods of measuring moisture in building materials and structures. Взято з: <https://ruarrijoseph.com/tehnologii/109538-kondensacionnyy-gigrometr-gigrometr-dlya-izmereniya-vlazhnosti-vozduha.html>

Rabbi B., Chen Z.-H., Sethuvenkatraman S. (2019). Protected Cropping in Warm Climates: A Review of Humidity Control and Cooling Methods. *Energies*, 12 (14), 1—24. Взято з: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/14/2737>.

Sharma, N., Acharya, S., Kumar, K., Singh, N., & Chaurasia, O. P. (2018). Hydroponics as an advanced technique for vegetable production: An overview. *Journal of Soil and Water Conservation*, 17(4), 364-371.

Shcherban' V., Korogod G., Chaban V., Kolysko O., Shcherban' Yu., Shchutskaya A. (2019). Computer simulation methods of redundant measurements with the nonlinear transformation function. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (98), 16—22.

Tai H., Wang S., Duan Z., & Jiang Y. (2020). Evolution of breath analysis based on humidity and gas sensors: Potential and challenges. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 318, 128104. doi.org/10.1016/j.snb.2020.128104.

Wibawa, I. M. S., Putra, I. K. (2022). Design of air temperature and humidity measurement based on Arduino ATmega 328P with DHT22 sensor. *International Journal of Physical Sciences and Engineering*, 6(1), 9—17. doi.org/10.53730/ijpse.v6n1.3065.