

УДК 621.316

Виноградов-Салтиков В.А., канд. техн. наук, доцент,  
Єщенко О.І., канд. техн. наук, доцент,  
Ряго В.В., магістр,

Національний технічний університет України «КПІ ім. І.Сікорського», м. Київ,  
[doc44ent@gmail.com](mailto:doc44ent@gmail.com)

## ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ В РЕГУЛЯРНОМУ РЕЖИМІ

На даний час актуальною проблемою є пошук і створення енергозберігаючих заходів та інженерних рішень, що могли б забезпечити мінімальне тепло- та енергоспоживання на теплотехнологічні процеси та одночасно звести до мінімуму теплові втрати. Значну роль у цьому відіграє знання теплофізичних характеристик (ТФХ), що використовуються в якості розрахункових значень для оцінки теплозахисних властивостей конструкційних матеріалів. Не останню роль має знання цих властивостей на процеси нагрівання, обробки й виготовлення матеріалів і виробів, та матеріалу, що використовується в оболонці апаратів, конструкцій огорожень, а також змінності їх властивості від вологості, температурних та механічних навантажень. В більшості випадків потрібно розглядати так звані ефективні властивості продуктів і матеріалів, і визначати їх в нестационарних процесах, під час яких і відбуваються характерні зміни в структурі речовини матеріалу.

Комплексне визначення дозволяє одночасно визначити перелічені характеристики (властивості) при зміні температури, вологості, що особливо важливо, враховувати структурні зміни всередині речовин з можливими фазовими перетвореннями.

Метою дослідження є особливості накопичення та перенесення енергії у нестационарному режимі, аналітичного опису цих процесів, застосування теорії подібності, а також методики визначення коефіцієнта температуропровідності, темпу охолодження та теплоємності – у регулярному режимі II роду.

Різниця температур в окремих точках тіла є рушійною силою перенесення теплової енергії або теплоти в напрямку меншої температури. Перенесення теплоти може відбуватися трьома способами за рахунок теплопровідності, конвекції та випромінювання.

Для сипких та поруватих матеріалів всі перелічені процеси перенесення теплоти поєднуються і відбуваються сумісно, а саме:

- 1) теплопровідність у твердих частинках чи каркасі –  $Q_{\lambda_{тч}}$ ;
- 2) теплопровідність у газуватому заповнювачі –  $Q_{\lambda_{г}}$ ;
- 3) конвекція у порах –  $Q_{\alpha}$
- 4) променистий теплообмін між твердими частинками (стінками пор) –  $Q_{\epsilon}$ .

Чисельні експерименти показали, що для більшості теплоенергетичних та теплотехнологічних процесів частка енергії, що переноситься конвекцією у порах та променистим теплообміном між твердими частинками, а подекуди теплопровідністю у твердих частинках чи тонкому каркасі, є дуже малою порівняно із теплопровідністю газового чи рідинного заповнювача. Це дає можливість застосувати феноменологічний підхід до цього явища, тобто розглядати нерухомий сипкий або поруватий матеріал — як простір, заповнений не окремими частинками, а суцільною масою, в якій тепла енергія поширюється лише теплопровідністю.

Теплопровідність в пористому матеріалі будемо розглядати через молекулярне перенесення теплоти в тілах або між ними, що обумовлено перемінністю температурного поля. Процеси теплопровідності, за якими температурне поле змінюється з часом, називаються нестационарним

Нестационарні процеси теплопровідності відбуваються при нагріванні або охолодженні тіл і супроводжуються зміненням ентальпії тіла. Будь-який процес нагріву або охолодження тіла можна умовно поділити на три стадії.

Перша стадія відповідає початку процесу, характеризує поширення температурних збурень. На цій стадії швидкість змінення температури в різних очах тіла різна, температурне поле залежить від початкового розподілу температур. Такий режим називається неусталеним.

З часом вплив початкових нерівномірностей (значень) температури в тілі зменшується і швидкість змінення температури у всіх точках тіла стає сталою величиною, що залежить від форми і розмірів тіла, його теплофізичних властивостей, умов теплообміну на поверхні тіла. режим називається регулярним.

Після тривалого часу (теоретично нескінченно великого часу) настає стаціонарний режим з постійним розподілом температури тіла в часі.

Рішення задачі нестационарної теплопровідності це визначення температурного поля і кількості теплоти, що отримується тілом за час  $\tau$ . Ці задачі розв'язуються рішенням диференційного рівняння теплопровідності спільно з умовами однозначності. [1]. Умови однозначності це математичний опис всіх частинних особливостей конкретного процесу.

Другий закон Фур'є або диференціальне рівняння Фур'є-Кірхгофа для сферичної стінки має такий вигляд:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2\partial t}{r\partial r} \right), \quad (1)$$

де додатково до рівняння  $\int_{t_1}^{t_2} dt = - \int_{r_1}^{r_2} \frac{Q}{4\pi \cdot \lambda} \frac{dr}{r^2}$ .

$\tau$  – час процесу;

$c$  – масова теплоємність;

$\rho$  – густина матеріалу.

Для порожнистої кулі це рішення наведене у праці [1]. Однозначно перетворити його відносно величин  $\lambda$ ,  $c$ , чи  $\alpha$  неможливо, тому вдаються до методів теорії подібності. В нашому випадку рівняння подібності має такий вигляд:

$$\theta = f(\eta; Fo; Bi), \quad (2)$$

де  $\theta$  – відносна надлишкова температура, або температурний критерій,

$\eta$  – відношення внутрішнього та зовнішнього радіусів кульового про шарку,

$Fo$  – безрозмірний час процесу, або число Фур'є;

$Bi$  – число подібності граничних умов, або число Біо.

Дана робота має практичну та дослідницьку спрямованість і яка має можливість розглядати визначення ТФХ різних за складом матеріалів під час лабораторної роботи [2].

#### Список посилань

1. Лыков А. В. Тепломассобмен / А.В. Лыков – М.: Энергия, 1978. – 480с.
2. Теплотехнічні вимірювання. Визначення теплоємності та температуропровідності сипких матеріалів у регулярному режимі: Навчальний посібник., Лабораторний практикум. / Уклад.: В.О. Виноградов-Салтиков, О.І. Єщенко. Електронне мережне видання – К.: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2022. – 22 с.