

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Удмуртский государственный университет»

И.В.Милютин, С.Р.Галлямов, С.Н.Костенков

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКЕ

Учебно-методическое пособие для студентов
специальностей «Физика»
и «Физика конденсированного состояния вещества»

Ижевск
2009

УДК 539.19(075)

ББК 22.36я7

М 608

*Рекомендовано к изданию редакционно-издательским
советом УдГУ.*

канд. физ.-мат. наук И.В.Милютин, С.Р.Галлямов, С.Н.Костенков

Лабораторные работы по молекулярной физике:
учеб.-метод. пособие для студ. спец. «Физика» и «Физика
конденсированного состояния вещества»/ И. В. Милютин,
С. Р. Галлямов, С. Н. Костенков; УдГУ, Ижевск: Изд-во
«Удмуртский университет», 2009. 62с.

УДК 539.19(075)

ББК 22.36я7

© И.В.Милютин, С.Р.Галлямов,
С.Н.Костенков, 2009

© Удмуртский госуниверситет, 2009

ВВЕДЕНИЕ

Данное учебно-методическое пособие адресовано студентам специальностей «Физика» и «Физика конденсированного состояния вещества» Физико-энергетического факультета, но может быть использовано и при преподавании физики студентам других специальностей (факультетов и институтов). Необходимые пояснения студентам в последнем случае, касающиеся числа реализуемых заданий, количества проводимых конкретных измерений, перечня теоретических вопросов, которые следует разобрать студенту в рамках проведения каждой лабораторной работы, даст преподаватель.

При изложении теоретического материала авторы исходили из того, что его объем должен быть ограничен рамками, необходимыми для понимания физического смысла рассматриваемых и измеряемых величин, а также понимания методики проводимых измерений. Для интерпретации изучаемых зависимостей и закономерностей студенту необходимо проработать дополнительный теоретический материал, ссылки на который даются в каждой работе. Исключение составляют случаи, когда необходимо привлечь материал других разделов общей физики (этот материал вынесен в «Приложения» к конкретным лабораторным работам).

Готовя отчет по лабораторной работе, студент должен сопоставить измеренные величины с их значениями, приводимыми в справочной литературе, и должен быть готов дать интерпретацию полученных экспериментальных закономерностей.

Учитывая, что студенты знакомы с элементами теории ошибок и имеют семестровый опыт работы в учебной лаборатории «Механика», данные лабораторные работы, как правило, не содержат рекомендаций по расчету погрешностей.

Графики должны быть выполнены на миллиметровой бумаге, для каждой полученной в эксперименте точки должны быть указаны интервалы ошибок.

Если лабораторная работа выполняется бригадой студентов (не более 2 человек), каждый студент представляет индивидуальный отчет.

После проведения измерений студенты заверяют полученные результаты у преподавателя или лаборанта. Заверенные результаты прилагаются к одному из индивидуальных отчетов бригады студентов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ ВОЗДУХА

ОБОРУДОВАНИЕ: стеклянный баллон, распределительные краны, жидкостный U - образный манометр, насос (микрокомпрессор), секундомер.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: изучение термодинамических процессов идеального газа, экспериментальное определение показателя адиабаты γ воздуха, изучение классической теории теплоемкости идеального газа.

ВВЕДЕНИЕ

Теплоемкостью системы C называют отношение элементарного количества теплоты δQ , полученного или отданного системой, к произошедшему приращению температуры системы dT

$$C = \delta Q / dT.$$

Можно ввести в рассмотрение удельную теплоемкость c (теплоемкость единицы массы, единица измерения Дж/(кг• К))

$$c = \delta Q / (m dT),$$

и молярную теплоемкость C_μ (теплоемкость моля вещества, единица измерения Дж/(моль• К))

$C_\mu = \delta Q / (\nu dT)$, где ν – число молей.

Теплоемкость является как характеристикой самой системы, так и характеристикой процесса, в котором участвует система. Поэтому, различают например теплоемкость при постоянном давлении C_p и теплоемкость при постоянном объеме C_v .

Величина γ , равная отношению теплоемкости при постоянном давлении C_p к теплоемкости при постоянном объеме C_v , называется показателем адиабаты данного газа. Ею, в частности, определяется скорость распространения звука в газе, от нее зависит характер течения газов по трубам и каналам, как при дозвуковых, так и при сверхзвуковых скоростях.

В предлагаемой работе по результатам эксперимента рассчитывается показатель адиабаты $\gamma = C_p / C_v$ воздуха.

ТЕОРИЯ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Установка (рис.1) состоит из стеклянного баллона Б, который соединяется с насосом Н через кран K_1 , с атмосферой через кран K_2 и с манометром М. Водяной U- образный манометр М измеряет разность между давлением в баллоне Б и атмосферным давлением.

Для определения показателя адиабаты газа (воздуха), находящегося в баллоне, с ним проводят последовательность термодинамических процессов, представленных на PV - диаграмме (рис.2).

Пусть в начальном состоянии (точка О) газ в баллоне характеризуется термодинамическими параметрами - давлением P_0 , объемом V_0 и комнатной температурой T_0 . Тогда, из уравнения состояния масса газа, находящегося в баллоне в начальном состоянии, выражается соотношением

$$m_0 = \frac{P_0 V_0}{R T_0} \mu, \quad (1)$$

где $R = 8,31$ Дж/(моль•К)- универсальная газовая постоянная, μ - молярная масса газа.

В процессе (О-А) быстрого сжатия этой массы в баллон при помощи насоса накачивается воздух (кран K_1 - открыт, K_2 - закрыт). При этом рассматриваемая масса нагревается до некоторой температуры T_A .

После прекращения нагнетания воздуха закрытием крана K_1 , K_2 по-прежнему закрыт, происходит изохорическое охлаждение (процесс А-1) до комнатной температуры $T_1 = T_0$ и давления P_1 (состояние 1). Затем краном K_2 соединяют баллон с атмосферой (кран K_1 - закрыт), и газ адиабатически расширяется (процесс 1-В) достигая атмосферного давления P_0 .

При этом газ охлаждается до некоторой температуры $T_B < T_0$.

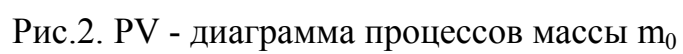
В момент достижения давления P_0 кран K_2 перекрывается, и газ изохорически нагревается до комнатной температуры (процесс В-2). В конечном состоянии давление газа $P_2 > P_0$, а температура равна T_0 .

Введем обозначения $\Delta P_1 = P_1 - P_0$ и $\Delta P_2 = P_2 - P_0$. Будем считать, что $\Delta P_1 < P_0$ и $\Delta P_2 < P_0$. Параметры газа в состояниях 1, В и 2 характеризуются следующими давлениями и температурами:

$$\text{Состояние 1: } P_1 = P_0 + \Delta P_1; \quad T_1 = T_0 \quad (2)$$

$$\text{Состояние В: } P_B = P_0; \quad T_B \quad (3)$$

$$\text{Состояние 2: } P_2 = P_0 + \Delta P_2; \quad T_2 = T_0 \quad (4)$$



Получим величину γ , используя процесс 1-В-2. Для процесса 1-В (адиабатическое расширение) справедливо уравнение адиабаты

$$P*V^\gamma = const \quad . \quad (5)$$

Или, в переменных P и T ,

$$P^{1-\gamma} * T^\gamma = const \quad . \quad (6)$$

Теперь уравнение (6) для процесса 1-В с учетом (2) и (3) запишется в виде

$$(P_0 + \Delta P_1)^{1-\gamma} * T_0^\gamma = P_0^{1-\gamma} * T_B^\gamma$$

или

$$\left(1 + \frac{\Delta P_1}{P_0}\right)^{\gamma-1} = \left(1 + \frac{T_0 - T_B}{T_B}\right)^\gamma \quad . \quad (7)$$

Прологарифмируем последнее выражение

$$(\gamma - 1) \ln \left(1 + \frac{\Delta P_1}{P_0}\right) = \gamma \ln \left(1 + \frac{T_0 - T_B}{T_B}\right),$$

т.к. $\frac{\Delta P_1}{P_0} \ll 1$ и $\frac{(T_0 - T_B)}{T_B} \ll 1$, и учитывая, что при малых x $\ln(1+x) \approx x$, получим

$$(\gamma - 1) \frac{\Delta P_1}{P_0} = \gamma \frac{T_0 - T_B}{T_B} \quad \text{или}$$

$$P_0 \frac{T_0 - T_B}{T_B} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \Delta P_1 \quad . \quad (8)$$

Покажем, что выражение в левой части (8) равно ΔP_2 . Рассмотрим изохорический процесс В-2, для которого справедлив закон Шарля

$$\frac{P_B}{P_2} = \frac{T_B}{T_2} \quad (9)$$

или с учетом (3) и (4)

$$\frac{P_0}{P_0 + \Delta P_2} = \frac{T_B}{T_0} \quad .$$

Выразив ΔP_2 , получим

$$\Delta P_2 = P_0 \frac{T_0 - T_B}{T_B} \quad .$$

Теперь, выразив (8) в виде

$$\Delta P_2 = \frac{\gamma-1}{\gamma} \Delta P_1 ,$$

найдем

$$\gamma = \frac{\Delta P_1}{\Delta P_1 - \Delta P_2} . \quad (10)$$

Рассмотренный метод определения показателя адиабаты называют методом Клемана-Дезорма. Казалось бы, в его рамках легко определить численное значение γ , однако, для подсчета показателя адиабаты по формуле (10), необходимо, чтобы выполнялись следующие условия:

1). в процессе 1-В кран K_2 должен быть закрыт в момент, когда давление в баллоне станет равным P_0 ;

2). время протекания процесса 1-В должно быть достаточно малым, чтобы теплообменом с окружающим воздухом можно было пренебречь, т.е. считать 1-В адиабатным процессом.

Условие 1 практически выполнить трудно по следующим причинам. После открытия крана K_2 , давление в баллоне со временем уменьшается по закону

$$P(t) = P_0 + \Delta P_1 e^{-\frac{Ut}{V_0}} , \quad (11)$$

где U - проводимость выпускного крана K_2 , которая для режима вязкостного течения выражается соотношением

$$U = \frac{\pi d^4}{128 \eta L} \times \frac{P_1 - P_0}{2} \quad (\text{м}^3 / \text{сек}) , \quad (12)$$

где d и L - соответственно диаметр и длина выпускного крана в (м), η - вязкость газа, P_1 и P_0 - соответственно давление в баллоне и атмосферное давление.

Для используемого крана $d \approx 0,004$ м, $L \approx 0,05$ м. Расчет показывает, что через 0.1 сек давление в баллоне отличается от P_0 не более чем на $0.01 \Delta P_1$, если $V_0 \leq 10$ л. Однако вручную открыть кран на 0,1 сек трудно, практически время оказывается значительно больше.

Невыполнение условия 1 ведет и к невыполнению условия 2. Это видно из следующих соображений. Предположим, что после достижения давления P_0 кран остается открытым еще некоторое время τ . За это время происходит изобарический нагрев (процесс В-3

для массы m_0), за счет теплообмена газа с окружающей средой через стенки баллона.

После закрытия крана K_2 (точка 3) происходит изохорический нагрев (процесс 3-4). Давление в баллоне достигает величины $P_0 + \Delta P$. Конечное состояние (точка 4) лежит на той же изотерме, что и точки 0, 1 и 2, но $\Delta P \neq \Delta P_2$ ($\Delta P < \Delta P_2$). Значит, ΔP зависит от времени τ . Таким образом, если принять во внимание теплообмен и уход части газа из баллона за время τ , то γ , рассчитанное по формуле (10) будет иметь значительную погрешность.

Для получения рабочей формулы рассмотрим процесс нагрева (В-3 для массы m_0) в течение времени τ . Уравнение баланса энергии для газа, находящегося в баллоне, может быть записано в виде

$$mc_p dT = \alpha(T_0 - T) d\tau, \quad (13)$$

где c_p – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении, α – коэффициент теплоотдачи, m – переменная масса газа в баллоне

$$m = \frac{P_0 V_0}{RT} \mu, \quad (14)$$

где T – температура газа в момент времени τ .

Разделяя переменные, с учетом (14), выражение (13) можно привести к виду

$$\frac{dT}{T(T_0 - T)} = \frac{\alpha R}{P_0 V_0 \mu c_p} d\tau. \quad (15)$$

После интегрирования приходим к выражению

$$\ln \frac{T_0 - T}{T} = - \frac{\alpha R T_0}{P_0 V_0 \mu c_p} \tau + \ln C. \quad (16)$$

Постоянную интегрирования C найдем из условия: при $\tau = 0$

$$T = T_B = T_0 - \Delta T_B,$$

тогда (16) принимает вид

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta T_B}{T_B} * e^{-\frac{\alpha \tau}{m_0 c_p}}, \quad (17)$$

где $\Delta T = T_0 - T$, $\Delta T_B = T_0 - T_B$.

После перекрытия крана K_2 , нагрев газа в баллоне продолжается изохорически, поэтому

$$\Delta P = \frac{P_0 \Delta T}{T_0 - \Delta T}, V = const, \quad (18)$$

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta P}{P_0}.$$

Из выражения (8) следует соотношение

$$\frac{\Delta T_B}{T_B} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} * \frac{\Delta P_1}{P_0}, \quad (19)$$

Подставляя (18) и (19) в (17), получим формулу

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_1} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} * e^{-\frac{\alpha \tau}{m_o c p}}, \quad (20)$$

из которой следует

$$\ln \frac{\Delta P}{\Delta P_1} = -\frac{\alpha \tau}{m_o c p} + \ln \frac{\gamma - 1}{\gamma}. \quad (21)$$

Из (21) видно, что график зависимости $\ln \frac{\Delta P}{\Delta P_1}$ линейно зависит от времени τ . При $\tau = 0$ этот график будет отсекает на оси ординат отрезок b (рис.3)

$$b = \ln \frac{\gamma - 1}{\gamma}, \quad (22)$$

величину которого можно определить методом наименьших квадратов (см. "Приложение"). Из выражения (22) следует искомая формула для определения показателя адиабаты

$$\gamma = \frac{1}{1 - e^b}. \quad (23)$$

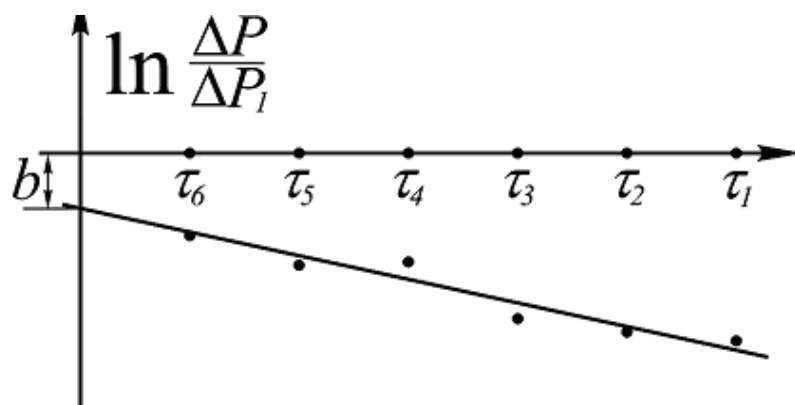


Рис.3 Зависимость $\ln \frac{\Delta P}{\Delta P_1}$ от времени τ

Порядок выполнения работы

1. Процесс О-А. Закрывать кран K_2 . Открыть кран K_1 . Накачать насосом воздух в баллон так, чтобы $P_A - P_0 = 250 - 300 \text{ мм вод.ст.}$. Закрывать кран K_1 .
2. Процесс А-1. Выждать не менее 60 сек, пока температура воздуха в баллоне не станет равной температуре окружающей среды. (О равенстве температуры можно судить по прекращению падения давления). Измерить установившееся значение ΔP_1 .
3. Процесс 1-В. Открыв кран K_2 , соединить баллон с атмосферой и одновременно включить секундомер.
4. Процесс В-3. Через время τ закрыть кран K_2 .
5. Процесс 3-4. Через время (не менее 60 секунд), необходимое для выравнивания температуры, измерить установившееся значение ΔP .
6. Процесс 4-5-0. Открыть кран K_2 . Выждать не менее 60 секунд.
7. Повторить (начиная с п.1) для другого времени τ из ряда 20, 15, 10, 6, 4 и 3 секунды.
8. Используя полученные данные, получить методом наименьших квадратов зависимость $\ln \frac{\Delta P}{\Delta P_1}$ от τ (см.рис.3), экстраполировать его до пересечения с осью ординат и получить тем самым величину b . Полученное значение b позволяет рассчитать γ по формуле (23).
9. Провести не менее трех серий описанных измерений.
10. Рассчитать погрешность определяемых величин. Заполнить таблицу.

ВОПРОСЫ, которые следует разобрать при подготовке к сдаче допуска к работе

1. Определение теплоемкости. Виды теплоемкостей.
2. Вывод формулы Майера: $C_p = C_v + R$.
3. Получить формулу (10).
4. Получить формулу (23).
5. Метод наименьших квадратов.
6. Изопроцессы. Вывод уравнения Пуассона. Политропа.

ВОПРОСЫ, которые необходимо разобрать перед сдачей отчета по работе

1. Теорема о равнораспределении энергии по степеням свободы.
2. Классическая теория теплоемкости идеального газа.
3. Экспериментальная зависимость теплоемкости двухатомного газа от температуры, ее качественное объяснение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.2. Термодинамика и молекулярная физика. М.: Наука, 1975. Гл.2, §§ 18, 20, 21, 22.
2. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. М.: Высш. шк., 1981. §§ 17, 18.

Таблица

	№	τ , сек	ΔP_1 , мм.вод.ст.	ΔP , мм.вод.ст.	$\ln \frac{\Delta P}{\Delta P_1}$	b_i	γ_i	$\bar{\gamma}$	$\Delta \gamma$
1.	1	3							
	2	4							
	3	6							
	4	10							
	5	15							
	6	20							
2.	1.	3							
	2.	4							
	3.	6							
	4.	10							
	5.	15							
	6.	20							
3.	1.	3							
	2.	4							
	3.	6							
	4.	10							
	5.	15							
	6.	20							

ПРИЛОЖЕНИЕ

Метод наименьших квадратов для линейно сглаживающей функции

Пусть измерены значения Y_i функции $Y(x)$ при заданных значениях аргумента x_i ($1 < i < k$); $Y_1(x_1)$, $Y_2(x_2)$, ..., $Y_k(x_k)$. Требуется найти функциональную зависимость, описывающую результаты эксперимента. Такая задача возникает в связи с тем, что наличие случайных погрешностей измерений делает бессмысленным подбор формулы, график которой должен обязательно проходить по всем точкам. Искомая функция должна лишь по возможности сгладить случайные погрешности эксперимента. Такая функция называется сглаживающей или выравнивающей. Выравнивание будет тем лучше, чем больше сделано измерений.

Так, известно, что для проведения прямой достаточно двух точно известных точек $Y_1(x_1)$ и $Y_2(x_2)$, но при наличии погрешностей, для этой цели могут понадобиться десятки точек.

Выбор сглаживающей функции делают обычно исходя из теоретических соображений или из упрощенного представления результатов измерений. Если выбранную функцию можно представить в виде

$$Y = f(x, a, b, c, \dots) , \quad (1\Pi)$$

то задача определения функции $Y(x)$ сводится к определению параметров $a, b, c, \dots$

Поскольку значения Y_i содержит погрешности, то по ним нельзя точно определить параметры $a, b, c, \dots$. Можно лишь получить достаточно хорошие оценки этих параметров. Наиболее прост для этой цели метод наименьших квадратов, который заключается в следующем.

Предположим, что измерения значений независимы, погрешности подчиняются нормальному закону распределения. Тогда для равноточных измерений оценки параметров $a, b, c, \dots$ определяют из условия суммы квадратов отклонения измеренных значений от кривой

$$\vartheta = \sum_{i=1}^k \left[f(x_i, a, b, c, \dots) - y_i^2 \right] = \min . \quad (2\Pi)$$

Для обеспечения минимума функции необходимо, чтобы ее частные производные первого порядка по параметрам $a, b, c, \dots$ были равны нулю ($\frac{\partial \vartheta}{\partial r} = 0, r = a, b, c, \dots$), а частные производные второго по-

рядка были положительны. При этом остальные параметры γ полагаются постоянными. Следовательно, для определения параметров $\gamma = a, b, c, \dots$, приводящих функцию к наименьшему значению, нужно решить систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial a} = 0 \\ \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial b} = 0 \\ \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial c} = 0 \\ \dots \end{cases} \quad (3\Pi)$$

Решение этой системы уравнений покажем на примере функций, выражающей линейную зависимость между Y и x .

Тогда система (3П) будет линейной, т.к. параметры $a, b, c, \dots$ входят линейно в выражение (1П). Данный случай выражает особый интерес в связи с тем, что на практике во многих случаях сложную функцию можно преобразовать в линейную.

Итак, пусть имеется k измеренных значений $Y_1, Y_2, \dots, Y_k$ при соответственных значениях $x_1, x_2, \dots, x_k$. Уравнение прямой имеет вид

$$Y = ax + b. \quad (4\Pi)$$

Требуется подобрать коэффициенты a и b наилучшим образом. Для этого ищем минимум выражения

$$\mathcal{G} = \sum_{i=1}^k (ax_i + b - y_i)^2. \quad (5\Pi)$$

Продифференцируем эту формулу по параметрам a и b и приравняем производные к нулю

$$\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial b} = \sum_{i=1}^k 2(ax_i + b - y_i) = 0 \quad (6\Pi)$$

$$\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial a} = \sum_{i=1}^k 2x_i(ax_i + b - y_i) = 0.$$

Следовательно, необходимо решить систему уравнений

$$\begin{cases} b \sum x_i + a \sum x_i^2 = \sum x_i y_i \\ kb + a \sum x_i = \sum y_i \end{cases} \quad (7\Pi)$$

Решения системы (7П) имеют вид

$$a = \frac{\kappa \sum_{i=1}^k x_i y_i - \left(\sum_{i=1}^k x_i \right) * \left(\sum_{i=1}^k y_i \right)}{k \sum_{i=1}^k x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^k x_i \right)^2}, \quad (8П)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^k x_i^2 \sum_{i=1}^k y_i - \left(\sum_{i=1}^k x_i \right) * \left(\sum_{i=1}^k x_i y_i \right)}{k \sum_{i=1}^k x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^k x_i \right)^2}. \quad (9П)$$

По формулам (8П) и (9П) получим коэффициенты прямой линии, которая является лучшим приближением к искомой зависимости величин x и Y .

Для удобства вычислений a и b применяется таблица 1П.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондрашов А.П., Шестопалов Е.В. Основы физического эксперимента и математическая обработка результатов измерений. М.: Атомиздат, 1977.
2. Сквайрс Дж. Практическая физика. М.: Мир, 1971.

Таблица 1П

I	x_i	y_i	x_i^2	$x_i y_i$
1	x_1	y_1	x_1^2	$x_1 y_1$
2	x_2	y_2	x_2^2	$x_2 y_2$
3	x_3	y_3	x_3^2	$x_3 y_3$
4	x_4	y_4	x_4^2	$x_4 y_4$
5	x_5	y_5	x_5^2	$x_5 y_5$
6	x_6	y_6	x_6^2	$x_6 y_6$
...	$\sum x_i$	$\sum y_i$	$\sum x_i^2$	$\sum x_i y_i$
	$(\sum x_i)^2$			

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА И СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА МОЛЕКУЛ ВОЗДУХА

ОБОРУДОВАНИЕ: установка ФПТ1-1, термометр, барометр.

Цель работы: ознакомиться с капиллярным методом определения вязкости, экспериментально определить вязкость воздуха и среднюю длину свободного пробега молекул воздуха, используя установку ФПТ1-1.

ТЕОРИЯ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ

Вывод формулы Пуазейля

Рассмотрим цилиндрический капилляр радиуса R и длины L , на концах которого поддерживаются давления P_1 и P_2 , ($P_1 > P_2$). Найдем зависимость от времени объема газа, проходящего через капилляр, при условии, что обеспечивается ламинарный характер течения газа.

Ось капилляра примем за ось X , которую направим в сторону течения газа. В результате действия сил внутреннего трения, скорость течения газа в этом случае максимальна на оси цилиндрического капилляра и равна нулю у его стенок (рис.1), т.е. является функцией расстояния r , откладываемого от оси капилляра.

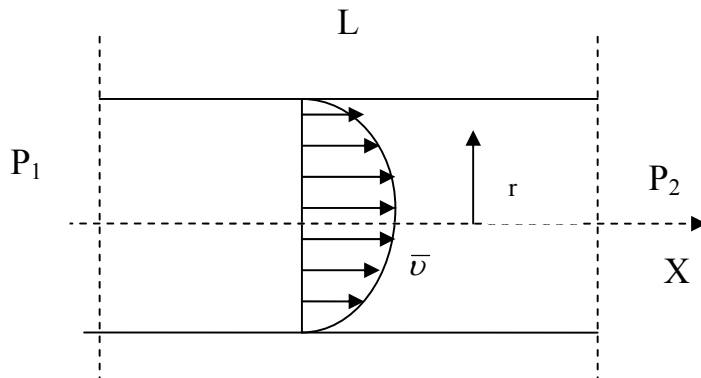


Рис.1

Выделим в газе тонкий цилиндрический слой с радиусом внутренней поверхности r , толщиной dr (рис.2) и длиной dL . На внутреннюю поверхность слоя действует направленная вдоль оси X сила внутреннего трения

$$f = -\eta \frac{dv}{dr} dS, \quad (1)$$

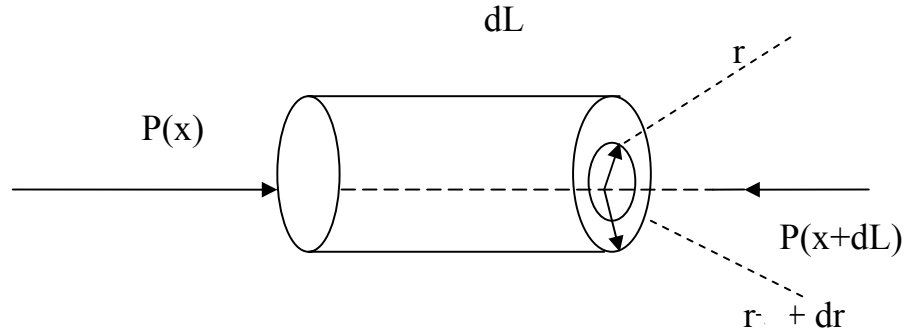


Рис.2

где $dS = 2\pi r dL$ - площадь внутренней поверхности цилиндрического слоя, η - вязкость газа, знак «-» учитывает, что с ростом r происходит уменьшение v . На внешнюю поверхность действует тормозящая слой сила, модуль которой равен

$$f_l = f + df.$$

Проекция на ось X результирующей силы вязкого трения, действующей на внутренний слой, равна

$$- \eta 2 \pi dL d \left(r \frac{dv}{dr} \right). \quad (2)$$

При стационарном течении газа эта сила уравнивается силой dF , направленной вдоль оси и создаваемой разностью давлений,

$$dF = 2\pi r dr [P(x) - P(x + dL)] = -\frac{dP}{dx} 2\pi r dr dL. \quad (3)$$

Таким образом,

$$2\pi \eta dL d \left(r \frac{dv}{dr} \right) = \frac{dP}{dx} 2r dr dL,$$

$$\eta d\left(r \frac{dv}{dr}\right) = \frac{dP}{dx} r dr \quad . \quad (4)$$

Данное выражение справедливо при любых значениях X (не зависит от положения выбираемого цилиндрического слоя на оси X).

Это означает, что $\frac{dP}{dx} = const$. Учитывая, что давления на концах капилляра длиной L равны P_1 и P_2 , получаем

$$\frac{dP}{dx} = -\frac{P_1 - P_2}{L} \quad . \quad (5)$$

Тогда выражение (4) принимает вид

$$\eta d\left(r \frac{dv}{dr}\right) = -\frac{P_1 - P_2}{L} r dr \quad .$$

После интегрирования

$$r \frac{dv}{dr} = -\frac{P_1 - P_2}{2L\eta} r^2 + C;$$

$$\frac{dv}{dr} = -\frac{P_1 - P_2}{2L\eta} r + \frac{C}{r} \quad .$$

На оси трубы скорость течения газа максимальна, следовательно,

$$\left. \frac{dv}{dr} \right|_{r=0} = 0, \text{ из чего получаем, что } C=0.$$

Интегрируя

$$dv = -\frac{P_1 - P_2}{2L\eta} r dr,$$

получаем зависимость

$$v(r) = -\frac{P_1 - P_2}{4L\eta} r^2 + C_1 \quad .$$

Значение постоянной интегрирования определяется из условия равенства скорости течения нулю на стенках капилляра, т.е. при $r = R$

$$C_1 = \frac{P_1 - P_2}{4L\eta} R^2.$$

Таким образом,

$$v = \frac{P_1 - P_2}{4L\eta} (R^2 - r^2). \quad (6)$$

Через кольцевую площадку с внутренним радиусом r и толщиной dr (рис.2) за время t вытекает объем газа

$$dV = 2\pi r dr * v(r)t = 2\pi t \frac{P_1 - P_2}{4L\eta} (R^2 - r^2) r dr.$$

Интегрируя это выражение по r в пределах от 0 до R , получим объем газа V_1 , протекшего за единицу времени через все сечение капилляра

$$V_1 = \frac{V}{t} = \frac{\pi (P_1 - P_2) R^4}{8L\eta} \quad (7) - \text{формула Пуазейля.}$$

Зная характеристики капилляра (R и L), разность давлений, поддерживаемую на его концах в ходе опыта и показания реометра (V_1)- прибора для измерения объемного расхода газа, можно найти значение вязкости воздуха, при условии, конечно, что был обеспечен ламинарный характер протекания газа через капилляр.

Определение длины свободного пробега молекул воздуха

Рассмотрим процесс возникновения вязкости (внутреннего трения) с точки зрения молекулярно-кинетической теории.

Течение газа считаем ламинарным. В текущем газе на тепловую скорость движения молекул v накладывается одинаковая для всех молекул данного слоя скорость упорядоченного движения u . Молекулы, переходящие из более быстрого в более медленный слой, имеют в среднем больший импульс, чем молекулы, приходящие им на смену из более медленного слоя. Вследствие этого обме-

на молекулами более быстрый слой ускоряет более медленный, а более медленный тормозит более быстрый.

Выделим в газе площадку S , параллельную текущим с различными скоростями слоям (рис.3).

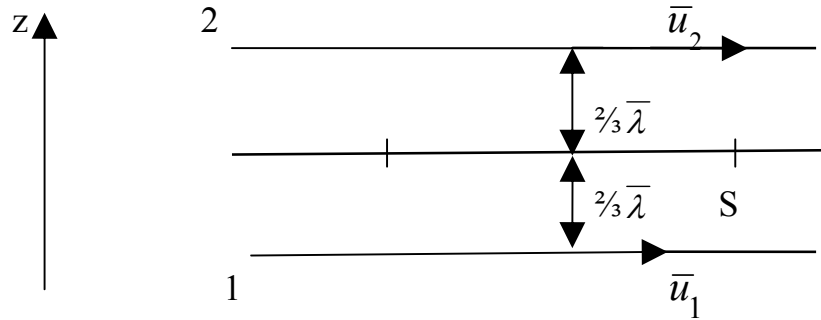


Рис.3

Слои, имеющие скорость упорядоченного движения u_1 и u_2 , выберем лежащими под и над площадкой S на расстоянии средней длины свободного молекул в данном направлении (составляет $\frac{2}{3}$ от $\bar{\lambda}$ - средней длины свободного пробега). Тогда молекулы, движущиеся со стороны слоев к площадке, будут достигать ее в среднем без столкновений. Число молекул n_1 , пролетающих через площадку S со стороны слоя 1 за время Δt , равно

$$n_1 = \frac{1}{4} n_0 \bar{v} S \Delta t, \quad (8)$$

где $\bar{v}$ - средняя скорость теплового движения, n_0 - концентрация молекул газа. Эти молекулы перенесут импульс упорядоченного движения

$$K_1 = \frac{1}{4} n_0 \bar{v} S \Delta t m u_1.$$

Соответственно, импульс, перенесенный из слоя 2,

$$K_2 = \frac{1}{4} n_0 \bar{v} S \Delta t m u_2.$$

В результате импульс, перенесенный через площадку S за время Δt ,

$$\Delta K = K_2 - K_1 = \frac{1}{4} n_0 \bar{v} S \Delta t m (u_2 - u_1).$$

Преобразуем разность скоростей слоев к виду

$$u_2 - u_1 = \frac{\Delta u}{\Delta Z} 2 \left(\frac{2}{3} \bar{\lambda} \right), \text{ тогда}$$

$$\Delta K = -\frac{1}{3} n_0 m \bar{\lambda} \bar{v} \left(\frac{\Delta u}{\Delta Z} \right) S \Delta t,$$

Или, т.к. $n_0 m = \rho$, то

$$\Delta K = -\frac{1}{3} \rho \bar{\lambda} \bar{v} \left(\frac{\Delta u}{\Delta Z} \right) S \Delta t.$$

Знак «-» соответствует тому, что направление роста скорости u и направление передачи импульса упорядоченного движения противоположны.

Сила, действующая со стороны более быстрого слоя на более медленный слой, равна

$$F = \frac{\Delta K}{\Delta t} = -\frac{1}{3} \rho \bar{\lambda} \bar{v} \left(\frac{\Delta u}{\Delta Z} \right) S. \quad (9)$$

Сравнение с законом вязкого трения Ньютона (1) позволяет выразить вязкость η в виде

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \bar{\lambda} \bar{v}, \quad (10)$$

отсюда
$$\bar{\lambda} = \frac{3\eta}{\rho \bar{v}}.$$

Так как $\rho = \frac{\mu P}{RT}$, $\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$, $\bar{\lambda} = \frac{KT}{\sqrt{2}\pi d^2 P}$ (*), то

$$\bar{\lambda} = \eta \frac{3}{2P} \sqrt{\frac{\pi RT}{2\mu}}, \quad (11)$$

где P - атмосферное давление, T - абсолютная температура, μ - молекулярная масса газа, R - универсальная газовая постоянная.

Зная вязкость, атмосферное давление и температуру газа, можем найти среднюю длину свободного пробега молекул воздуха.

Описание установки

Используемая в данной работе установка ФПТ1-1 изображена на рис.4.

Микрокомпрессор, установленный в приборном блоке 2, прокачивает воздух через металлический капилляр 4. Расход воздуха измеряется с помощью реометра 5 ($\text{в м}^3/\text{с} \cdot 10^{-5}$) и может изменяться с помощью регулятора «ВОЗДУХ». Разность давлений на концах капилляра измеряется жидкостным манометром 6, колена которого подсоединены к отборным камерам, расположенным с разных концов капилляра. *Длина капилляра 0,1 м, его внутренний диаметр 0,6 мм.*

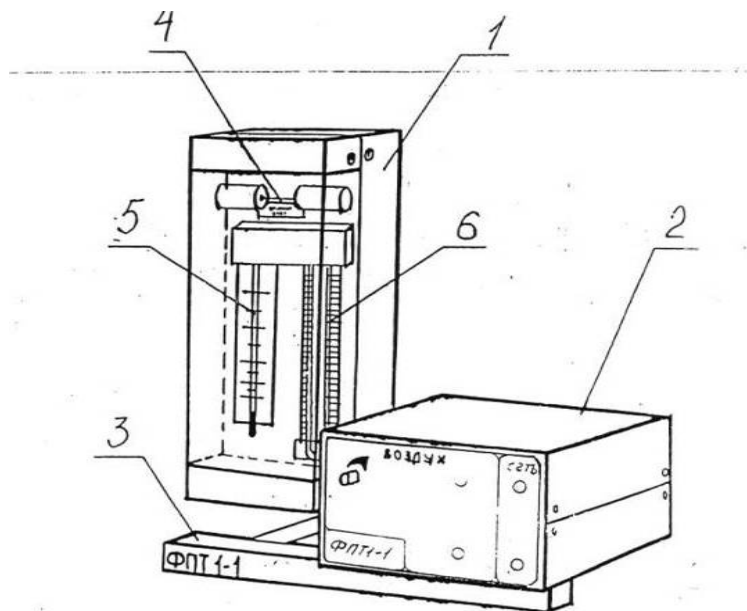


Рис.4 Установка ФПТ 1-1:

- 1 - блок РЭ-1;
- 2 - блок приборный БП – 1;
- 3 - стойка РМС;
- 4 - металлический капилляр;
- 5 - реометр ;
- 6 – манометр.

Порядок выполнения работы

1. Установить регулятор расхода воздуха «ВОЗДУХ» на минимум (крайнее левое положение) и включить тумблер «СЕТЬ».
2. Включить микрокомпрессор, плавно установить регулятор расхода воздуха в положение, соответствующее первому делению шкалы реометра ($0,25 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$), и измерить разность давлений на концах капилляра с помощью манометра.
3. Повторить измерения при показаниях реометра, соответствующих расходу воздуха $0,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ (если это удастся). Каждое измерение проводится не менее 6 раз.
4. Вернуть регулятор «ВОЗДУХ» в крайнее левое положение, выключить микрокомпрессор и тумблер «СЕТЬ».
5. Для определения $\bar{\lambda}$ измерить температуру воздуха и атмосферное давление.
6. Результаты измерений и обработки, данных эксперимента представить в виде двух таблиц – отдельно для η и отдельно для $\bar{\lambda}$.

ВОПРОСЫ, которые должны быть разобраны при подготовке к сдаче допуска к работе

1. Объясните механизм возникновения внутреннего трения.
2. Выведите формулу Пуазейля. Каковы границы ее применения?
3. Каков реальный смысл характеристик капилляра R и L, входящих в формулу Пуазейля?
3. Выведите формулу Максвелла для вязкости (формула 10).

ВОПРОСЫ, которые должны быть разобраны при подготовке к сдаче отчета

1. Получите выражение (*), позволяющее находить среднюю длину свободного пробега молекул.
2. Выведите общее уравнение переноса и из него получите формулу (10).
3. Как зависит вязкость идеального газа от P и T?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рейф Ф. Статистическая физика. М.: Наука, 1986, Гл.8. С. 294-301.
2. Телеснин Р.В. Молекулярная физика. М.: Высш. шк., 1973 . Гл.7.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.1. Механика. М.: Наука, 1989. § 97. С. 518-520.
4. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. М.: Высш. шк., 1981, С. 355-361, 363-366.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИРАЩЕНИЯ ЭНТРОПИИ
ТИОСУЛЬФАТА НАТРИЯ ПРИ НАГРЕВАНИИ

ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ: пробирка с тиосульфатом натрия, термометр, электронагреватель, секундомер, термopара типа ХК, вольтметр цифровой.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: научиться определять температуру плавления кристаллического вещества по графику зависимости температуры от времени нагрева; научиться определять приращение энтропии системы при изменении температуры и фазовых переходах первого рода; наблюдение метастабильного состояния (переохлажденной жидкости).

ТЕОРИЯ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ.

В данной работе необходимо определить температуру плавления и приращение энтропии тиосульфата натрия ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – тиосульфат пентагидрат натрия) при нагревании от комнатной температуры T_k до температуры плавления $T_{пл}$ и его последующем плавлении до полностью расплавленного состояния.

При поглощении системой, находящейся при температуре T , малого количества теплоты δQ , энтропия системы испытывает приращение

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \quad . \quad (1)$$

Приращение энтропии системы в процессе ее перехода из начального состояния О в конечное состояние N независимо от пути перехода можно определить так:

$$\Delta S = \int_0^N dS = S_n - S_0 \quad . \quad (2)$$

В нашем случае удобно отдельно рассматривать приращение энтропии ΔS , при нагреве системы от T_k до $T_{пл}$, и приращение энтропии системы ΔS_2 при плавлении:

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2, \quad (3)$$

$$\Delta S_1 = \int_{T_k}^{T_{пл}} \frac{\delta Q}{T} = \int_{T_k}^{T_{пл}} \frac{cm dT}{T} = cm \ln \frac{T_{пл}}{T_k} \quad , \quad (4)$$

$$\Delta S_2 = \int_{T_{пл}} \frac{\delta Q}{T} = \int_0^m \frac{\lambda dm}{T_{пл}} = \frac{\lambda m}{T_{пл}}, \quad (5)$$

где c – удельная теплоемкость тиосульфата натрия, λ – удельная теплота плавления тиосульфата натрия, m – масса тиосульфата натрия.

Температуру плавления кристаллического вещества можно определить по графику зависимости температуры тела от времени нагрева – пока вещество плавится, его температура не меняется, т.к. все тепло, поступающее от нагревателя, идет на разрушение связей в кристаллической решетке.

При охлаждении тиосульфат легко переходит в метастабильное состояние – состояние переохлажденной жидкости (жидкость, имеющая температуру ниже температуры кристаллизации). В ходе эксперимента это состояние можно будет наблюдать достав пробирку из нагревателя после его выключения и проводя измерение температуры тиосульфата в режиме охлаждения вплоть до температур вблизи комнатной.

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ.

Входящие в расчетные формулы константы для тиосульфата имеют значения:

$$c = 360,7 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}); \lambda = 23,4 \text{ кДж}/\text{моль}; m = 2,5 \text{ г.}$$

В данной работе для измерения температуры тиосульфата натрия используется термопара.

Температура рабочего спая термопары фиксируется цифровым вольтметром в мВ и затем с помощью таблицы (Приложение 1) переводится в $t^{\circ}\text{C}$. Температура свободных концов термопары фиксируется термометром и равна комнатной температуре.

Подробнее о принципе измерения температуры с помощью термопары можно познакомиться в [3; 4] или в Приложении 2.

Перед началом измерений определите, какие показания цифрового милливольтметра соответствуют температуре окончания нагрева (60°C). Не забудьте при пользовании таблицей из Приложения 1 сделать поправку на то, что спай сравнения термопары находится не при 0°C , а при комнатной температуре.

Помните, что помещать пробирку в нагреватель и извлекать ее из него можно только при выключенном нагревателе.

1. Нагрейте тиосульфат натрия от комнатной температуры до 60°C , отмечая при этом его температуру через каждые 10 секунд.

2. Достаньте пробирку с тиосульфатом натрия из нагревателя и охлаждайте на воздухе до 35°C , продолжая отмечать каждые 10 секунд его температуру.

3. Проведите измерения не менее 3-х раз. В ходе последнего измерения продолжайте фиксировать показания милливольтметра при понижении температуры вплоть до температуры, отличающейся от комнатной на 3-4⁰С, наблюдая за состоянием тиосульфата в пробирке. Остается ли тиосульфат жидким и при температурах ниже температуры кристаллизации?

4. Вычислите по формуле (3) приращение энтропии тиосульфата натрия.

5. Данные запишите в таблицу:

N	τ (сек)	t (mB)	t (⁰ С)	T _к (K)	T _{пл} (K)	ΔS (Дж/К)
1.						
2.						
3.						
4.						
5.						
...						

На основании данных опыта начертить график изменения температуры тиосульфата натрия в зависимости от времени нагревания.

6. Отметьте на графике температуру плавления тиосульфата натрия. Объясните полученный график.

ВОПРОСЫ, которые следует разобрать при подготовке к сдаче допуска

1. Дайте определение термодинамического потенциала. Дайте определение энтропии.
2. Объясните принцип измерения температуры термопарой.
3. От чего зависит величина термо-э.д.с.?
4. Как выглядит график зависимости температуры тела от времени его нагрева?
5. Дайте определение метастабильного состояния вещества. Какие метастабильные состояния вы знаете?

ВОПРОСЫ, которые должны быть разобраны при подготовке к сдаче отчета

1. Вывод неравенства Клаузиуса.
2. Физический смысл энтропии, ее связь с беспорядком, информацией.

- Доказать, что при необратимых процессах энтропия замкнутой системы растет.
- Процесс нагревания и плавления тиосульфата натрия не был равновесным. Можно ли в этом случае искать приращение его энтропии по формулам (4) и (5)?
- Один моль идеального газа адиабатически расширяется в пустоту так, что его объем возрастает в два раза. Чему равно приращение энтропии газа в этом процессе?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Телеснин Р.В. Молекулярная физика. М.: Высш. шк., 1973. Гл.5.
- Матвеев А.Н. Молекулярная физика. М.: Высш. шк., 1981. С. 363-366.
- Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы. М.: Энергия, 1978. С.86.
- Калашников С.Г. Электричество. М.: Наука, 1977. §§198-202.

Приложение 1

Термо-э.д.с. термоэлектрических термометров типа ТХК стандартной градуировки ХК при температуре свободных концов 0°C ГОСТ 3044-74.

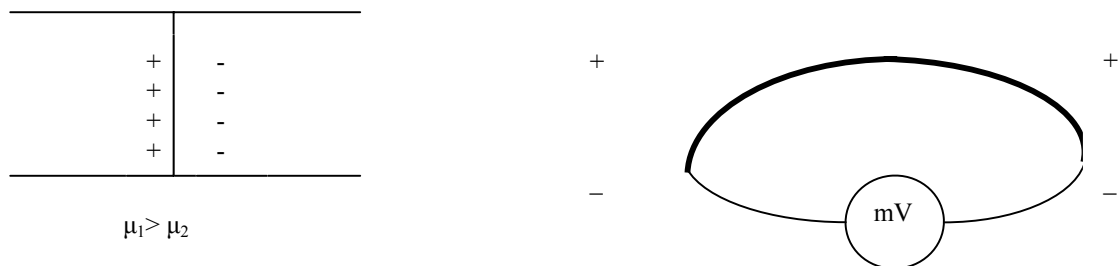
Температура рабочего конца, $^{\circ}\text{C}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	mV									
0	0,00	0,07	0,13	0,20	0,26	0,33	0,39	0,46	0,52	0,59
10	0,65	0,72	0,78	0,85	0,91	0,98	1,03	1,11	1,18	1,24
20	1,31	1,38	1,44	1,51	1,57	1,64	1,70	1,77	1,84	1,91
30	1,98	2,05	2,12	2,18	2,25	2,32	2,38	2,45	2,52	2,59
40	2,66	2,73	2,80	2,87	2,94	3,00	3,07	3,14	3,21	3,28
50	3,35	3,42	3,49	3,56	3,63	3,70	3,77	3,84	3,91	3,98
60	4,05	4,12	4,19	4,26	4,33	4,41	4,48	4,55	4,62	4,69
70	4,70	4,83	4,98	4,98	5,05	5,12	5,20	5,27	5,34	5,41
80	5,48	5,55	5,69	5,69	5,76	5,83	5,90	5,97	6,04	6,11
90	6,18	6,25	6,39	6,39	6,46	6,53	6,60	6,67	6,74	6,81

Приложение 2

Термоэлектричество. Измерение температуры термопарой.

При приведении в контакт двух разнородных металлов или полупроводников между ними возникает разность потенциалов, называемая контактной. Вследствие перераспределения зарядов между проводниками с одной стороны контакта появляется избыточный положительный заряд, с другой – отрицательный.

Электроны проводимости переходят из металла, где их химический потенциал μ больше, в металл, где он меньше. Химический потенциал равен энергии, которую частица уносит из системы, уходя из нее, или вносит, входя в систему. Таким образом, переход электронов проводимости из области с большим значением химического потенциала в область с его меньшим значением, соответствует переходу системы к состоянию равновесия, в котором энергия минимальна.



Сторона контакта, с которой находится металл с меньшим значением химического потенциала, заряжается отрицательно, другая сторона контакта – положительно. Контактная разность потенциалов не растет неограниченно, так как с ее возникновением появляется встречный первичному поток электронов. В состоянии равновесия процесс перехода электронов через контакт макроскопически прекращается.

Термопара представляет собой две проволоки из различных металлов, спаянные своими концами, с включенным в цепь милливольтметром. Если места соединения различных металлов имеют одинаковую температуру, то одинаковы и контактные разности потенциалов. Ток в цепи в этом случае не пойдет, так как действия двух контактных разностей потенциалов компенсируют друг-друга.

Химический потенциал, а с ним и контактная разность потенциалов, зависит от температуры. Поэтому при нагреве или охлаждении одного из контактов, в цепи пойдет ток, называемый термоэлектрическим током. Вызывающую термоэлектрический ток разность потенциалов называют термоэлектродвижущей силой. Она может быть зафиксирована милливольтметром. Явление возникновения термоэлектрического тока было открыто в 1821 году немецким физиком Зеебеком.

Возникающая контактная разность потенциалов зависит от рода приводимых в контакт металлов, от разности температур между измерительным спаем и спаем сравнения и, при одной и той же разности температур между спаями, от того, какова температура спая сравнения.

Последнюю зависимость предлагается не учитывать в данной работе при пересчете температуры с милливольт в градусы с использованием приведенной в работе таблицы (Приложение 1).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ КАНТОРА-РЕБИНДЕРА

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: установка для определения коэффициента поверхностного натяжения, термометр, электроплитка, сосуд для воды, стакан, исследуемые жидкости.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: изучение температурной и концентрационной зависимостей коэффициента поверхностного натяжения.

Введение.

Энергетическое состояние молекул в поверхностном слое и внутри объема жидкости различны. Поэтому поверхностному слою можно приписать так называемую поверхностную энергию E , которая пропорциональна площади поверхности:

$$E = \alpha S. \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности α называется *коэффициентом поверхностного натяжения*.

Понятие коэффициента поверхностного натяжения можно ввести и иначе. Энергетически выгодным является состояние системы с минимумом поверхностной энергии, следовательно, по касательной к поверхности действует сила, стремящаяся уменьшить площадь поверхности, называемая силой поверхностного натяжения. Эта сила пропорциональна длине отрезка L , лежащего на поверхности

$$F = \alpha L. \quad (2)$$

Если поверхность жидкости искривлена, то наличие силы поверхностного натяжения приводит к появлению избыточного давления, которое обычно называют лапласовским давлением. Лапласовское давление определяется из соотношения

$$\Delta p = \alpha \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (3)$$

где R_1 и R_2 – радиусы кривизны двух взаимно перпендикулярных нормальных сечений поверхности жидкости. Для сферической поверхности, очевидно,

$$\Delta p = \frac{2\alpha}{R}, \quad (4)$$

где R – радиус кривизны сферической поверхности.

Измерив лапласовское давление, можно определить коэффициент поверхностного натяжения.

Описание экспериментальной установки

Установка состоит из трубки 1 с капилляром К. Трубка 1 вставляется в пробку, закрывающую сосуд 2 с исследуемой жидкостью. Капилляр К должен соприкасаться с поверхностью исследуемой жидкости. Тройник 3 соединяет воздушное пространства сосуда 2 с аспиратором 4 и манометром 5. С помощью манометра измеряют разность атмосферного давления и давления воздуха в сосуде 2. Сосуд 2 снабжен краном, чтобы менять вид исследуемой жидкости. Исследуемую жидкость можно нагревать с помощью металлического стакана 6, помещенного на электроплитку, измеряя температуру термометром 9. При проведении эксперимента открывается кран аспиратора (расширителя) 4, вследствие чего вода выливается в стакан 10. При этом в сосуде 2 создается разрежение. При некоторой разности давлений от капилляра отрывается воздушный пузырек. Это свидетельствует о том, что достигнута разность давлений равна лапласовскому давлению, обусловленному кривизной поверхности пузырька.

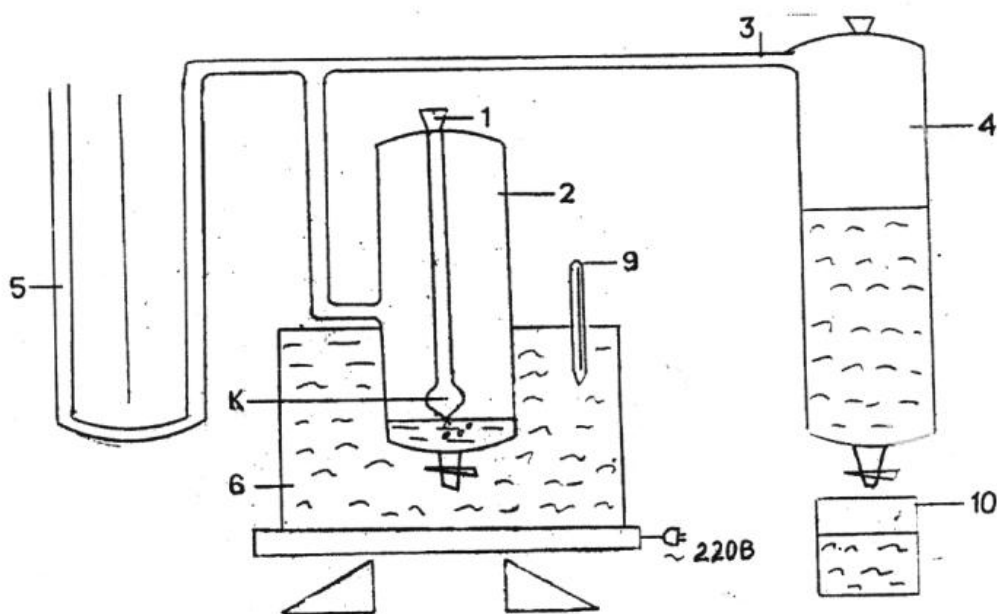


Рис. Схема экспериментальной установки

Измерения и обработка результатов

При подготовке прибора к работе в аспиратор налейте воду. В сосуд 2 с исследуемой жидкостью поместите трубку 1 так, чтобы капилляр трубки касался поверхности жидкости. Сосуд 2, аспиратор 4 плотно закрываются. Если открыть кран аспиратора, из капилляра в исследуемую жидкость должны выдвигаться пузырьки воздуха. В момент отрыва пузырька разность давлений Δp , регистрируемая манометром, равна лапласовскому давлению $\frac{2\alpha}{R}$, следовательно, измерение α может быть основано на использовании формулы (4). Входящий в эту формулу радиус пузырька нельзя определить путем непосредственного измерения радиуса капилляра, поскольку радиус пузырька в общем случае не совпадает ни с внешним, ни с внутренним радиусом капилляра. Поэтому лучше записать соотношение (4) в виде

$$\Delta p = K\alpha \quad , \quad (5)$$

определив коэффициент K из опыта.

Задание 1. Определение постоянной прибора K .

Сосуд 2 с налитой исследуемой жидкостью (дистиллированная вода), закрыть трубкой 1 с капилляром K так , чтобы капилляр касался поверхности исследуемой жидкости.

Измерить Δp при продувании пузырьков через дистиллированную воду (при комнатной температуре). Измерения провести 10 раз. Показания манометра Δp записать в мм.вод.столба и перевести в Па. Расчет K осуществляется при помощи формулы (5). Значение α возьмите из таблицы в соответствии с температурой в комнате. Найдите абсолютную и относительную погрешности величины константы K . По результатам измерений и вычислений заполните Таблицу 1.

1 мм. вод. столба $\approx$ 9.8 Па.

Таблица 1

№	Δp , мм.в.ст.	Δp , Па	K , м ⁻¹	ΔK , м ⁻¹	ε
1.					
...					
10.					

Задание 2. *Определение зависимости коэффициента поверхностного натяжения воды α от температуры.*

Для выполнения данного задания налейте в стакан 6 воду, подставьте под сосуд 2 как показано на рис.1. Включите нагреватель (электроплитка), нагрейте воду в сосуде до 80^0 - 90^0 С. Сосуд 2 при нагревании должен быть открыт, чтобы давление в нем не повышалось. Проводите измерение Δp при остывании воды через каждые 6 - 8^0 С. Вычислите α при соответствующих значениях температуры. При каждой температуре измерения проводятся 6-8 раз. Проведите оценку погрешности измерений.

Результаты представьте в виде таблицы 2 и графически.

Таблица 2

$t, ^\circ\text{C}$	$\alpha, \text{Н/м}$	$\Delta\alpha, \text{Н/м}$	ε
....			
....			

Задание 3. *Определение концентрационной зависимости α .*

По выше описанной методике (задание 1) определите α как функцию процентной концентрации раствора β (например, спирта в воде). Для каждого значения концентрации измерения проводятся 6-8 раз.

Проведите оценку точности измерений. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 3, полученную зависимость представьте в виде графика.

Таблица 3

$\beta, \%$	$\alpha, \text{Н/м}$	$\Delta\alpha, \text{Н/м}$	ε
100			
75			
50			
25			
0			

ВОПРОСЫ, которые должны быть разобраны при подготовке к сдаче допуска к работе

1. Почему молекулы поверхностного слоя обладают дополнительной энергией?
2. Входящие в формулу Лапласа радиусы кривизны – алгебраические величины. Какое правило знаков используется для них?

ВОПРОСЫ, которые должны быть разобраны при подготовке к сдаче отчета

1. Вывод формулы Лапласа (формула 3).
2. Поясните качественно полученные закономерности.
3. Получите формулу, позволяющую рассчитать высоту подъема (опускания) жидкости в капилляре при смачивании (несмачивании) закон Жюрена.
4. Какие вещества называются поверхностно-активными? Почему пленки, образованные чистыми жидкостями неустойчивы, а пленки, образованные жидкостями, содержащими поверхностно-активные вещества, устойчивы?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Телеснин Р.В. Молекулярная физика. 2-е изд. М.: Высш. шк., 1973. §§ 94 – 101.
2. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. М.: Высш. шк., 1981. § 34.

Таблица
Поверхностное натяжение
дистиллированной воды

$T (^{\circ}\text{C})$	$\alpha \left(\frac{\text{мН}}{\text{м}} \right)$
0	75,49
5	74,75
10	74,01
12	73,70
14	73,41
16	73,11
18	72,82
20	72,53
21	72,37
22	72,22
23	72,08
24	71,93
25	71,78
26	71,63
28	71,33
30	71,03
32	70,74
34	70,44
36	70,14
38	69,85
40	69,54
45	68,6
50	67,8
55	66,9
60	66,0
65	65,1
70	64,2
75	63,3
80	62,3

Поверхностное натяжение этилового спирта при 20°C –
 $22,75 \left(\frac{\text{мН}}{\text{м}} \right)$.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН

ОБОРУДОВАНИЕ: генератор гармонических колебаний, частотомер типа ЧЗ-54 (ЧЗ-33), секундомер.

ЦЕЛИ РАБОТЫ: экспериментальное определение функций плотности вероятности случайных величин; оценка параметров распределений и влияния случайных факторов на результаты измерений в зависимости от числа измерений; определение условий, в которых наблюдаются нормальное и равномерное распределения.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Событием (случаем) в теории вероятности называют всякое явление, относительно которого имеет смысл ставить вопрос, может оно произойти или нет. Случайные величины могут иметь дискретный спектр значений (например, спектр из шести значений от 1 до 6 при бросании игрального кубика) и непрерывный спектр (определяемая в эксперименте скорость отдельной молекулы – непрерывная случайная величина). Вероятность случайного события характеризует количественную меру ожидаемой возможности его появления.

В случае дискретной случайной величины можно дать частотное определение вероятности W случайного события A :

$$W(A) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_A}{N}, \quad (1)$$

где N – число испытаний, N_A – число испытаний, в которых произошло событие A .

Очевидно, что задаваемая формулой (1) математическая вероятность может принимать значения от 0 (недовероятное событие) до 1 (вероятное событие).

Вычислить среднее значение $\bar{x}$ дискретной случайной величины можно по формуле

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i W_i, \quad (2)$$

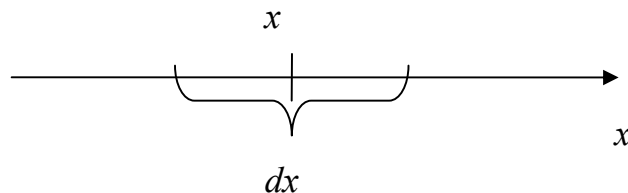
здесь n – число различных значений в спектре случайной величины (при бросании игрального кубика оно равно 6), W_i – вероятность выпадения при испытании i -го значения (x_i) в спектре случайной величины (например, вероятность выпадения двойки при бросании кубика, равная $\frac{1}{6}$).

Таким образом, чтобы вычислить среднее значение дискретной случайной величины, нужно знать спектр ее возможных значений и вероятность каждого значения в спектре. Когда говорят, что дискретная случайная величина задана, то подразумевают, что владеют этой информацией.

В случае непрерывной случайной величины частотное определение вероятности не подходит. Например, в отношении скорости отдельной молекулы бессмысленно ставить вопрос о том, чему равна вероятность обнаружить в ходе измерения, что скорость молекулы будет равна $200 \frac{м}{с}$, ведь число возможных значений скорости бесконечно. Непрерывную случайную величину x описывают с помощью функции плотности вероятности

$$f(x) = \frac{dW(x)}{dx}, \quad (3)$$

здесь $dW(x)$ – вероятность того, что случайная величина в испытании примет значение в интервале dx вблизи данного значения случайной величины x .



Следовательно, функция плотности вероятности равна вероятности обнаружить случайную величину в малом интервале вблизи данного значения величины, отнесенной к величине интервала.

Вероятность попасть в малый интервал dx равна $dW(x) = f(x)dx$, а вероятность того, что при испытании случайная величина окажется в конечном интервале $[x_1; x_2]$

$$W(x_1; x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f(x)dx. \quad (4)$$

Проведя по формуле (4) вычисление вероятности по всей области определения случайной величины, мы получим вероятность достоверного события, состоящего в том, что в испытании будет зафиксировано какое-либо разрешенное значение случайной величины

$$\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} f(x)dx = 1. \quad (5)$$

Формулу (5) называют условием нормировки вероятности непрерывной случайной величины. Аналогичное условие для дискретной случайной величины получим, заменив интегрирование суммированием

$$\sum_{i=1}^n W_i = 1, \quad (6)$$

здесь W_i – вероятность выпадения i -го значения в спектре случайной величины, n – число различных значений в спектре.

Вычислить среднее значение непрерывной случайной величины можно по формуле, аналогичной формуле (2):

$$\bar{x} = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} xf(x)dx, \quad (7)$$

т.е. для определения среднего значения непрерывной случайной величины нужно знать ее функцию плотности вероятности и область определения. Располагая этой информацией, говорят, что непрерывная случайная величина задана. В формуле (7) на месте величины x под интегралом, вообще говоря, должна находиться усредняемая величина, роль которой может играть любая функция $u(x)$ аргумента x . Следовательно, среднее значение функции случайной величины можно найти так

$$\overline{u(x)} = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} u(x)f(x)dx. \quad (7')$$

Разброс случайной величины относительно среднего значения характеризует дисперсия σ^2 - средний квадрат отклонения величины от среднего значения

$$\sigma^2 = \overline{(x - \bar{x})^2} = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} (x - \bar{x})^2 f(x) dx, \quad (8)$$

или, в случае дискретной величины,

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 W_i. \quad (8')$$

На практике дисперсию удобно вычислять по формуле

$$\sigma^2 = \overline{x^2} - \bar{x}^2. \quad (8'')$$

Результаты непосредственных измерений физической величины часто описываются нормальным распределением (распределением Гаусса)

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}. \quad (9)$$

Еще один пример функции плотности вероятности - прямоугольное (равномерное) распределение, для которого

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\gamma - \beta}, & \text{при } \beta \leq x \leq \gamma \\ 0, & \text{при } x < \beta \text{ или } x > \gamma, \end{cases} \quad (10)$$

где β и γ – границы интервала величины, а

$$\bar{x} = \int_{\beta}^{\gamma} x f(x) dx = \frac{\gamma + \beta}{2},$$

$$\sigma^2 = \int_{\beta}^{\gamma} (x - \bar{x})^2 f(x) dx = \frac{(\gamma - \beta)^2}{12}. \quad (11)$$

Графики нормального и равномерного распределений представлены на рис.1 и 2. Площади, заштрихованные на графиках, равны вероятности обнаружить при испытании значение случайной величины в интервале $[a, b]$. Полная площадь под кривой функции плотности вероятности согласно условию нормировки равна единице.

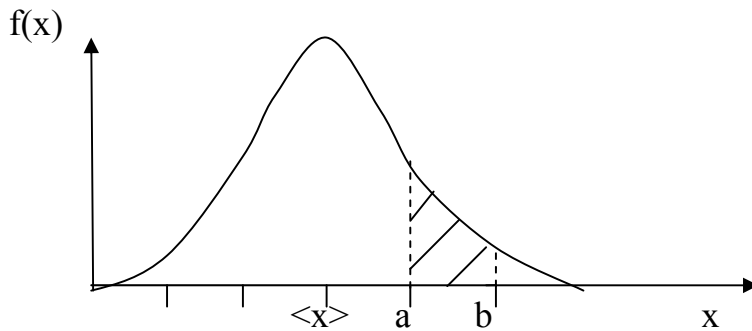


Рис.1 Нормальное распределение

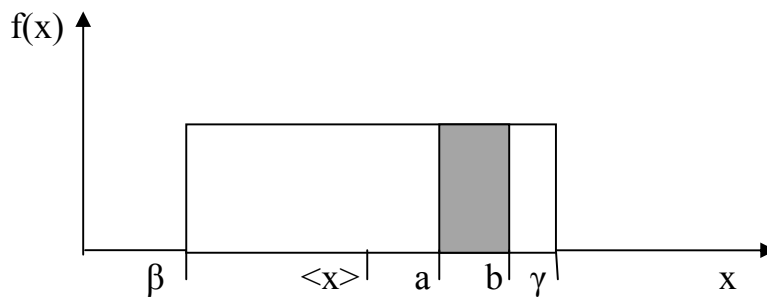


Рис.2 Прямоугольное распределение

На практике число измерений N не бывает достаточным для того, чтобы по их результатам можно было вычислить истинное значение измеряемой величины и дисперсию. Можно лишь найти

выборочное среднее $\bar{x}_N$ для серии из N измерений и выборочное среднее квадратичное отклонение среднего значения S_N по формулам:

$$\bar{x}_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i, \quad (12)$$

$$S_N^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}_N)^2}{N(N-1)}. \quad (13)$$

Перед тем, как окончательно записать результат N измерений, нужно определить его надежность, т.е. выяснить с какой вероятностью попадает истинное значение измеряемой величины в данный доверительный интервал. Доверительным интервалом $[\bar{x}_N - \varepsilon; \bar{x}_N + \varepsilon]$ называют интервал, в котором находится с заданной вероятностью истинное значение измеренной величины. Под абсолютной ошибкой ε в теории обычно понимают величину $t_{W,N} S_N$, где $t_{W,N}$ - коэффициент Стьюдента, значение которого зависит от вероятности попадания измеренной величины в доверительный интервал и от проведенного числа измерений. Значения коэффициента Стьюдента приведены в таблице 1. Таким образом, результат представляется в виде:

$$x = \bar{x}_N \pm t_{W,N} S_N, \quad (15)$$

причем эта запись не означает, что истинное значение измеренной величины лежит в интервале от $\bar{x}_N - t_{W,N} S_N$ до $\bar{x}_N + t_{W,N} S_N$, а лишь указывает на то, что истинное значение попадает в этот интервал с вероятностью W.

В ходе лабораторной работы необходимо определить вид функции плотности вероятности, описывающей распределение измеренной в эксперименте случайной величины, и выяснить условия эксперимента, в которых наблюдаются нормальное и прямоугольное распределения.

Подготовка к работе

1. Заземлите приборы.
2. Соедините кабелем выход генератора сигналов с входом «СУММА А» частотомера.
3. Включите приборы тумблером «СЕТЬ».
4. Установите переключатель «РОД РАБОТЫ» в положение «СУММА А».
5. Установите выходную частоту генератора 50-60 Гц.
6. «ПУСК» и «СТОП» осуществляйте клавишей «ПАМЯТЬ», «СБРОС» - соответствующей клавишей на частотомере.

Упражнение 1

(нормальное распределение)

1. При помощи секундомера сделайте 50-60 отсчетов числа импульсов, проходящих через пересчетное устройство частотомера за 5 сек, и вычислите ν с точностью до 0.1 имп/сек для каждого отсчета, ν – число импульсов в секунду. Число отсчетов должно нацело делиться на 3.
2. Вычислите среднее значение $\bar{\nu}$ и среднеквадратичное отклонение среднего S_N по формулам (12) и (13) и интервал для надежности $W=0.6$ пользуясь таблицей 1.
3. Для определения вида распределения разбейте весь диапазон из N опытных значений ν на интервалы $\Delta\nu$ (в данном случае $\Delta\nu=0.5\text{с}^{-1}$). Подсчитайте, какое количество N_i значений попадает в каждый интервал, и вычислите относительную частоту, приходящуюся на единичный интервал. Для этого составьте таблицу:

Интервалы от ___ до___	Количество импульсов в интервале	N_i	$W_i = \frac{N_i}{N}$	$h_i = \frac{N_i}{N\Delta\nu}$
47 - 47.5		3	3/51	0.12
47.51 - 48		5	5/51	0.2
48.01 – 48.5		6	6/51	0.24

(Цифры в таблице приведены для случая $N=51$.)

4. Построить на миллиметровой бумаге диаграмму распределения плотности вероятности в зависимости от ν , откладывая по оси абсцисс значения ν и $\Delta\nu$, по оси ординат h_i . Диаграмма будет представлять систему прямоугольников высотой h_i с основаниями $\Delta\nu$ (площади которых численно равны доле от-

счетов в соответствующем интервале), а площадь всех прямоугольников равна единице. Построенная таким образом диаграмма называется *гистограммой*.

5. На том же графике и в том же масштабе построить кривую плотности вероятности по уравнению (9), заменив $\bar{x}$ и σ^2 их оценками $\bar{x}_N$ и S_N^2 . Вычислить координаты для абсцисс равных $\bar{v} - S_N$ и $\bar{v} + S_N$.
6. Разбейте полученные v_i -на тройки. Вычислите средние значения, средние квадратичные ошибки, доверительные интервалы для $W=0.6$ для каждого трех значений (если $N=51$, то для 17 троек).
7. Нанести для сравнения все средние значения и интервалы на тот же график (ниже гистограммы) в том же масштабе для v и вычислить, какой процент значений попадает в интервал общего среднего и какой процент интервалов перекрывается с интервалом общего среднего. Оформление результатов упражнения должно быть представлено в виде, данном на рис.3.

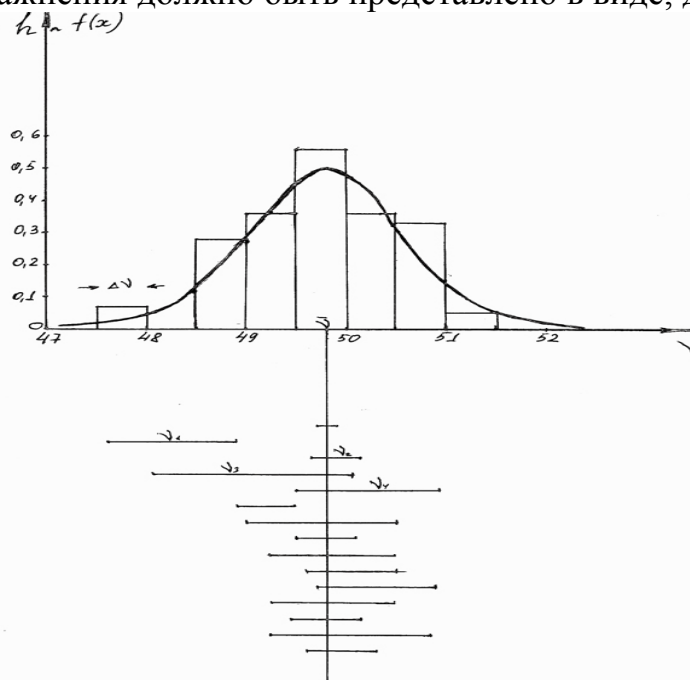


Рис.3

Упражнение 2

1. На генераторе сигналов установите переключатель «МНОЖИТЕЛЬ» в положение 10^2 . В качестве измеряемой величины используйте последнюю значащую цифру на экране частотомера. Повторите опыт 100 раз.
2. Определите среднее значение и дисперсию.
3. Постройте гистограмму, как и в упражнении 1. В зависимости от вида гистограммы решите вопрос о том, нормальное или прямоугольное распределение плотности вероятности.

ВОПРОСЫ, которые должны быть рассмотрены при подготовке к сдаче допуска к работе

1. Основные понятия теории вероятностей. Функция плотности вероятности.
2. В каком случае считают, что дискретная (непрерывная) случайная величина задана?
3. Вычисление средних значений случайных величин. Дисперсия.
4. Прямоугольное и нормальное распределения

ВОПРОСЫ, которые следует рассмотреть при подготовке к сдаче отчета по работе

1. При выполнении, каких условий результаты измерений описываются нормальным, прямоугольным распределением?
2. Биномиальное распределение, его предельные формы.
3. Распределение Максвелла, его различные формы.
4. Распределение Больцмана.
5. Вывести формулу (2) и формулу (8^{//}).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондрашов А.П., Шестопалов Е.В. Основы физического эксперимента и математическая обработка результатов измерений. М., 1977г.
2. Гнеденко Б.В., Хинчин А.Я. Элементарное введение в теорию вероятностей. М., 1976 .
3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М., 1964.
4. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. М.: Высш. шк., 1981. §§ 2, 5, 8, 9.

Таблица 1

КОЭФФИЦИЕНТЫ СТЬЮДЕНТА $t_{W, N}$

N	W						
	0,6	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99	0,999
2	1,38	3,08	6,31	12,7	31,8	63,7	637
3	1,06	1,89	2,92	4,30	6,96	9,92	31,6
4	0,98	1,64	2,35	3,18	4,54	5,84	12,9
5	0,94	1,53	2,13	2,78	3,75	4,60	8,61
6	0,92	1,48	2,02	2,54	3,36	4,03	6,67
7	0,90	1,44	1,94	2,45	3,14	3,71	5,96
8	0,90	1,42	1,89	2,36	3,00	3,50	5,41
9	0,90	1,40	1,86	2,31	2,90	3,36	5,04
10	0,88	1,38	1,83	2,26	2,82	3,25	4,78
12	0,87	1,36	1,80	2,20	2,72	3,11	4,44
14	0,87	1,35	1,77	2,16	2,65	3,01	4,22
16	0,87	1,34	1,75	2,13	2,60	2,95	4,07
18	0,86	1,33	1,74	2,11	2,57	2,90	3,97
20	0,86	1,33	1,73	2,09	2,54	2,86	3,88
25	0,86	1,32	1,71	2,06	2,49	2,80	3,75
30	0,85	1,31	1,70	2,05	2,46	2,76	3,66
35	0,85	1,31	1,69	2,04	2,45	2,73	3,60
40	0,85	1,30	1,68	2,02	2,42	2,70	3,55
45	0,85	1,30	1,68	2,02	2,41	2,69	3,53
50	0,85	1,30	1,68	2,01	2,40	2,68	3,51
60	0,85	1,30	1,67	2,00	2,39	2,67	3,46
70	0,85	1,30	1,67	1,99	2,38	2,66	3,44
80	0,85	1,30	1,66	1,99	2,37	2,65	3,42
90	0,85	1,29	1,66	1,99	2,37	2,64	3,40
100	0,85	1,29	1,66	1,98	2,36	2,63	3,39

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ХОЛОДИЛЬНИКА

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: холодильный агрегат, нагревательный элемент, амперметр, вольтметр, термометр, секундомер.
ЦЕЛЬ РАБОТЫ: изучение работы холодильной и тепловой машин.

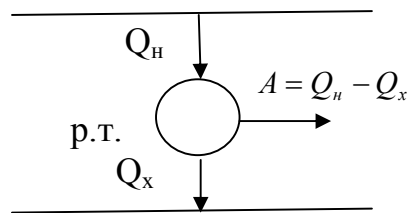
ВВЕДЕНИЕ

В данной задаче изучается работа холодильной машины. Холодильная машина – это система, работающая по циклу, обратному тому, по которому работает тепловая машина. Рабочее тело тепловой машины (например, водяной пар в паровом двигателе) участвует в циклическом процессе, в ходе которого получает тепло Q_n тела - нагревателя. Часть этого тепла Q_x рабочее тело отдает другому телу - холодильнику, температура которого ниже температуры нагревателя. При этом совершается работа над внешними телами, равная

$$A = Q_n - Q_x \quad (1)$$

или $A = Q_n + Q_x$, (1³)
если считать величины алгебраическими.

Нагреватель с температурой T_1



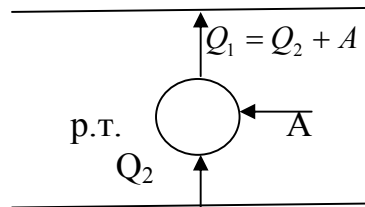
Холодильник с температурой T_2 ($T_2 < T_1$)

В цикле холодильной машины все величины меняют знак. Это означает, что механическая работа A совершается над рабочим телом. При этом некоторое количество теплоты Q_2 отбирается от теплового резервуара, имеющего меньшую температуру (холодильника), к нему добавляется тепло, связанное с совершенной над рабочим телом работой, и тепло

$$Q_1 = Q_2 + A \quad (2)$$

передается более нагретому телу (нагревателю).

Нагреватель с температурой T_1



Холодильник с температурой T_2 ($T_2 < T_1$)

По своей сути, как тепловая, так и холодильная машина являются периодически действующими устройствами, т.е. в ходе их работы рабочее тело периодически повторяет одну и ту же последовательность проходимых им состояний.

Рассмотрим схему работы изучаемой холодильной машины (рис.1). Рабочим телом машины является фреон CF_4 . Это жидкость, давление насыщенных паров которой при комнатной температуре составляет около 4 атм. Компрессор M сжимает пары фреона до давления около 10 атм., и они поступают в конденсатор K . При сжатии фреон нагревается, т.к. процесс сжатия идет адиабатически. Конденсатор представляет собой длинную трубку, имеющую хороший тепловой контакт с металлической поверхностью-радиатором. В конденсаторе фреон остается в парообразном состоянии и постепенно охлаждается за счет теплообмена с окружающим воздухом. Радиатор ускоряет процесс охлаждения. Теплообмен ведет к тому, что в последних витках конденсатора температура фреона лишь на $10-15^\circ\text{C}$ выше, чем температура окружающего воздуха. Поэтому в последних витках конденсатора часть фреона переходит в жидкое состояние.

Далее фреон поступает в испаритель через узкий, длинный капилляр-дроссель D . Диаметр трубки конденсатора 3-4 мм, а диаметр дросселя 0,8 мм. На входном конце капилляра давление 8 атм., а на выходном около 1 атм. Выходной конец капилляра открывается в испаритель I . Испаритель представляет собой широкую трубку, проложенную в стенках алюминиевого корпуса. Здесь давление паров фреона оказывается ниже давления насыщенного пара. Фреон закипает. За счет кипения от стен испарителя отнимается тепло. После испарения фреон вновь засасывается компрессором M , проходя через змеевик $З$, пары фреона на обратном пути охлаждают трубку

конденсатора перед испарителем. Это позволяет более эффективно использовать охлаждающие свойства фреона. Компрессор и вся система представляют собой единую замкнутую линию, по которой проходит циркуляция фреона. Эта система изолирована и не сообщается с атмосферой.

Компрессор приводит в движение электромотор, питаемый от сети 220 В. В данной задаче измеряется одна из характеристик холодильника – коэффициент эффективности. Так как в холодильнике совершается превращение механической энергии в «тепловую», то обычное понятие КПД здесь неприменимо. Под коэффициентом эффективности будем понимать отношение количества тепла, отобранного у стенок охлаждаемого тела к количеству энергии, затраченной на этот процесс. В нашем случае эта последняя потребляется в виде электроэнергии.

Электрическая схема представлена на рис.2. Здесь охлаждаемым объектом является резервуар с водой P . В резервуаре находится нагревательный элемент H и коробка испарителя от холодильного агрегата «X». Вода в резервуаре перемешивается мешалкой «М», вращаемой мотором. Теплоемкость резервуара с водой может быть определена путем нагревания его. Если нагревательный элемент выделяет в резервуар количество энергии Q и температура резервуара с водой изменяется на ΔT_1 , то теплоемкость может быть найдена по формуле

$$C = \frac{Q}{\Delta T_1}. \quad (3)$$

Зная теплоемкость C , можно найти коэффициент эффективности холодильной машины. Пусть в течение времени Δt холодильный агрегат понизил температуру резервуара с водой на ΔT_2 градусов. Тогда количество отобранного тепла равно

$$Q_x = C \Delta T_2.$$

Если известна совершенная при этом работа, то коэффициент эффективности работы холодильника (холодильный коэффициент):

$$\eta = \frac{Q_x}{A}. \quad (4)$$

Упражнение 1

Определение теплоемкости резервуара с водой

1. Включить мотор мешалки. Выждать 10 мин пока в резервуаре не установится стационарная температура.
2. Включить нагреватель. Для этого тумблер перевести в положение «НАГРЕВ».
3. Включить секундомер.
4. Увеличить температуру воды на один градус. Показания термометра записывать каждые 2 мин. (при такой малой разности температур воды и воздуха теплообменом между ними можно пренебречь).
5. Мощность W потребляемой электроэнергии измеряется по показаниям вольтметра и амперметра. Записывать показания приборов через каждые 2 минуты.
6. Выключить нагреватель, продолжая фиксировать температуру.
7. Показания термометра записывать до тех пор, пока температура не станет уменьшаться (при выключенном нагревателе).
8. Построить график зависимости температуры от времени.
9. Найти полное приращение температуры воды ΔT_1 .
10. Рассчитать количество энергии, затраченное на нагрев и теплоемкость резервуара с водой по формуле (3).

Упражнение 2

Определение коэффициента эффективности

1. Включить холодильник. Для этого тумблер перевести в положение «ХОЛ».
2. Включить секундомер.
3. Понизить температуру воды на один градус относительно комнатной. Показания термометра записывать через 2 мин. В ходе охлаждения резервуара с водой записывать показания вольтметра и амперметра через каждые 2 минуты.
4. Выключить холодильник.
5. Показания термометра фиксировать до тех пор, пока температура не станет расти (при выключенном холодильнике).
6. Выключить мотор мешалки.
7. Построить график зависимости температуры от времени.
8. Найти полное приращение температуры ΔT_2 .
9. Построить график зависимости потребляемой холодильником мощности от времени.

10. По графику найти полную энергию, затраченную на работу холодильника. Полная энергия равна сумме: $A = \sum_{i=1}^n (W_i \Delta t_i)$, вычисляющейся для всех двухминутных интервалов работы холодильника.

Пользуясь этим выражением и формулой (4) рассчитать коэффициент эффективности холодильника.

Данные опыта занести в таблицу:

N	Q	C	ΔT_2	Q_x	V	I	A	η	$\Delta \eta$
1.									
2.									
3.									
4.									
...									

ВОПРОСЫ, которые следует разобрать при подготовке к сдаче допуска к работе

1. Тепловая машина, ее КПД.
2. Холодильник и нагреватель, их коэффициенты эффективности.
3. Работа, количество теплоты, внутренняя энергия.

ВОПРОСЫ, которые должны быть разобраны при подготовке к сдаче отчета

1. Различные формулировки основного постулата второго начала термодинамики.
2. Теоремы Карно, их доказательство.
3. Третье начало термодинамики в формулировке Планка. Его объяснение на основе формулы Больцмана для энтропии.
4. «Тепловая смерть» Вселенной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кикоин Н.К., Кикоин К.К. Молекулярная физика. М.: Физматиздат., 1962. Гл.7.
2. Телеснин Р.В. Молекулярная физика. М.: Высш. шк., 1973. Гл. 4,5.
3. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. М.: Высш. шк., 1981. § 20.

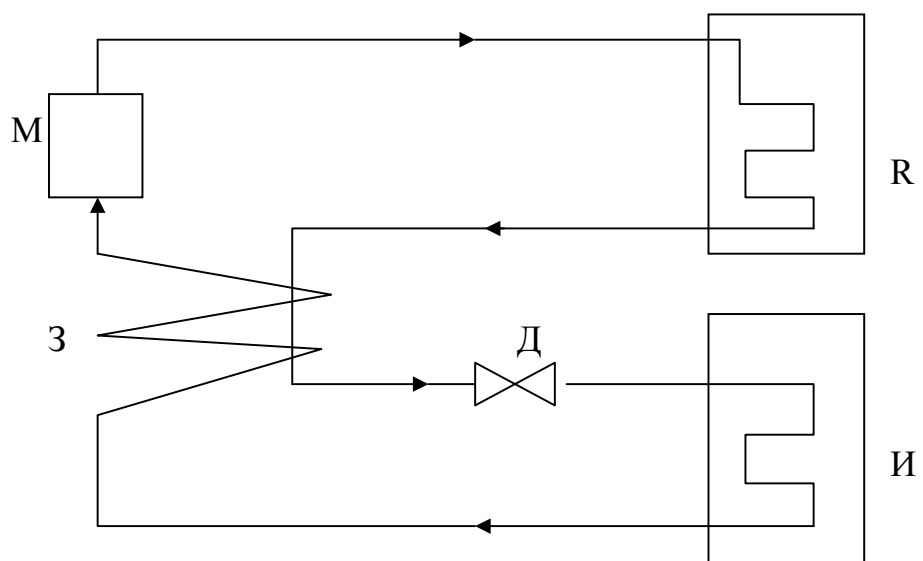


Рис.1

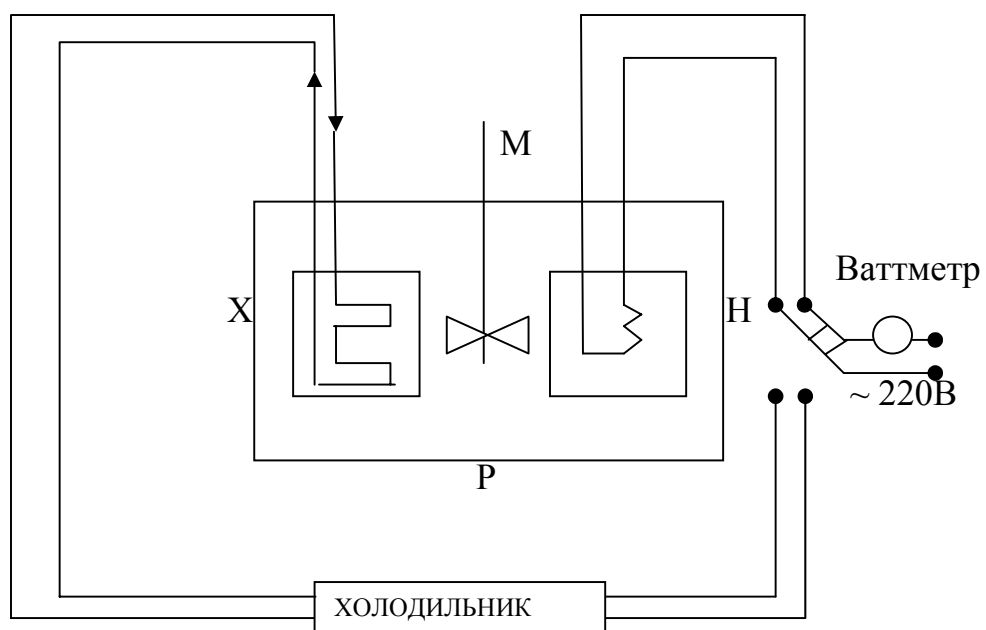


Рис.2

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОЗДУХА

ОБОРУДОВАНИЕ: Установка ФПТ1-3.

ЦЕЛИ РАБОТЫ: Изучение процессов переноса, измерение теплопроводности воздуха, сравнение полученных результатов со значениями, приведенными в справочной литературе и с теоретической оценкой данной величины.

ВВЕДЕНИЕ

Если в газе, состоящем из одинаковых молекул, вдоль оси x

существует градиент $\frac{\partial A}{\partial x}$ некоторой величины A (A -молекулярное свойство, отнесенное к одной молекуле; это может быть энергия, как в случае теплопроводности, импульс, в случае вязкости, концентрация, в случае диффузии ...), то плотность потока I этой величины вдоль оси x может быть определена из уравнения

$$I = -\frac{1}{3} n \langle V \rangle \lambda \frac{\partial A}{\partial x}, \quad (1)$$

где n – равновесная концентрация молекул, $\langle V \rangle$ – средняя скорость их теплового движения, $\langle \lambda \rangle$ – средняя длина свободного пробега молекул.

При теплопроводности происходит непосредственная передача кинетической энергии молекулярного движения от одних молекул к другим, следовательно, в данном случае роль величины A играет средняя энергия теплового движения, приходящаяся на одну молекулу. Согласно теореме о равнораспределении энергии по степеням свободы

$$A = \frac{i}{2} kT, \quad (2)$$

где i – число квадратичных членов энергии в выражении для полной механической энергии молекулы, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура.

Формулу (2) можно привести к виду (проделайте преобразования сами):

$$A = \frac{C_V}{N_A} T, \quad (2')$$

где C_V – молярная теплоемкость газа при постоянном объеме, $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{моль}^{-1}$ – число Авогадро.

С учетом формулы (2') уравнение переноса (1) для плотности потока тепла примет вид:

$$I = -\frac{1}{3} n \langle V \rangle \lambda \frac{C_V}{N_A} \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (3)$$

$$\text{Величина} \quad \chi = \frac{1}{3} n \langle V \rangle \lambda \frac{C_V}{N_A} \quad (4)$$

называется теплопроводностью. Умножив и разделив формулу (4) на массу одной молекулы, теплопроводность можно выразить следующим образом

$$\chi = \frac{1}{3} \rho \langle V \rangle \lambda c_V, \quad (4')$$

где ρ – плотность газа, c_V – удельная теплоемкость при постоянном объеме.

Если не учитывать некоторое уменьшение эффективного диаметра молекулы с ростом T , то $n\langle\lambda\rangle = \text{const}$, $\langle V \rangle$ же $\sim \sqrt{T}$, следовательно, $\chi \sim \sqrt{T}$ и от давления не зависит, что хорошо подтверждается экспериментом.

В данной работе вам предстоит экспериментально определить теплопроводность воздуха и сопоставить полученное значение с данными справочной литературы и результатами расчета по формуле (4).

Описание экспериментальной установки.

Установка ФПТ1-3 состоит из трех основных частей (рис.1).

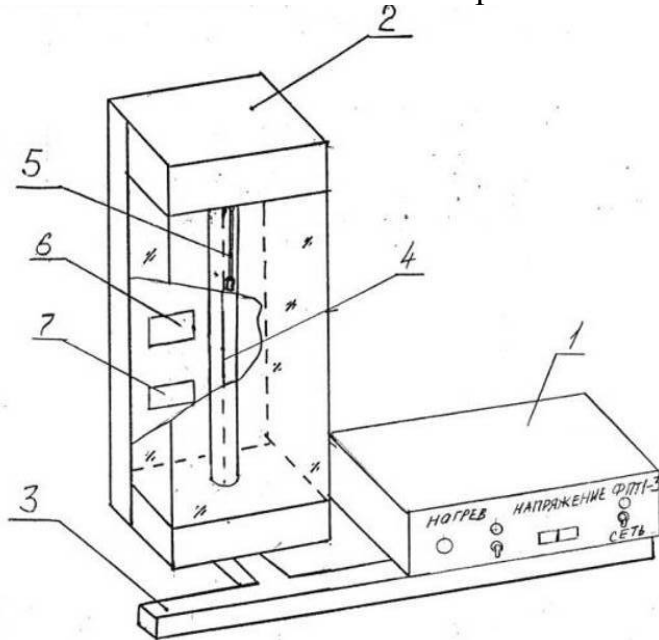


Рис.1 Установка ФПТ1-3:

- приборный блок ПБ (1);
- блок рабочего элемента РЭ (2);
- стойка (3).

На лицевой панели приборного блока расположены органы управления и регулирования установки, условно разделенные на три функциональных узла:

- узел «НАПРЯЖЕНИЕ», осуществляющий управление цифрового контроллера для измерения напряжения;
- узел «НАГРЕВ», осуществляющий включение и регулировку нагрева нити;
- узел «СЕТЬ», осуществляющий подключение установки к сети питающего напряжения.

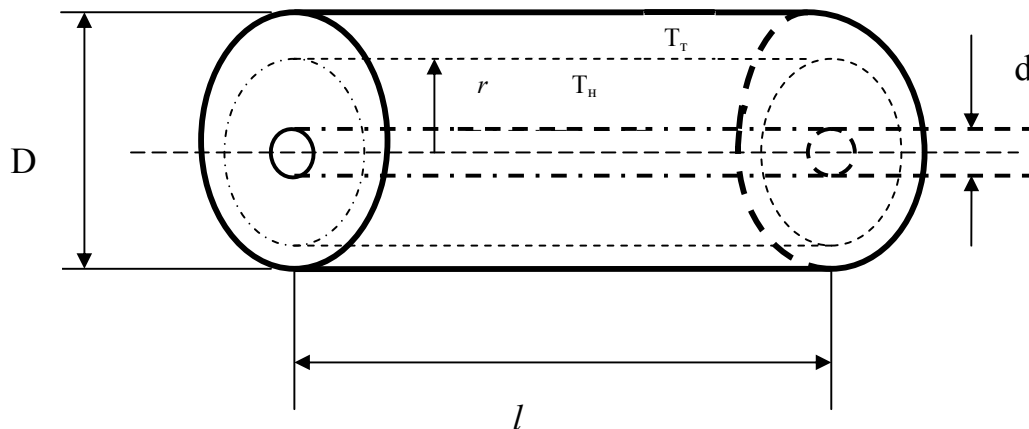
Блок рабочего элемента включает натянутую по оси стеклянной трубки вольфрамовую нить (4), датчик контроллера для измерения температуры (5), цифровой контроллер для измерения температуры (6), цифровой контроллер для измерения напряжения (7) и вентилятор для охлаждения трубки.

Технические характеристики установки и ее элементов

1. Характеристики вольфрамовой нити: длина $l=0.402$ м, диаметр $d=64 \cdot 10^{-5}$ м, температурный коэффициент сопротивления $\alpha=4.1 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, сопротивление при 20°C $R_n=(8 \pm 1) \text{ Ом}$.
2. Нагрев нити относительно окружающего воздуха $0-30^\circ\text{C}$.
3. Внутренний диаметр трубки рабочего элемента $D=26 \pm 1$ мм.
4. Погрешность измерения температуры воздуха $0,3^\circ\text{C}$.
5. Диапазон регулирования рабочего тока $2-200$ мА.
6. Погрешность измерения рабочего тока 1 мА .

Теоретические основы проводимых измерений

Рассмотрим перенос тепла в пространстве между двумя коаксиальными цилиндрами, один из которых представляет собой поверхность вольфрамовой нити диаметра d и длины l , имеющей температуру T_n , а другой - внутреннюю поверхность стеклянной трубки с диаметром D и такой же длиной, имеющую температуру T_r .



В установившемся режиме поток тепла Φ через любую цилиндрическую поверхность с радиусом основания r , коаксиальную со стеклянной трубкой, должен быть одинаков и равен

$$\Phi = - \frac{\chi dT}{dr} 2\pi r l \quad . \quad (5)$$

Разделим переменные и проинтегрируем с учетом граничных условий

$$\int_{T_n}^{T_T} dT = - \int_{D/2}^{d/2} \frac{\Phi dr}{\chi 2\pi r l}, \text{ после чего получим форму-}$$

лу для расчета теплопроводности

$$\chi = \frac{\Phi \ln \frac{D}{d}}{\Delta T 2\pi l} \quad , \quad (6)$$

где $\Delta T = T_n - T_T$.

Для вычисления теплопроводности нужно знать Φ и ΔT .

При пропускании тока i по вольфрамовой нити в установившемся режиме выделяющаяся в нити тепловая мощность $i^2 R_n$ равна тепловому потоку между нитью и внутренней поверхностью стеклянной трубки:

$$\Phi = i^2 R_n = \frac{U_p U_n}{R_p} \quad , \quad (7)$$

где U_n - падение напряжения на нити,

U_p - падение напряжения на эталонном резисторе, включенном в цепь последовательно с нитью,

$R_p = 7,5 \text{ Ом}$ - сопротивление эталонного резистора, которое полагается независимым от температуры.

Разность температур ΔT можно определить следующим образом.

Температура внутренней поверхности трубки T_T в ходе эксперимента принимается постоянной и равной температуре воздуха в комнате, т.к. поверхность трубки обдувается потоком воздуха от вентилятора. Температура нити T_n тем выше, чем больше протекающий по ней ток. ΔT можно определить, измеряя напряжение на нити и эталонном резисторе при очень малом ($< 10 \text{ мА}$) ненагре-

вающем токе (u_{h_0} и u_{p_0} соответственно) и при токе, вызывающем нагрев (u_h и u_p соответственно):

$$\Delta T = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{u_h u_{p_0}}{u_p u_{h_0}} - 1 \right). \quad (8)$$

Вывод формулы (8) дан в Приложении 1.

Таким образом, расчетная формула для теплопроводности имеет вид

$$\chi = \frac{u_p u_h}{2\pi l R_p} \frac{\alpha \ln \frac{D}{d}}{\left(\frac{u_h u_{p_0}}{u_p u_{h_0}} - 1 \right)}. \quad (9)$$

Приложение 1

Определение разности температур между вольфрамовой нитью и внутренней поверхностью стеклянной трубки

Пусть R_{H_0} - сопротивление вольфрамовой нити при комнатной температуре, тогда при температуре на ΔT градусов выше сопротивление нити равно

$$R_H = R_{H_0} (1 + \alpha \Delta T). \quad (a)$$

Так как

$$R_{H_0} = \frac{U_{H_0}}{i_0} = \frac{U_{H_0}}{\frac{U_{P_0}}{R_P}} = \frac{U_{H_0} R_P}{U_{P_0}},$$

где U_{H_0} и U_{P_0} - напряжения на нити и эталонном резисторе при «негреющем» токе i_0 ($< 10 \text{ мА}$), соответственно формула (а) может быть представлена в виде

$$R_H = \frac{U_{H_0} R_P}{U_{P_0}} (1 + \alpha \Delta T).$$

Выразив ΔT , получим

$$\Delta T = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{R_H U_{P_0}}{R_P U_{H_0}} - 1 \right), \text{ и, учитывая, что при «на-}$$

гревающим» токе $U_H = R_H i$ и $U_P = R_P i$, а, следовательно, $\frac{R_H}{R_P} = \frac{U_H}{U_P}$,

окончательно

$$\Delta T = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{U_H U_{P_0}}{U_P U_{H_0}} - 1 \right).$$

Порядок выполнения работы

1. Вывести на минимум (крайнее левое положение) ручку потенциометра в узле «НАГРЕВ» ПБ, убедиться, что все тумблеры ПБ в положении «ВЫКЛ».
2. Подключить вилку питания прибора к розетке сети переменного тока напряжением 220В.
3. Включить тумблеры «ВКЛ» в узле «СЕТЬ» и «НАГРЕВ» в соответствующем узле.
4. Нажать кнопку U_p (режим измерения падения напряжения на эталонном резисторе). Установить рукояткой «НАГРЕВ» напряжение U_{p_0} не более 0,060В («негреющий» ток). Записать значение U_{p_0} .
5. Нажать кнопку U_n (режим измерения падения напряжения на нити) и зарегистрировать по цифровому индикатору значение U_{n_0} .
6. Нажать кнопку U_p , установить рукояткой «НАГРЕВ» напряжение порядка 0,7В и записать значение U_p .
7. Выждав минуту для установления стационарного теплового режима, определить падение напряжения на нити U_n нажатием кнопки U_n .
8. Повторить пункты 6 и 7, плавно меняя рукояткой «НАГРЕВ» напряжение U_p в интервале от 0,7В до 1,5В (провести 6-7 измерений).

НЕ ПОДНИМАТЬ U_p ВЫШЕ 1,5В!

9. Вывести ручку «НАГРЕВ» в крайнее левое положение, выключить тумблеры «НАГРЕВ» и «СЕТЬ». Вытащить вилку из розетки сети переменного тока.
10. По результатам измерений и вычислений заполнить таблицу.

Таблица

№ опыта	u_{p_0} , В	u_{n_0} , В	u_p , В	u_n , В	$\chi, \frac{Bm}{m \cdot K}$	$\Delta\chi, \frac{Bm}{m \cdot K}$	ε
1							
2							
3							
...							

ВОПРОСЫ, которые следует разобрать при подготовке к сдаче допуска к работе

1. Дайте определение плотности потока, потока физической величины.
2. Дайте определение степени свободы. Сколько степеней свободы имеет одно-, двух-, многоатомная молекула? Как можно выбрать эти степени свободы?
3. Сформулируйте теорему о равномерном распределении энергии по степеням свободы.
4. Как можно вычислить среднюю скорость теплового движения молекул, среднюю длину свободного пробега молекул?
5. Как в ходе эксперимента определить тепловой поток между нитью и стеклянной трубкой? Как определить разность температур между нитью и трубкой?

ВОПРОСЫ, которые следует разобрать при подготовке к сдаче отчета по работе

1. Вывод общего уравнения переноса.
2. Оценить значение теплопроводности воздуха при н.у. по формуле (4), приняв диаметр «молекулы воздуха» равным 0,35 нм.
3. Как зависит теплопроводность газа от давления, температуры?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Телеснин Р.В. Молекулярная физика. М.: Высш. шк., 1973. §§ 61, 68, §29.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.2. Термодинамика и молекулярная физика. М.: Наука, 1975. §§ 86, 89, 68.
3. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. М.: Высш. шк., 1981 . С. 355-358, 363-365, 103-109, 132-136.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3.
Лабораторная работа №1. Определение показателя адиабаты воздуха.	4.
Лабораторная работа №2. Определение вязкости воздуха и средней длины свободного пробега молекул воздуха.	16.
Лабораторная работа №3. Определение приращения энтропии тиосульфата натрия при нагревании.	25.
Лабораторная работа №4. Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости методом Кантора- Ребиндера.	31.
Лабораторная работа №5. Экспериментальное определение функции распределения случайных величин.	37.
Лабораторная работа №6. Изучение работы холодильника.	47.
Лабораторная работа №7. Определение теплопроводности воздуха.	53.