

## 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  $\Theta_1$  от температуры окружающей среды  $\Theta_2$  :

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

где  $\alpha$  - 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  $\Theta_1$ , а на другой – температура  $\Theta_2$ , 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  $\chi$  - 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  $\chi$  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,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  коэффициенты теплоотдачи на передней и задней границах стенки, а  $\chi$  - коэффициент теплопроводности материала стенки (рис. 1).

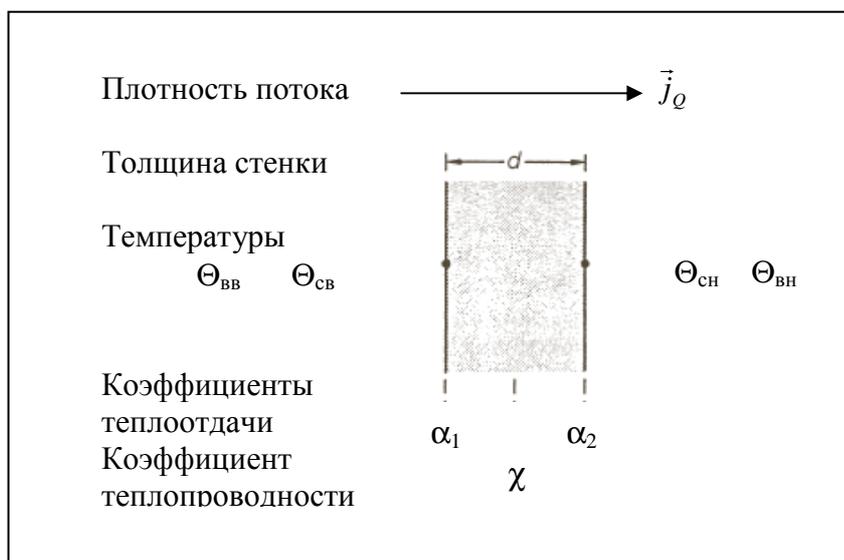


Рис.1. К выводу формулы сопротивления теплопередаче.

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 ( $\alpha_1$  - внутренний коэффициент теплоотдачи)

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

Теплопередача стенка-воздух, наружные ( $\alpha_2$  - внешний коэффициент теплоотдачи)

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

Теплопроводность в стенке ( $d$  - толщина,  $\chi$  - 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  $\alpha$ ,  $k$  и  $\Lambda$  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  $\alpha$  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  $1/\alpha_1 + 1/\alpha_2$ ).

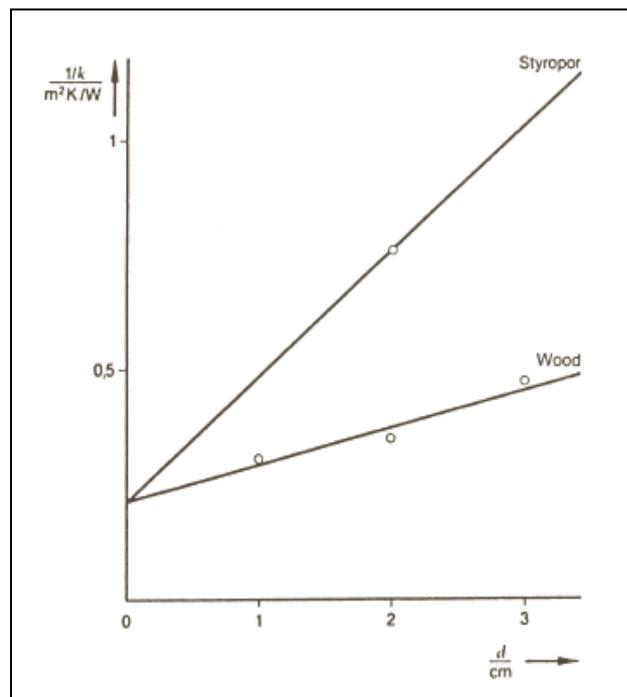


Рис. 2. График зависимости сопротивления теплопередаче от толщины стенки.

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

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 четвёртая 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 <sup>2</sup>
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	$\Theta$	$\Theta_{вв}$	$\Theta_{вн}$	$\Theta_{св}$	$\Theta_{сн}$
		$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
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  $\Theta$ .

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) -  $\chi$ ; 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. Батурин 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.