

Лабораторная работа № 1-18

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ТВЁРДЫХ ТЕЛ

Цель работы

Экспериментальное исследование явления переноса теплоты на примере исследования процесса теплопроводности твердых тел.

Теоретическое введение

Известно, что при нарушении равновесия система стремится вернуться в равновесное состояние. Процессы, возникающие при нарушениях равновесия, носят название явлений переноса, поскольку они связаны с возникновением потоков энергии, массы, электрического заряда и т.д. К явлениям переноса относятся теплопроводность, диффузия, электропроводность и др. Каждое из этих явлений можно изучать отдельно или во взаимосвязи. Естественно, чем больше связей исследуется в экспериментальной работе, тем более сложным становится эксперимент и тем больше времени отводится на его постановку. Экспериментальные задачи, которые решаются в данной лабораторной работе, связаны с исследованием теплопроводности твердых тел.

Если температура тела в разных точках различна, то и средняя энергия молекул вещества этого тела в этих точках различна. Перемещаясь вследствие теплового движения, молекулы переносят запасённую ими энергию. Этот перенос энергии и обуславливает теплопроводность.

Количество какой-либо величины (энергии, импульса, частиц и т.д.), проходящее в единицу времени через некоторую площадку S , называется потоком этой величины через площадку. Формулы для расчёта потока тепловой энергии P будут приведены ниже.

В данной лабораторной работе перенос тепловой энергии происходит как в однородной среде, так и через границу двух сред. Рассмотрение второго случая привело Ньютона к формуле, согласно которой в случае отличия температуры тела Θ_1 от температуры окружающей среды Θ_2 :

$$\frac{P}{S} = \alpha(\Theta_1 - \Theta_2), \quad (1)$$

где α - коэффициент теплоотдачи (или коэффициент внешней теплопроводности), а отношение $\frac{P}{S}$ численно равно плотности потока тепловой энергии через границу тела и окружающей среды.

В общем случае плотность потока тепловой энергии описывается вектором \vec{j}_Q , совпадающий по направлению с направлением распространения тепловой энергии и численно равный количеству теплоты, проходящему в единицу времени через поверхность единичной площади, перпендикулярную к направлению потока. Модуль этого вектора равен

$$|\vec{j}_Q| = \frac{dQ}{dt \cdot S},$$

где dQ — количество теплоты, переносимое за время dt через площадку S , расположенную перпендикулярно оси, совпадающей по направлению с направлением распространения тепловой энергии.

При распространении тепловой энергии в однородной среде также существует связь между плотностью потока тепловой энергии и температурой среды. Поток тепловой энергии имеет место только тогда, когда температура среды меняется от точки к точке, при этом поток направлен в сторону понижения температуры. Простейшим является случай бесконечной однородной пластинки толщины d . Если на одной стороне пластинки поддерживается температура Θ_1 , а на другой – температура Θ_2 , причём $\Theta_1 > \Theta_2$, то опыт показывает, что отношение $\frac{P}{S}$ прямо пропорционально разности температур $\Theta_1 - \Theta_2$ и обратно пропорционально толщине пластинки d :

$$\frac{P}{S} = \frac{\chi}{d} (\Theta_1 - \Theta_2), \quad (2)$$

где χ - положительная постоянная, зависящая только от материала пластинки и его физического состояния. Эта постоянная называется коэффициентом внутренней теплопроводности или просто коэффициентом теплопроводности.

В векторной дифференциальной форме уравнение (2) принимает вид уравнения Фурье:

$$\vec{j}_Q = -\chi \text{grad} \Theta \quad (3)$$

Знак « - » показывает, что тепловая энергия переносится в направлении убывания температуры.

Коэффициент теплопроводности χ численно равен количеству теплоты, переносимому через единицу поверхности за единицу времени, при градиенте температуры, равном единице.

Пусть $\Theta_{вв}$, $\Theta_{вн}$, $\Theta_{св}$, $\Theta_{сн}$ - температуры внутреннего и наружного воздуха, внутренней и наружной границ стенок соответственно, P – поток тепловой энергии сквозь стенку, α_1 и α_2 коэффициенты теплоотдачи на передней и задней границах стенки, а χ - коэффициент теплопроводности материала стенки (рис. 1).



Рис.1. К выводу формулы сопротивления теплопередаче.

Плотность потока тепловой энергии \vec{j}_Q сквозь однородную, плоскую стенку определяется в установившемся состоянии теплопередачей от воздуха к стенке и теплопроводностью стенки и зависит от разности температур (в дальнейшем в уравнениях мы будем записывать не вектор плотности потока \vec{j}_Q , а его модуль в упрощённой записи j).

Теплопередача воздух-стенка, внутренние (α_1 - внутренний коэффициент теплоотдачи)

$$j = \alpha_1 \cdot (\Theta_{вв} - \Theta_{св}) \quad (4)$$

Теплопередача стенка-воздух, наружные (α_2 - внешний коэффициент теплоотдачи)

$$j = \alpha_2 \cdot (\Theta_{сн} - \Theta_{вн}) \quad (5)$$

Теплопроводность в стенке (d - толщина, χ - коэффициент теплопроводности)

$$j = \frac{\chi}{d} \cdot (\Theta_{\text{св}} - \Theta_{\text{сн}}) \quad (6)$$

В итоге для стенки, состоящей из одного слоя однородного изотропного материала, использование уравнений (4,5,6) приводит к уравнению (7):

$$j = k \cdot (\Theta_{\text{вв}} - \Theta_{\text{вн}}) \quad (7)$$

где k - коэффициент теплопередачи, связанный с введенными ранее параметрами формулой (7):

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{d}{\chi} + \frac{1}{\alpha_a} \quad (8)$$

Параметр

$$\Lambda = \frac{\chi}{d} \quad , \quad (9)$$

определяемый только материалом и толщиной стенки известен, как термический коэффициент теплопередачи.

Величины, обратные α , k и Λ называются термическими сопротивлениями теплоотдаче, теплопередаче, теплопроводности.

Следует отметить, что поток тепловой энергии сквозь стенку определяется разностью температур наружной границы стенки и наружного воздуха, а коэффициент теплоотдачи в случае естественного движения воздуха в замкнутом пространстве для всех встречающихся на практике стеновых материалов равен $\alpha=8,1 \text{ Вт/Км}^2$ (это значение для α может быть получено из графика, изображённого на рис. 2, так как уравнение (8) показывает линейную зависимость между сопротивлением теплопередаче и толщиной стенки d , а пересечение оси для $d = 0$ даёт сумму внутреннего и внешнего сопротивлений теплоотдачи $1/\alpha_1 + 1/\alpha_2$).

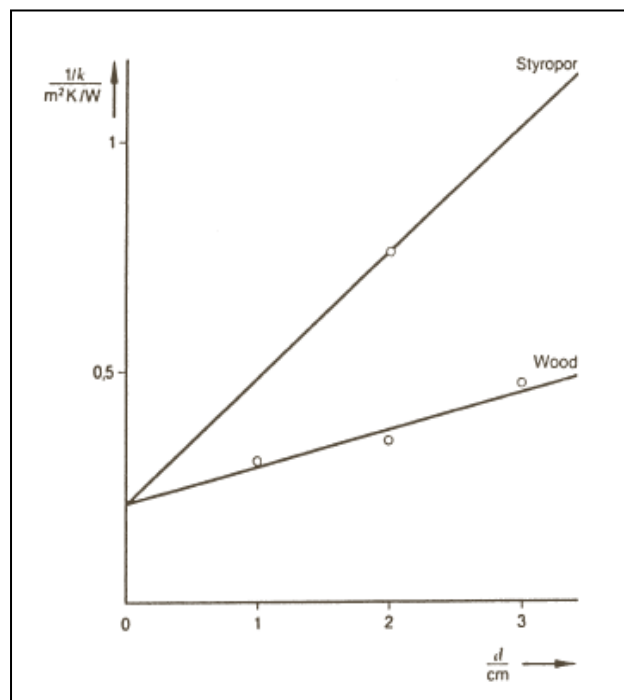


Рис. 2. График зависимости сопротивления теплопередаче от толщины стенки.

Последовательность вычисления коэффициентов следующая. Из уравнения (5) получаем j , из уравнения (7) получаем k , из уравнения (6) получаем χ .

В случае многослойной стенки со слоями равной толщины отношение разности температур в слоях обратно отношению коэффициентов теплопроводности слоёв:

$$\frac{\Delta\Theta_1}{\Delta\Theta_2} = \frac{\chi_2}{\chi_1} \quad (10)$$

Равенство (10) можно получить, используя уравнение (5) для каждого из двух слоёв, при учёте равенства плотности теплового потока через каждый слой. Это выражение используется для определения коэффициента теплопроводности любого материала в сравнении с известным коэффициентом.

Используя уравнение (10), получаем для дерево/пенопласт стен со слоями равной толщины d , используемых в эксперименте:

$$\frac{\Delta\Theta_{\text{пенопл}}}{\Delta\Theta_{\text{дерево}}} = \frac{\chi_{\text{дерево}}}{\chi_{\text{пенопл}}} \quad (11)$$

Описание экспериментальной установки

Общий вид экспериментальной установки приведён на рис.3.

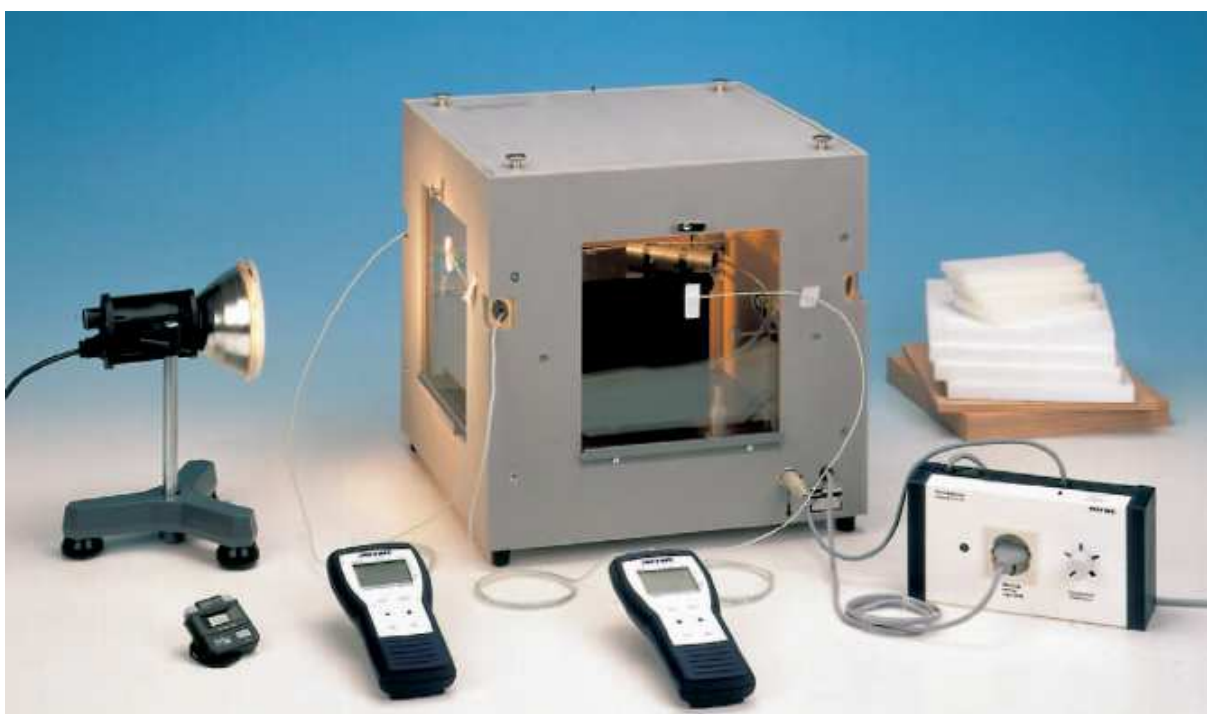


Рис.3. Общий вид установки.

Теплоизолированный корпус собирается из заменяемых стенок. Материал стенок: древесина, пенопласт, стекло. Кроме однородных стенок в эксперименте используются также многослойные стенки из различных материалов.

Для нагрева корпуса изнутри используется стоваттная лампа накаливания с кожухом, внутренняя температура поддерживается практически постоянной благодаря термостату. Термодатчик термостата прикреплен к кожуху лампы накаливания и подключен к термостату с помощью 5-штырькового разъема на столе и сбоку корпуса. Электропитание для нагрева подводится через вилку термостата.

Для нагрева стенок корпуса снаружи используется переносная лампа накаливания мощностью 120 Вт.

Отверстия в угловой стойке экспериментального корпуса служат для введения термопар при измерении внутренней и наружной температур стенки.

После ознакомления с приборами необходимо заполнить таблицу 1.

Таблица 1. Технические данные приборов

№ п/п	Название прибора	Пределы измерений	Число делений	Цена деления	Класс точности	Абсолютная приборная погрешность
1	Термопара					
2	Секундомер					

Порядок выполнения работы

При выполнении работы необходимо строго соблюдать общие требования техники безопасности и охраны труда, установленные на рабочем месте студента в лаборатории.

Общие рекомендации

а) Принцип выполнения работы заключается в следующем: корпус с заменяемыми стенками используется для определения коэффициента теплопередачи (величины k) различных стенок и окон, а также для определения коэффициента теплопроводности различных материалов (в установившемся режиме); в многослойной стенке разность температур в последующих слоях пропорциональна сопротивлению теплопередаче.

б) Так как точность результатов эксперимента зависит от точности измерения разности температур, в начале эксперимента проверяется согласование термопар, и различия в их показаниях учитываются при вычислениях.

в) Измерения для восьми различных стенок и окон могут быть проведены в двух измерительных сериях, каждая из которых длится около 1,5 часа. В каждом случае измеряются температуры внутренних и наружных стенок, при многослойной структуре стенки должны быть измерены температуры между слоями.

г) Так как в любом корпусе существует температурный градиент от верхней части к нижней, все измерения должны быть зарегистрированы на одинаковой высоте. Термопара, используемая для измерения внутренней температуры, вставляется приблизительно на 5 см. вглубь корпуса. Для измерения температур стенки, конец термопары должен быть надежно закреплен на уровне боковых отверстий и размещен как можно ближе к перпендикуляру, проведенному от центра стенки.

д) Переключатель температуры устанавливается на четвертое деление, обеспечивая в установившемся состоянии температуру внутри корпуса около 60°C.

Первая серия измерений

1. Для первой серии измерений могут быть использованы следующие стенки и окна:

–древесина, толщиной $d=1$ см.

–древесина, толщиной $d=3$ см.

–пенопласт, толщиной $d=2$ см. (большая 25x25 см. панель)

–обычное стекло.

Окна в этом случае устанавливаются в деревянную стенку, толщиной $d=1$ см.

2. Первая и вторая термопара подключаются к внутренней и наружной стенкам пенопласта. Третья термопара подключается к внутренней деревянной стенке ($d=3$ см.). Четвёртая термопара измеряет внутреннюю температуру воздуха. Показания термопар регистрируются через интервал около 15 мин.

3. Приблизительно через 60 мин. нагрева (установившееся состояние):

Измеряются внутренняя и наружная температуры пенопластовой стенки. Измеряется внутренняя температура воздуха. Извлекается термопара, измеряющая внутреннюю температуру воздуха, и подключается к наружной стороне деревянной

стенки ($d=3$ см.). Измеряются внутренняя и наружная температуры деревянной стенки ($d=3$ см.). Затем термопара снимается с наружной стороны деревянной стенки и используется для измерения наружной температуры воздуха.

4. На данном этапе снимается крышка корпуса, переставляются две термопары на внутреннюю и наружную стенки древесины ($d=1$ см.), третья термопара подсоединяется к внутренней стеклянной стенке, а четвертая служит для измерений внутренней температуры воздуха. Затем крышка закрывается.

Через 15 мин. регистрируется температура аналогично пункту 3 первой серии измерений.

Вторая серия измерений

1. Следующие стенки и окна могут быть использованы для второй серии измерений:

- многослойная стенка, состоящая из 2 см. пенопласта (внутри) и 2 см. дерева (снаружи)

- многослойная стенка, состоящая из 1 см. древесины (внутри) полого слоя (с узкой пенопластовой полосой по краю) и 2 см. пенопласта (малая 21x21 см. панель, вставленная в отверстие стены снаружи)

- деревянная стенка, толщиной $d=3$ см.

- изоляционное стеклянное окно.

2. Прежде всего, измерения регистрируются по четырем точкам на стенке с полым слоем: на древесине, со стороны камеры; на древесине, на стороне полого слоя; на пенопласте, на наружной стороне. Необходимо позаботиться о том, чтобы при монтаже исключить изгибы и поломку термопар.

Приблизительно через 60 мин. нагрева (установившееся состояние):

Температуры в четырех точках наблюдаются и измеряются периодически с интервалом минут около 15 мин. .

3. Крышка корпуса открывается и термопары переставляются на многослойную деревянную/пенопластовую стенку, при этом винты ослабляются или затягиваются на сколько это необходимо. Термопары подключаются к следующим трем точкам: на пенопласте, со стороны камеры; на контактных поверхностях между древесиной и пенопластом, на деревянной стенке с наружной стороны. Затем закрывается крышка. Четвертая термопара служит для измерения температуры воздуха. Через 15 мин нагрева

измеряется температура стенки, затем внутренняя и наружная температуры воздуха. Затем открывается крышка корпуса и используются две термопары для измерения температуры внутри деревянной стенки ($d=3$ см.) и изоляционного стеклянного окна. Крышка закрывается. Две другие термопары размещаются на внешней стороне деревянной стенки ($d=3$ см.) и изоляционного стеклянного окна. Через 15 мин. нагрева измеряются температуры стенок.

Порядок выполнения работы по предлагаемым вариантам

За два академических часа, отведённых на выполнение лабораторной работы, можно выполнить только часть одной серии измерений. В этой связи порядок выполнения работы зависит от того, к какой серии измерений относится соответствующий вариант задания. Если вариант задания относится к измерениям на однослойных стенках, то порядок измерений относится к первой серии, на многослойных стенках – ко второй.

Для вариантов заданий первой серии необходимо выполнить измерения с занесением результатов измерений в таблицу 2, содержащую данные о температуре воздуха и изоляционных материалов (пенопласт, древесина ($d=3$ см) и стекло) для промежуточных результатов, а также установившегося состояния, величины k и теплопроводности. Четвёртая по порядку запись для каждого материала соответствует температурам установившегося состояния.

Таблица 2. Температуры воздуха и изоляционных материалов, величины k и теплопроводности.

Материал	Толщина	$\Theta_{вв}$	$\Theta_{вн}$	$\Theta_{св}$	$\Theta_{сн}$	j
		°C	°C	°C	°C	Вт/м ²
Пенопласт	2 см					
Древесина	3 см					
Стекло	0,5 см					

--	--	--	--	--	--	--

Примечание. $\Theta_{вв}$, $\Theta_{вн}$, $\Theta_{св}$, $\Theta_{сн}$ - температуры внутреннего, наружного воздуха, внутренней и наружной границ стенок соответственно.

В каждом варианте заданий первой серии предлагается провести измерения для двух стенок. Поэтому из таблицы выполняемого варианта выпадают четыре строки, касающиеся материала, изъятого из трёх перечисленных в таблице 2. Измерения производятся в порядке, предлагаемом в пункте 3 общих рекомендаций по первой серии измерений.

Для вариантов заданий второй серии необходимо выполнить измерения с занесением результатов измерений в таблицу 3, содержащую данные о температуре воздуха и изоляционных однослойных и многослойных материалов для установившегося состояния, величины k и теплопроводности.

Таблица 3. Температуры воздуха, однослойных и многослойных изоляционных материалов, величины k и теплопроводности.

Материал	Толщина	Θ	$\Theta_{вв}$	$\Theta_{вн}$	$\Theta_{св}$	$\Theta_{сн}$
		°C	°C	°C	°C	°C
Пенопласт/древесина	2 см/2 см					
Древесина	1 см					
Древесина	3 см					
Стекло	0,5см					

Примечание. В таблице 3 по сравнению с таблицей 2 введён дополнительно столбец для указания температуры между слоями Θ .

Поскольку в вариантах заданий второй серии многослойная стенка с полостью не используется, пункт б) для второй серии общих рекомендаций не выполняется, а пункт в) видоизменяется.

Вначале собирается корпус из стенок, материал и толщина которых указаны в таблице 3. Термопары закрепляются в следующих трех точках: на пенопласте, со стороны камеры; на контактных поверхностях между древесиной и пенопластом, на деревянной стенке с наружной стороны. Четвёртая термопара устанавливается для измерения внутренней температуры воздуха. Приблизительно через 60 минут нагрева измеряются температуры в трёх точках контакта со стенками и внутренняя температура воздуха, затем измеряется внешняя температура воздуха.

Крышка корпуса открывается. Две термопары используются для измерения температуры либо на внутренних и внешних сторонах деревянных стенок ($d=3$ см. и $d=1$ см.), либо на внутренних и внешних сторонах деревянной стенки и стеклянного окна. Крышка закрывается. Через 15 мин. нагрева измеряются температуры стенок.

Обработка результатов эксперимента

1. По результатам измерений, занесённых в таблицу 2 (или 3), из уравнения (5) вычислить j , из уравнения (7) - k , из уравнения (6) - χ ; занести результаты вычислений в таблицу 2 (или 3).

2. Построить графики зависимости термических сопротивлений теплопередачи от толщины стенок.

3. В случае многослойной стены определить неизвестный коэффициент теплопроводности одного материала по известному коэффициенту теплопроводности другого материала, используя уравнение (11).

4. Сравнить полученные для коэффициентов теплопроводности результаты с табличными, на основании сравнения получить погрешности измерений: $\Delta\chi = |\chi - \chi_{\text{таб}}|$, $\varepsilon = \Delta\chi/\chi_{\text{таб}}$.

Библиографический список

а) основной

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Кн.1. Механика. М.: АСТ: Астрель. 2003. 253 с.
2. Батулин Б.Н. Правила электробезопасности при выполнении лабораторных работ. Учебное пособие. М.: МИСиС. 1995. - 38 с.
3. Капуткин Д.Е., Шустиков А.Г. Физика. Обработка результатов измерений при выполнении лабораторных работ. Учебно-методическое пособие. М.: Учба. 2007. – 107 с.

б) дополнительный

4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.2. М.: Физматлит. 1979. - 552 с.

Контрольные вопросы

1. Какие процессы относятся к явлениям переноса?
2. Перенос какой физической величины обуславливает теплопроводность?
3. Как зависит сопротивление теплопередаче от толщины стенки изоляционного материала?

Индивидуальные задания

Задание 1

1. Провести измерения температуры воздуха и изоляционных материалов для стенок из пенопласта ($d=2\text{см.}$) и древесины ($d=3\text{ см.}$).
2. Построить графики зависимости термических сопротивлений теплопередачи от толщины стенок для пенопласта.
3. Вычислить коэффициент теплопроводности для древесины..

Задание 2

1. Провести измерения температуры воздуха и изоляционных материалов для стенок из пенопласта ($d=2\text{см.}$) и древесины ($d=3\text{ см.}$).
2. Построить графики зависимости термических сопротивлений теплопередачи от толщины стенок для древесины.
3. Вычислить коэффициент теплопроводности для пенопласта.

Задание 3

1. Провести измерения температуры воздуха и изоляционных материалов для стенок из пенопласта ($d=2\text{см.}$) и стекла($d=0,5\text{см.}$).
2. Построить график зависимости термического сопротивления теплопередачи от толщины стенок для стекла.
3. Вычислить коэффициент теплопроводности для древесины.

Задание 4

1. Провести измерения температуры воздуха и изоляционных материалов для стенок из древесины ($d=3\text{см.}$) и стекла($d=0,5\text{см.}$).
2. Построить графики зависимости термических сопротивлений теплопередачи от толщины стенок для древесины.
3. Вычислить коэффициент теплопроводности для стекла.