



Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Физический факультет

Кафедра общей физики

Лабораторный практикум по молекулярной физике

Задача №219

Изучение явлений переноса в воздухе

Москва 2019

Лабораторный практикум по молекулярной физике

С.А.Киров, А.М. Салецкий, Д.Э. Харабадзе

Изучение явлений переноса в воздухе

Учебное пособие – М.: ООП Физ. факультета МГУ, 2019, 20 с.

Данное учебное пособие представляет собой переработанный вариант описания задачи практикума физического факультета:

П.С. Булкин, О.Н. Васильева, Т.И. Малова, Я.В. Пузырев. М.: ООП Физ. факультета МГУ, 2007. *Изучение явлений переноса в воздухе*.

В новом описании добавлены дополнительные методы обработки результатов и оценки влияния разных факторов на результаты измерений.

Оглавление

Теоретическое введение.....	3
Теплопроводность	3
Теоретические основы метода измерения теплопроводности.....	4
Вязкость.....	7
Теоретические основы метода измерения вязкости	8
Эксперимент	10
Экспериментальная установка.....	10
<i>Измерение теплопроводности.....</i>	<i>10</i>
<i>Измерение вязкости воздуха</i>	<i>13</i>
Проведение эксперимента	14
<i>Упражнение 1. Измерение коэффициента теплопроводности воздуха</i>	<i>14</i>
<i>Упражнение 2. Измерение коэффициента вязкости воздуха.....</i>	<i>14</i>
Обработка результатов.....	15
<i>Упражнение 1</i>	<i>15</i>
<i>Упражнение 2</i>	<i>17</i>
Контрольные вопросы	18
Литература.....	19
Приложение 1. Расчет коэффициента теплопроводности с учетом его предполагаемой зависимости от температуры.....	19

Изучение явлений переноса в воздухе

Цель работы

Изучение процессов переноса (теплопроводности и вязкости) в газе. Изучение физических основ измерения теплопроводности методом цилиндрического слоя и вязкости – методом капиллярного вискозиметра. Измерение коэффициента теплопроводности и вязкости воздуха.

Идея эксперимента

Измерение коэффициента теплопроводности газа базируется на теоретической формуле, связывающей величину стационарного теплового потока между двумя длинными коаксиальными цилиндрами с величиной коэффициента теплопроводности и с температурой цилиндров. Величина теплового потока измеряется по мощности электрического тока, нагревающего внутренний цилиндр. Температура этого цилиндра (проволоки) находится по известной зависимости его сопротивления от температуры.

Измерение коэффициента вязкости базируется на формуле Пуазейля, связывающей величину объемного потока среды, протекающей по капиллярной трубке, с коэффициентом вязкости и разностью давлений на концах трубки.

Теоретическое введение

Теплопроводность

Теплопроводность – процесс переноса тепла, обусловленный передачей энергии от молекулы к молекуле при их столкновениях. Плотность потока энергии \mathbf{j} , то есть энергия, проходящая через единичную площадку за 1 с, в направлении, перпендикулярном к площадке, пропорциональна градиенту температуры и выражается соотношением:

$$\mathbf{j} = -\kappa \operatorname{grad} T, \quad (1)$$

где κ – коэффициент теплопроводности с размерностью Вт/(м·К).

Кинетическая теория газов дает для коэффициента теплопроводности κ следующее выражение [1, 2]:

$$\kappa = \frac{1}{3} n v \lambda \frac{C_V}{N_A} = \frac{1}{3} \rho v \lambda c_V, \quad (2)$$

где C_V – молярная теплоемкость, N_A – число Авогадро, ρ – плотность, c_V – удельная теплоёмкость газа, $v = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$ – средняя скорость молекул, $\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}n\sigma}$ – средняя длина свободного пробега молекул, n – концентрация молекул, σ газо-кинетическое эффективное сечение молекулы.

При постоянной температуре величина κ остается постоянной в широких пределах изменения давления p , так как в этом случае $\rho \sim p$, а $\lambda \sim 1/p$, так что их произведение не меняется. Однако для малых давлений и концентраций, при которых длина свободного пробега становится больше, чем размеры сосуда, теплопроводность, как результат передачи энергии от молекулы к молекуле, теряет смысл. В этом случае теплопередача между стенками сосуда осуществляется молекулами, летающими без столкновений между стенками, и она уменьшается пропорционально уменьшению концентрации молекул, т.е. с уменьшением давления.

Однако в случае тонкой нагретой нити теплопередача от нее в окружающее пространство начнет уменьшаться с уменьшением давления, когда длина пробега станет больше диаметра нити

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}p\sigma} > d,$$

т.е. независимо от размеров сосуда, окружающего эту нить.

Для воздуха при температуре 25°C длину свободного пробега можно оценить по приближенной формуле:

$$\lambda \approx \frac{6.2}{p_{\text{Па}}} \cdot 10^{-3} = \frac{4.7}{p_{\text{ммг}}} \cdot 10^{-5} (\text{м}), \quad (3)$$

где $p_{\text{Па}}$ – давление в паскалях, $p_{\text{ммг}}$ – давление в миллиметрах ртутного столба.

Теоретические основы метода измерения теплопроводности

Для измерения коэффициента теплопроводности в данной задаче используется

метод цилиндрического слоя, основанный на измерении теплового потока между двумя concentрическими цилиндрами (рис.1). Найдем теоретически величину теплового потока между цилиндрами, считая, что $T_1 > T_2$.

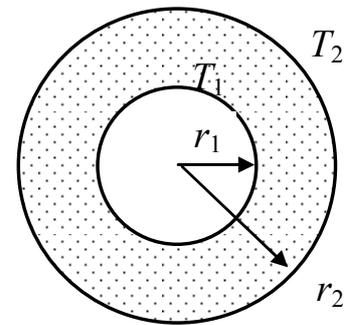


Рис.1. Геометрия измерения теплопроводности

Для рассматриваемого цилиндрически симметричного случая вектор плотности потока энергии (1) имеет только радиальную составляющую

$$j = j_r = -\kappa \frac{dT}{dr}.$$

Полный поток через боковую поверхность цилиндра произвольного радиуса r в интервале $r_1 < r < r_2$ равен

$$W = j_r S = -\kappa \frac{dT}{dr} 2\pi r L,$$

где L – высота цилиндров. Поскольку в промежутке $r_1 < r < r_2$ нет источников тепла, то тепловой поток W должен быть постоянной величиной. Учитывая это, разделим переменные в этом уравнении и проинтегрируем в указанных пределах

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = -\frac{2\pi L}{W} \int_{T_1}^{T_2} \kappa dT.$$

Интегрируя, получаем

$$\ln \frac{r_2}{r_1} = -\frac{2\pi L}{W} \int_{T_1}^{T_2} \kappa dT. \tag{4}$$

Далее возможны разные варианты измерения и обработки экспериментальных данных.

I. Приближение $\kappa = \text{const}$

Введем средний коэффициент теплопроводности по интервалу температур $T_1 < T < T_2$, равный

$$\bar{\kappa} = \frac{1}{T_1 - T_2} \int_{T_1}^{T_2} \kappa dT .$$

Тогда из (4) получается

$$\bar{\kappa} = \frac{\ln(r_2 / r_1)}{2\pi L} \frac{W}{T_1 - T_2} . \quad (5)$$

Таким образом, для измерения коэффициента теплопроводности данным методом достаточно знать только температуры обоих цилиндров и величину теплового потока между ними. Поскольку κ слабо зависит от температуры, а именно

$$\kappa \sim v \sim \sqrt{T} , \quad (6)$$

то при небольшой разности температур измеренный коэффициент $\bar{\kappa}$ будет близок к своему точному значению $\kappa(\bar{T})$ при средней температуре на этом интервале. Из (6) следует, что относительное изменение коэффициента в первом

приближении равно $\frac{\Delta\kappa}{\bar{\kappa}} \approx \frac{\Delta T}{2T}$. Например, для получения относительной точности измерения κ в 5% относительное изменение температуры не должно превышать 10%, т.е. величины порядка 30 К.

II. Приближение $\kappa \sim T^{1/2}$

Если при обработке результатов сразу учесть теоретическую зависимость (6), то есть положить $\kappa = \beta\sqrt{T}$, то точность измерения κ можно увеличить. Такой расчет приведен в Приложении 1.

III. Точное измерение $\kappa(T)$

Точное значение коэффициента теплопроводности при температуре нагреваемого внутреннего цилиндра $\kappa(T_1)$, без всяких дополнительных предположений можно найти следующим образом. Перепишем (4) в виде

$$W = -\frac{2\pi L}{\ln(r_2 / r_1)} \int_{T_1}^{T_2} \kappa(T) dT .$$

Продифференцировав это соотношение по T_1 , получим

$$\frac{dW}{dT_1} = \frac{2\pi L}{\ln(r_2 / r_1)} \kappa(T_1),$$

откуда следует

$$\kappa(T_1) = \frac{\ln(r_2 / r_1)}{2\pi L} \frac{dW}{dT_1}. \quad (7)$$

Для расчета $\kappa(T_1)$ нужно измерить экспериментальную зависимость тепловой мощности W от температуры нити T_1 и найти производную dW/dT_1 при разных температурах T_1 .

Вязкость

Внутреннее трение в газах, или вязкость, определяется переносом импульса в направлении, перпендикулярном движению слоёв газа. Пусть газ движется вдоль оси x , а скорость слоёв газа меняется по оси y . Из-за переходов молекул между слоями за счет теплового движения, более быстрый слой, получая медленные молекулы, будет испытывать торможение, а медленный слой – наоборот, получать дополнительный импульс по оси x от попадающих в него быстрых молекул (рис.2). Плотность потока импульса j_y равна касательному напряжению τ , т.е. отношению силы вязкого трения ΔF_x , к площади ΔS_y площадки на границе двух соседних слоёв газа, перпендикулярной к оси y . Это напряжение определяется формулой Ньютона [1, 3] :

$$\tau_{yx} = \frac{\Delta F_x}{\Delta S_y} = -\eta \frac{dv_x}{dy},$$

где η – коэффициент динамической вязкости размерности Па·с.

Кинетическая теория газов дает выражение для коэффициента вязкости [1,2]:

$$\eta = \frac{1}{3} n m v \lambda = \frac{1}{3} \rho v \lambda, \quad (8)$$

где m – масса молекулы. Поведение η в зависимости от температуры и давления аналогично коэффициенту теплопроводности (2). Из выражений (2) и (8) видно,

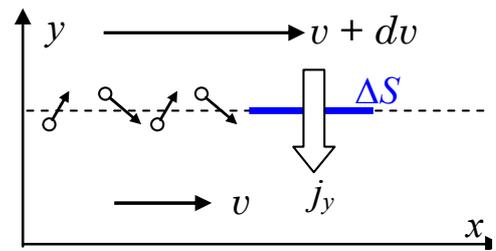


Рис.2. Иллюстрация к механизму вязкого трения.

что отношение коэффициентов теплопроводности и вязкости равно удельной теплоёмкости газа при постоянном объёме c_V .

Более точный и сложный расчет с учетом формы молекул и распределения по скоростям приводит к соотношению [2]:

$$\frac{\kappa}{\eta} = A c_V. \quad (9)$$

Коэффициент A для воздуха близок к 2.

Теоретические основы метода измерения вязкости

Коэффициент вязкости в данной работе определяется из известных закономерностей протекания газа через измерительный капилляр.

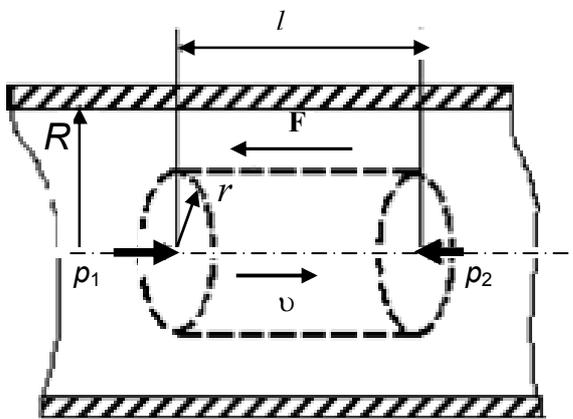


Рис.3. Течение жидкости в круглом капилляре

Рассмотрим сначала движение несжимаемой среды (жидкости). При малых скоростях потока течение в капилляре является *ламинарным*, т.е. поток движется отдельными слоями, и его скорость в каждой точке направлена вдоль оси капилляра. Такое течение устанавливается на некотором расстоянии от входа в капилляр, поэтому для достижения достаточной точности эксперимента необходимо выполнение условия $R \ll l$, где R – радиус, l – длина капилляра.

Рассмотрим течение несжимаемой среды (жидкости) в круглом капилляре диаметром $2R$ при ламинарном течении. Выделим воображаемый цилиндрический объем радиусом r и длиной l , как это показано на рис.3. Поскольку среда несжимаема и скорости всех слоев направлены только вдоль оси капилляра, то в каждой точке поперечного сечения капилляра давления одинаковы.

Обозначим давления на торцах цилиндра через p_1 и p_2 . При стационарном течении вектор скорости в каждой точке канала не меняется со временем. Тогда сила давления на выбранный объем, равная $(p_1 - p_2) \pi r^2$, должна уравновешиваться

силой внутреннего трения F , действующей со стороны наружных слоев газа на боковую поверхность выбранного цилиндра:

$$F = -\eta \frac{dv}{dr} S. \quad (10)$$

где $S = 2\pi r l$ – площадь боковой поверхности цилиндра, v – скорость потока, η – коэффициент вязкости среды.

Приравняв эти силы, получим уравнение

$$(p_1 - p_2) \pi r^2 = -\eta \frac{dv}{dr} 2\pi r l, \quad (11)$$

Разделив переменные, проинтегрируем получившиеся дифференциальное уравнение, считая, что сила внутреннего трения о стенку капилляра полностью тормозит прилежащий к ней слой среды, т.е. $v(R) = 0$:

$$\int_v^0 dv = -\frac{p_1 - p_2}{2l\eta} \int_r^R r dr.$$

Получаем параболический закон изменения скорости газа по радиусу канала:

$$v = \frac{\Delta p}{4\eta l} (R^2 - r^2),$$

где $\Delta p = p_1 - p_2$. Вычислим теперь объемный расход (объем, протекающий за единицу времени через поперечное сечение капилляра). Разобьем поперечное сечение на кольца шириной dr (рис.4). Объемный поток через кольцо радиусом r и толщиной dr можно представить в виде

$$dI_V = v dS = \frac{\Delta p}{4\eta l} (R^2 - r^2) 2\pi r dr.$$

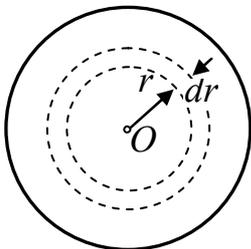


Рис.4. К вычислению объемного расхода газа

Объемный расход через все сечение капилляра будет равен

$$I_V = \frac{\pi \Delta p}{2\eta l} \int_0^R (R^2 - r^2) r dr.$$

Интегрируя, получаем формулу Пуазейля для объемного расхода несжимаемой среды при протекании по круглой трубе (капилляру):

$$I_V = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8 \eta l}. \quad (12)$$

При изотермическом течении по капилляру сжимаемой среды – газа – плотность среды $\rho(p)$ зависит от давления и меняется вдоль потока, поэтому величина объемного потока будет меняться вдоль длины капилляра. Одинаковым будет только массовый расход среды, т.е. масса, проходящая за единицу времени через любое поперечное сечение капилляра. Но если $\Delta p \ll p_{1,2}$, как имеет место в нашей работе, то изменением плотности газа можно пренебречь и использовать для потока газа ту же формулу (12).

Таким образом, если экспериментально измерить поток I_V через капилляр и давления p_1, p_2 на его концах, то из (13) можно найти коэффициент динамической вязкости газа

$$\eta = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8 I_V l}. \quad (13)$$

Более точно найти η можно, если построить зависимость $I_V(\Delta p)$, и с помощью МНК аппроксимировать ее линейной зависимостью $I_V = A \cdot \Delta p$. Величина η будет равна

$$\eta = \frac{\pi R^4}{8 l A}. \quad (14)$$

Эксперимент

Экспериментальная установка

Общий вид установки показан на рис.5. Измерительный стенд состоит из двух независимых частей: левая (А) – для определения коэффициента теплопроводности и правая часть (Б) – для определения коэффициента внутреннего трения (выделена пунктиром).

Измерение теплопроводности

Используется описанный выше метод цилиндрического слоя. Роль внешнего цилиндра выполняет стеклянная измерительная трубка ИТ, температура которой

в процессе измерений поддерживается постоянной и равной комнатной благодаря окружающему ее термостату – резервуару P , заполненному водой. По оси измерительной трубки натянута тонкая металлическая проволока (нить) из никеля, играющая роль внутреннего цилиндра. Тепло распространяется от нагреваемой нити к внешнему цилиндру. Для нагрева нити по ней пропускается постоянный ток I от лабораторного источника питания Π . Сила тока I через нить измеряется амперметром A , напряжение U на ее концах измеряет вольтметр V . Резистор r ограничивает максимальную силу тока через проволоку.

Размеры трубки ИТ и никелевой проволоки приведены на установке. Из измерительной трубки можно откачивать воздух с помощью вакуумного насоса H_1 . Измерительная трубка соединена с трехходовым краном K_p , который может соединять ее с насосом (положение 1 "Насос"), с атмосферой (положение 3 "Атмосфера"), либо изолировать ее (положение 2 "Закрывается").

Давление в трубке измеряется манометром M (определяется разность давлений

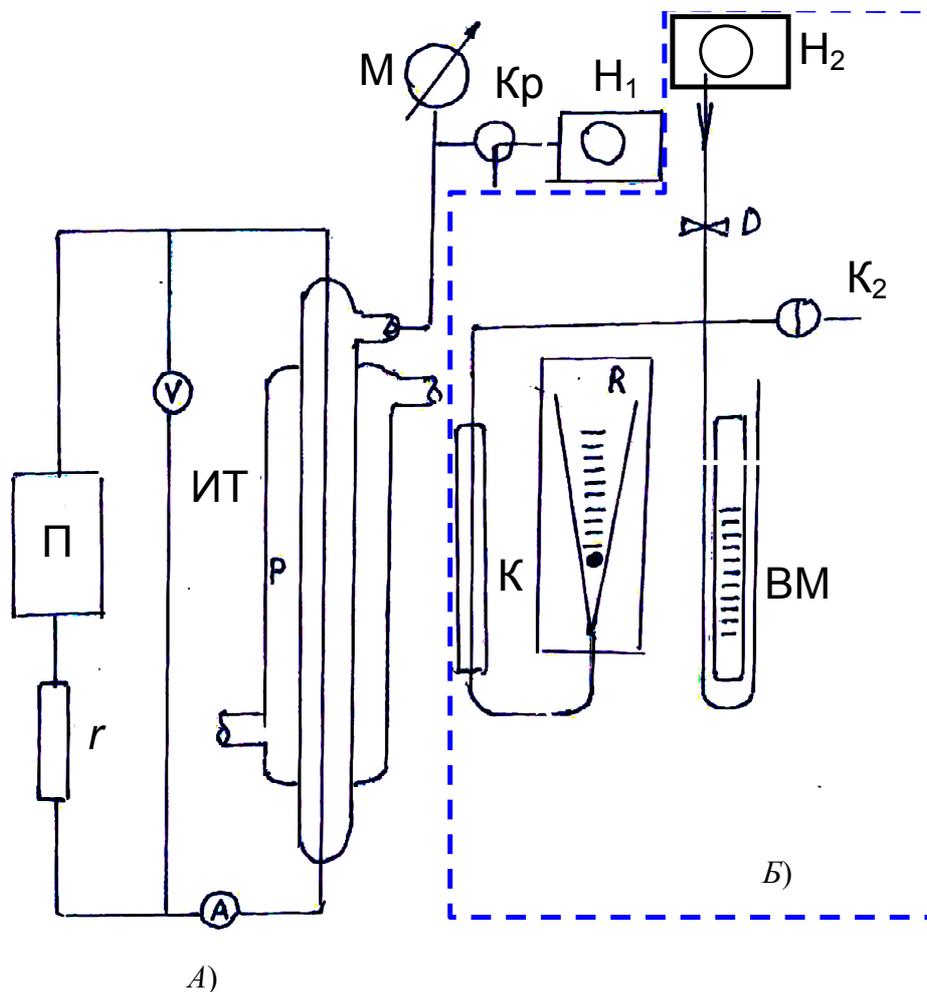


Рис.5 Принципиальная схема установки

в трубке и атмосфере). Температура проволоки определяется косвенно по её электрическому сопротивлению. В области используемых температур сопротивление проволоки меняется по линейному закону:

$$R = R_0(1 + \alpha(T - T_0)), \quad (15)$$

где T_0 – исходная комнатная температура нити, α – температурный коэффициент сопротивления материала проволоки (никель), R – сопротивление проволоки при температуре T , а R_0 – сопротивление проволоки при комнатной температуре T_0 .

Положив $T_0 = T_2$ и $T = T_1$, из (15) получим

$$T_1 - T_2 = \frac{R - R_0}{\alpha R_0}.$$

Подставив эту разность температур в (5), найдем окончательное выражение для коэффициента теплопроводности:

$$\bar{\kappa} = \frac{W \alpha \ln(r_2 / r_1)}{2\pi L} \frac{R_0}{R - R_0}. \quad (16)$$

Поскольку на установке экспериментально измеряется напряжение на проволоке U и сила тока I , то ее сопротивление находится по закону Ома

$$R = \frac{U}{I}, \quad (17)$$

а тепловая мощность тока рассчитывается по формуле

$$W_I = UI. \quad (18)$$

Эта мощность в стационарном режиме уносится от провода на стенки внешнего цилиндра через поток теплопроводности газа W , а также частично за счет излучения и конвекции. В данной установке излучение будет мало из-за небольшой температуры нагрева нити, а конвекция мала ввиду малого диаметра нагреваемой нити. Поэтому можно считать, что вся электрическая мощность равна потоку тепла за счет теплопроводности $W_I = W$.

Так как соотношение (16) содержит две неизвестных величины – $\bar{\kappa}$ и R_0 , то для нахождения $\bar{\kappa}$, в принципе, достаточно двух измерений при двух токах. Однако для увеличения точности целесообразно провести измерения в большем числе

точек, считая, что при небольших изменениях температуры коэффициент κ меняется очень мало, на величину, меньшую нашей погрешности измерений. Перепишем (16) в виде

$$R = W \frac{\alpha R_0 \ln(r_2 / r_1)}{2\pi L \bar{\kappa}} + R_0. \quad (19)$$

Отсюда видно, что если пренебречь изменением $\bar{\kappa}$, то сопротивление нити R является линейной функцией тепловой мощности W . Чтобы найти $\bar{\kappa}$, экспериментальный график $R(W)$ нужно аппроксимировать линейной функцией $R(W) = A \cdot W + B$ методом наименьших квадратов. Параметр B , равный отрезку, отсекаемому графиком от оси ординат R , определит исходное сопротивление нити при комнатной температуре

$$R_0 = B. \quad (20)$$

Коэффициент наклона прямой, равный

$$A = \frac{\alpha R_0}{2\pi L \bar{\kappa}} \ln(r_2 / r_1),$$

позволяет найти среднее значение коэффициента теплопроводности

$$\bar{\kappa} = \frac{\alpha R_0}{2\pi L A} \ln(r_2 / r_1). \quad (21)$$

Для получения зависимости $\kappa(T)$ в соответствии с формулой (7) можно записать

$$\kappa(T) = \frac{\alpha R_0}{2\pi L A(T)} \ln \frac{r_2}{r_1}; \quad A(T) = \frac{dR}{dW}. \quad (22)$$

Измерение вязкости воздуха

Принципиальная схема установки показана в правой части рис.5. Воздух от компрессора-насоса H_2 , подается в измерительной капилляр K , величина потока измеряется ротаметром R . Поток регулируется клапаном на входе ротаметра. Разность давлений на концах капилляра измеряется водяным U-образным водяным манометром BM .

Проведение эксперимента

Упражнение 1. Измерение коэффициента теплопроводности воздуха

- 1) На экспериментальной установке переведите кран Кр в положение *Атмосфера*. На блоке питания поставьте регулятор напряжения в положение минимума (ручкой против часовой стрелки до упора).
- 2) Включите источник питания. Амперметр покажет небольшой начальный ток. Подождите 1 минуту для установления стационарного состояния температуры нити. Запишите величину силы тока и напряжения.
- 3) Добавляя силу тока каждый раз на 20 мА (приблизительно), повторите аналогичные измерения до достижения максимально возможного тока (около 350 мА). После перехода к каждой следующей величине тока необходимо выждать 1 минуту для установления стационарного состояния.
- 4) Проведите аналогичные измерения при уменьшении силы тока.
- 5) После окончания этих измерений установите максимальный ток. Переведите кран Кр в положение *Насос*. Откачайте воздух до максимального вакуума. затем переведите кран Кр в положение *Закрито*.

Ввиду наличия в системе небольшой течи, давление в трубке начнет медленно возрастать.

- 6) По мере увеличения давления запишите в нескольких точках (4 - 5) показания манометра, силу тока и напряжение. Манометр измеряет разность давлений в трубке p и в атмосфере: $\Delta p = p_0 - p$, где p_0 – атмосферное давление в лаборатории, измеряемое по барометру.
- 7) Окончив измерения, уменьшите ток до минимума, выключите источник питания и запустите воздух в измерительную трубку, переведя кран Кр в положение *Атмосфера*.

Упражнение 2. Измерение коэффициента вязкости воздуха

- 8) Установите максимальную величину потока воздуха ручкой регулирующего вентиля на ротаметре. Запишите показания по шкале ротаметра и разность уровней водяного манометра ВМ.

- 9) Повторите измерения, уменьшая поток каждый раз ручкой вентиля приблизительно на 1/2-1 деление шкалы ротаметра до минимума.

Обработка результатов

Упражнение 1

Все величины нужно рассчитать с указанием экспериментальной погрешности. Погрешность используемого цифрового вольтметра-мультиметра составляет $\pm 0.25\%$ от измеренной величины ± 2 младшие единицы индикатора. Погрешность стрелочного амперметра определяется по его классу точности.

- 1) По формулам (17), (18) рассчитайте сопротивление нити R и тепловую мощность W при каждом токе I . Результаты запишите в табл.1.

Табл.1 Результаты измерений теплопроводности

I, A	U, B	$R, Ом$	$W, Вт$	$A, Ом/Вт$	$B, Ом$

- 2) Постройте график $R(W)$, измеренный при возрастающем токе. Выполните линейную аппроксимацию $R = AW$, используя МНК, желательно с учетом погрешности каждой точки. Найдите коэффициент наклона графика A и величину R_0 с указанием погрешности.
- 3) Рассчитайте средний коэффициент теплопроводности \bar{k} по формуле (21), используя значения параметров, указанные на установке. Рассчитайте погрешность результата.
- 4) Выполните аналогичный расчет для случая убывающего тока и запишите результаты в табл.1.

Поскольку при выбранных параметрах питания установки разность температур нити и трубки не превосходит 50 К, то изменения коэффициента теплопроводности на этом интервале малы. Поэтому при нашей точности измерений зави-

симось $R(W)$ будет близка к линейной, и рассчитывать более точную зависимость $\kappa(T)$ по формуле (22) не имеет смысла.

- 5) Сравните между собой данные измерений I и U , полученные при разных давлениях воздуха. Запишите выводы о влиянии давления на коэффициент теплопроводности.
- 6) Пользуясь (3), рассчитайте давление p_d , при котором длина пробега молекул сравняется с диаметром проволоки d и теплопередача должна начать уменьшаться.

По указанию преподавателя: рассчитайте величину коэффициента теплопроводности при комнатной температуре по методу, изложенному в Приложении 1.

Оценка мощности теплоизлучения и конвекции

- 7) Оцените величину теплового потока излучения для максимальной температуры нити, пользуясь законом Стефана-Больцмана:

$$W_{изл} = \varepsilon\sigma(T_1^4 - T_2^4)S, \quad (23)$$

где S – площадь поверхности нити, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К), коэффициент серости для никеля равен $\varepsilon = 0,35$.

Перенос тепла конвекцией зависит от многих факторов и является сложным гидродинамическим процессом, не имеющим точных аналитических решений.

Конвективные потери тепла с поверхности можно приблизительно описать формулой Ньютона-Рихмана

$$W_{кон} = \alpha(T_1 - T_2)S, \quad (24)$$

где S – площадь нагретой поверхности. Приблизительные оценки параметра α базируются на экспериментальных данных, полученных для ряда типовых вариантов расположения и формы нагретых тел, которые затем уже пересчитываются к нужным размерам с помощью результатов теории подобия.

При свободной конвекции, когда движение осуществляется только за счет разности плотностей, вызванной неравномерностью температурного поля (силы Архимеда), критерием подобия, определяющим распространение теплоты в сре-

де, является безразмерный параметр – число Грасгофа (Gr) [4]. Он равен произведению числа Рейнольдса на отношение подъемной силы к силе вязкости

$$Gr = \frac{g\beta L^3 \Delta T}{\nu^2}, \quad (25)$$

где $g = 9.8 \text{ м/с}^2$, $\beta = \frac{1}{V} \left(\frac{dV}{dT} \right)_p$ – коэффициент изобарической сжимаемости (для

идеального газа $\beta = 1/T$), ν – кинематическая вязкость (для воздуха при комнатной температуре $\nu \approx 1.6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$), L – длина цилиндра (нити), ΔT – разность температур нагретой нити и окружающей среды.

Для случая вертикального цилиндра при $Gr < 10^9$ течение газа при конвекции ламинарно, и α можно оценить по формуле [4]

$$\alpha \approx 0.75 \frac{\kappa}{L} (0.7 \cdot Gr)^{1/4}, \quad (26)$$

где κ – коэффициент теплопроводности газа. Соотношение (26) является обобщением полуэмпирических законов конвективного теплообмена. Оно отражает тот факт, что конвекция в гравитационном поле тем больше, чем меньше вязкость среды и чем больше коэффициент теплового расширения, поскольку он определяет плотность сил Архимеда, которые и вызывают конвекцию.

- 8) Оцените по формулам (24-26) тепловую мощность конвекции $W_{\text{кон}}$ для максимальной температуры нити.
- 9) Сравните величину $W_{\text{изл}}$ и $W_{\text{кон}}$ с погрешностями измерений тепловой мощности нагрева нити, запишите выводы.

Упражнение 2

- 10) Пересчитайте показания ротаметра в величину объемного потока воздуха I_V , пользуясь графиком, имеющимся на каждой установке, рассчитайте разность давлений Δp на концах капилляра в паскалях. Результаты запишите в табл.2.
- 11) Постройте график $I_V(\Delta p)$ и с помощью МНК аппроксимируйте его линейной зависимостью $I_V = A \cdot \Delta p$. Рассчитайте η по формуле (14). Радиус капилляра и его длина указаны на каждой установке.

Табл.2 Данные для измерений вязкости

n , дел. ротаметра	I_V , см ³ /с	Δp , мм Н ₂ О	Δp , Па	A , м ³ /(Па·с)	η , Па·с

12) Для проверки предполагаемого условия ламинарности течения воздуха по капилляру оцените величину числа Рейнольдса [3] по формуле

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta},$$

где ρ – плотность воздуха, v – скорость потока, d – диаметр капилляра. Переход в турбулентный режим при тчении по трубе соответствует критическому значению числа Рейнольдса около $2 \cdot 10^3$.

13) С помощью формулы (9) рассчитать величину теплоёмкости c_V .

Сделать выводы о точности полученных результатов.

Итоги работы

В результате выполнения работы должны быть изучены физические основы измерения коэффициентов теплопроводности и вязкости, найдены их значения для воздуха с указанием погрешностей и с оценкой влияния ряда дополнительных факторов, не учтенных использованной теорией.

Контрольные вопросы

1. Что такое процессы переноса, в каких случаях возникают процессы переноса?
2. Что такое длина свободного пробега молекулы?
3. Что такое эффективный диаметр молекулы?
4. Как длина свободного пробега молекулы зависит от температуры газа (при постоянном давлении)?
5. Какой из процессов переноса лежит в основе явления вязкости?
6. Какой из процессов переноса лежит в основе явления теплопроводности?
7. Охарактеризуйте различные способы переноса тепла между телами.

8. Что такое коэффициент теплопроводности среды? Его размерность.
9. Как коэффициент теплопроводности газа зависит от давления и температуры?
10. Физические основы измерения теплопроводности методом коаксиальных цилиндров.
11. Каким образом измеряется температура нити в данной работе?
12. Как определяется мощность теплового потока в газе в данной работе?
13. Что такое конвекция?
14. Что такое тепловое излучение?
15. Что такое коэффициент вязкости? Его размерность.
16. Как зависит коэффициент вязкости газа от давления и температуры?
17. Физические основы измерения вязкости методом капилляра.
18. Вывести формулу Пуазейля.
19. Что такое число Рейнольдса и его смысл?

Литература

Основная

1. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. М.: Оникс, 2006, §50-52.
2. Сивухин Д. В. Общий курс физики. В 5 томах. Том 2. Термодинамика и молекулярная физика М.: Физматлит, 2006. § 89.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики. В 5 томах. Том 1. Механика. М.: Физматлит, 2005. §96, 98.

Дополнительная

4. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М. Энергия. 1977, стр. 99.

Приложение 1. Расчет коэффициента теплопроводности с учетом его предполагаемой зависимости от температуры

Учитывая, что для газа коэффициент теплопроводности пропорционален средней скорости молекул $\kappa(T) \sim v \sim \sqrt{T}$, положим

$$\kappa(T) = \beta\sqrt{T}.$$

где множитель β не зависит от температуры. Подставив это соотношение в (4) и проинтегрировав его, получим

$$\ln \frac{r_2}{r_1} = \frac{4\pi L\beta}{3W} (T_1^{3/2} - T_2^{3/2}). \quad (27)$$

Температуру внутреннего цилиндра можно рассчитать из (15)

$$T_1 = \frac{R - R_0}{\alpha R_0} + T_0,$$

где $T_2 = T_0$ – комнатная температура. Необходимую для данного расчета величину R_0 можно взять из результатов упражнения 1. Для расчетов заполните следующую табл.3, взяв данные для первых 4 столбцов из табл.1.

Табл.3 Результаты расчета коэффициента теплопроводности

I, A	U, B	$R, Ом$	$W, Вт$	T_1, K	$x, K^{3/2}$	$A, Вт \cdot K^{-3/2}$	$\beta, Вт \cdot м \cdot K^{-3/2}$

Введем новую переменную

$$x = T_1^{3/2}.$$

Соотношение (27) можно переписать в виде линейной зависимости W от переменной x

$$W(x) = \frac{4\pi L\beta}{3\ln(r_2 / r_1)} (x - T_0^{3/2}). \quad (28)$$

Коэффициент наклона этой прямой $A = \frac{4\pi L\beta}{3\ln(r_2 / r_1)}$ можно найти с помощью

МНК по экспериментальному графику $W(x)$. Отсюда можно рассчитать величину коэффициента β

$$\beta = \frac{4\pi L}{3A \ln(r_2 / r_1)}.$$

Рассчитайте коэффициент теплопроводности при комнатной температуре

$$\kappa(T_0) = \beta \sqrt{T_0} = \frac{3\ln(r_2 / r_1)A}{4\pi L} \sqrt{T_0} \quad (29)$$

и постройте график теоретической зависимости $\kappa(T) = \beta \sqrt{T}$. Нанесите на график также среднюю величину $\bar{\kappa}$, найденную выше. Запишите выводы.