

УДК 536.6

DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2219-3804162017100799>С. О. Іванов<sup>1</sup>

### КОМПЕНСАЦІЯ НЕІДЕНТИЧНОСТІ УМОВ ТЕПЛООБМІНУ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КОМІРОК ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОГО КАЛОРИМЕТРА ПІД ЧАС ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОТИ ВИПАРОВУВАННЯ

**En** The article is devoted to compensation of non-identical conditions of heat exchange in differential calorimeter's measuring cells during measurement of evaporation heat of refrigerating medium by synchronous thermal analysis. Different methods for determining the evaporation heat which take into account the influence of non-identical heat exchange conditions in the cells are considered. The first method is based on the analytical determination of the temperature difference between the surface of the sample and the cell-referent. The second method allows measuring the temperature difference between the surface of the sample and cell-referent experimentally. The new design of calorimeter which is able to realize in practice the new experimental methods for determining the vaporization heat is presented.

**Ru** Рассмотрена проблема компенсации влияния неидентичности условий теплообмена в измерительных ячейках дифференциального калориметра при исследовании удельной теплоты испарения рабочих жидкостей систем охлаждения методом синхронного теплового анализа. Предложены два метода компенсации такого влияния: расчетный метод компенсации и метод, основанный на прямом измерении температуры поверхностей ячеек и газовой среды калориметра. Для реализации метода компенсации, основанного на измерении температуры представлена новая конструкция калориметра.

#### Вступ

Системи теплового захисту, які використовують випаровування робочої рідини із охолоджуваної поверхні є ефективним інструментом вирішення проблеми безпечного і надійного відведення тепла за умови екстре-

---

<sup>1</sup> Інститут технічної теплофізики НАН України

мальних теплових навантажень. Підвищені вимоги до проектування охолоджуючих систем та підбору режимів охолодження, а також тенденція до появи нових перспективних матеріалів, які можна застосовувати у якості робочого середовища, вимагають отримання точних даних про питому теплоту випаровування у залежності від робочої температури. Урахування всіх факторів впливу під час випаровування таких речовин у разі аналітичного розрахунку майже неможливе, тому для визначення теплоти випаровування перевагу необхідно надавати експериментальним методам дослідження із використанням спеціалізованих засобів вимірювання, які враховують особливості дослідження конкретних матеріалів.

Зручним методом визначення теплоти випаровування матеріалів є метод диференціальної калориметрії. Для його реалізації необхідно, щоб в експерименті брали участь не менше двох вимірювальних комірок, які є ідентичними як за геометричними, так і за теплофізичними параметрами, і перебували б у спільній робочій камері за однакових умов експерименту. Досліджуваний зразок розміщують у робочій комірці, а друга комірка (референт) залишається порожньою. Протягом експерименту комірки знаходяться у робочій камері приладу за однакових умов, що значно знижує вплив зовнішніх збурюючих факторів за рахунок різниці сигналів від робочої комірки та комірки-референта [1].

Характерним прикладом диференціального калориметра для дослідження питомої теплоти випаровування є прилад синхронного теплового аналізу ДМКІ-1, розроблений у Інституті технічної теплофізики НАН України [2]. Робоча камера приладу представлена на рис. 1, а.

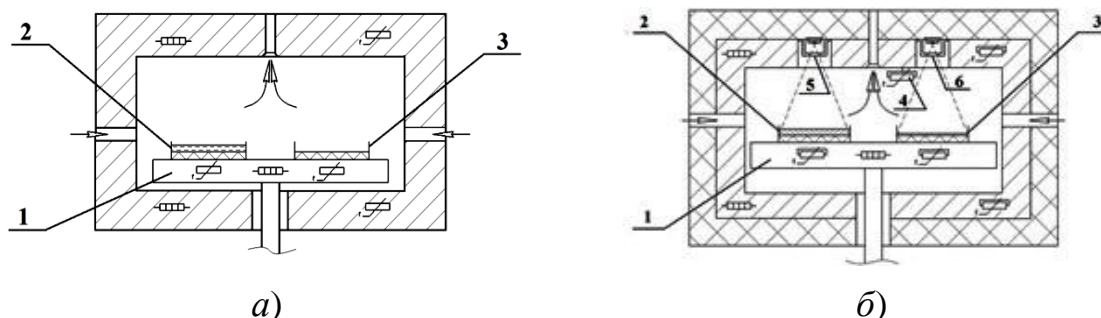


Рис. 1. Робоча камера приладу синхронного теплового аналізу (а) та експериментального приладу (б)

1 – калориметрична платформа; 2 – робоча комірка; 3 – комірка-референт; 4 – перетворювач температури для газового середовища; 5 – безконтактний інфрачервоний ПТ робочої комірки; 6 – безконтактний інфрачервоний ПТ комірки-референта

Калориметрична платформа 1 даного приладу має дві плоскі відкриті комірки 2 і 3, які ідентичні за геометричними та теплофізичними характеристиками, із вмонтованими перетворювачами теплового потоку (ПТП) [3]. Платформа розміщена у робочій камері і поєднана із аналіти-

чними вагами під тепловим блоком через коаксіальну стійку. Платформа, верхня кришка і корпус приладу обладнані спеціальними електронагрівачами із незалежним регулюванням.

Загальний принцип розрахунку питомої теплоти випаровування представлений формулою (1):

$$r = \frac{Q_1 - Q_2}{\Delta m / \Delta \tau}, \quad (1)$$

де  $Q_1$  - тепловий потік, що проходить через робочу комірку;

$Q_2$  - тепловий потік, що проходить через комірку-референт;

$\Delta m / \Delta \tau$  - втрата маси зразком за час  $\Delta \tau$ .

Проте, використання диференціального методу за умови експериментального визначення теплоти випаровування пов'язане із певними ускладненнями. Випаровування вологи зі зразка у робочій комірці знижує температуру її поверхні, що призводить до утворення неідентичних умов теплообміну робочої комірки та комірки-референта. Це призводить до появи додаткової похибки та порушує питання компенсації її впливу.

### **Постановка задачі**

Розробка методів вимірювання теплоти випаровування із компенсацією впливу неідентичності умов теплообміну вимірювальних комірок диференціального калориметра, а також розробка засобу вимірювання для реалізації даних методів.

### **Викладення основного матеріалу**

Для врахування впливу неідентичності умов теплообміну у диференціальних комірках необхідно розглядати систему рівнянь теплового балансу комірок. Теплообмін відкритої поверхні робочої комірки приладу із навколишнім середовищем представлений трьома складовими: конвективною складовою теплообміну зразка із газовим середовищем робочої камери, радіаційною складовою теплообміну зразка із верхнім термостатуючим елементом кришки приладу і складовою тепломасопереносу внаслідок зневоднення зразка. Для комірки-референта теплообмін відкритої поверхні із середовищем обмежений тільки конвективною і радіаційною складовими теплообміну. Для схеми, яка використовується у разі вимірювання теплоти випаровування справедливою буде наступна система рівнянь теплового балансу:

$$\begin{cases} Q_1 = r \cdot \frac{\Delta m}{\Delta \tau} + \alpha_{\Sigma} (T_C - T_1) \cdot F_1; \\ Q_2 = \alpha_{\Sigma} (T_C - T_2) \cdot F_1, \end{cases} \quad (2)$$

де  $F_1 = F_2$  - площа ПТП комірки;

$\alpha_\Sigma$  – сумарний коефіцієнт теплообміну внаслідок конвекції та випромінювання;

$T_C$  – температура газового середовища;

$T_1$  - температура поверхні робочої комірки;

$T_2$  - температура поверхні комірки-референта;

$r$  – питома теплота випаровування.

Справедливою також є система рівнянь, які описують кондуктивний теплопідвід від платформи до поверхні зразка і поверхні комірки-референта:

$$\begin{cases} Q_1 = (T_0 - T_1)/(R_1 + R_S); \\ Q_2 = (T_0 - T_2)/R_2, \end{cases} \quad (3)$$

де  $T_0$  - температура платформи;  $R_1$  - тепловий опір ПТП робочої комірки;

$R_2$  - тепловий опір ПТП комірки-референта;  $R_S$  - тепловий опір зразка.

Розв'язавши рівняння (2) і (3) відносно  $r$ , та ввівши величину  $R_\alpha = 1/(\alpha_\Sigma \cdot F_1)$  - сумарний опір теплообміну від конвективної і радіаційної складової, отримуємо формулу для визначення теплоти випаровування:

$$r = \frac{(Q_1 - Q_2) \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_\alpha}\right) + Q_1 \cdot \frac{R_S}{R_\alpha} + Q_2 \cdot \Delta \frac{R_{1,2}}{R_\alpha}}{\Delta m / \Delta \tau}. \quad (4)$$

Даний метод враховує неідентичність умов теплообміну у комірках за рахунок непрямого визначення температури поверхонь зразка і комірки-референта через значення теплового опору зразка  $R_S$  і сумарного теплового опору  $R_\alpha$ , а також не потребує внесення змін у конструкцію існуючої установки синхронного теплового аналізу (СТА). Проте, величина  $R_S$  часто не тільки невідома, але і змінюється зі зміною вологості зразка, що робить її незручною для використання.

Альтернативою попередньому методу може стати розрахунок на основі прямого вимірювання величин  $T_1$  і  $T_2$ . Для реалізації такого методу була запропонована нова конструкція приладу СТА (рис. 1, б) [4]. Для вимірювання температури  $T_C$  у експериментальний прилад вмонтовано спеціальний перетворювач температури, а для реєстрації температури  $T_1$  і  $T_2$  в кришці приладу безпосередньо над комірками розміщено безконтактні інфрачервоні перетворювачі температури (ПТ). Крім того, у комірці-референті розміщують пластину із термічно інертного матеріалу, на поверхню якої нанесене покриття із терморадіаційними характеристиками, які близькі до характеристик досліджуваного зразка.

Розв'яжемо систему рівнянь (2) відносно  $r$  та отримаємо формулу для визначення питомої теплоти випаровування, яка спирається на прямі вимірювання  $T_C$ ,  $T_1$  і  $T_2$ :

$$r = \frac{Q_1 - Q_2 \cdot \frac{T_C - T_1}{T_C - T_2}}{\Delta m / \Delta \tau} \quad (5)$$

Даний метод дозволяє коригувати значення  $Q_2$  за рахунок внесення поправки для кожного відрізка часу  $\Delta t$  на основі прямих безперервних вимірювань величин  $T_C$ ,  $T_1$  і  $T_2$ , а також не потребує використання складних для визначення величин.

### Висновки

Для підвищення точності визначення питомої теплоти випаровування із використанням диференціального калориметра запропоновано два методи компенсації впливу неідентичності умов теплообміну комірок із середовищем. Перший метод дозволяє вводити поправку на неідентичність за рахунок теплових опорів комірок зразка, та сумарного опору із середовищем. У основу другого методу покладені прямі вимірювання значень температури поверхонь зразка, референта та газового середовища робочої камери. Другий метод дає змогу змінювати поправку на неідентичність у процесі дослідження, проте потребує суттєвої модернізації існуючого калориметра. Запропоновано конструкцію диференціального калориметра, яка дозволить реалізувати прямі вимірювання температури поверхонь зразка, референта та середовища.

### Список використаної літератури

1. W. Hemminger and G.W.H. Höhne: "Calorimetry – Fundamentals and Practice" Verlag Chemie, Weinheim (1984).
2. Патент України № 84075 МПК G01N 25/26, G01N25/28/ Калориметричний пристрій для визначення питомої теплоти випаровування вологи і органічних рідин з матеріалів / Ю. Ф. Снежкін, Л. В. Декуша, Н. С. Дубовікова, Т. Г. Грищенко, Л. Й. Воробйов, Л. А. Боряк.– Заявка № а2006 13266 від 15.12.2006.
3. *Геращенко О. А.* Основы теплотрии – К.: Наукова думка, 1971. –192 с.
4. . Пат. 113939 Україна, МПК<sup>6</sup>G01K 17/02. Калориметричний пристрій для визначення питомої теплоти випаровування води і органічних рідин з матеріалів / Л. В. Декуша, Л. Й. Воробйов, С. О. Іванов; власник Інститут технічної теплофізики НАН України. – № 2016 05946; заявл. 01.06.2016; опубл. 27.03.2017, Бюл. № 6.