

Винахід відноситься до експериментальної теплофізики і може бути використаний для визначення коефіцієнта тепловіддачі твердих тіл у різноманітних охолоджуючих середовищах.

Відомий спосіб визначення коефіцієнта тепловіддачі твердих тіл, коли шляхом одноосового деформування в межах пружкості постійним зусиллям викликають стрибкоподібну зміну температури зразка, розміщеного в дослідному середовищі, вимірюють зміну в часі температури його поверхні, визначають темп нагрівання (охолодження) у регулярному тепловому режимі і по формулах обчислюють коефіцієнт тепловіддачі [1].

Основними недоліками цього способу варто вважати те, що коефіцієнт тепловіддачі визначається при низьких температурах зразка і в умовах, коли температура зразка відрізняється від температури охолоджуючого середовища на незначну величину. Тоді, як у виробничих умовах потрібно нагрівати зразок до високих температур, порядку 800°C і вище, і охолоджувати його в рідині зі значно більш низькою температурою.

Відомий також спосіб визначення коефіцієнта тепловіддачі, оснований на охолодженні стандартного срібного зразка (кулька діаметром 20 мм), нагрітого до високої температури T_3 , який охолоджується у досліджуваній рідині із температурою T_p . [2]. У процесі охолодження кульки вимірюють і реєструють температуру T_u центру кульки, як функцію часу $T_u(\tau)$. Внаслідок малих розмірів кульки і високої теплопровідності срібла температуру поверхні приймають рівній температурі центру кульки $T_n = T_u$ і знаходять коефіцієнт тепловіддачі а відповідно до формули Ньютона:

$$\alpha(T_u) = \frac{q}{T_u(\tau) - T_p}, \quad (1)$$

де: q - щільність теплового потоку на поверхні кульки визначають по формулі:

$$q = \frac{mc_p}{S} \frac{dT_u(\tau)}{d\tau}, \quad (2)$$

де: m - маса кульки, кг;

c_p - питома теплоємність срібла, Дж/(кг°) при температурі $T_u(\tau)$;

S - площа поверхні кульки, м².

Цей спосіб має наступний недолік. При інтенсивному теплообміні між зразком і рідиною різниця температури центру і поверхні кульки стає настільки велика, що використання температури $T_u(\tau)$ у якості температури поверхні призводить до великих похибок при визначенні коефіцієнта тепловіддачі. Наприклад, у воді (при $T_p=20^\circ\text{C}$) охолодження центру зразка більше 750°C/s і перепад температури центру і поверхні зразка складає біля 80°C . При дослідженні рідин із високою охолоджуючою спроможністю (наприклад, водні розчини хлоридів) швидкість охолодження центру срібної кульки досягає значень більш як 2000°C/s і використання температури центру для розрахунку значень коефіцієнта тепловіддачі α по формулах (1, 2) призводить до похибки більше 50%. Відзначений недолік значно знижує точність експерименту.

Задача, на розв'язання якої спрямований винахід, полягає у вдосконаленні способу визначення коефіцієнта тепловіддачі шляхом визначення температури поверхні і при розрахунку коефіцієнта тепловіддачі її використовують замість температури центру; щільність теплового потоку в заданий момент часу також знаходять по температурі центру, виміряної з запізненням, тривалість якого визначається тепловими властивостями зразка, в результаті чого досягається підвищення точності визначення коефіцієнта тепловіддачі. Це розширить можливості дослідження процесу тепловіддачі твердих тіл і дозволить із меншими витратами одержати дані про коефіцієнт тепловіддачі, що дозволить точно визначити баланс теплових процесів у досліджуваних системах при розв'язанні відповідних крайових задач. Крім того визначення коефіцієнту тепловіддачі по температурі поверхні, а не по температурі центру, зменшує абсолютну похибку визначення T_n у 4-5 разів. При визначенні теплового потоку відносна похибка визначення q зменшується в 5-6 разів.

Поставлена задача вирішується тим, що в способі визначення коефіцієнта тепловіддачі при кипінні рідини на поверхні, що охолоджується, який включає нагрів срібної кульки до високої температури, охолодження його в досліджуваній рідині, вимірювання температури центру кульки в залежності від часу, розрахунок теплового потоку при прийнятій умові рівності температури центру і поверхні кульки і розрахунок коефіцієнта тепловіддачі по формулі Ньютона, згідно з винаходом апроксимують залежність

$$\Delta\tau = \frac{0,12R^2}{a}$$

температури центру кульки від часу лінійною функцією на ділянці часу $\Delta\tau$, визначають похідну температури центру кульки по відношенню збільшення лінійної функції температури до відрізка часу $\Delta\tau$;

визначають щільність теплового потоку в момент часу τ за значеннями похідної температури центру

кульки в момент часу $\tau + \frac{R^2}{6a}$, знаходять значення температури поверхні по формулі

$$T_n(\tau) = T_u(\tau) - 0,5 \frac{q(\tau) \cdot R}{\lambda},$$

де:

λ, a - значення коефіцієнтів тепло- і температуропровідності срібла при

температурі $T_u(\tau)$;

R - радіус кулі;

і за значеннями теплового потоку і температури поверхні кулі визначають а відповідно до формули Ньютона.

Сутність винаходу полягає в тому, що досліджуваний зразок нагрівають до 800°C, а потім занурюють в охолоджуюче середовище. У процесі охолодження вимірюється температура центру зразка. З метою визначення температури поверхні кульки використовуємо розв'язок задачі теплопровідності, коли нагрів (охолодження) кульки з радіусом R відбувається рівномірно по всій поверхні при постійній щільності теплового потоку $q = \text{const}$. Розв'язок має вигляд (Ликов А.В. Теорія теплопровідності. - М.: Вища школа. 1967):

$$\theta = \frac{T(r, \tau) - T_0}{T_n - T_0} = K_i \left[3Fo - \frac{1}{10} \left(3 - 5 \frac{r^2}{R^2} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n^2 \cos \mu_n} \cdot \frac{R \sin \mu_n \frac{r}{R}}{r \mu_n} \exp(-\mu_n^2 Fo) \right], \quad (3)$$

де $K_i = \frac{qR}{\lambda(T_n - T_0)}$ - критерій Кирпичова;

$Fo = \frac{\alpha \tau}{R^2}$ - критерій Фур'є;

ρ, λ - відповідно, щільність у кг/м^3 і коефіцієнт теплопровідності у Вт/(мН) ;

T_0, T_n - початкова температура і температура поверхні;

μ_n - корені характеристичного рівняння $\text{tg} \mu = \mu$.

Із збільшенням значень Fo ряд у розв'язку (3) швидко наближається до нуля і вже для $Fo > 0,15$ значенням ряду можна зневажити в порівнянні з двома першими в квадратних скобках виразу (3). Наступає квазістаціонарний режим теплообміну і температура убуває по лінійному закону з однакою для всіх точок кулі швидкістю, а зміна температури уздовж радіусу діє за законом параболи, і рішення (3) приймає вигляд

$$\Theta = K_i \left[3Fo - \frac{1}{10} \left(3 - 5 \frac{r^2}{R^2} \right) \right]. \quad (4)$$

І тоді температура поверхні при охолодженні кульки визначається по формулі:

$$T_n(\tau) \equiv T_c(\tau) - 0,5 \frac{qR}{\lambda}. \quad (5)$$

Таким чином, для $Fo \geq 0,15$ для срібної кульки радіусом $R = 10^{-2} \text{ м}$ і $\Delta \tau > 0,1 \text{ с}$ наближене значення (5) температури поверхні $T_n(\tau)$ дозволяє знаходити різницю температур $(T_n - T_c)$ із похибкою менше 2% у порівнянні з точним значенням, знайденим із виразу (3). Щоб скористатися виразом (5), апроксимуємо дослідну залежність температури центру кульки лінійною залежністю $T_c(\tau) = a + b\tau$ на ділянці часу $(\tau + \Delta \tau, \tau)$, тобто моделюємо тепловий процес охолодження кульки на цій ділянці розв'язком (3) при квазістаціонарному режимі - формулою (4). Тоді температуру поверхні $T_n(\tau)$ визначаємо по формулі (5), а тепловий потік визначаємо по формулі (2), де похідну температури центру кулі замінюємо на відношення збільшення лінійної функції $\Delta T_c(\tau)$ до відрізка часу $\Delta \tau$.

Застосування формули (2) відповідає практичним вимогам точності для повільно мінливих у часу теплових потоків на поверхні кульки, а коли інтенсивність теплообміну між зразком і охолоджуючою рідиною швидко змінюється (наприклад, при зміні плівкового режиму кипіння рідини на поверхні кулі на бульбашковий) похибка у визначенні q досягає значень більш як 50%. Це обумовлено тим, що динаміка (зміна) теплового потоку на поверхні кульки проявляється з запізненням у зміні температури центру кульки, що визначається часом поширення температурної хвилі від поверхні до центру 8 нс . Час запізнення можна знайти по формулі (4) з умов рівності температури центру і поверхні кульки. Для срібної кульки радіусом 10^{-2} м при $T = 720^\circ \text{C}$ маємо:

$$\delta \tau = \frac{R^2}{6a} = \frac{10^{-4} \text{ м}^2}{(6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-4}) \text{ м}^2 / \text{с}} = 0,104 \text{ с}, \quad (6)$$

де a - коефіцієнт температуропровідності срібла при $T = 720^\circ$.

Таким чином, для визначення щільності теплового потоку на поверхні кульки по формулі (2) у момент часу τ знаходимо значення похідної температури в центрі кульки радіусом 10^{-2} м в момент часу $(\tau + \delta \tau)$, де $\delta \tau$ визначається температуропровідністю срібла при $T_c(\tau + \delta \tau)$.

Запропонований спосіб визначення коефіцієнта тепловіддачі має такі переваги. Коефіцієнт тепловіддачі визначається по температурі поверхні, а не по температурі центру, що зменшує абсолютну похибку T_n у 4-5 разів. При визначенні теплового потоку відносна похибка визначення q зменшується в 5-6 разів.

З метою перевірки працездатності запропонованого способу були проведені досліді на срібній кульці діаметром 20 мм, що нагрівалася до 800°C і охолоджувалася до 100°C (кінець бульбашкового кипіння). У якості охолоджуючого середовища використовувалися вода і водні розчини солей.

Методична похибка визначення щільності теплового потоку і температури поверхні оцінювали в такий

спосіб. Методом кінцевих різниць були розраховані температурні поля срібної кульки при заданих щільностях теплового потоку $q(\tau)$ на поверхні кульки. Вигляд функції $q(\tau)$ визначали по дослідних даних охолодження срібної кульки в холодній воді і 15% розчині солі NaCl, приведеними в роботі Петраша Л.В. Похибка розрахунків температурних полів характеризується абсолютною похибкою $\Delta T < 0,1^\circ\text{C}$. Потім по температурі центру кульки відповідно до запропонованого способу знаходили значення $q^*(\tau)$ і $T_n^*(\tau)$.

Після цього оцінювалася методична похибка запропонованого засобу по відомих (або заданих) значеннях щільності теплового потоку $q(\tau)$ і дійсних значеннях температури поверхні $T_n(\tau)$, розрахованих в результаті розв'язку прямої задачі теплопровідності методом кінцевих різниць. Для порівняння оцінювалася методична похибка методу прототипу.

У таблиці, як приклад, подані результати, отримані в момент часу τ , де похибки δq і ΔT досягають локальних максимумів.

Таблиця

Час, τ , с	α - розраховане, Вт/м ² °C	α - автор., α Вт/м ² °C	α - прототип Вт/м ² °C	$\delta\alpha$ - автор., $\delta\alpha$ %	$\delta\alpha$ - прототип, $\delta\alpha$ %
2,17	11537	12175	5298	5,4	-54,2
2,34	28320	28020	18130	-1,1	-36,0
2,49	33419	31698	31009	-5,2	-7,2
2,81	97340	98792	16622	1,5	70,8

В результаті встановлене таке:

при інтенсивності процесу охолодження кульки, що характеризується умовою $q_{\max} \leq 10^7$ Вт/м², для моментів часу $\tau > 0,12$ с (τ - час від початку охолодження кульки), при кроці апроксимації $\Delta \tau = 0,07\text{с} \div 0,10$ с методична похибка визначення щільності теплового потоку $q^*(\tau)$ знаходиться в межах від 0,1% до 4%; абсолютна похибка визначення температури менше 5°C , при цьому різниця температури центру і поверхні кульки досягає значень більш як 100°C ;

при інтенсивності охолодження кульки, що характеризується умовою;

$10^7 \text{ Вт/м}^2 < q_{\max}(\tau) < 2107 \text{ Вт/м}^2$ і умовах, зазначених вище ($\tau > 0,12$ с, $\Delta \tau = 0,06\text{с} \div 0,09$ с) методична похибка визначення $q^*(\tau)$ не більша за 9%, а абсолютна методична похибка визначення температури поверхні кульки менше 40°C , при цьому різниця температури центру і поверхні кульки досягає значень більш як 260°C .

На цих прикладах показано, що запропонований спосіб визначення коефіцієнта тепловіддачі дозволяє значно підвищити його точність.

Джерела інформації:

1. Авторське свідоцтво Російської Федерації № 2046327, Кп.6G01 N25/18, (аналог).
2. Петра Л.В. Заключные среды. М. - Л.: Машгиз, 1959. - 112 с., (прототип).