

УДК 372.853

Черниш В. В., Гуамбе Ж. Ф., Мігел Н. А.

ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ ПО ВИЗНАЧЕННЮ КОЕФІЦІЄНТА ПЕЛЬТЬЄ

Показана можливість створення лабораторних робіт з використанням учбових приладів для поглибленого вивчення термоелектричних методів прямого перетворення енергії. З цією метою проілюстрована можливість визначення коефіцієнту Пельтьє ряду матеріалів. Приведено результати експериментального визначення коефіцієнту Пельтьє ніхрому і експериментальної перевірки другого співвідношення Томсона.

Ключові слова: лабораторні роботи, фізика, термоелектрика.

В останні десятиріччя вивченню основ методів прямого перетворення теплової енергії в електричну, а також використанню відновлюваних джерел енергії приділяється значна увага не тільки в спеціальних курсах фізики, а також в курсах загальної фізики вищих навчальних закладів. Природно, це знайшло своє відображення і в курсах фізики для середніх навчальних закладів і загальноосвітніх шкіл.

Поряд з ознайомленням з теоретичними основами вказаних методів одержання і перетворення енергії значна увага приділяється постановці і проведенню лабораторних робіт з метою поглибленого вивчення вказаних методів і набуття елементарного досвіду роботи.

Ознайомлення з методами термоелектричного перетворення енергії займає вагомe місце в цьому ряду [1, 2]. Існує серія лабораторних робіт по вивченню основних методів термоелектричного перетворення енергії [3-6].

У цьому повідомленні розглядається можливий метод визначення коефіцієнта Пельтьє і експериментальної перевірки другого співвідношення Томсона.

Теоретичне обґрунтування. Як відомо ефект Пельтьє полягає в тому що при проходженні електричного струму послідовно через два різних з'єднаних між собою провідника однакової температури в області контакту виділяється або поглинається тепло в залежності від напрямку електричного струму і природи провідників. Це тепло на відміну від тепла Джоуля-Ленца, що пропорційне квадрату електричного струму, пропорційне величині електричного струму. У випадку неоднорідних провідників тепло виділяється не тільки на контакті провідників, а також і в об'ємі провідника (об'ємний ефект Пельтьє).

Для визначення коефіцієнта Пельтьє розглянемо однорідний ізотропний стержень по якому протікає електричний струм. Розв'яжемо задачу про розподіл температури в такому стержні в стаціонарних умовах, $(\partial T / \partial t) = 0$. На кінцях стержня розміщені термостати з температурами T_0 і $T_L < T_0$. Бокові стінки стержня адіабатично ізолювані. Рівняння теплопровідності для такого одномірного ізотропного стержня має вигляд [2]

$$\frac{\partial}{\partial x} \kappa(T) \frac{\partial T}{\partial x} + \rho e^2 j^2 - \tau \frac{\partial T}{\partial x} e j = 0, \quad (1)$$

де τ – коефіцієнт Томсона, j – густина потоку частинок, $e j$ – густина електричного струму. Інші позначення загальноприйняті.

Для спрощення розглянемо випадок коли $\kappa = const, \rho = const, \alpha = const$. Таке припущення може бути справедливим при не великих різницях температур T_L і T_0 . В цьому випадку коефіцієнт Томсона що зв'язаний з коефіцієнтом Пельтьє Π і термоелектрорушійною силою α першим співвідношенням Томсона

$$\tau = \frac{\partial \Pi}{\partial T} - \alpha = \frac{\partial}{\partial T} (T \alpha) - \alpha = T \frac{\partial \alpha}{\partial T} = 0 \quad (2)$$

і рівняння теплопровідності спрощується

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\rho e^2 j^2}{\kappa} = 0, \quad (3)$$

а його розв'язок з врахуванням граничних умов

$$T(0) = T_0, T(L) = T_L \quad (4)$$

приймає вигляд

$$T(x) = -\frac{\rho e^2 j^2}{2\kappa} x^2 + \left(-\frac{\Delta T}{L} + \frac{\rho e^2 j^2}{2\kappa} L\right) x + T_0. \quad (5)$$

Таким чином присутність електричного струму змінює розподіл температури.

Визначимо кількість тепла Q_0 що надходить від нагрівника з температурою T_0 в стержень і кількість тепла Q_L що переноситься із стержня до холодильника з температурою T_L . Густина потоку тепла дорівнює

$$q = -\kappa \frac{\partial T}{\partial x} + \Pi e j. \quad (6)$$

Другий доданок в (6) описує тепловий потік обумовлений потоком частинок. Він називається, як відомо [2], потоком тепла Пельтьє, що виникає із-за переносу енергії частинками (електронами в нашому випадку), а тому це конвективний потік тепла. Із (6) слідує що

$$\begin{aligned} Q_0 &= s \left(-\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} + \Pi e j \Big|_{x=0} \right), \\ Q_L &= s \left(-\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} + \Pi e j \Big|_{x=L} \right), \end{aligned} \quad (7)$$

де s – площа поперечного перерізу стержня.

Із (5) знайдемо градієнти температури в точках $x = 0$ і $x = L$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{\rho e^2 j^2}{\kappa} x - \frac{\Delta T}{L} + \frac{\rho e^2 j^2}{2\kappa} L, \quad (8)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\frac{\Delta T}{L} + \frac{\rho e^2 j^2}{2\kappa} L. \quad (9)$$

У (9) верхній знак відповідає $x = 0$, а нижній – $x = L$.

Знайдемо тепер Q_0 і Q_L , припускаючи, що $\alpha(T) = const$, але $\Pi = T\alpha$, що означає $\Pi = \Pi(T)$.

$$Q_0 = s \left(\kappa \frac{\Delta T}{L} - \frac{\rho e^2 j^2}{2} L + \Pi(T_0) e j \right), \quad (10)$$

$$Q_L = s \left(\kappa \frac{\Delta T}{L} + \frac{\rho e^2 j^2}{2} L + \Pi(T_L) e j \right). \quad (11)$$

Різниця цих теплот дорівнює

$$Q_L - Q_0 = s \{ \rho e^2 j^2 + [\Pi(T_L) - \Pi(T_0)] e j \}. \quad (12)$$

Враховуючи друге співвідношення Томсона $\Pi = T\alpha$, одержимо

$$Q_L - Q_0 = s [\rho e^2 j^2 + (T_L - T_0) \alpha e j], \quad (13)$$

або

$$Q_L - Q_0 = s \rho e^2 j^2 - E_T e j L s, \quad (13a)$$

де $E_T = \alpha(T_0 - T_L)/L$ – напруженість термоелектричного поля.

Запишемо рівняння (11) для двох протилежних напрямків електричного струму

$$Q_{L1} = s \left(\kappa \frac{\Delta T}{L} + \frac{\rho e^2 j^2}{2} L + \Pi(T_L) e j \right), \quad (14a)$$

$$Q_{L2} = s \left(\kappa \frac{\Delta T}{L} + \frac{\rho e^2 j^2}{2} L - \Pi(T_L) e j \right). \quad (14b)$$

Різниця теплот що відводяться в холодильник, тобто в калориметр з температурою T_L , при різних напрямках електричного струму буде

$$Q_{L1} - Q_{L2} = 2s \Pi(T_L) e j, \quad (15)$$

Звідки

$$\Pi(T_L) = \frac{Q_{L1} - Q_{L2}}{2sej}. \quad (16)$$

Різниця теплот що надходять з нагрівника, тобто з калориметра з температурою T_0 , при різних напрямках електричного струму буде

$$Q_{01} - Q_{02} = 2s\Pi(T_0)ej, \quad (15)$$

що дає

$$\Pi(T_L) = \frac{Q_{01} - Q_{02}}{2sej}. \quad (16)$$

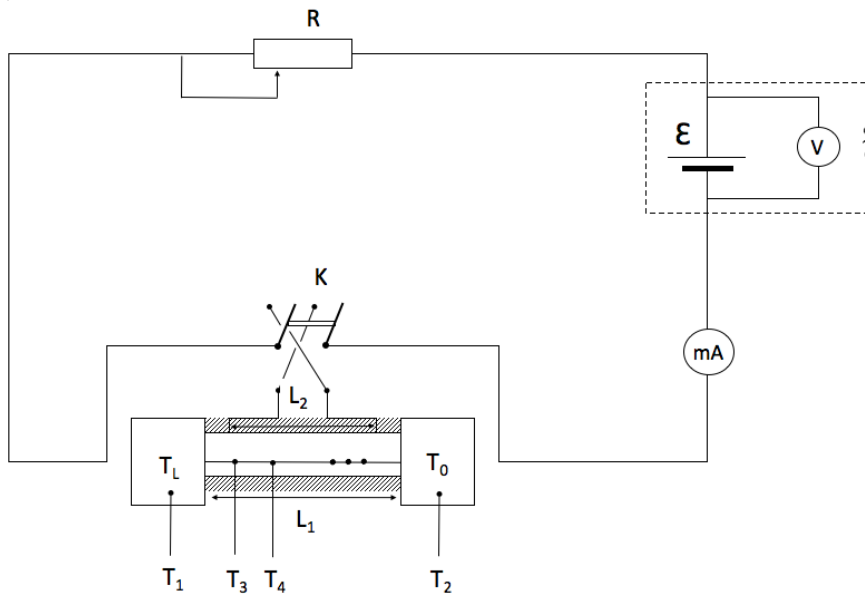
Проаналізуємо формулу (13а), яка показує, що в тих випадках, коли тепло Джоуля $\rho e^2 j^2 sL$, що виділяється в об'ємі стержня більше ніж тепло $E_T e j L s$, що виділяється за рахунок роботи електричного струму проти термоелектричного поля, кількість тепла, що надходить із стержня в холодильник, більше кількості тепла, що надходить із нагрівника в стержень. Причиною цього є те, що все тепло Джоуля, що виділяється в стержні в одиницю часу порівну надходить в холодильник і нагрівник, що добре видно з формул (10) і (11).

Такий висновок справедливий тільки в тому випадку, коли процеси, що мають місце в стержні, є стаціонарними (початкове рівняння (3) відноситься до стаціонарного випадку). При не стаціонарних процесах, коли

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \neq 0, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \neq 0$$

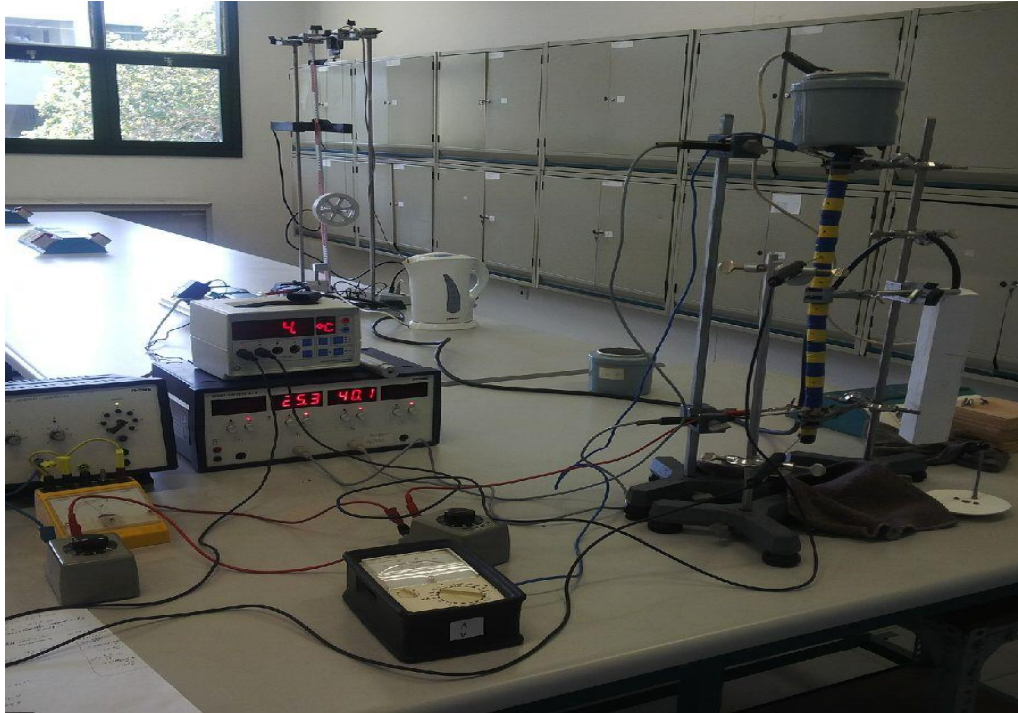
співвідношення між теплотами Q_L і Q_0 буде іншим.

Експериментальний лабораторний пристрій. Відомі лабораторні експерименти по калориметричному вимірюванні коефіцієнту теплопровідності і вивченню теплових насосів Пельтьє [3]. Для вимірювання коефіцієнту Пельтьє з вказаних лабораторних були використані цифрові термопарні термометри з високою точністю вимірювання температури. Принципова схема лабораторного пристрою проста і приведена на мал. 1.



Мал. 1

У якості вимірювального зразка використовувався ніхромовий дріт діаметром $d = 1,2 \text{ mm}$ і довжиною $L_1 = 49,5 \text{ cm}$. Бокова поверхня зразка адіабатично ізольована. Зразок знаходиться в тепловому контакті з двома калориметрами, один з яких є звичайним калориметром фірми RHYWE, а другий дозволяє вимірювати малі кількості тепла, що переносяться ніхромовим дротом. Температури калориметрів вимірюються двома цифровими термопарними термометрами. Третій і четвертий термопарні термометри використовуються для вимірювання розподілу температури вздовж ніхромового зразка. Виміри проводились при наявності теплового потоку і електричного струму вздовж зразка. Перемикач K дозволяв змінювати напрям електричного струму вздовж зразка. Зовнішній вигляд лабораторного пристрою показано на мал. 2.



Мал. 2

Експериментальні результати. Омичний опір ніхромового зразка з контактами $R = 1,1$ ом, довжина зразка між електричними контактами $L_2 = 45,5$ см, площа поперечного перерізу зразка $s = 1,09$ мм², струм через зразок $I = 59$ мА = 0,059А. Використовуючи формули (11) для кількості тепла що проходить в 1с через поперечний переріз провідника, маємо

$$Q_L = \kappa \frac{\Delta T}{L_2} s + \frac{1}{2} R I^2 + \Pi(T_L) I, \quad (19)$$

а тому для струмів що течуть в протилежних напрямках формула (19) приймає вигляд

$$Q_L^\uparrow = \kappa \frac{\Delta T}{L_2} s + \frac{1}{2} R I^2 + \Pi(T_L) I, \quad (20a)$$

$$Q_L^\downarrow = \kappa \frac{\Delta T}{L_2} s + \frac{1}{2} R I^2 - \Pi(T_L) I. \quad (20b)$$

Різниця цих теплот залежить тільки від тепла Пельтьє що виділяється

$$Q_L^\uparrow - Q_L^\downarrow = 2\Pi(T_L) I,$$

звідки

$$\Pi(T_L) = \frac{(Q_L^\uparrow - Q_L^\downarrow)t}{2It} \quad (21)$$

Кількість тепла що виділилась в калориметрі при різних напрямках струму може бути визначена по вимірах зміни температури калориметра в цих умовах. Знаючи масу калориметра і його питому теплоємність знаходимо

$$(Q_L^\uparrow - Q_L^\downarrow)t = cm(T' - T''), \quad (22)$$

що приводить до кінцевого результату

$$\Pi(T_L) = \frac{cm(T' - T'')}{2It}. \quad (23)$$

В якості калориметричного тіла при температурі T_L в твердотільному калориметрі використовувалась свинцева кулька, що завдяки малій питомій теплоємності свинцю дозволяло

вимірювати малі кількості тепла. В формулі (23) c – питома теплоємність свинцю, $m = 8g$ – маса свинцевої кульки, T' і T'' – температури в калориметрі в стаціонарних умовах до і після комутації струму в ніхромовому зразку. На основі проведених експериментів для коефіцієнта Пельтьє одержуються результати близькі до відомих [7, 8].

Необхідно відмітити, що незалежні вимірювання термоерс ніхромового зразка дозволили експериментально підтвердити друге співвідношення Томсона $\Pi(T_L) = T_L \alpha$. Описані обґрунтування і виміри можуть бути основою ряду лабораторних робіт в курсі фізики.

Використані джерела

1. Anatyshuk L. I., Physics of Thermoelectricity, v1, Institute of Thermoelectricity, Kyiv, Chernivtsi, 1998, 376p.
2. Самойлович А. Г., Термоэлектрические и термомагнитные методы превращения энергии. Конспект лекций. (Сост. Вихор Л.Н., Охрем Е.А., Снарский А.А.) Черновцы, Рута, 2006, 228 с.
3. University Laboratory Experiments PHYSICS, PHYWE, v. 1-5, (3.1 and 4.2.4), 3 edition, Göttingen, Germany, 1991.
4. Черниш В.В., Домбу К., Фізичний експеримент при вивченні базово – спеціалізуючих дисциплін на департаменті фізики Університету Едуардо Мондлане (Мозамбiк), Вісник ЧДПУ, випуск 77, серія Педагогічні науки, с.243-246, 2010.
5. Черниш В. В., Лабораторні роботи при вивченні термоелектричних явищ в курсі фізики, Вісник ЧНПУ, випуск 116, серія Педагогічні науки, с.169-172, 2014.
6. Черниш В. В., Куамба Б. Ш., Особливості викладання дисциплін спеціалізації на департаменті фізики Університету Едуардо Мондлане (Мозамбiк), Вісник ЧДПУ, випуск 57, серія Педагогічні науки, с.254-256, 2008.
7. Металлы и сплавы. Справочник под ред. Ю. П. Солнцева, НПО Профессионал, С-Петербург, 2003.
8. Кикоин И. К. Таблицы физических величин. Атомиздат, 1976.

Chernysh V., Guambe J., Miguel N.

LABORATORY EXPERIMENTS FOR PELTIER COEFFICIENT DETERMINATION

Laboratory experiments to study principal thermoelectric effects and determination important physical characteristics of thermoelectric devices and materials and acquaint with real working devices are important element of physical education of students. In this communication possible method for Peltier coefficient's determination and verifying the second Thomson relation have been considered. For determination of Peltier coefficient the behavior of homogeneous isotropic rod between two calorimeters with different temperatures and electric current along rod has been analyzed. The stationary distribution of temperature in this condition may be obtained for non temperature dependent kinetic coefficient and fixed boundary conditions. The temperature distribution changes in the presence of electric current and, correspondingly, energy transfer conditions along the rod. Generalized thermal conductivity law has been used to calculate heat transfer from "hot" calorimeter to rod and from rod to "cold" calorimeter. After that the heat transfer from rod to "cold" calorimeter has been considered for two opposite current's directions and use the elementary equation for heat balance in "cold" calorimeter before and after current commutation is not difficult to receive simple mathematical expression for Peltier coefficient in stationary conditions.

As experimental sample for indicated measurements the nichrome wire localized between two calorimeters with different temperatures has been used. The temperatures in calorimeters as well as temperature distribution along the wire have been measured by thermocouple digital thermometers.

The results of experimental determination of Peltier coefficient are in good agreement with known results. Independent measurement of thermoemf with the same sample permit to verify second Thomson relation.

The considered theoretical substantiation and experimental attachment may be used as basis for students laboratory experiments.

Key words: *laboratory experiments, physics, thermoelectricity.*

Стаття рекомендована секцією теоретичної фізики департаменту фізики наукового факультету університету Едуардо Мондлане, Мапуту, Мозамбiк.

Надійшла до редакції 25.05.2018