

PACS: 61.50.AH, 64.70FM

ISSN 1729-4428 (Print)
ISSN 2309-8589 (Online)

Я.П. Салій, Б.С. Дзундза

Аналітичний метод визначення температурної залежності коефіцієнта теплопровідності

*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, м. Івано-Франківськ, Україна,
yaroslav.saliy@pnu.edu.ua*

В роботі розроблено аналітичний метод визначення температурної залежності коефіцієнта теплопровідності, який ґрунтується на апроксимації температурного поля, отриманого за допомогою інфрачервоної тепловізійної камери, розв'язком неоднорідного стаціонарного рівняння теплопровідності.

З отриманих експериментальних залежностей показано, що запропонований метод на основі стаціонарного теплового потоку можна використовувати для визначення температурної залежності коефіцієнта теплопровідності для твердих тіл: металів, багатокомпонентних сплавів, напівпровідників та діелектриків. Отримано температурні залежності теплопровідності тестових зразків фторопласту та сталі. Згідно з даними експериментальними результатами, теплопровідність фторопласту зростає, а теплопровідність сталі зменшуються зі збільшенням температури.

Ключові слова: теплопровідність, методи вимірювання, температурні залежності, тепловізор, неоднорідне стаціонарне рівняння.

Подано до редакції 27.01.2025; прийнято до друку 13.06.2025.

Вступ

Для експериментального визначення теплопровідності твердих тіл розроблено багато методів чутливих до діапазону вимірюваних температур і типу матеріалу з різною теплопровідністю. Таким чином, той чи інший метод може мати переваги для певного матеріалу чи діапазону температур.

Методи вимірювання теплопровідності поділяються на дві групи: методи стаціонарного та нестаціонарного режимів. У стаціонарних методах вимірювання зразок піддається температурному профілю, який не змінюється в часі; після досягнення рівноваги; теплопровідність визначається безпосередньо з геометричних розмірів та градієнта температури. У нестаціонарних методах – температурне поле змінюється з часом, аналізуючи просторово-часовий профіль температури, визначають коефіцієнт теплопровідності.

Одним із поширених методів вимірювання

теплопровідності твердих тіл є метод поздовжнього теплового потоку. У методах поздовжнього теплового потоку експериментальне розташування розроблено таким чином, що потік тепла відбувається лише в осьовому напрямку зразка. У стаціонарних умовах і за умови відсутності радіальних втрат або приросту тепла теплопровідність визначається з одновимірного рівняння теплопровідності Фур'є-Біо [1]. Радіальні втрати тепла повинні бути незначними, що на практиці значно ускладнює застосування подібних методів.

У роботі [2] розроблено високоточну установку для визначення характеристик термоелектричних приладів в діапазоні температур 350-600 К. Для вимірювання теплопровідності обрані прямі методи, за допомогою яких тепловий потік направляється через термоелемент у відповідь на температурний градієнт, що створюється між нагрівачем і радіатором. Суть розробленої методології полягає у використанні двох ідентичних зразків, розташованих по обидві сторони нагрівального елемента, які охолоджуються ідентичними водяними радіаторами.

Аналіз методів визначення теплопровідності для тонких плівок проведено у роботі [3] Показано перспективи застосування абсолютного, 3 ω - і флеш-методу, для вимірювання теплопровідності тонких плівок. Наведено схеми і характеристики методів, дано ряд відомих теоретичних та емпіричних формул для обрахунку теплопровідності.

Автори [1] провели дослідження, пов'язані з вимірюванням зміни теплопровідності в залежності від температури металів і багатокомпонентних металевих сплавів. Автори модифікували стрижневий метод лінійного теплового потоку та розробили прилад для вимірювання зміни теплопровідності з температурою. Апарат складався з гарячого столу, холодного радіатора та тримача зразка. Була реалізована пропорційна система керування, використовуючи контрольну термопару в гарячому каскаді. Щоб отримати лінійний градієнт температури в зразку, відстань між гарячою та холодною поверхнею дорівнювала 10 мм. Температуру контролювали термопарами.

Теплопровідність є одним з найважливіших параметрів теплозахисних матеріалів. У роботі [4] запропонована методика вимірювання температурної залежності теплопровідності для теплоізоляційних матеріалів. Побудована експериментальна установка для проведення випробувань ефективності теплоізоляції за великих різниць температур як у стаціонарному, так і в перехідному режимах та отримано залежність теплопровідності від температури для теплозахисних матеріалів.

У більшості наявних робіт для вимірювання температури використовують термопари, або терморезистори, але для вимірювання градієнтів температури такі методи мають суттєві недоліки, особливо для тонкопліткових зразків так як відвід тепла через проводи термопари викривлює температурне поле. Для швидких вимірювань температурних градієнтів вздовж поверхні зразка зручно застосовувати тепловізійні методи. Що підтверджують автори роботи [5] де реалізовано швидкі вимірювання залежності теплопровідності від температури на основі теплових зображень. Коефіцієнт теплопровідності отримано з комбінованого експериментального та теоретичного дослідження на основі закону Відемана-Франца. Було використано для визначення теплопровідності при різних температурах кубічне співвідношення між часом нагрівання та відстанню до джерела тепла.

Однак посилань щодо визначення температурної залежності коефіцієнта теплопровідності тіла, що базуються на витоках через поверхню тепла на випромінювання і тепловіддачу у зовнішнє середовище авторами не знайдено.

I. Методика експерименту

Для відпрацювання методики досліджували зразки циліндричної форми з плоскими паралельними торцями. Діаметри зразків складали 6 мм, а довжини 30 та 60 мм. Досліджували як діелектричні матеріали з низькою теплопровідністю, зокрема фторопласт, так і електропровідні матеріали з високою теплопровідністю, зокрема сталь. Для створення стаціонарного температурного поля зразок був затиснутий між полірованим мідним радіатором (рис. 1, а) з охолодженням протічною водою чи масивним алюмінієвим радіатором (рис. 1, б) та мідним нагрівником який нагрівається за допомогою електричної спіралі всередині. Контроль температури здійснювався хромель -алюмелевими термопарами, стабілізація температури нагрівника здійснювалася автоматично за пропорційно-інтегрально-диференціальним (ПІД) алгоритмом. Сила притискання задавалася за допомогою пружини. Вимірювання проводили в закритому об'ємі, на повітрі, в аргоні або у вакуумі.

Температурне поле вздовж зразка отримували за знімками з тепловізора Unit-T 120. Відстань до температурних маркерів визначали за допомогою екранного штангенциркуля.

На рис. 2 представлено тепловий знімок для матеріалу з низькою теплопровідністю (фторопласт) рис. 2, а, та матеріалу з високою теплопровідністю (нержавіюча сталь) (рис. 2, б)

II. Теоретична модель та варіанти розв'язку

Стаціонарне неоднорідне рівняння теплопровідності описує розподіл температури в тілі у випадку, коли температура не змінюється з часом. Використаємо таке рівняння для знаходження температурної залежності коефіцієнта теплопровідності.



Рис. 1. Загальний вигляд вимірювальної комірки та конфігурація зразків для вимірювання.

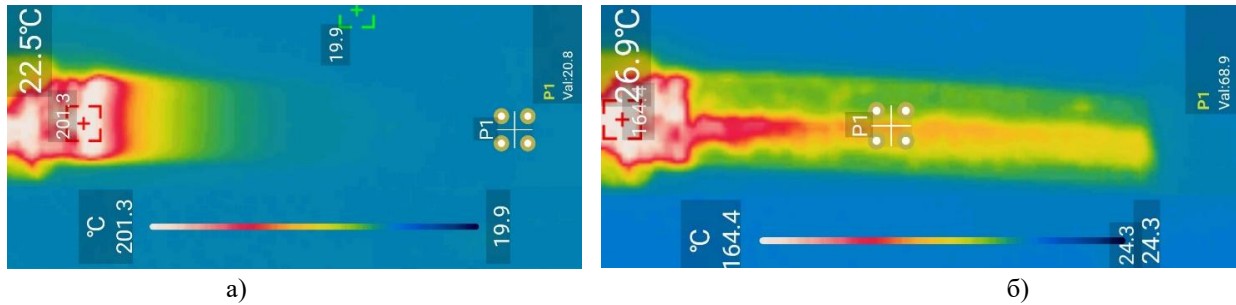


Рис. 2. Тепловізійні знімки градієнта температури для матеріалу з низькою теплопровідністю (фторопласт) (а), та матеріалу з високою теплопровідністю (сталь) (б).

Розглянемо стаціонарне рівняння для температурного поля вздовж тонкого стержня діаметром d :

$$\frac{d}{dx}(\lambda(T) \frac{dT(x)}{dx}) = \frac{4}{d} \{ \sigma(T(x)^4 - T_{\infty}^4) + \alpha(T(x) - T_{\infty}) \}, \quad (1)$$

де стала Стефана-Больцмана $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$, T_{∞} – температура зовнішнього середовища, коефіцієнт тепловіддачі α для природної конвекції у повітрі змінюється в межах $3 - 10 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$.

Якщо температурне поле добре апроксимується залежністю

$$T(x) = T_{\infty} + T_1 \exp(-x/L), \quad (2)$$

то після заміни $t = T/T_{\infty}$ і $\xi = x/L$ отримаємо рівняння

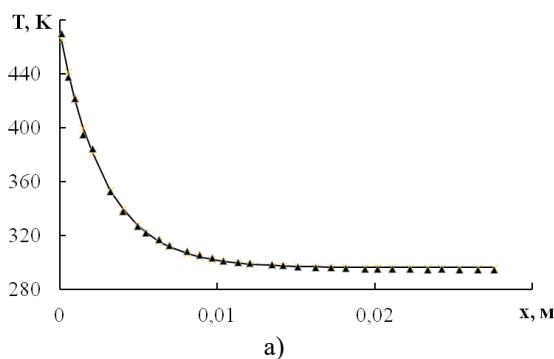
$$\frac{d}{d\xi}(\lambda^*(t) \frac{dt(\xi)}{d\xi}) = t^4 - 1 + \alpha^*(t - 1), \quad (3)$$

де $\lambda^* = \lambda d / 4 L^2 \sigma T_{\infty}^3$, а $\alpha^* = \alpha / \sigma T_{\infty}^3$.

Розв'язком рівняння (3) є

$$\lambda^*(t) = (25 + 12\alpha^* + 13t + 7t^2 + 3t^3)/12. \quad (4)$$

Якщо температурне поле погано апроксимується залежністю (2), то рівняння (1) розв'язуємо чисельно, а крайову умову $t(0)$ і $t'(0)$ для рівняння (3) та коефіцієнти $\lambda^*(t_0)$ і $\lambda^{*'}(t_0)$ розкладу $\lambda^*(t) = \lambda^*(t_0) + \lambda^{*'}(t_0)(t - t_0)$ отримуємо з апроксимації експериментальної $t(\xi)$ теоретичною.



III. Результати вимірювань та апроксимації

На рис. 3. наведено залежність температури фторопластового стержня від координати вздовж осі, а також температурну залежність коефіцієнта теплопровідності.

Залежність температури сталюого стержня від координати вздовж осі, а також залежність коефіцієнта теплопровідності від температури наведено на рис. 4.

IV. Обговорення отриманих результатів

Фторопласт є типовим тепло-ізолятором, температурні залежності коефіцієнта теплопровідності для деяких марок наведені в [6, 7]. В [7] показано, що поруватий фторопласт має коефіцієнт теплопровідності в 3,5 – 4 рази менший ніж компактний фторопласт-4. Ступені чорноти ϵ для чистого фторопласту 0.9–0.95, для фторопласту з домішками або шорсткою поверхнею 0.8–0.9. Вибраний коефіцієнт тепловіддачі α також суттєво впливає на результати обробки. Таким чином відтворення зростання температурної залежності λ та його величини з точністю 6% для типового теплоізолятора вважаємо задовільним.

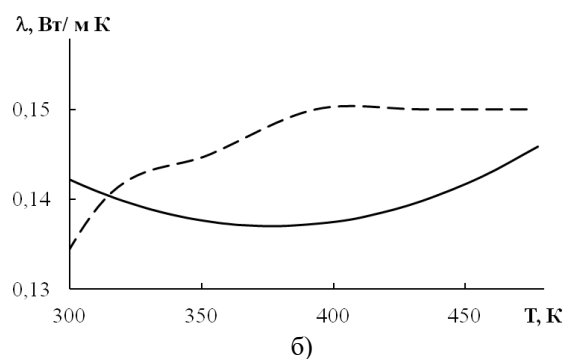


Рис. 3. а) Температурне поле вздовж стержня діаметром 6 мм і довжиною 3 см з фторопласту, отримане за допомогою інфрачервоної тепловізійної камери. Плавна лінія крива (2).

б) Розрахована температурна залежність (суцільна лінія) коефіцієнта теплопровідності, використано коефіцієнт тепловіддачі $\alpha = 12 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$, ступень чорноти $\epsilon = 1$; та для порівняння наведено теплопровідність фторопласта Ф-4НА [6] (штрихова лінія).

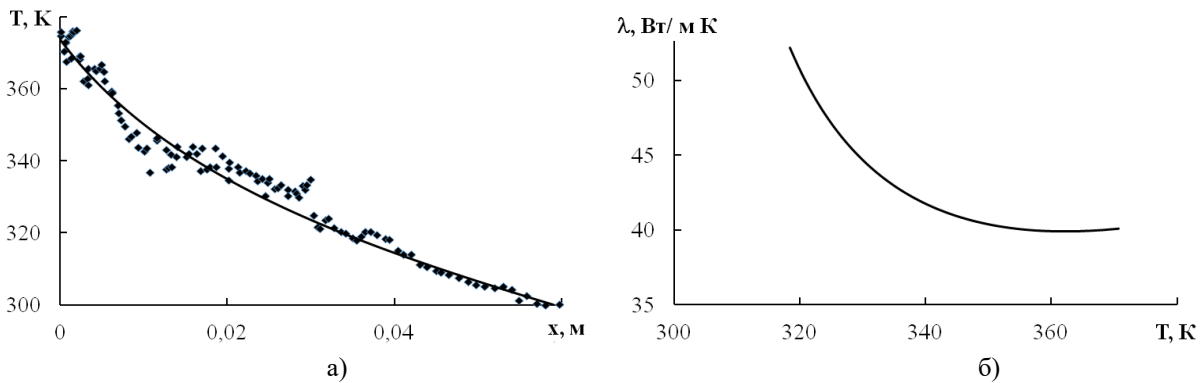


Рис. 4. а) Температурне поле вздовж стержня діаметром 6 мм і довжиною 6 см з сталі, отримане за допомогою інфрачервоної камери. Плавна лінія результат чисельного інтегрування рівняння (3).

б) Розрахована температурна залежність коефіцієнта теплопровідності, використано коефіцієнт тепловіддачі $\alpha = 10 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$, ступень чорноти $\varepsilon = 1$.

Теплопровідність λ сталі залежить від її складу, при підвищенні температури теплопровідність сталі зазвичай зменшується:

$$\lambda(T) = \lambda_0 \cdot (1 - \beta \cdot (T - T_0)),$$

де: λ_0 – теплопровідність при 20°C , β – температурний коефіцієнт $\approx 0.0005 - 0.002 \text{ K}^{-1}$, $\lambda_0 \approx 45 - 50 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ (вуглецева сталь типу Ст3, 10, 20), $\lambda_0 \approx 14 - 16 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ (нержавіюча сталь типу 304, 316).

Ступінь чорноти сталі ε залежить від обробки поверхні, для шліфованої сталі $\approx 0.1 - 0.3$, для окисованої $0.7 - 0.9$. Таким чином, потік випромінювання сильно залежить від ступеня чорноти поверхні: окисовані або зафарбовані поверхні випромінюють у 3–4 рази більше енергії, ніж поліровані.

Отже відтворення спадання температурної залежності λ та його величини з точністю 12% для типового тепло-провідника вважаємо також задовільним.

Висновки

Розроблено методику вимірювання температурної залежності коефіцієнта теплопровідності, яка ґрунтується на аналізі температурного поля отриманого з інфрачервоної тепловізійної камери та розв’язку стаціонарного неоднорідного рівняння теплопровідності.

Показано, що розроблений метод можна використовувати для вимірювання температурної залежності коефіцієнта теплопровідності для твердих матеріалів, зокрема металів, багатокомпонентних сплавів, напівпровідників та діелектриків.

Салій Я.П. – доктор фізико-математичних наук, професор;
Дзундза Б.С. – доктор технічних наук, професор.

- [1] S. Aksöz, E. Öztürk, N. Marasli, *The measurement of thermal conductivity variation with temperature for solid materials*, Measurement, 46, 161 (2013); <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.06.003>.
- [2] B.S Dzundza., O.B. Kostyuk, U.M. Pysklynets, Z.M. Dashevsky, , *Development of high-precision hardware and software tools for automated determination of the characteristics of thermoelectric devices*. Physics and chemistry of solid state, 24 (2), 278 (2023); <https://doi.org/10.15330/pcss.24.2.278-283/>.
- [3] M.O. Galushchak, V.G. Ralchenko, D.M. Freik, A.I. Tkachuk, *Analysis of methods for determining the thermal conductivity of thin films*. Methods and devices for quality control, 1 (28), 162 (2012).
- [4] Hu Zhang, Chenyang Shang, Guihua Tang, *Measurement and identification of temperature-dependent thermal conductivity for thermal insulation materials under large temperature difference*, International Journal of Thermal Sciences 171, 107261 (2022); <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.107261>.
- [5] Sichao Hou, Ming Su, *Image-based rapid measurements of temperature dependent thermal conductivities*, Journal of Heat Transfer, 140 (8), 084501 (2018); <https://doi.org/10.1115/1.4039219>.
- [6] I.A. Rozov, *Thermal conductivity of fluoroplastics*, Plastics, 6, 42 (1988).
- [7] O.B. Kalyuzhny, B.G. Kalyuzhny, V.Ya. Khustkov, *Thermal conductivity of highly porous materials based on fluoroplastic-4*, Technical service of the agro-industrial, forestry and transport complexes, 6, 195 (2016).

Ya.P. Saliy, B.S. Dzundza

Analytical method for determining the temperature dependence of the thermal conductivity coefficient

¹*Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk, Ukraine, yaroslav.saliy@pnu.edu.ua*

The paper developed an analytical method for determining the temperature dependence of the thermal conductivity coefficient, which is based on the approximation of the temperature field obtained using an infrared thermal imaging camera by the solution of the inhomogeneous stationary equation of thermal conductivity.

From the obtained experimental dependences, it is shown that the proposed method based on the stationary heat flux can be used to determine the temperature dependence of the thermal conductivity coefficient for solids: metals, multicomponent alloys, semiconductors and dielectrics. The temperature dependences of the thermal conductivity of test samples of fluoroplastic and steel were obtained. According to these experimental results, the thermal conductivity of fluoroplastic increases, and the thermal conductivity of steel decreases with increasing temperature.

Keywords: thermal conductivity, measurement methods, temperature dependences, thermal imager, stationary equation.