

Набережночелнинский институт К(П)ФУ

Кафедра высокоэнергетических процессов и агрегатов

Определение коэффициента теплопроводности материалов

Методические указания

Набережные Челны
2016

Печатается по решению учебно-методической комиссии отделения
энергетики и информатизации НЧИ К(П)ФУ

Рецензент

канд. техн. наук, доцент **Галимянов И.Д.**

ГАБДРАХМАНОВ А.Т.

Определение коэффициента теплопроводности материалов:
метод. указания / сост. Габдрахманов А.Т., Рахимов Р.Р.,
Шафигуллин Л.Н. – Набережные Челны: НЧИ КФУ, 2016. – 16
с.: ил.: 2. Библиогр.: 5 назв.

Методические указания предназначены для выполнения
лабораторных работ студентами по курсам «Тепломассообмен»,
«Теплопередача», «Теплотехника».

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: получить представление о физической сущности процесса теплопроводности и его математическом описании; ознакомиться с методом экспериментального определения коэффициента теплопроводности.

Основы теории

Теплопроводность - это явление переноса теплоты, обусловленное взаимодействием микрочастиц, соприкасающихся тел (или частей одного тела), имеющих разную энергию (температуру). При этом в газах перенос энергии осуществляется путем диффузии молекул и атомов, а в жидкостях и твердых телах-диэлектриках — путем упругих волн. В металлах перенос энергии в основном осуществляется путем диффузии свободных электронов, а роль упругих колебаний кристаллической решетки здесь второстепенна.

Теплопроводность, как и все виды теплообмена, осуществляется при наличии разности температур в различных точках пространства или тела, которая в свою очередь меняется во времени. Совокупность значений температуры всех точек или пространства $M(x, y, z)$ в данный момент времени T представляет собой **температурное поле** (1):

$$T = T(x, y, z, \tau) . \quad (1)$$

Различают стационарное и нестационарное температурные поля. Уравнение (1) является записью наиболее общего вида *трёхмерного* температурного поля, когда температура изменяется с течением времени и от одной точки к другой. Такое поле отвечает неустановившемуся тепловому режиму теплопроводности и носит название **нестационарного температурного поля**.

Если тепловой режим является установившимся, то температура в каждой точке поля с течением времени остается неизменной и такое температурное поле называется

стационарным. В этом случае температура является функцией только координат и поле может быть *одномерным*, *двумерным* или *трёхмерным*.

Если соединить точки тела, имеющие одинаковую температуру, получим поверхность равных температур, называемую *изотермической*. Таким образом, геометрическое место точек, имеющих одинаковую температуру, образует ***изотермическую поверхность***. Форма и положение такой поверхности в пространстве меняется во времени, если поле нестационарное. Поскольку в одной и той же точке не может быть одновременно двух значений температуры, изотермические поверхности никогда не пересекаются - они либо заканчиваются на поверхности тела, либо замыкаются сами на себя. Пересечение изотермических поверхностей плоскостью дает на этой плоскости семейство *изотерм*. Они обладают теми же свойствами, что и изотермические поверхности, т. е. не пересекаются, не обрываются внутри тела, оканчиваются на поверхности, либо целиком располагаются внутри самого тела. На рис. 1 приведены изотермы, температуры которых отличаются на ΔT .

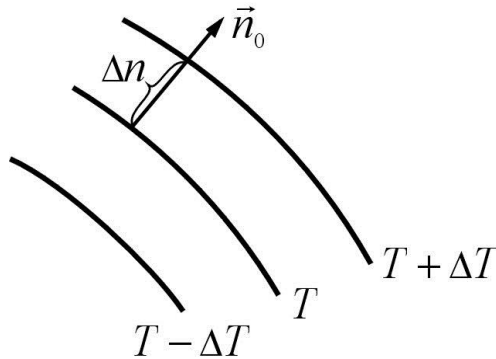


Рис. 1 Изотермы

Температура в теле изменяется только в направлениях, пересекающих изотермические поверхности. При этом наибольший перепад температуры на единицу длины

происходит в направлении нормали к изотермической поверхности.

Возрастание температуры в направлении нормали к изотермической поверхности характеризуется **градиентом температуры** (2):

$$\text{grad}T = \lim_{n_0 \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta n} = \frac{\partial T}{\partial n} \vec{n}_0, \quad (2)$$

Который определяется как вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону увеличения температуры по этому направлению, где \vec{n}_0 - единичный вектор, направленный нормально к изотермической поверхности и в сторону возрастания температуры (рис.1). Градиент по любому направлению можно разложить на составляющие вектора. В частности, в прямоугольной системе координат (3):

$$\begin{aligned} \text{grad}T &= \vec{i}(\text{grad}T)_x + \vec{j}(\text{grad}T)_y + \vec{k}(\text{grad}T)_z = \\ &= \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k} \end{aligned} \quad (3)$$

Необходимым условием распространения теплоты является неравномерность распределения температуры в рассматриваемой среде. Таким образом, для передачи теплоты теплопроводностью необходимо неравенство нулю температурного градиента в различных точках тела.

Количество теплоты, переносимое за единицу времени через изотермическую поверхность площадью F называется **тепловым потоком** Q , Вт. Тепловой поток, приходящийся на единицу площади изотермической поверхности, носит название **плотности теплового потока** q , Вт·м⁻² (4).

$$q = \frac{dQ}{dF}; \quad Q = \int_F q dF. \quad (4)$$

Фурье выдвинул гипотезу, согласно которой плотность теплового потока прямо пропорциональна градиенту температуры (5):

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad}T = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \vec{n}_0, \quad (5)$$

где λ - *коэффициент теплопроводности*, зависит от температуры в данной точке и физических свойств пространства или тела и характеризует способность вещества проводить теплоту.

Гипотеза многократно подтверждалась экспериментально и теперь имеет значение физического закона.

Вектор плотности теплового потока \vec{q} направлен по нормали к изотермической поверхности. Его положительное направление совпадает с направлением убывания температуры, так как теплота всегда передаётся от более горячих тел к холодным. Следовательно, векторы q и $\text{grad}T$ лежат на одной прямой, но направлены в противоположные стороны. Это объясняет наличие знака “минус” в правой части уравнения (5).

Из формул следует, что коэффициент теплопроводности численно равен количеству теплоты, которое проходит в единицу времени через единицу изотермической поверхности при температурном градиенте, равном единице.

Полное количество теплоты Q_τ , Дж, прошедшее за время τ через изотермическую поверхность F с учётом (4) и (5) равно (6):

$$Q_\tau = - \int_0^\tau \int_F \lambda \frac{\partial T}{\partial n} dF d\tau. \quad (6)$$

Коэффициент теплопроводности λ газов меняется в пределах $0,006 \div 0,17 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$. С повышением температуры он возрастает. От давления практически не зависит. Для смеси газов определяется опытным путём, так как закон аддитивности для определения неприменим.

Коэффициент теплопроводности для капельных неметаллических жидкостей меняется от 0,09 до 0,7 Вт·м⁻¹·К⁻¹. С повышением температуры он убывает, исключая воду, для которой повышение температуры от 0 до 80 °С вызывает изменение λ от 0,11 до 0,67 Вт·м⁻¹·К⁻¹.

Коэффициент теплопроводности строительных материалов меняется от 0,02 до 3 Вт·м⁻¹·К⁻¹. Как правило, материалы с большой объёмной массой имеют более высокие значения λ . Коэффициент теплопроводности зависит также от состава материала, температуры, его пористости и влажности. Для влажного материала он значительно выше, чем для сухого и воды в отдельности. Например, для сухого красного кирпича $\lambda=0,35$, для воды 0,6, а для влажного кирпича $\lambda=1,05$ Вт·м⁻¹·К⁻¹.

Коэффициент теплопроводности металлов меняется от 2,5 до 420 Вт·м⁻¹·К⁻¹. Самыми теплопроводными материалами являются серебро, медь, золото и алюминий. С повышением температуры для большинства металлов λ убывает. Так как теплопроводность металла, так же как и электропроводность определяется свободно дифференцируемыми электронами, то тепло- и электропроводности чистых металлов связаны пропорциональной зависимостью.

Примеси существенно уменьшают теплопроводность чистых металлов. Так, теплопроводность железа с примесью углерода 0,1% (по массе) составляет, примерно 50 Вт·м⁻¹·К⁻¹. При повышении содержания углерода до 1% теплопроводность этого сплава понижается на 20%.

Теплопроводность стали зависит не только от наличия примеси, но и от термической обработки, микро- и макроструктуры, у прокатной стали она выше, чем у литой. Теплопроводность закалённой углеродистой стали на 10 - 25% ниже, чем не закалённой. Очень сильно уменьшается коэффициент теплопроводности материала при наличии в нём газовых пор.

Применение законов сохранения энергии и Фурье к анализу процесса теплопроводности в неподвижной изотропной среде при наличии внутренних источников теплоты приводит к

дифференциальному уравнению теплопроводности, которое связывает изменение температуры во времени и пространстве (7).

$$\rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} T) + q_v \quad (7)$$

где ρ - плотность, c - удельная теплоёмкость, q_v - мощность внутренних источников теплоты, выделяемое (поглощаемое) в единице объема тела за единицу времени (может быть вызвано пропусканием электрического тока, химическими или ядерными превращениями т. п.)

Запись дифференциального уравнения теплопроводности в виде (7) является наиболее общей, учитывающей зависимость физических свойств λ , ρ , c от температуры, неравномерность распределения q_v по объёму и его изменения во времени. В частности, когда $\lambda = \text{const}$ можно получить (8):

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T + \frac{q_v}{c\rho} \quad (8)$$

где $a = \frac{q_v}{c\rho}$ - коэффициент

температуропроводности - физическое свойство вещества, характеризующее скорость выравнивания температуры в неравномерно нагретом теле,

∇^2 - оператор Лапласа в декартовых координатах (9):

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (9)$$

в цилиндрических координатах (10):

$$\nabla^2 = \frac{\partial}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (10)$$

В случае стационарной теплопроводности (11):

$$\nabla^2 T + \frac{q_v}{\lambda} = 0 \quad (11)$$

В отсутствие внутренних источников тепла уравнение (7) более упрощается (12):

$$\nabla^2 T = 0 \quad (12)$$

Уравнения (7), (8), (11), (12) могут быть использованы для решения конкретных задач теплопроводности, если их дополнить краевыми условиями (условиями однозначности).

Метод единичной пластины

Количество теплоты, которое за время $\Delta\tau$ проходит через образец материала, пропорционально разности температур ΔT между передней и задней сторонами пластины, площади поверхности пластины S и обратно пропорционально толщине пластины d .

$$\frac{\Delta Q}{\Delta\tau} = \lambda \cdot \frac{S}{d} \cdot \Delta T \quad (13)$$

где λ называется коэффициентом теплопроводности.

В методе единичной пластины теплопроводность определяется непосредственным измерением теплового потока $\frac{\Delta Q}{\Delta\tau}$.

$$\lambda = \frac{\Delta Q}{\Delta\tau} \cdot \frac{d}{S \cdot \Delta T} \quad (14)$$

При проведении измерений необходимо быть уверенным и том, что тепловой поток проходит только через образец (других причин для утечки количества теплоты нет), и что он является однородным. Для этого по показаниям цифрового температурного датчика и контроллера необходимо следить за тем, чтобы температура внутри камеры сохраняла свое значение. Следует отметить, что в работе используется калориметрическая камера с теплоизоляционными стенками.

Таким образом, значение электрической энергии ΔW , излучаемой нагревателем в течение промежутка времени $\Delta\tau$, равно количеству теплоты, которое за этот промежуток времени проходит через образец строительного материала:

$$\frac{\Delta W}{\Delta\tau} = \frac{\Delta Q}{\Delta\tau}$$

Теплопроводность λ может быть вычислена с помощью соотношения:

$$\lambda = \frac{\Delta W}{\Delta \tau} \cdot \frac{d}{S \cdot \Delta T} \quad (15)$$

Экспериментальная установка и аппаратура

В эксперименте используется калориметрическая камера (Рис. 2):

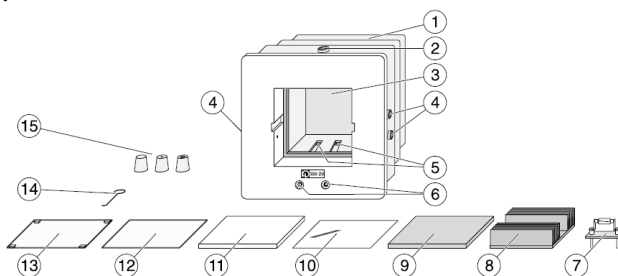


Рис. 2. Калориметрическая камера

- 1 - Калориметрическая камера с теплоизоляционными стенками.
- 2 - Канал для термометра или датчика температуры, измеряющего температуру воздуха в камере.
- 3 - Внутренность камеры с отделением из поролонового покрытия для вставки стеновых материалов (9 -13) или образцов строительных материалов.
- 4 - Три канала для измерения температуры в экспериментах с набором строительных материалов.
- 6 - Розетки для вставки нагревателя (7)
- 6 - Пара 4-мм разъемов для напряжения питания нагревателя (7), электрически связанного с (5).
- 7 - Нагреватель, трубчатая лампа, 24 В, 10 Вт, на пластине с 4-мм заглушкой для подключения в (5).
- 8 - Накопитель для тепла (алюминий вес около. 500г).
- 9-13 - Стеновые материалы для размещения в (3), размеры: 15 см 15 x 15 см.
- 9 - Керамическая плитка, толщиной 11 мм.

- 10 - Алюминиевая пластина толщиной 3 мм.
- 11 - Пластина из пенополистирола, толщиной 10 мм.
- 12 - Пластина из оргстекла, толщиной 1,5 мм.
- 13 - Пластина из оргстекла с прокладками, толщиной 1,5 мм (используется в совокупности с (12) для имитации изолирующего остекления).
- 14 - Крючок для удаления стеновых материалов из калориметрической камеры (3), (Хранение: повесить его за кольцо от одного из выступающих типов (3)).
- 15 - Резиновые пробки для канала (2). без скважины, с отверстием диаметром 1,5 мм (для температурного датчика 666 193) с отверстием диаметром 6 мм (для стеклянного термометра 38234).

Дополнительно для измерения температуры используется:

- Сенсор температуры NiCr-Ni 2 шт, значения выводятся на РС.

Для регулировки внутренней температуры в калориметрической камере:

- Цифровой температурный датчик и контроллер.

Для напряжения питания нагревателя (7):

- Трансформатор 2 - 12 В, 120 Вт.

Для измерения тепловой энергии:

- Секундомер.

Для снятия показаний:

- Ноутбук с программой CASS Y Lab 2.

Проведение эксперимента

1 Вставьте алюминиевую пластину в калориметрическую камеру и нагреватель.

2 Поверх алюминиевой пластины вставьте образец строительного материала (по выбору преподавателя). Далее поверх пластины ставится вторая алюминиевая пластина и прижимается все сверху керамической пластиной.

3 Для измерения температуры перед образцом строительного материала вставьте сенсор температуры NiCr-Ni

в канал (4(2)), между второй алюминиевой пластиной и строительным материалом. Для измерения температуры за образцом строительного материала вставьте сенсор температуры NiCr-Ni в канал (4(1)), между первой алюминиевой пластиной и строительным материалом. Для записи температур используется компьютер с программой CASSY.

4 Подключите к нагревателю напряжение питания с трансформатора через разъемы (6). В качестве нагревателя используется трубчатая лампа со следующими характеристиками: $U=12\text{ В}$, $P=10\text{ Вт}$.

5 Получите с помощью программы CASSY графики зависимости температуры от времени передней и задней поверхности образца строительного материала, а также их разности. При этом выберите следующие параметры $\tau=1000\text{ с}$, скорость записи 1 мм/мин .

6 Подключите цифровой температурный датчик и контроллер в канал (2) и убедитесь, что температура внутри камеры сохраняет свое значение.

7 Воспользовавшись формулой (15), определите значение теплопроводности строительного материала. При этом считайте, что значение мощности электрической энергии нагревателя

$$\frac{\Delta W}{\Delta \tau} = P = 10\text{ Вт}$$

8 Повторите эксперимент с другими образцами строительных материалов. При этом учтите, что пока нагреватель (7) и накопитель тепла находятся в камере, *нельзя удалять строительные материалы, наклоня камеру*. Используйте для этого монтажный крюк (14). Вставьте монтажный крюк в одну из плоских канавок между строительным материалом и внутренней стенкой камеры, аккуратно нажмите на нее ниже строительного материала и действием рычага вытащите соответствующую пластину. Старайтесь не повредить поронозное покрытие.

9 Можно сравнить результаты измерения с использованием накопителя тепла и него.

Контрольные вопросы

1. Что такое теплопроводность? Каким образом осуществляется перенос теплоты теплопроводностью в газах, жидкостях, металлах, диэлектриках?
2. Какое свойство тела характеризует коэффициент теплопроводности материалов? В каких пределах колеблется он для газов, капельных жидкостей, строительных и изоляционных материалов?
3. Понятие о стационарном и нестационарном тепловых потоках.
4. Что характеризуют дифференциальные уравнения теплопроводности и уравнение Фурье?
5. Какие методы определения λ Вы знаете? В чём состоит идея метода единичной пластины для определения λ ?
6. Перечислите основные элементы экспериментальной установки. Каково их значение?

Литература

1. Круглов, Г.А. Теплотехника [Электронный ресурс] : учебное пособие / Г.А. Круглов, Р.И. Булгакова, Е.С. Круглова. — Электрон. дан. — СПб.: Лань, 2012. — 208 с.
2. Теплотехника: Учебник / Ю.П. Семенов, А.Б. Левин - 2 изд. - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. - 400 с.
3. Теоретические основы теплотехники/Ляшков В. И. - М.: КУРС, НИЦ ИНФРА-М, 2015. - 328 с.
4. Теплотехника: Учебное пособие / В.А. Кудинов, Э.М. Карташов, Е.В. Стефанюк. - М.: КУРС: НИЦ ИНФРА-М, 2015. - 424 с.
5. Теплотехника: учебник для студ. вузов по спец. "Эксплуатация наземн. транспорта и трансп. оборудования" / М. Г. Шатров, И. Е. Иванов, Пришвин, С.А. [и др.] ; под ред. М.Г. Шатрова. - М.: Академия, 2011. - 288 с.

