

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИЯТШ

\_\_\_\_\_ О.Ю. Долматов  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛОВ**

Методические указания к выполнению лабораторной работы МТ–016  
по курсу «Физика» для студентов всех направлений и специальностей

*Составители* **В.С. Сыпченко, Л.А. Святкин**

Издательство  
Томского политехнического университета  
2021

УДК 000000  
ББК 00000  
М00

**Определение теплопроводности металлов:** методические указания к лабораторной работе МТ–016 по курсу «Физика» для студентов всех направлений и специальностей / сост. В.С. Сыпченко, Л.А. Святкин; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2021. – 16 с.

УДК 000000  
ББК 00000

Методические указания рассмотрены и рекомендованы  
к изданию методическим семинаром отделения  
Экспериментальной физики ИЯТШ  
«\_\_\_\_»\_\_\_\_\_2021 г.

Заведующий кафедрой - руководитель  
отделения на правах кафедры ОЭФ  
доктор тех. наук, \_\_\_\_\_ *А.М. Лидер*

Председатель  
учебно-методической комиссии \_\_\_\_\_ *А.М. Лидер*

*Рецензент*  
Доктор педагогических наук,  
профессор отделения ЭФ ИЯТШ НИ ТПУ  
*В.В. Ларионов*

© Составление. ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2021  
© В.С. Сыпченко, Л.А. Святкин составление, 2021

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛОВ

**Цель работы:** изучение основ теории теплопроводности металлов, определение коэффициента теплопроводности для меди или алюминия.

**Приборы и принадлежности:** два калориметра объемом по 500 мл, металлические стержни, цифровой термометр, температурные датчики контактного типа, секундомер, штативы с держателями, мерный стеклянный стакан, магнитная мешалка, нагреватель.

### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

При тепловом контакте двух тел, имеющих различные температуры  $T_1$  и  $T_2$ , происходит передача теплоты от тела с более высокой температурой к телу с температурой ниже. Передача теплоты происходит также между различными частями одного и того же тела, если температуры этих частей неодинаковы. Различают три механизма передачи теплоты: **теплопроводность**, **конвекция** и **излучение**. Последний механизм рассматривают в оптике. В жидкостях и газах передача теплоты возможна путем теплопроводности, конвекции. В твердом теле конвекция не может возникнуть, так как невозможно перемещение массы вещества вместе с теплом. Поэтому перенос тепла в твердом теле осуществляется только теплопроводностью.

Механизм переноса тепла в твердом теле описывается так же, как и в газе. Если через единицу площади сечения  $S$  перпендикулярно к его плоскости в течение времени  $dt$  переносится количество тепла  $dQ$ , то величина  $q$  называется **плотностью теплового потока** и определяется как

$$q = \frac{dQ}{Sdt}. \quad (1)$$

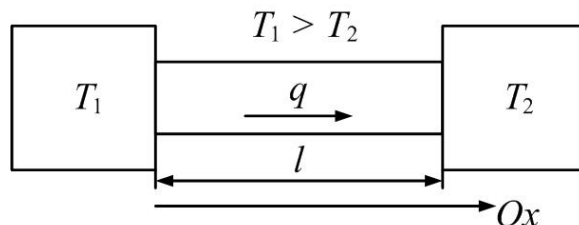


Рис. 1. Одномерный случай процесса теплопроводности

В одномерном случае (рис. 1) плотность теплового потока связана с разностью температур, вызывающей перенос вдоль направления  $x$ , соотношением

$$q = \chi \cdot \frac{T_1 - T_2}{dx} = -\chi \frac{dT}{dx}, \quad (2)$$

где  $\chi$  – коэффициент теплопроводности,  $dT/dx$  – градиент температуры в направлении  $Ox$ . Величина  $dT/dx$  характеризует быстроту изменения температуры в направлении распространения тепла и численно равна изменению температуры тела на единице длины в этом направлении. Данная величина получила название **градиента температур**. Представленный в уравнении (2) знак минус характеризует направление потока тепла. Перенос теплоты в случае теплопроводности происходит в направлении к более низкой температуре, в то время как градиент температуры направлен в противоположную сторону, то есть в направлении увеличения температуры.

В тех случаях, когда вещество, в котором существует градиент температуры, предоставлено самому себе, то есть к нему извне не подводится энергия, теплопроводность приводит к выравниванию температуры. Такой процесс теплопроводности называют *нестационарным*. *Стационарная теплопроводность* наблюдается, если поддерживается постоянный градиент температуры.

Объединив соотношения (1) и (2), получим уравнение, которое описывает процесс теплопроводности и называется уравнением Фурье:

$$dQ = -\chi \cdot \frac{dT}{dx} \cdot S \cdot dt. \quad (3)$$

Коэффициент  $\chi$  зависит от физической природы вещества и его состояния. Исходя из закона Фурье, представленного уравнением (3), *коэффициент теплопроводности* численно равен количеству теплоты, проходящему через единицу площади поверхности за единицу времени при единичном градиенте температуры. Как следует из формулы (3), коэффициент теплопроводности измеряется в системе СИ в единицах Дж/(м·с·К) или Вт/(м·К).

Значения коэффициента теплопроводности для некоторых материалов приведены в таблице 1. Как видно из таблицы, металлы обладают большими коэффициентами теплопроводности. Вследствие этого, их можно применять в качестве проводников теплоты. В случае диэлектрических материалов, таких как асбест, дерево, лед, и различных газов, наблюдаются противоположные свойства проводимости теплоты. Большинство диэлектриков являются плохими проводниками теплоты, поэтому некоторые из них применяются в качестве тепловых изоляторов. Но самой низкой теплопроводностью обладают газы, что и демонстрирует таблица 1.

**Таблица 1.** Коэффициенты тепло- и электропроводности для различных материалов

	Вещество	T, К	$\chi$ , Вт/(м·К)	$\sigma$ , Ом <sup>2</sup> /м
Газы	Водород	300	0,183	–
	Гелий	300	0,152	–
	Кислород	300	0,0267	–
	Аргон	300	0,0177	–
	Азот	300	0,0257	–
	Воздух	300	0,0262	10 <sup>-24</sup> –10 <sup>-21</sup>
Металлы	Серебро	273	425	6,1·10 <sup>7</sup>
	Медь	273	393	5,9·10 <sup>7</sup>
	Железо	273	70	0,5·10 <sup>7</sup>
	Олово	273	62	0,9·10 <sup>7</sup>
	Алюминий	273	240	4,0·10 <sup>7</sup>
	Свинец	273	34	0,5·10 <sup>7</sup>
Диэлектрики	Хлорид натрия	273	6,9	12
	Стекло	293	0,4÷1,0	10 <sup>-11</sup>
	Дерево	293	0,095÷0,20	10 <sup>-6</sup>
	Асбест	293	0,4÷0,8	10 <sup>-8</sup>
	Кварц	291	5,0	2·10 <sup>-17</sup>
	Кирпич	298	0,27÷0,81	
	Лед	273	2,2	

Рассмотрим процесс переноса тепла через некоторую площадку  $S$  на расстоянии  $x$  от источника тепла (рис. 2). Поскольку в слое с большей температурой молекулы газа имеют большую среднюю кинетическую энергию, чем в слое с меньшей температурой, то, попадая при хаотическом движении в этот слой, они при столкновениях с другими молекулами слоя передают им избыток своей энергии и тем самым увеличивают его температуру. А молекулы, попадающие из слоя с меньшей температурой в слой с большей температурой, будут увеличивать в нем свою энергию за счет других молекул этого слоя и, тем самым, будут понижать температуру слоя. Поэтому в молекулярно-кинетической теории перенос количества теплоты  $dQ$  через площадку  $S$  рассматривается, как перенос через эту площадку средней кинетической энергии хаотического движения молекул.

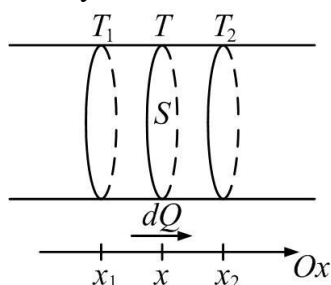


Рис. 2. Одномерный случай переноса тепла  $dQ$  через площадку  $S$  на расстоянии  $x$  от источника тепла ( $T_1 > T_2$ )

При движении внутри вещества молекулы постоянно испытывают соударения с им подобными молекулами. Расстояние между подобными соударениями, когда молекула движется свободно, получило название *средняя длина свободного пробега*. Так молекулам со средней длиной свободного пробега  $\bar{\lambda}$ , проходящим через площадку  $S$  от более нагретого участка (рис. 2), нужно приписать среднюю энергию, соответствующую температуре  $T_1 = \left( T + \bar{\lambda} \frac{dT}{dx} \right)$  в плоскости с координатой  $x_1 = (x - \bar{\lambda})$ . В случае молекул, двигающихся от более холодного участка – значение энергии, определяемое температурой  $T_2 = \left( T - \bar{\lambda} \frac{dT}{dx} \right)$  в плоскости с координатой  $x_2 = (x + \bar{\lambda})$ .

Средняя кинетическая энергия молекулы газа связана с его температурой соотношением

$$\bar{\epsilon}_k = \frac{3}{2} kT. \quad (4)$$

Поэтому через площадку  $S$  из левого слоя одной молекулой в среднем переносится энергия  $\frac{3}{2} kT_1$ , а обратно  $\frac{3}{2} kT$ . Соответственно из правого слоя влево переносится энергия  $\frac{3}{2} kT_2$ , а обратно  $\frac{3}{2} kT$ . Разность этих величин, равная  $\frac{3}{2} k \cdot \bar{\lambda} \frac{dT}{dx}$ , представляет собой среднюю энергию, переносимую одной молекулой, перелетающей из слоя в слой.

При небольшой разнице в температуре слоев газа можно считать, что произведение числа  $n$  молекул в единице объема газа на среднюю скорость  $\bar{v}$  молекул для обоих слоев приблизительно одинаково. Поскольку в направлении слоя

перпендикулярно к нему будет в среднем двигаться 1/6 часть всех молекул, тогда число молекул, пролетающих в одном направлении через площадку  $S$  в единицу времени, равно  $\frac{1}{6} \bar{v} n S$ .

Таким образом, количество средней кинетической энергии хаотического движения молекул, переносимое через площадку  $S$  за время  $dt$ , т. е. переносимое количество теплоты, равно:

$$dQ = \frac{3}{2} k \cdot \bar{\lambda} \frac{dT}{dx} \cdot \frac{1}{6} \bar{v} n S \cdot dt. \quad (5)$$

Сравнивая полученное выражение с уравнением Фурье (3), получаем, что коэффициент теплопроводности равен:

$$\chi = \frac{1}{2} nk \cdot \bar{\lambda} \bar{v}. \quad (6)$$

Это выражение можно преобразовать, введя **удельную теплоемкость**  $C_V$  при постоянном объеме. Поскольку  $\bar{\epsilon}_k = \frac{3}{2} nkT$  есть средняя энергия молекул в единице объема газа, то количество теплоты, необходимое для нагревания единицы объема газа на один градус при постоянном объеме, равно  $\frac{3}{2} nk$ . Так как масса единицы объема газа равна его плотности  $\rho$ , то удельная теплоемкость газа будет:

$$C_V = \frac{3}{2} nk \frac{1}{\rho}, \quad (7)$$

Откуда  $nk = \frac{2}{3} \rho C_V$ . Подставив это выражение в формулу (6), получим:

$$\chi = \frac{1}{3} \bar{\lambda} \bar{v} \rho C_V. \quad (8)$$

Теплопроводность твердых тел имеет разную природу в зависимости от типа твердого тела. В диэлектриках, не имеющих свободных электрических зарядов, перенос энергии теплового движения осуществляется только **фононами** – фиктивными частицами, которые сопоставляются распространяющимся в твердом теле со скоростью звука колебаниям решетки кристалла. Основное отличие фононов от настоящих частиц в том, что они могут существовать только внутри кристалла. Фононы не могут существовать в вакууме, как, например, электроны, фотоны. Но там, где они существуют, они ведут себя как настоящие частицы, подчиняясь законам сохранения, проявляя свойства специфических квантовых частиц, перенося в пространстве импульс и энергию. Считая, что кристалл содержит фононный газ, можно рассматривать явление теплопроводности как явление переноса энергии отдельными фононами. Поскольку фононы характеризуют колебания решетки кристалла, то теплопроводность диэлектриков называют иногда решеточной теплопроводностью.

Применим формулу (8) к фононному газу, подставив в нее вместо  $C_V$  теплоемкость фононного газа,  $\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_\phi$  – среднюю длину свободного пробега фононов,  $\bar{v} = \bar{v}_\phi$  – среднюю скорость фононов,  $\rho$  – плотность тела. Скорость фононов  $\bar{v}_\phi$  – это скорость звука, то есть скорость распространения упругих волн в кристалле. Учитывая эти замены, получим для коэффициента теплопроводности решетки

$$\chi_{\text{реш}} = \frac{1}{3} \bar{\lambda}_{\text{ф}} \bar{v}_{\text{ф}} \rho C_{\text{v}} \quad (9)$$

Температурная зависимость коэффициента теплопроводности решетки определяется зависимостью от температуры длины свободного пробега и теплоемкости.

В металлах, в отличие от диэлектриков, перенос теплоты осуществляется не только фононами, но и свободными электронами. Поэтому теплопроводность металлов  $\chi$  в общем случае складывается из теплопроводности решетки  $\chi_{\text{реш}}$ , обусловленной фононами, и теплопроводности  $\chi_{\text{е}}$ , обусловленной свободными электронами

$$\chi = \chi_{\text{реш}} + \chi_{\text{е}} \quad (10)$$

Теплопроводность электронного газа можно определить на основании (8), подставив в эту формулу  $\bar{\lambda}_{\text{е}}$  – среднюю длину свободного пробега электронов,  $\bar{v}_{\text{е}}$  – средняя скорость электронов,  $C_{\text{е}}$  – теплоемкость электронного газа:

$$\chi_{\text{е}} = \frac{1}{3} \bar{\lambda}_{\text{е}} \bar{v}_{\text{е}} \rho C_{\text{е}} \quad (11)$$

Оценим относительную долю, приходящуюся на решеточную теплопроводность металла. Учитывая соотношения (9) и (11), получим

$$\frac{\chi_{\text{реш}}}{\chi_{\text{е}}} = \frac{\bar{\lambda}_{\text{ф}} \bar{v}_{\text{ф}} C_{\text{v}}}{\bar{\lambda}_{\text{е}} \bar{v}_{\text{е}} C_{\text{е}}} \quad (12).$$

Для чистых металлов  $C_{\text{е}}/C_{\text{v}} \approx 0,01$ ,  $\bar{v}_{\text{е}} \approx 10^6$  м/с,  $\bar{v}_{\text{ф}} \approx 5 \cdot 10^3$  м/с,  $\bar{\lambda}_{\text{ф}} \approx 10^{-9}$  м,  $\bar{\lambda}_{\text{е}} \approx 10^{-8}$  м, поэтому на основании (12) получим  $\frac{\chi_{\text{реш}}}{\chi_{\text{е}}} \approx 5 \cdot 10^{-2}$ .

Следовательно, теплопроводность чистых металлов почти полностью определяется теплопроводностью их электронного газа, на долю решеточной проводимости приходится лишь несколько процентов. Этим объясняется высокая теплопроводность металлов по сравнению с неметаллами, в которых фононы – единственные переносчики тепла.

Наличие в металлах электронного газа позволяет ожидать, что между электропроводностью твердых тел и их электронной теплопроводностью должна существовать связь. В 1853 году немецкими физиками Г. Видеманом и Р. Францем было экспериментально установлено, что отношение коэффициента теплопроводности  $\chi$  к удельной электропроводности  $\sigma$  для металлов при одинаковой температуре постоянно:

$$\frac{\chi_{\text{е}}}{\sigma} = \text{const} . \quad (13)$$

В 1881 году датский физик Л. Лоренц экспериментально показал, что это отношение пропорционально температуре  $T$ :

$$\frac{\chi_{\text{е}}}{\sigma} = L \cdot T , \quad (14)$$

где  $L$  – число Лоренца, одинаковое практически для всех металлов при комнатной и более высоких температурах. На базе квантовой статистики для числа Лоренца было получено соотношение

$$L = \frac{\pi^2}{3} \cdot \frac{k^2}{e^2} \quad (15),$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$  – постоянная Больцмана;  $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  – заряд электрона.

Учитывая, что у большинства металлов  $\chi_{\text{реш}} \ll \chi_{\text{е}}$ , в выражении (13) можно заменить  $\chi_{\text{е}}$  на  $\chi$ , а также, используя (14) и (15), соотношение (13) можно записать как

$$\frac{\chi}{\sigma} = \frac{\pi^2}{3} \cdot \frac{k^2}{e^2} \cdot T \quad (16).$$

Выражение (16) получило название **закона Видемана-Франца**.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Внешний вид установки для проведения измерений коэффициента теплопроводности представлен на рисунке 3.



Рис. 3. Экспериментальная установка для определения теплопроводности металла:  
 1 – термометр; 2 – крышка для верхнего калориметра; 3 – подставка; 4 – магнитная мешалка;  
 5 – нижний калориметр; 6 – штатив;  
 7 – исследуемый металлический стержень; 8 – верхний калориметр; 9 – нагреватель (кипятильник);  
 10 – контактные термодатчики; 11 – прибор для измерения температуры



В качестве исследуемого материала используется металлический стержень 7 из неизвестного материала, поверхность которого покрыта термо-изолирующим гелем, что позволяет пренебречь теплоотдачей через боковую поверхность в окружающую среду. Таким образом, по длине металлического стержня создается одномерный температурный градиент. Верхний конец стержня 7 контактирует с калориметром 8, в котором находится кипящая вода. Нижний конец стержня 7 опущен в калориметр 5 с холодной водой (рис. 3), что позволяет поддерживать постоянную температуру на концах стержня 7. Для измерения температуры воды в калориметре 5 используется термометр 1, погруженный в воду. Для измерения температуры стержня используется прибор 11, а температурные датчики 10 вставляются в сквозные отверстия на стержне 7. Таким образом температурные датчики 10 позволяют определить температуру стержня в верхней и нижней части.

### МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Количество теплоты  $dQ_{\text{стержень}}$ , переносимое за время  $dt$ , в направлении, перпендикулярном поперечному сечению стержня  $S$  при наличии температурного градиента  $dT/dl$  по длине стержня можно, в соответствии с уравнением Фурье (3), найти как

$$\frac{dQ_{\text{стержень}}}{dt} = -\chi \cdot S \cdot \frac{dT}{dl}, \quad (17)$$

где  $\chi$  – коэффициент теплопроводности исследуемого вещества,  $S$  – площадь поперечного сечения стержня.

Через некоторое время после начала кипения воды в верхнем калориметре в стержне устанавливается стационарный процесс переноса тепла, характеризуемый постоянством температуры на каждом из участков стержня. Однако, между разными участками эта температура будет неодинакова. Такое состояние возможно, если через любое поперечное сечение за равные промежутки времени проходит одинаковое количество тепла ( $dQ_{\text{стержень}}/dt = \text{const}$ ), и градиент температуры  $dT/dl$  можно считать одинаковым для всех сечений стержня. Поэтому он может быть определен в виде:

$$\frac{dT}{dl} = \frac{\Delta T}{\Delta l}, \quad (18)$$

где  $\Delta l$  – расстояние между двумя сечениями стержня,  $\Delta T$  – разность температур в этих сечениях.

Для определения стационарного процесса переноса тепла необходимо фиксировать разность температур между верхней и нижней частью стержня с помощью контактных датчиков. Результаты измерений нужно представить графически в виде зависимости  $\Delta T$  от времени  $t$ . Измерения коэффициента теплопроводности можно начинать, когда  $\Delta T$  практически перестанет изменяться.

Однако необходимо также учитывать, что вода ( $dQ_{\text{вода}}$ ) не только получает теплоту от стержня ( $dQ_{\text{стержень}}$ ), но и отдает ее окружающей среде ( $dQ_{\text{окр}}$ ). Поэтому нагрев воды только за счет теплоты, полученной от стержня можно учесть, записав следующее соотношение

$$\frac{dQ_{\text{стержень}}}{dt} = \frac{dQ_{\text{вода}}}{dt} + \frac{dQ_{\text{окр}}}{dt} \quad (19)$$

Подставляя формулы (18) и (19) в уравнение Фурье (17), получим

$$\frac{dQ_{\text{стержень}}}{dt} = \frac{dQ_{\text{вода}}}{dt} + \frac{dQ_{\text{окр}}}{dt} = \chi \cdot \left| \frac{\Delta T}{l} \right| \cdot S \quad (20)$$

Выразив  $\chi$  из (20), получим рабочую формулу для определения коэффициента теплопроводности:

$$\chi = \frac{\frac{dQ_{\text{вода}}}{dt} + \frac{dQ_{\text{окр}}}{dt}}{S \cdot |\Delta T|} \cdot l \quad (21)$$

Для определения  $dQ_{\text{вода}}/dt$  поступают следующим образом. За время  $t$  теплота  $Q$  будет передана воде, находящейся в нижнем калориметре. При этом вода нагреется от  $T_0$  до  $T$ . Значения температуры воды в нижнем калориметре фиксируются с помощью термодатчика. Зная массу воды  $m_{\text{в}}$ , находящуюся в нижнем калориметре, можно записать, что

$$Q_{\text{вода}} = (c_{\text{в}} m_{\text{в}} + C) \cdot (T - T_0) \quad (22)$$

где  $c_{\text{в}}$  и  $m_{\text{в}}$  – удельная теплоемкость и масса воды, соответственно;  $C$  – теплоемкость калориметра,  $T_0$  и  $T$  – показания термодатчика, погруженного в нижний калориметр, в начальный момент времени и момент времени  $t$ , соответственно. В результате должна быть обнаружена зависимость температуры от времени нагрева воды и построен соответствующий график. В дальнейшем величина  $dQ_{\text{вода}}/dt$  определяется по тангенсу угла наклона зависимости  $Q_{\text{вода}}(t)$ .

Количество теплоты, отдаваемое водой, находящейся в нижнем калориметре, окружающей среде, можно определить, проведя предварительные измерения по определению температуры теплой воды, помещенной в калориметр в течение некоторого промежутка времени. Количество теплоты  $Q_{\text{окр}}$ , отданное водой в любой момент времени, можно рассчитать как

$$Q_{\text{окр}} = (c_{\text{в}} m_{\text{в}} + C) \cdot (T - T_0), \quad (23)$$

где  $T_0$  и  $T$  – температуры воды, соответственно, в начальный момент времени и момент времени  $t$ . Результаты вычислений необходимо представить в виде графика зависимости  $Q_{\text{окр}}$  от времени  $t$ . Тангенс угла наклона этой зависимости будет равен  $dQ_{\text{окр}}/dt$ .

Теплоемкость калориметра может быть найдена предварительно из уравнения теплового баланса для воды, переливаемой из мерного стакана в калориметр. Пусть температура воды (отличная от комнатной) в мерном стакане равна  $T_1$ , тогда, если воду перелить из стакана в калориметр, ее температура изменится до величины  $T_2$  за счет передачи тепла калориметру, который нагреется/охладится от комнатной температуры  $T_{\text{комн}}$  до установившейся температуры воды  $T_2$  в калориметре. Из уравнения теплового баланса можно получить следующую формулу для расчета теплоемкости калориметра:

$$C = c_{\text{в}} \cdot m_{\text{в}} \cdot \frac{T_1 - T_2}{T_2 - T_{\text{комн}}} \quad (24)$$

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

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

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ НИЖНЕГО КАЛОРИМЕТРА

1. Определите комнатную температуру  $T_{\text{комн.}}$ .
2. Отмерьте мерным стаканом 300 мл воды из-под крана. Температура воды должна отличаться от комнатной, для этого можно набрать теплой воды (или попросить у сотрудников лаборатории) или слить немного воды из крана холодного водоснабжения и затем набрать.
3. Определите температуру воды  $T_1$  в мерном стакане с помощью термометра 1. *Для измерения температуры воды в стакане/калориметре термометр погружного типа необходимо опустить в стакан/калориметр таким образом, чтобы он не касался дна и стенок стакана/калориметра.*
4. Перелейте воду из мерного стакана в нижний калориметр. Определите температуру воды  $T_2$  после переливания ее в калориметр, предварительно перемешав.
5. Рассчитайте теплоемкость калориметра  $C$  по формуле (24). Массу воды в калориметре определите по формуле  $m_{\text{в}} = V\rho_{\text{в}}$ , где  $\rho_{\text{в}} = 10^3 \text{ кг/м}^3$  – плотность воды,  $V$  – объем воды в калориметре.
6. Вылейте воду из калориметра и насухо вытрите его.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ, СВЯЗАННЫХ С ТЕПЛООБМЕНОМ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

1. Отмерьте мерным стаканом 300 мл воды из-под крана и заполните нижний калориметр водой. Температура воды должна отличаться от комнатной, для этого можно набрать теплой воды из-под крана или попросить у сотрудников лаборатории. Рассчитайте массу воды.
2. Определите начальную температуру воды  $T_0$  ( $t = 0$  с) с помощью термометра.
3. Фиксируйте значения температуры воды через каждую минуту в течение 20 минут. Данные измерений занесите в таблицу 2.

Таблица 2

$t, \text{с}$	60	120	180	240	...	1200
$T_0, \text{°C}$						
$T, \text{°C}$						
$Q_{\text{окр}}, \text{Дж}$						

4. Рассчитайте количество теплоты, полученное водой для каждого момента времени  $t$ , по формуле (23). Результаты вычислений занесите в таблицу 2.
5. Постройте график зависимости  $Q_{\text{окр}}(t)$  и определите тангенс угла наклона  $dQ_{\text{окр}}/dt$ .
6. Вылейте воду из калориметра.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СТЕРЖНЯ

1. Соберите экспериментальную установку согласно рис. 3. Для этого необходимо:

– закрепить металлический стержень на штативе таким образом, чтобы нижний калориметр можно было при необходимости удалить из-под стержня. Высота расположения нижнего калориметра может быть изменена при помощи подставки.

– между подставкой и нижним калориметром поместить магнитную мешалку.

**Внимание: необходимо, чтобы неизолированный конец стержня оставался полностью погруженным в холодную воду в течение всего эксперимента.**

– установить контактные температурные датчики в специальные отверстия на стержне. Данные датчики уже автоматически подключены к прибору для измерения температуры.

– поместить в верхний калориметр и закрепить в штативе нагреватель, погрузив его в калориметр. Нагреватель не должен касаться стенок и дна калориметра. Заполнить водой верхний калориметр так, чтобы открытая часть нагревателя была под водой.

– в нижний калориметр налить фиксированное количество холодной воды из-под крана, чтобы неизолированный конец стержня находился полностью под водой. Измерить объём налитой воды. Поместить термометр в калориметр.

– включить магнитную мешалку, предварительно поместив в нижний калориметр магнетик.

– набрать в мерный стакан воды из-под крана, для подливания в верхний калориметр, т.к. в процессе выполнения работы часть воды будет испаряться.

**Внимательно проверьте, чтобы погруженный кипятильник не касался дна верхнего калориметра и был плотно закреплен в штативе, а также, чтобы он был залит водой. Регулярно проверяйте уровень воды в верхнем калориметре, при необходимости подливайте небольшими порциями. Воспользуйтесь крышкой 2 для замедления процесса испарения воды.**

– убедиться, что установка собрана верно, для этого можно обратиться к ведущему преподавателю и сотруднику лаборатории.

– включить нагреватель (кипятильник) и прибор для измерения температуры в сеть 220 В. Доведите воду, находящуюся в верхнем калориметре, до кипения.

2. После того, как вода в верхнем калориметре закипит, включите секундомер и с помощью термодатчиков в течение 20 минут каждые 30 секунд, фиксируйте разность температур  $\Delta T = T_{\text{верх}} - T_{\text{низ}}$  между верхней и нижней частью стержня и температуру воды  $T$  в нижнем калориметре. Результаты измерений занесите в таблицу 3.

**Внимание: После окончания работы выключите нагреватель (кипятильник) и прибор для измерения температуры из сети. Дайте воде постоять и сообщите лаборанту об окончании работы.**

Таблица 3

$t, \text{с}$	0	30	60	90	...	1200
$T_{\text{верх}}, \text{°C}$						
$T_{\text{низ}}, \text{°C}$						
$\Delta T, \text{°C}$						
$T, \text{°C}$						
$Q_{\text{вода}}, \text{Дж}$						

3. Зная объем воды в нижнем калориметре и плотность воды, рассчитайте массу воды.
4. Постройте график зависимости  $\Delta T$  от времени  $t$ . Определите по графику разность температур  $\Delta T$ , соответствующую периоду времени, когда установился постоянный температурный градиент (то есть разность температур  $\Delta T$  не изменяется).
5. По результатам измерений с помощью формулы (22) рассчитайте количество теплоты  $Q_{\text{вода}}$ , полученное водой для каждого момента времени. Результаты расчетов занесите в таблицу 3.
6. Постройте график зависимости  $Q_{\text{вода}}$  от времени  $t$ .
7. Определите тангенс угла наклона  $dQ_{\text{вода}}/dt$  графика зависимости  $Q_{\text{вода}}(t)$  для периода времени, когда в опыте установился постоянный температурный градиент.
8. Рассчитайте коэффициент теплопроводности исследуемого стержня по формуле (21); определите материал, из которого сделан стержень.
9. Рассчитайте число Лоренца по формуле (14), используя экспериментально полученные значения теплопроводности и материал, из которого сделан стержень, определите по таблице 1 электропроводность стержня при комнатной температуре. Сравните полученное значение с теорией и сделайте вывод.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Теплопроводность принадлежит к явлениям переноса. Что переносится в явлении теплопроводности?
2. Какие уравнения описывают явление теплопроводности?
3. Что такое коэффициент теплопроводности? В чем заключается физический смысл коэффициента теплопроводности?
4. От чего зависит коэффициент теплопроводности газов?
5. Какие частицы называют фононами?
6. Какова природа теплопроводности диэлектриков и металлов?
7. Объясните, почему металлы обладают большими значениями коэффициента теплопроводности, чем диэлектрики?
8. В чем заключается идея метода данной лабораторной работы по определению коэффициента теплопроводности?
9. Выведите рабочую формулу для определения коэффициента теплопроводности, используемую в работе.
10. Что такое стационарная теплопроводность? Как в работе достигается стационарный процесс теплопроводности?
11. Сформулируйте закон Видемана-Франца и объясните его сущность.

12. Объясните, как в эксперименте учитываются тепловые потери, связанные с теплообменом воды с окружающей средой.
13. Какие процессы называются явлениями переноса?
14. Опишите, в чем заключаются следующие механизмы переноса теплоты: конвекция, теплопроводность и излучение. Приведите примеры, когда каждый из перечисленных механизмов реализуется.
15. Получите формулу для коэффициента теплопроводности электронного газа в металлах.
16. Рассмотрите явление переноса тепла в металлах и получите закон Фурье.
17. Почему в молекулярно-кинетической теории перенос количества теплоты через некоторую площадку рассматривается, как перенос через эту площадку средней кинетической энергии хаотического движения молекул?
18. Какое устройство называется калориметром?
19. Объясните, почему измерение зависимости разности температур между различными частями стержня от времени проводят при включенной магнитной мешалке? Что будет происходить, если проводить все измерения без включения магнитной мешалки?
20. Опишите используемую в работе методику определения теплоемкости калориметра. Какова погрешность данной методики?
21. Почему в эксперименте по определению тепла, отдаваемого водой окружающему воздуху, рекомендуется использовать воду с температурой от 30 до 35°C?
22. Почему при определении теплопроводности стержня рекомендуется в течение всего эксперимента держать неизолированный конец стержня полностью погруженным в холодную воду?
23. Почему в верхний калориметр рекомендуется наливать дистиллированную воду, а для нижнего калориметра можно использовать воду из-под крана?
24. Поясните, почему стержни покрыты пленкой? Каково ее назначение?

## ГЛОССАРИЙ

1. Теплопроводность – процесс распространения тепловой энергии при непосредственном соприкосновении отдельных частиц тела, имеющих различные температуры
2. Конвекция – процесс переноса тепловой энергии при перемещении объёмов жидкости или газа в пространстве из области с одной температурой в область с другой
3. Излучение – процесс распространения тепловой энергии с помощью электромагнитных волн
4. Градиент температур – вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону увеличения температуры, модуль которого равен частной производной температуры по данному направлению
5. Длина свободного пробега – это среднее расстояние, которое пролетает молекула за время между двумя последовательными соударениями.

6. Удельная теплоемкость – количество теплоты, которое необходимо подвести, чтобы изменить температуру 1 кг вещества на 1 градус Цельсия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики, Т.2. Термодинамика и молекулярная физика: учебное пособие. – М.: Наука, 1990. – 576 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики, Т.1. Механика. Молекулярная физика. – СПб.: Лань, 2007. – 432 с.
3. Иродов И.Е. Физика макросистем. Основные законы. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. – 208 с.
4. Назаров А.И., Сергеева О.А. Определение теплопроводности металлов: методические указания к лабораторной работе. – Петрозаводск: Петрозаводский государственный университет, 2008. – 14 с.
5. Трофимова Т. И. Курс физики - М.: Высшая школа, 1998. – 542 с.

Учебное издание

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛОВ

Методические указания к выполнению лабораторной работы МТ–016 по курсу «Физика» для студентов всех направлений и специальностей

*Составители*

СЫПЧЕНКО Владимир Сергеевич  
СВЯТКИН Леонид Александрович


**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии  
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати 25.05.2021. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл.печ.л. 9,01. Уч.-изд.л. 8,16.  
Заказ . Тираж 50 экз.



Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Издательства Томского политехнического университета  
сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS  
EN ISO 9001:2008



**ИЗДАТЕЛЬСТВО**  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru