

Работа ТП-01
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы — ознакомление с основными понятиями теории теплопроводности; освоение методики экспериментального определения коэффициента теплопроводности и методики обработки полученных результатов.

Содержание работы

1. Экспериментальное определение коэффициента теплопроводности исследуемого материала при трех температурных режимах.
2. Получение аналитической зависимости коэффициента теплопроводности от температуры (в пределах возможной точности).
3. Оценка погрешностей измерений.

Основы теории

Теплопроводностью называется перенос теплоты в сплошной среде вследствие теплового движения структурных частиц вещества, т. е. перенос, не связанный с конвективным движением макроскопических частиц.

Совокупность значений температуры для всех точек рассматриваемого тела в фиксированный момент времени называется *температурным полем тела*; оно скалярно и может быть стационарным или нестационарным.

Геометрическое место точек с одинаковой температурой представляет собой изотермическую поверхность. На плоскости, секущей такие поверхности, получают линии — *изотермы*.

Любому температурному полю соответствуют поля двух векторных величин — поле температурного градиента и поле плотности теплового потока. *Температурным градиентом* (∇t , или $\text{grad } t$) в какой-либо точке является вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в этой точке в сторону роста температуры и по абсолютной величине равный

$$|\nabla t| = \left| \frac{\partial t}{\partial n} \right| = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta t}{\Delta n} \right|, \quad (1.1)$$

где ∇t — градиент температуры, К/м; Δn — длина отрезка нормали к изотермической поверхности, на концах которого разность температур равна Δt , К.

Плотность теплового потока q , Вт/м², в какой-либо точке есть вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности (в этой точке) в сторону снижения температур и по абсолютной величине равный количеству теплоты, проходящему в единицу времени через единицу площади изотермической поверхности.

Закон Био — Фурье устанавливает связь между векторами q и $\text{grad } t$:

$$q = -\lambda \text{grad } t. \quad (1.2)$$

Знак минус указывает на противоположные направления векторов. Здесь λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К), являющийся теплофизической характеристикой материальной структуры и указывающий на способность вещества проводить теплоту.

В общем случае коэффициент теплопроводности является функцией структуры, плотности и влажности вещества, а также температуры и давления. В большинстве технических задач λ рассматривается либо как постоянная величина, либо как функция только температуры. По своему физическому смыслу коэффициент теплопроводности можно определить как количество теплоты, проходящее в единицу времени через единицу изотермической поверхности в рассматриваемой среде при единичном значении градиента температуры.

Числовое значение коэффициента теплопроводности изменяется в широких пределах: для газов $\lambda = 0,005 \dots 0,50$ Вт/(м·К); для капельных жидкостей $\lambda = 0,08 \dots 0,80$ Вт/(м·К); для строитель-

ных и теплоизоляционных материалов $\lambda = 0,02 \dots 3,0$ Вт/(м·К); для металлов $\lambda = 8 \dots 410$ Вт/(м·К).

Значения коэффициента теплопроводности определяют экспериментальным путем. Наиболее простыми для определения величины λ являются стационарные методы, в частности так называемый метод пластины. Для плоской стенки, имеющей толщину δ и состоящей из однородного вещества, при соблюдении граничных условий первого рода (при поддержании постоянства температуры на границах раздела (t_{c1} и t_{c2})), распределение температуры линейно, изотермические поверхности параллельны границам раздела, а градиент температуры постоянен и равен $\text{grad } t = (t_{c2} - t_{c1})/\delta$.

Плотность теплового потока, проходящего через стенку,

$$q = -\lambda \text{grad } t = -\lambda(t_{c2} - t_{c1})/\delta, \quad (1.3)$$

поэтому коэффициент теплопроводности следует определять по формуле

$$\lambda = \frac{q\delta}{t_{c2} - t_{c1}}$$

или

$$\lambda = \frac{Q\delta}{F(t_{c2} - t_{c1})}, \quad (1.4)$$

где $Q = qF$ — общее количество теплоты, проходящее через плоскую стенку, Вт; F — площадь поверхности теплообмена, м².

В рассматриваемой задаче торцовые поверхности стенки считаются теплоизолированными.

Описание установки

Для экспериментального определения коэффициента теплопроводности в этой работе используют стационарный метод — метод пластины. Пластинами служат два плоских диска. Схема установки представлена на рис. 1.1. Два диска 3 (толщина $\delta = (5,0 \pm 0,15)$ мм, диаметр $d = 140$ мм) из исследуемого материала установлены между двумя холодильниками 2 и нагревателем 5. Плотность контакта дисков с поверхностями нагревателя и холодильника обеспечивается благодаря высокому качеству обработки поверхностей (по седьмому классу) и скреплению элементов установки болтовым соединением.

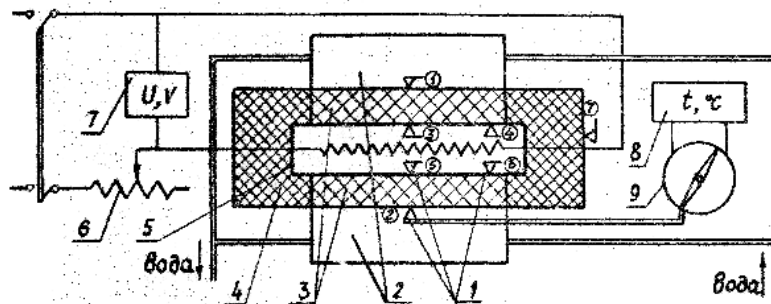


Рис. 1.1. Схема экспериментальной установки:

1 — термопары; 2 — холодильники; 3 — диски (исследуемые образцы); 4 — кожух; 5 — нагреватель; 6 — автотрансформатор; 7 — комбинированный прибор (вольтметр); 8 — милливольтметр; 9 — переключатель термопар

Корпус нагревателя состоит из двух скрепляемых между собой латунных дисков (диаметр $d_n = 146$ мм, общая высота $h_n = 12$ мм). В пространстве между дисками установлен нагревательный элемент из нихромовой проволоки, изолированный от дисков асбестом. Питание нагревателя осуществляется переменным током через автотрансформатор 6, позволяющий изменять подаваемую мощность. Падение напряжения на нагревательном элементе измеряется комбинированным прибором 7 (Щ-4313 первого класса). Электрическое сопротивление элемента определено в процессе изготовления лабораторной установки и равно 41,7 Ом (с погрешностью менее 1%). Нагреватель окружен кожухом 4, являющимся теплоизолятором для боковых поверхностей исследуемых дисков 3.

В установившемся тепловом режиме выделяющаяся в нагревателе теплота почти полностью (за вычетом радиальных утечек) проходит через образцы и затем отводится с водой, протекающей через полости двух холодильников. Каждый из них представляет собой цилиндрическую коробку (наружным диаметром 140 мм) из стали, состоящую из корпуса и крышки (общая высота 20 мм). Корпус выполнен в виде диска с выфрезерованными спиральными канавками для направленной циркуляции воды.

Для измерения температуры поверхностей образцов использовано шесть хромель-копелевых термопар. Термопары № 1 и 2

зачеканены по центру прилегающих к образцам поверхностей холодильников; четыре термопары — на торцовых поверхностях нагревателя (№ 3 и 5 — по центру, № 4 и 6 — на периферии). На боковой поверхности теплоизолирующего кожуха установлена термопара № 7. Термопары присоединены через переключатель 9 к милливольтметру 8 (МВ 46-41 А первого класса), фиксирующему их показания. Время выхода установки на стационарный режим — не более 20 мин.

Порядок выполнения работы

Перед включением установки проверить наличие и исправность цепи заземления корпуса установки. Убедиться, что ручка регулятора напряжения (автотрансформатора) выведена против хода часовой стрелки до упора.

1. Включить установку в сеть нажатием кнопки выключателя на пульте (при этом загорится сигнальная лампа).

2. Записать показания ртутного термометра, фиксирующего температуру воздуха в помещении ($t_{в}$).

3. Открыть вентиль подачи охлаждающей воды в холодильники, убедиться в нормальной работе системы охлаждения.

4. Включить подачу напряжения на нагревательный элемент и затем, вращая ручку автотрансформатора по ходу часовой стрелки, плавно установить значение напряжения для первого режима $U \approx 35$ В. Для более точного измерения U в первом, а затем и во втором режиме следует использовать диапазон $U \leq 50$ В прибора 8 (с соответствующим тумблером).

5. После 20 мин работы установки измерить значения температуры t_1, \dots, t_7 милливольтметром.

6. Повторять измерения всех значений температуры через 3...5 мин: убедиться, что показания не меняются во времени.

7. Установить второй режим работы установки, увеличивая напряжение до $U \approx 48$ В.

Время выхода на стационарный режим выдержать в течение 15...20 мин.

8. Провести измерения в таком же порядке, что и в первом режиме (см. п. 6).

9. Установить третий режим ($U \approx 60$ В), переключив предел измерений прибора 8 на 500 В, и провести измерения в той же последовательности, что и в первом режиме.

10. По окончании эксперимента отвести ручку автотрансформатора против хода часовой стрелки до упора, выключить подачу напряжения на нагреватель, отключить питание установки, после чего закрыть вентиль подачи воды в холодильники.

Обработка результатов экспериментов

Для расчетов следует использовать результаты, относящиеся к полностью установившемуся стационарному режиму.

Количество теплоты, Вт, выделяемое нагревателем в единицу времени, определяется согласно выражению

$$Q = \frac{U^2}{R}, \quad (1.5)$$

где U — измеренное падение напряжения на рабочем участке, В; R — активное сопротивление нагревательного элемента, Ом.

Расчетный тепловой поток, проходящий через исследуемые образцы,

$$Q_p = Q - Q_{\text{пот}}, \quad (1.6)$$

где $Q_{\text{пот}}$ — количество теплоты, теряемое вследствие утечек через теплоизолирующий кожух. С целью предварительной оценки этой величины было рассмотрено трехмерное (фактическое) стационарное поле в элементах установки. Для расчета потерь получены формулы

$$Q_{\text{пот}} = F_k \alpha_k (t_k - t_b) + 0,33(t_b - t_x); \quad (1.7)$$

$$\alpha_k = 3,31 + 2,4 \cdot 10^{-3}(t_p + t_r); \quad (1.8)$$

$$t_p = t_b + 0,30(t_r - t_b) - 0,06(t_b - t_x). \quad (1.9)$$

Здесь $F_k = 0,039 \text{ м}^2$ и t_k — соответственно расчетная площадь и средняя температура, °С, наружной поверхности теплоизолирующего кожуха; α_k — коэффициент теплоотдачи от поверхности кожуха, Вт/(м²·К); t_p — расчетная температура, °С, теоретически равная температуре, измеренной термопарой № 7; t_b и t_b — температуры окружающего воздуха и крепежного болта, °С; t_x и t_r —

средние температуры торцов двух образцов со стороны холодильников и нагревателя соответственно, °C, при этом

$$t_x = (t_1 + t_2)/2; \quad t_r = (t_3 + t_4 + t_5 + t_6)/4. \quad (1.10)$$

По предварительным расчетам

$$t_6 = 0,13t_r + 0,09t_b + 0,73t_x; \quad t_k = 1,08t_p - 0,08(2t_b - t_x). \quad (1.11)$$

Коэффициент теплопроводности определяют по выражению

$$\lambda = \frac{Q_p \delta}{2F(t_r - t_x)}, \quad (1.12)$$

где $F = \pi d^2/4$ – площадь торцевой поверхности образца, м²; δ – толщина образца, м.

Полученное по формуле (1.12) значение коэффициента теплопроводности следует считать относящимся к средней температуре образца

$$t_{cp} = (t_r + t_x)/2. \quad (1.13)$$

По результатам для трех указанных выше режимов, считая зависимость коэффициента теплопроводности от средней температуры образца линейной функцией вида

$$\lambda = a + bt_{cp}, \quad (1.14)$$

следует построить график этой зависимости и определить значения a и b .

Оценка погрешностей измерений

Среднее квадратичное значение относительной погрешности косвенного измерения коэффициента теплопроводности рассчитывают в соответствии с выражением (1.12) по формуле

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cdot 100\% = \\ = \sqrt{\left(\frac{\Delta\delta}{\delta}\right)^2 + 2\left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 + 2\left(\frac{\Delta t}{t_r - t_x}\right)^2} + W \cdot 100\%, \end{aligned} \quad (1.15)$$

где $W = \frac{\Delta Q^2 + \Delta Q_{\text{пот}}^2}{(Q - Q_{\text{пот}})^2}$; Δ – символ абсолютной погрешности. Справедливо, что $|\Delta Q_{\text{пот}}| \ll |\Delta Q|$ и $\Delta Q/Q = 2\Delta U/U + \Delta R/R$. Можно принять $|\Delta U/U| \gg |\Delta R/R|$; поэтому $\Delta Q/Q \approx 2\Delta U/U$; $\Delta U/U = \pm 0,01(U_{\uparrow} - U_{\downarrow})/U$, где U_{\uparrow} и U_{\downarrow} – верхний и нижний пределы используемого диапазона значений напряжения; U – измеряемое значение напряжения. Значение Δt допустимо принять равным 1 К. Считая погрешности в определении геометрических размеров образца пренебрежимо малыми ($\Delta \delta = \Delta d = 0$), получаем

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} \cdot 100 \% = \pm 2 \sqrt{\frac{(U_{\uparrow} - U_{\downarrow})^2 U^2}{10^{-4}(1 - Q_{\text{пот}}/Q)^2} + \frac{1}{(t_{\Gamma} - t_{\times})^2}} \cdot 100 \%$$

Отчет о работе должен содержать: краткое описание работы; принципиальную схему экспериментальной установки; оформленный протокол испытаний, содержащий оценку погрешности измерения.

Контрольные вопросы

1. Напишите уравнение Био – Фурье. Поясните физический смысл входящих в него величин.
2. Дайте определение коэффициента теплопроводности.
3. При каких граничных условиях получена расчетная формула, используемая при экспериментальном определении коэффициента теплопроводности λ ?
4. Дайте пояснения к схеме экспериментальной установки.
5. При каком режиме работы установки осуществляются измерения?
6. Какие величины измеряются при проведении эксперимента?
7. Назовите основные причины возможных погрешностей данного эксперимента.