

ГБОУ Гимназия № 1505

«Московская городская педагогическая гимназия – лаборатория»

ДИПЛОМ

Зависимость коэффициента теплопроводности воздуха
от температуры.

автор: Ратцев Илья, 10 «Б»

руководитель: Наумов А. Л.

Москва

2015

СОДЕРЖАНИЕ

Введение

1. Глава 1

§1. Теплопроводность. Особенности теплопроводности газов

§2. Коэффициент теплопроводности идеального газа

§3. Среднее значение скорости молекул

§4. Свободный пробег молекул

Вывод.

2. Глава 2

§1. Теоретические основы эксперимента

§2. Экспериментальная установка

§3. Результаты эксперимента

Заключение

Список источников

Приложения

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос теплопроводности воздуха актуален в наши дни. В некоторых областях производства, к примеру в строительстве, постоянно встаёт проблема теплоизоляции помещений. Установление зависимости теплопроводности воздуха от температуры поможет увеличить эффективность теплоизоляции зданий.

Целью данной работы является установление зависимости коэффициента теплопроводности воздуха от его температуры.

Для достижения поставленной цели требуется рассмотреть такое физическое явление, как теплопроводность; изучить теоретическую зависимость теплопроводности воздуха от макропараметров; а также создать экспериментальную установку, с помощью которой возможно изменять температуру воздуха и измерять его коэффициент теплопроводности и провести эксперимент.

Работа рассчитана на русскоязычную аудиторию, преимущественно на учеников старших классов, а также на студентов младших курсов, интересующихся теплофизикой.

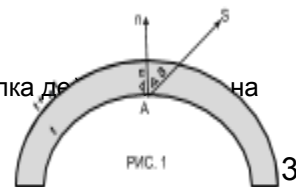
1 ГЛАВА

§1. Теплопроводность. Особенности теплопроводности газов.

В термодинамически неравновесных системах возникают особые необратимые процессы, называемые явлениями переноса, в результате которых происходит пространственный перенос энергии, массы, импульса. Явления, обусловленные переносом энергии, называется теплопроводностью; переносом массы - диффузией; импульса - внутренним трением.¹

Рассмотрим две поверхности, каждая точка которых имеет одинаковую температуру (рис. 1). Такие поверхности называются изотермными. Пусть одна поверхность имеет температуру t , а другая $t + \Delta t$. Перемещаясь из

¹ Явления переноса в термодинамике [электронный ресурс] // Режим доступа: http://www.terver.ru/Javlenie_perenosa_v_termodinamike.php, свободный. - Ссылка действительна на 26.05.2015.



какой-либо точки А, можно обнаружить, что изменение температуры по различным направлениям неодинаково: если перемещаться по изотермной поверхности, то изменения температуры мы не обнаружим; если же перемещаться вдоль какого-либо направления S , то будет наблюдаться изменение температуры. Наибольшую разность температур на единицу длины мы будем наблюдать в направлении нормали к изотермной поверхности. Предел отношения изменения температуры Δt к расстоянию между изотермами по нормали Δn , когда Δn стремится к нулю, называют градиентом температуры, имеющим размерность [градус/метр].² Стоит отметить, что перенос энергии при теплопроводности происходит в сторону скорейшего убывания температуры, что следует из второго закона термодинамики.

Если в одной области газа температура выше, чем в другой, то можно говорить о том, что средняя кинетическая энергия молекул в этой области больше. С течением времени, вследствие постоянных столкновений молекул происходит процесс выравнивания средних кинетических энергий молекул, то есть, иными словами, процесс выравнивания температур.

Теплопроводность - это процесс переноса внутренней энергии от более нагретых частей тела к менее нагретым частям или телам, осуществляемый хаотически движущимися частицами тела.³

Точный подсчёт явлений теплопроводности делается на основе следующего закона Фурье: поток теплоты q , проходящий через взятую внутри тела площадку S , нормальную к той линии l , вдоль которой течёт поток энергии пропорционален площадке S и температурному градиенту $\frac{dT}{dX}$. Если буквой k назвать коэффициент пропорциональности, то получим такую формулу:

$$q = -k \frac{dT}{dX} S \quad (1)$$

² Тепломассообмен: градиент температуры [электронный ресурс] // Режим доступа: <http://bog5.in.ua/zadachi/teplomassoobmen/teplomassobm%20kr1%20v1.html>, свободный. - Ссылка действительна на 26.05.2015.

³ Энциклопедия на Академике: теплопроводность, толкование [электронный ресурс] // Режим доступа: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/8691>, свободный. - Ссылка действительна на 26.05.2015.

Коэффициент k , зависящий от свойств среды, называют коэффициентом теплопроводности. Единицей q служит Вт(ватт), следовательно k измеряется в ваттах на метр-кельвин. Знак минус в правой части уравнения показывает то обстоятельство, что энергия переносится в сторону убывания температуры, о чём было сказано выше.⁴

Тепловым потоком q в формуле является количество теплоты Q , проходящее через площадку S , за некоторое время t . Таким образом, формула для вычисления количества теплоты, проходящего через площадку за определённое время будет носить такой вид:

$$Q = qt \quad (2)$$

Стоит отметить, что данная формула является справедливой только в случае стационарного процесса. То есть вызвавшая перенос энергии разница температур должна оставаться неизменной с течением времени.

§2. Коэффициент теплопроводности идеального газа.

Если идеальный газ вывести из состояния равновесия, изменив в какой-либо части объёма температуру молекул, то прекращение внешнего воздействия повлечёт за собой стремление системы вернуться в равновесное состояние, при котором распределение температур будет равномерным.

Рассмотрим некоторый объём идеального газа, заключённый между двумя параллельными плоскими поверхностями, обладающими различной температурой T_1 и T_2 . В случае постоянства этих температур в исследуемом объёме газа установится стационарный поток теплоты.⁵

Молекулярно-кинетическая теория даёт формулу для потока тепла идеального газа:□

$$q = - \frac{1}{3}nm\bar{v}\lambda c_v \frac{dT}{dX} \quad (3)$$

⁴ Явления переноса в термодинамике [электронный ресурс] // Режим доступа: http://www.terver.ru/Javlenie_perenosa_v_termodinamike.php, свободный. - Ссылка действительна на 26.05.2015.

⁵ Исаков А. Я. Молекулярная физика и термодинамика. Петропавловск-Камчатский, 2007. - С. 118.

где q - поток тепла, n - концентрация молекул, m - масса молекулы, λ - средняя длина свободного пробега молекул, \bar{v} - средняя квадратичная скорость молекул, c_v - удельная теплоёмкость при постоянном объёме, $\frac{dT}{dX}$ - градиент температуры.

Представив плотность газа ρ как произведение массы газа и концентрации молекул, и сравнив формулу (3) с формулой (1), можем найти значение коэффициента теплопроводности идеального газа:

$$k = \frac{1}{3}\rho\bar{v}\lambda c_v$$

где ρ - плотность газа, \bar{v} - средняя квадратичная скорость молекул, λ - средняя длина свободного пробега молекул, c_v - удельная теплоёмкость при постоянном объёме.⁶

§3. Среднее значение скорости молекул.

В формуле для коэффициента теплопроводности присутствует величина, называемая средней квадратичной скоростью молекул. Вычислить её несложно; для начала напишем уравнение состояния идеального газа:

$$PV = \nu RT$$

где ν - количество вещества, P - давление газа, V - объём, занимаемый газом, R - универсальная газовая постоянная, T - температура.

Для более лёгких вычислений возьмём количество вещества, равное 1 моль. Из основного уравнения молекулярно-кинетической теории для одного моля вещества:

$$PV = \frac{2}{3}N_A E_k$$

где P - давление, V - объём, занимаемый газом, N_A - число Авогадро, E_k - средняя кинетическая энергия молекул.

Однако в механике существует другая формула для нахождения E_k :

$$E_k = \frac{1}{2}N_A m \bar{v}^2$$

где m - масса молекулы, \bar{v} - средняя квадратичная скорость.

⁶ Савельев И.В. Курс общей физики, т.1. Механика. Молекулярная физика: учебное пособие. - 2-е изд., перераб. - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. - С. 387

Подставив значение E_k и приравняв уравнения, получим:

$$RT = \frac{1}{3}N_A m \bar{v}^2$$

Учитывая, что $R = \kappa N_A$, уравнение принимает вид

$$\kappa T = \frac{1}{3}N_A m \bar{v}^2$$

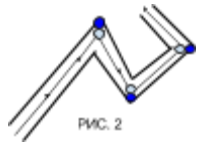
Произведение $N_A m$ можно записать как μ (молярная масса). Отсюда скорость \bar{v} будет равна

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3\kappa T}{\mu}}$$

Из приведенной формулы следует вывод, что средняя квадратичная скорость молекул, а следовательно и коэффициент теплопроводности газа должны зависеть от температуры.⁷

$$k \sim \sqrt{T} \quad (4)$$

§4. Свободный пробег молекул.



Важным условием для проведения эксперимента является независимость коэффициента теплопроводности от давления. Как уже было сказано ранее, λ - это средняя длина свободного пробега молекул. Под средней длиной свободного пробега понимают среднее расстояние, которое проходит молекула между двумя последовательными соударениями. С увеличением давления газа увеличивается и его плотность, соответственно увеличивается и число молекул, переносящих энергию. Однако молекулы начинают сталкиваться между собой чаще - расстояние свободного пробега уменьшается.

$$\lambda \sim \frac{1}{p}$$

Поэтому в области нормальных давлений изменение давления не влечёт за собой заметного изменения коэффициента теплопроводности.

В достаточно разреженных газах, когда плотность молекул невелика, то длина свободного пробега молекул будет определяться

⁷ Средняя квадратичная скорость молекул [электронный ресурс] // Режим доступа: <http://frutmrut.ru/srednyaya-kvadratichnaya-skorost-molekul>, свободный. - Ссылка действительна на 26.05.2015

столкновениями молекул не друг с другом, а со стенками сосуда. Такое состояние газа называют высоким вакуумом. Длина свободного пробега молекул в высоком вакууме постоянна и не зависит от давления. Тогда коэффициент теплопроводности зависит от давления так же, как и плотность, то есть прямо пропорционально.⁸

Наш эксперимент будет проводиться при атмосферном давлении, следовательно увеличение давления за счёт нагревания газа не повлечёт за собой каких-либо изменений коэффициента теплопроводности.

Вывод из 1 главы.

Итак, в газах возникают явления переноса. При осуществлении переноса энергии происходит процесс теплопроводности. Формула для расчета потока тепла, проходящего через площадку при переносе, при стационарном процессе определяется законом Фурье.

Молекулярно-кинетическая теория даёт формулу для коэффициента теплопроводности идеального газа. Эта величина зависит от плотности, средней длины свободного пробега, средней квадратичной скорости молекул и молярной теплоёмкости газа. Средняя квадратичная скорость молекул зависит от температуры газа. При существенном нагревании газа будет заметно увеличение его коэффициента теплопроводности. Так как плотность газа зависит от давления прямо пропорционально, а средняя длина свободного пробега - обратно пропорционально, то в области атмосферного давления изменение давления не влечет за собой изменения коэффициента теплопроводности газа.

2 ГЛАВА

§1. Теоретические основы эксперимента.

Для измерения теплопроводности использовался так называемый метод цилиндрического слоя, состоящий из измерения теплового потока, проходящего между двумя цилиндрами.

⁸ Средняя длина свободного пробега молекул [электронный ресурс] // Режим доступа: http://flash-fizika.narod.ru/3_1.html, свободный. - Ссылка действительна на 25.05.2015.

Теория говорит о том, что температура внутреннего цилиндра будет зависеть от мощности потока теплоты, поданного ему, и от теплопроводности вещества, в которое он погружён. Чем больше коэффициент теплопроводности, тем больше будут тепловые потери источника тепла, и, следовательно, тем меньше будет температура цилиндра.

Если зафиксировать температуры цилиндров на определённом значении, то можно говорить о том, что процесс переноса тепла от более нагретого цилиндра к менее нагретому является стационарным и выполняется закон Фурье. Для цилиндрического слоя закон теплопроводности Фурье принимает следующую форму:

$$q_l = (T_1 - T_2) \frac{2\pi k}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \quad (5)$$

где q_l - плотность теплового потока в расчёте на единицу длины; T_1 - температура внутреннего (нагреваемого) цилиндра; T_2 - температура внешнего (холодного) цилиндра; d_2 - диаметр внешнего цилиндра; d_1 - диаметр внутреннего цилиндра; k - коэффициент теплопроводности.

Отсюда коэффициент теплопроводности воздуха k будет вычисляться по формуле⁹

$$k = \left(\frac{\ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi} \right) \frac{q_l}{T_1 - T_2} \quad (6)$$

Выше приведённое выражение (6) является основной расчётной формулой в данной задаче. Стоит отметить, что величина в скобках является константой прибора. Для упрощения задачи мы обеспечиваем постоянство значения температуры внешнего цилиндра T_2 . Таким образом, для установления зависимости коэффициента теплопроводности от температуры следует измерить несколько значений температуры внутреннего цилиндра и соответствующих значений потока теплоты.

⁹ Киров С.А., Салецкий А.М., Харабадзе Д.Э. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра общей физики, лабораторный практикум по молекулярной физике: Изучение явлений переноса в воздухе. С. 4-6. [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://genphys.phys.msu.ru/rus/lab/mol/Lab219_2013.pdf, свободный. - Ссылка действительна на 26.05.2015.

§2. Экспериментальная установка.



Принципиальная схема экспериментальной установки (рис. 3)

Экспериментальная установка (рис. 3) состоит из прозрачной пластиковой трубки, наполненной воздухом и служащей в эксперименте внешним цилиндром. По её центру помещена алюминиевая трубка меньшего диаметра, являющаяся внутренним цилиндром. Для нагревания внутреннего цилиндра в него помещена тонкая нихромовая нить, подключённая к источнику тока.

Пространство между стенками цилиндра и нитью заполнено машинным маслом. Внешний цилиндр помещён в пластиковую бутылку, наполненную водой. Таким образом обеспечивается постоянство температуры внешнего цилиндра T_2 . Температура внутреннего цилиндра определяется датчиком температуры (T); сила тока в цепи измеряется амперметром (A), подключённым последовательно; падение напряжения на нити регистрирует вольтметр (V).¹⁰

Суть эксперимента заключается в том, что, увеличивая силу тока I с помощью увеличения напряжения цепи U , мы сможем увеличивать температуру внутреннего цилиндра T_1 . Напряжение цепи изменяется путём изменения количества источников тока, подключённых последовательно.

Измеряя силу тока I и напряжение U , мы сможем найти поток теплоты q , выделяемый нитью за единицу времени.

$$q = IU$$

Плотность теплового потока в расчёте на единицу длины q_l найдём по формуле

$$q_l = \frac{q}{L} = \frac{IU}{L}$$

где L - длина алюминиевой трубки.

§3. Результаты эксперимента.

¹⁰ Там же. С. 10-11.

Неизменные данные прибора, такие как диаметр внешнего цилиндра d_2 , диаметр внутреннего цилиндра d_1 и длина внутреннего цилиндра L , а также температура внешнего цилиндра T_2 , измеренная в ходе проведения эксперимента, представлены в *таблице 1*.

$d_1, (мм)$	$d_2, (мм)$	$L, (м)$	$T_2, (К)$
10,4	30	0,29	296

таблица 1

С помощью экспериментальной установки (*рис. 3*) был проведён эксперимент, в ходе которого были получены данные, необходимые для вычисления коэффициента теплопроводности воздуха. В ходе исследования было зафиксировано 6 стационарных температурных режимов с соответствующими показателями силы тока I и падением напряжения на нити U .

В связи с потребностью во времени для получения стационарного процесса была проведена одна серия эксперимента. Показатели амперметра и вольтметра варьировались в пределах, указанных в *таблице 2*. Термометр по достижении стационарного процесса устанавливался на постоянной величине, погрешность измерений температуры не зафиксирована.

Полученные данные представлены в *таблице 2*.

	1	2	3	4	5	6
$T_1, (К)$	302,2	308,1	317,2	322,3	329,1	334,3
$I, (А)$	0,52 ÷ 0,05	0,75 ÷ 0,05	1,49 ÷ 0,07	1,57 ÷ 0,07	1,84 ÷ 0,09	1,95 ÷ 0,1
$U, (В)$	2,55 ÷ 0,2	4,45 ÷ 0,3	5,05 ÷ 0,3	6,80 ÷ 0,3	8,00 ÷ 0,4	8,80 ÷ 0,4
$k, (Вт/м*К)$	0,124	0,160	0,206	0,236	0,259	0,260

таблица 2

На основе полученных данных можно получить зависимость коэффициента теплопроводности воздуха от температуры.

Полученная зависимость представлена на ниже приведённом *графике 1* (см. Приложение).¹¹

Из графика видно, что полученная зависимость $k(T_1)$ соответствует теоретической зависимости (4), полученной в первой главе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, поставленные задачи работы выполнены. Исследована теория теплопроводности воздуха, установлена теоретическая зависимость коэффициента теплопроводности идеального газа от давления и температуры, создана экспериментальная установка, с помощью которой проведён эксперимент.

Цель работы также достигнута. С помощью эксперимента установлена зависимость коэффициента теплопроводности воздуха от температуры. Полученные данные соответствуют теоретической зависимости. Коэффициент теплопроводности воздуха повышается с увеличением температуры.

На этом потенциал данной темы не исчерпывается. Впоследствии открываются возможности для исследования зависимости коэффициента теплопроводности воздуха от давления в состоянии, близком к вакууму. Установление же зависимости от всех макропараметров может иметь широкое применение в строительной отрасли.

¹¹ На графике показана зависимость коэффициента теплопроводности от разницы температур между цилиндрами. Это подчёркивает то обстоятельство, что коэффициент теплопроводности обращается в ноль при отсутствии разницы температур между элементами системы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Термодинамика и молекулярная физика. 164-170 стр.
2. Савельев И.В. Курс общей физики, т.1. Механика. Молекулярная физика: учебное пособие. - 2-е изд., перераб. - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. 384-388 стр.
3. Теоретические основы эксперимента
http://genphys.phys.msu.ru/rus/lab/mol/Lab219_2013.pdf ссылка действительна на 24.05.2015.
4. Средняя длина свободного пробега
http://flash-fizika.narod.ru/3_1.html ссылка действительна на 24.05.2015.
5. Средняя квадратичная скорость молекул
<http://frutmrut.ru/srednyaya-kvadratichnaya-skorost-molekul> ссылка действительна на 24.05.2015.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Прил. 1.

График зависимости коэффициента теплопроводности воздуха от температуры.

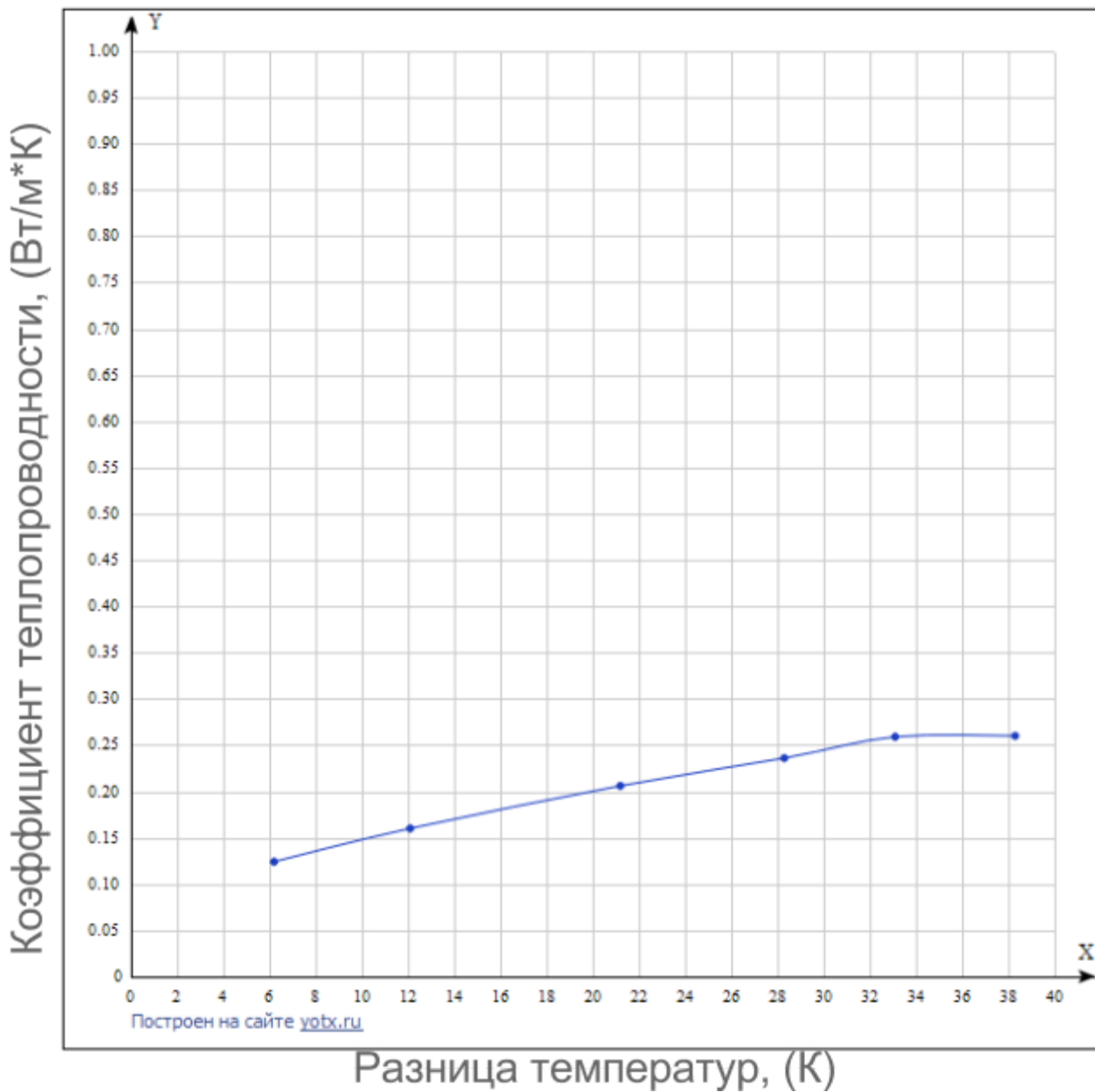


график 1

Прил. 2.
Фотографии экспериментальной установки.

