

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Северный (Арктический) федеральный университет
имени М.В.Ломоносова»

А.И.Аникин

**СВОЙСТВА ГАЗОВ.
СВОЙСТВА КОНДЕНСИРОВАННЫХ
СИСТЕМ**

Лабораторный практикум

Архангельск

ИД САФУ
2014

УДК 536:538.9
ББК 22.3
А67

*Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом
Северного (Арктического) федерального университета
имени М.В. Ломоносова*

Рецензенты: **В.К.Любов**, заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики института энергетики и транспорта, доктор технических наук, профессор;
Ю.Л.Леухин, доцент кафедры теплотехники института энергетики и транспорта, кандидат технических наук;
Л.В.Филимоненкова, доцент кафедры физики института естественных наук и биомедицины, кандидат технических наук

Аникин, А.И.

А67 Свойства газов. Свойства конденсированных систем: лабораторный практикум / А.И. Аникин; Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. – Архангельск: ИД САФУ, 2014. – 48 с.
ISBN 978-5-261-00958-0

Содержит рекомендации о порядке подготовки к выполнению и оформления лабораторных работ, описание лабораторных работ и порядка их выполнения, а также справочный материал, необходимый для обработки опытных данных. Описание каждой работы включает необходимую теоретическую часть, позволяющую получить ясное представление о существе изучаемых явлений и применяемых методах измерения физических величин.

Предназначено для студентов инженерно-технических направлений подготовки и специальностей вузов.

УДК 536:538.9
ББК 22.3

ISBN 978-5-261-00958-0

© Аникин А.И., 2014
© Северный (Арктический)
федеральный университет
им. М.В.Ломоносова, 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Порядок подготовки к выполнению и оформления лабораторных работ	4
2. Лабораторная работа № 2.1. Определение показателя адиабаты воздуха методом Клемана – Дезорма	7
3. Лабораторная работа №2.2. Определение температурного коэффициента давления воздуха при помощи газового термометра	15
4. Лабораторная работа №2.3. Определение коэффициента вязкости воздуха	19
5. Лабораторная работа №2.4. Определение коэффициента диффузии пара летучей жидкости в воздухе	23
6. Лабораторная работа №2.5. Изучение зависимости коэффициента вязкости жидкости от температуры	29
7. Лабораторная работа №2.6. Теплопроводность металлов	34
8. Лабораторная работа №2.7. Теплопроводность диэлектриков	40
Приложение	46
Список рекомендуемой литературы	48

1. ПОРЯДОК ПОДГОТОВКИ К ВЫПОЛНЕНИЮ И ОФОРМЛЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1.1. Требования к домашней подготовке

Выполнению лабораторной работы должна предшествовать домашняя подготовка, в ходе которой следует внимательно ознакомиться с описанием лабораторной работы и порядка ее выполнения. Затем в отчете о лабораторной работе необходимо оформить вводную часть по следующей схеме:

- указать название работы и кратко сформулировать ее цель;
- изобразить схему экспериментальной установки;
- привести вывод расчетных формул;
- письменно ответить на контрольные вопросы;
- подготовить таблицу для записи результатов измерений.

Студент может приступить к выполнению лабораторной работы только после того, как получит разрешение преподавателя. Студенты, не имеющие подготовки к лабораторной работе, к ее выполнению не допускаются.

1.2. Оформление таблиц

Результаты измерений, как правило, записывают в таблицы. При этом необходимо придерживаться следующих правил:

- сначала записывают номер таблицы и ее название;
- наименование физических величин или их условное обозначение, единицы величин пишут только один раз в верхней строке или левом столбце;

- при записи чисел, представленных в экспоненциальной форме, в таблицу заносят только мантиссу числа, а общий множитель $10^{\pm E}$ выносят в верхнюю строку или левый столбец (например, результаты $l_1 = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м; $l_2 = 0,2 \cdot 10^{-3}$ м; $l_3 = 0,3 \cdot 10^{-3}$ м и т.д. можно представить

в виде $l_1 \cdot 10^3 = 0,1$ м; $l_2 \cdot 10^3 = 0,2$ м; $l_3 \cdot 10^3 = 0,3$ м и т. д., тогда в таблицу следует записывать только числовые значения 0,1; 0,2; 0,3 и т. д., а в верхнюю строку или левый столбец – $l \cdot 10^3$, м);

- таблицы следует чертить только по линейке.

1.3. Построение графиков

Графики позволяют наглядно представить характер зависимости одних физических величин от других. Как правило, графики имеют вид гладких, плавных линий, без резких изломов. Вследствие погрешностей измерений часть экспериментальных точек или даже все не ложатся на эти линии, а группируются вокруг них случайным образом.

При построении графиков следует руководствоваться следующими правилами.

1. Графики необходимо выполнять с использованием чертежных принадлежностей желательно на миллиметровой бумаге.

2. По оси ординат следует откладывать значения функции, по оси абсцисс – значения аргумента.

3. При построении графиков желательно выбирать такие координаты, чтобы ожидаемая зависимость была линейной.

4. Масштаб графика должен быть удобным для нанесения экспериментальных точек.

5. Координатные оси должны быть размечены метками. Рядом с делениями проставляют цифры, позволяющие установить значения, соответствующие делениям шкалы. Около осей координат указывают обозначения физических величин и их единицы.

6. Точка пересечения координатных осей не обязательно должна совпадать с нулевыми значениями функции и аргумента.

7. Экспериментальные точки наносят на график в виде условных знаков небольшого размера (кружки, квадратики, крестики и т.д.). Никаких лишних линий и отметок, поясняющих построение точек, на

график не наносят, так как они загромождают рисунок и мешают анализировать результаты.

8. Не следует соединять экспериментальные точки на графике отрезками прямой и получать таким образом ломаную линию.

9. Экспериментальную кривую (прямую) следует проводить так, чтобы она проходила примерно в средней части всей совокупности экспериментальных точек.

10. Экспериментальные кривые должны занимать практически все поле чертежа.

11. График должен сопровождаться подрисуночной подписью и при необходимости расшифровкой условных обозначений.

1.4. Защита лабораторных работ

Правильно оформленная лабораторная работа – это отчет, который должен содержать вводную часть, перечень измерительных приборов и их характеристики, результаты прямых измерений, один пример расчета искомой величины с записью всех промежуточных вычислений и пояснениями, результаты расчетов, оценку погрешности измерений, результаты эксперимента, задания к лабораторной работе (построение графиков, определение параметров экспериментальных зависимостей, сопоставление экспериментальных данных с рассчитанными теоретически и т.д.), анализ результатов работы и выводы.

Зачет по лабораторной работе может быть получен только после ее защиты в ходе собеседования с преподавателем, на котором студент должен показать знание теоретического материала, устройства и принципа действия экспериментальной установки, методики измерений и обработки опытных данных, способность грамотно интерпретировать результаты измерений и расчетов, относящихся к лабораторной работе.

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ ВОЗДУХА МЕТОДОМ КЛЕМАНА–ДЕЗОРМА

Первая цифра номера лабораторной работы указывает раздел общего курса физики, вторая – номер лабораторной работы в разделе.

2.1. Теоретические положения

Теплоемкостью тела c_T называют физическую величину, численно равную отношению бесконечно малого количества теплоты δQ , сообщаемой телу, к приращению dT его температуры в рассматриваемом термодинамическом процессе:

$$c_T = \frac{\delta Q}{dT}.$$

Единица теплоемкости в Международной системе единиц (СИ) – джоуль на кельвин (Дж/К).

Теплоемкость c единицы массы вещества называют удельной теплоемкостью:

$$c = \frac{\delta Q}{m dT},$$

где m – масса вещества, кг.

Единица удельной теплоемкости – джоуль на килограмм-кельвин (Дж/(кг·К)).

Теплоемкость C одного моля вещества называют молярной теплоемкостью:

$$C = \frac{\delta Q}{\nu dT},$$

где ν – количество вещества, моль.

Единица молярной теплоемкости – джоуль на моль-кельвин (Дж/(моль·К)).

Молярная и удельная теплоемкости одного и того же вещества связаны соотношением

$$C = cM ,$$

где $M = m/\nu$ – молярная масса вещества, кг/моль.

Первое начало термодинамики утверждает, что количество теплоты Q , подведенной к термодинамической системе, идет на приращение ее внутренней энергии ΔU и на совершение системой работы A над внешними телами:

$$Q = \Delta U + A .$$

Здесь

$$\Delta U = U_2 - U_1 ,$$

где U_2, U_1 – внутренняя энергия термодинамической системы в ее конечном и начальном состояниях.

Уравнение первого начала термодинамики в дифференциальной форме имеет вид

$$\delta Q = dU + \delta A ,$$

где δQ – бесконечно малое количество теплоты; dU – бесконечно малое приращение внутренней энергии; δA – бесконечно малая работа.

Различие в записи бесконечно малых величин δQ , δA и dU связано с тем, что внутренняя энергия является параметром состояния системы, dU – полный дифференциал, а теплота и работа параметрами состояния системы не являются, δQ и δA не являются полными дифференциалами.

При расширении или сжатии газа, например, уравнение первого начала термодинамики для одного моля можно записать так:

$$\delta Q = dU_m + p dV_m ,$$

где U_m, V_m – внутренняя энергия и объем одного моля газа; p – давление газа.

При расширении газа $dV_m > 0$, поэтому $\delta A > 0$, при сжатии газа $dV_m < 0$, поэтому $\delta A < 0$. Так как для одного моля $\delta Q = C dT$, то

$$C dT = dU_m + p dV_m . \quad (2.1)$$

Теплоемкость газа зависит от условий, при которых к нему подводят теплоту. Наибольший интерес представляют случаи подвода теплоты при постоянном объеме или при постоянном давлении газа. Соответственно различают теплоемкости при постоянном объеме C_v и постоянном давлении C_p .

В случае изохорного процесса ($V_m = \text{const}$, $dV_m = 0$) уравнение (2.1) принимает вид

$$C_v dT = dU_m ,$$

где C_v – молярная теплоемкость при постоянном объеме.

Внутренняя энергия идеального газа зависит только от температуры. Поэтому для идеального газа

$$C_v = \left(\frac{\partial U_m}{\partial T} \right)_v = \frac{dU_m}{dT} .$$

Для идеального газа справедливо уравнение Клапейрона – Менделеева, в соответствии с которым

$$V_m = \frac{RT}{p} , \quad (2.2)$$

где R – молярная газовая постоянная; T – термодинамическая температура.

Подставим выражение (2.2) и $dU_m = C_v dT$ в уравнение (2.1). В случае изобарного процесса ($p = \text{const}$) идеального газа это уравнение примет вид

$$C_p dT = C_v dT + R dT , \quad (2.3)$$

где C_p – молярная теплоемкость при постоянном давлении.

Разделив обе части уравнения (2.3) на dT , получаем

$$C_p = C_v + R .$$

Это выражение называют уравнением Майера. Оно справедливо только для идеальных газов.

Адиабатным называют термодинамический процесс, который происходит без теплообмена с внешней средой. Уравнение адиабатного процесса для идеального газа имеет вид

$$pV^\gamma = \text{const} \quad , \quad (2.4)$$

где $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ – показатель адиабаты (коэффициент Пуассона).

Выражение (2.4) называют уравнением Пуассона. Можно записать уравнение адиабатного процесса в переменных T, V и T, p :

$$TV^{\gamma-1} = \text{const} \quad ; \quad T^\gamma p^{1-\gamma} = \text{const}.$$

2.2. Экспериментальная установка

В лабораторной работе требуется определить показатель адиабаты воздуха. Экспериментальная установка, схема которой изображена на рис. 2.1, состоит из сосуда и U-образного водяного манометра, соединенных между собой. Манометр служит для измерения разности между давлением воздуха в сосуде и атмосферным давлением.

В сосуд с помощью насоса накачивают воздух, создавая внутри сосуда избыточное, по сравнению с атмосферным, давление. Если процесс сжатия производить достаточно быстро, то в результате работы внешних сил газ нагревается до температуры выше комнатной. После прекращения процесса накачки температура воздуха в

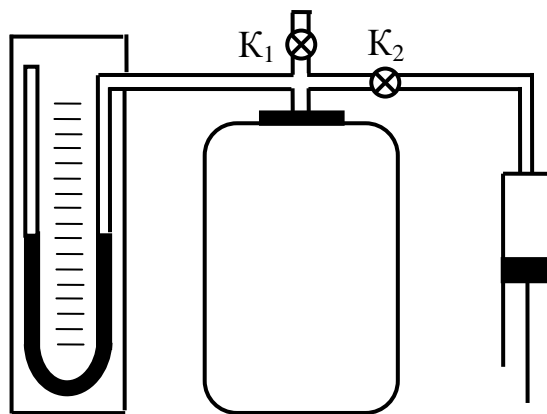


Рис. 2.1. Схема экспериментальной установки

сосуде постепенно сравнивается с комнатной температурой T_1 в результате теплообмена с окружающей средой. Газ в сосуде будет иметь давление p_1 , объем V_1 , температуру T_1 , что соответствует точке 1 на рис. 2.2.

Давление газа в точке 1 определяется выражением

$$p_1 = p_0 + \rho gh_1,$$

где p_0 – атмосферное давление во время проведения эксперимента; ρ – плотность жидкости в U-образном манометре; h_1 – разность уровней жидкости в коленях манометра.

Когда температура воздуха в сосуде сравнивается с комнатной (об этом можно судить по установившимся уровням жидкости в коленях манометра), на короткое время откроем кран, соединяющий сосуд с атмосферой. Возникнет процесс истечения воздуха из сосуда в атмосферу, сопровождающийся убыванием давления и температуры в сосуде. Так как истечение воздуха из сосуда

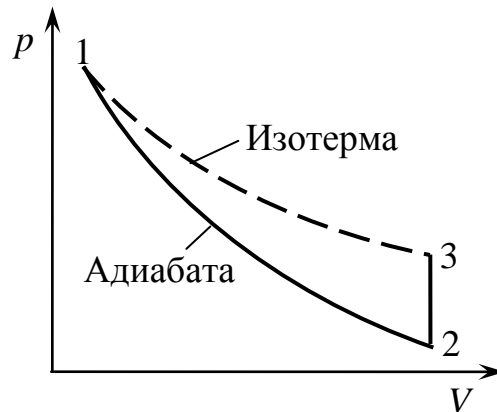


Рис. 2.2. Термодинамические процессы в p, V -координатах

происходит достаточно быстро, термодинамический процесс в сосуде в этом промежутке времени можно считать близким к адиабатному. Истечение воздуха будет происходить до тех пор, пока давление воздуха в сосуде не сравняется с атмосферным. В этот момент времени давление воздуха в сосуде будет равно p_2 , а температура – T_2 . Адиабатное расширение воздуха, при котором его давление изменяется от начального значения p_1 до конечного значения p_2 , происходит в соответствии с кривой 1-2 на рис.2.2. В точке 2 давление воздуха $p_2 = p_0$, объем воздуха $V_2 > V_1$, температура воздуха $T_2 < T_1$. Уравнение адиабатного процесса 1-2, записанное в переменных p, T , имеет вид

$$\left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\gamma-1} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\gamma}. \quad (2.5)$$

После того, как давление воздуха в сосуде сравняется с атмосферным, следует закрыть кран, соединяющий сосуд с атмосферой.

После закрытия крана температура воздуха в сосуде постепенно повысится до комнатной вследствие теплообмена с окружающей средой. Давление воздуха в сосуде при этом возрастет (станет больше атмосферного). Термодинамический процесс в сосуде после закрытия крана близок к изохорному. Процесс изохорного нагрева изображен на рис.2.2 участком 2-3 прямой, параллельной оси ординат. В точке 3 воздух имеет давление p_3 , объем $V_3 = V_2$, температуру $T_3 = T_1$. Давление воздуха в точке 3 определяется выражением

$$p_3 = p_0 + \rho gh_2,$$

где h_2 – разность уровней жидкости в коленах манометра после того, как температура воздуха в сосуде сравнивается с температурой окружающей среды.

Уравнение изохорного процесса (2.3), записанное в переменных p, T , имеет вид (учитываем, что $T_3 = T_1$)

$$\frac{p_3}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (2.6)$$

Из уравнений (2.5) и (2.6) следует, что

$$\left(\frac{p_1}{p_2} \right)^\gamma = \frac{p_3}{p_2}. \quad (2.7)$$

Подставив значения $p_1 = p_0 + \rho gh_1$, $p_2 = p_0$, $p_3 = p_0 + \rho gh_2$ в формулу (2.7), получаем

$$\left(\frac{p_0 + \rho gh_1}{p_0} \right)^\gamma = \frac{p_0 + \rho gh_2}{p_0} \text{ и } \left(1 + \frac{\rho gh_1}{p_0} \right)^\gamma = 1 + \frac{\rho gh_2}{p_0}.$$

Левую часть последней формулы раскладываем в ряд Маклорена, ограничиваясь двумя первыми слагаемыми (ряд быстро сходится, так как $\rho gh_1 \ll p_0$):

$$1 + \frac{(\gamma - 1)\rho gh_1}{\gamma p_0} = 1 + \frac{\rho gh_2}{p_0}.$$

Отсюда

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (2.8)$$

Эта формула является приближенной, так как получена путем разложения функции в ряд Маклорена с ограниченным числом членов. Сохранение только первых двух слагаемых вносит погрешность расчета γ воздуха, не превышающую 0,01.

2.3. Порядок выполнения работы и обработки результатов измерений

2.3.1. Ознакомиться с устройством экспериментальной установки, записать перечень приборов и принадлежностей и их характеристики в отчет о лабораторной работе.

2.3.2. Перекрыть кран K_1 (см. рис. 2.1), соединяющий сосуд с атмосферой, открыть кран K_2 , соединяющий сосуд с насосом, и накачать воздух в сосуд так, чтобы разность уровней жидкости в U-образном манометре составила 20–30 см.

2.3.3. Перекрыть кран K_2 , дождаться, чтобы уровни жидкости в манометре установились, и измерить показание h_1 .

2.3.4. Открыть кран K_1 и вновь закрыть его, как только давление воздуха в сосуде сравняется с атмосферным (в этот момент времени прекратится звук, возникающий при истечении воздуха из сосуда в атмосферу). Дождаться, чтобы уровни жидкости в манометре установились, и измерить показание h_2 .

2.3.5. Рассчитать значение γ по формуле (2.8).

2.3.6. Повторить опыт не менее семи раз. Результаты измерений записать в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Номер опыта	Показания манометра		γ
	h_1	h_2	

2.3.7. Рассчитать среднее арифметическое из всех измеренных значений γ .

2.3.8. Оценить случайную абсолютную и относительную погрешности измерения γ .

2.3.9. Рассчитать число степеней свободы i воздуха, используя результаты измерений и формулу

$$\gamma = \frac{i + 2}{i}.$$

2.3.10. Выполнить расчет молярной и удельной теплоемкостей воздуха при постоянном объеме и постоянном давлении, используя найденное значение i .

2.3.11. Проанализировать полученные результаты.

2.4. Контрольные вопросы

1. Что понимают под теплоемкостью тела c_T ? Удельной теплоемкостью c ? Молярной теплоемкостью C ? В каких единицах Международной системы (СИ) выражают эти физические величины?

2. Какой газ называют идеальным? Как связаны между собой C_V и C_p идеальных газов? Как зависят C_V и C_p от числа степеней свободы i молекул в рамках классической теории теплоемкости идеальных газов?

3. Сколько степеней свободы имеют молекулы газов He, N₂, CO₂? Какие это степени свободы?

4. Какой термодинамический процесс называют адиабатным? В каком из газов показатель адиабаты $\gamma = \frac{C_p}{C_V}$ имеет наибольшее значение – N₂, He, CO₂?

5. Как изменяется внутренняя энергия газа при его адиабатном расширении? При адиабатном сжатии?

6. Как изменяется температура газа при его адиабатном расширении? При адиабатном сжатии?

3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ДАВЛЕНИЯ ВОЗДУХА ПРИ ПОМОЩИ ГАЗОВОГО ТЕРМОМЕТРА

3.1. Теоретические положения

Французский физик Ж.Шарль в 1787 г. на основе проведенных им экспериментов установил, что давление p данной массы газа при постоянном объеме меняется при изменении температуры t по линейному закону (закон Шарля)

$$p = p_0(1 + \alpha t),$$

где p_0 – давление при температуре $0\text{ }^\circ\text{C}$; α – температурный коэффициент давления газа.

В 1802 г. французский физик Ж.Л.Гей-Люссак экспериментально изучал зависимость объема газа от его температуры. Он установил, что объем V данной массы газа при постоянном давлении меняется при изменении температуры t по линейному закону (закон Гей-Люссака)

$$V = V_0(1 + \alpha t),$$

где V_0 – объем газа при температуре $0\text{ }^\circ\text{C}$; α – температурный коэффициент объемного расширения газа.

Многочисленные эксперименты показали, что для идеальных газов

$$\alpha = \frac{1}{273,15} \text{ K}^{-1}.$$

Можно применить термодинамическую шкалу температур. В этом случае законы Шарля и Гей-Люссака принимают вид

$$p = p_0 \alpha T \text{ и } V = V_0 \alpha T.$$

3.2. Экспериментальная установка

В лабораторной работе требуется экспериментально определить температурный коэффициент давления воздуха. Изображенная на

рис. 3.1 экспериментальная установка состоит из стеклянного сосуда, заполненного воздухом, и жидкостного U-образного манометра. Сосуд с воздухом помещен в воду, температуру которой можно изменять с помощью нагревателя.

Процесс нагревания газа в сосуде близок к изохорному ($V = \text{const}$). Запишем закон Шарля для двух различных температур воздуха t_1 и t_2 :

$$p_1 = p_0(1 + \alpha t_1); \quad (3.1)$$

$$p_2 = p_0(1 + \alpha t_2), \quad (3.2)$$

где p_1, p_2 – давление воздуха в сосуде при температурах соответственно t_1 и t_2 .

В результате почленного деления (3.1) на (3.2) получаем

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{1 + \alpha t_1}{1 + \alpha t_2},$$

откуда

$$\alpha = \frac{p_2 - p_1}{p_1 t_2 - p_2 t_1}. \quad (3.3)$$

Если уровни жидкости в коленях манометра находятся на разной высоте, то давление воздуха в сосуде

$$p = p' + \rho gh,$$

где p' – давление воздуха в правом (закрытом) колене манометра; h – разность уровней жидкости в манометре; ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения.

Тогда для первого и второго состояний газа в сосуде получаем

$$p_1 = p'_1 + \rho gh_1, \quad (3.4)$$

$$p_2 = p'_2 + \rho gh_2. \quad (3.5)$$

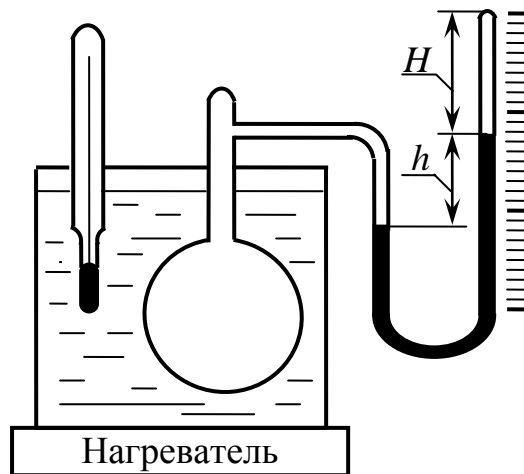


Рис. 3.1. Схема экспериментальной установки

Если температуру воздуха в сосуде повышать медленно, то в закрытом колене манометра будет происходить процесс изотермического сжатия ($T = \text{const}$), поэтому в соответствии с законом Бойля – Мариотта

$$p'_2 = p'_1 \frac{V_1}{V_2} = p'_1 \frac{SH_1}{SH_2} = p'_1 \frac{H_1}{H_2}, \quad (3.6)$$

где V_1, V_2 – объемы воздуха соответственно в первом и втором состояниях в закрытом колене манометра; S – площадь поперечного сечения трубки манометра; H_1, H_2 – высота столба воздуха соответственно в первом и втором состояниях в закрытом колене манометра.

Подставляем выражения (3.4) и (3.5) в формулу (3.3) и с учетом соотношения (3.6) после математических преобразований получаем

$$\alpha = \frac{p'_1 \frac{H_1 - H_2}{H_2} + \rho g (h_2 - h_1)}{p'_1 \frac{H_2 t_2 - H_1 t_1}{H_2} + \rho g (h_1 t_2 - h_2 t_1)}.$$

Вторыми слагаемыми в числителе и знаменателе можно пренебречь, поскольку они очень малы. В этом случае

$$\alpha = \frac{H_1 - H_2}{H_2 t_2 - H_1 t_1}. \quad (3.7)$$

3.3. Порядок выполнения работы и обработки результатов измерений

3.3.1. Ознакомиться с устройством экспериментальной установки, записать перечень приборов и принадлежностей и их характеристики в отчет о лабораторной работе.

3.3.2. Погрузить сосуд с воздухом в холодную воду. Через 2–3 мин (это время необходимо, чтобы температура воды и температура воздуха в сосуде сравнялись) измерить с помощью термометра температуру воздуха t в сосуде и с помощью измерительной линейки – высоту H столба воздуха в закрытом колене манометра.

3.3.3. Включить нагреватель и нагреть воду на 5–7 °С . После этого отключить нагреватель и через 2–3 мин измерить температуру воздуха в сосуде и высоту столба воздуха в закрытом колене манометра.

3.3.4. Провести аналогичные измерения, постепенно нагревая воду на 5–7 °С до 70 °С . Результаты измерений записать в табл. 3.1.

3.3.5. Рассчитать значение α , подставив в формулу (3.7) значения t и H , записанные в первой и второй строках табл. 3.1, затем выполнить такой же расчет для значений t и H , записанных во второй и третьей строках, и т.д. для всего диапазона температур, в котором проводились измерения. Результаты записать в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Результаты измерений и расчетов

Номер опыта	t	H	α

3.3.6. Рассчитать среднее арифметическое из всех измеренных значений α .

3.3.7. Оценить случайную абсолютную и относительную погрешности измерения α .

3.3.8. Проанализировать полученные результаты. Подтверждают ли эти результаты, что воздух при условиях, в которых проводился эксперимент, по своим свойствам близок к свойствам идеального газа?

3.4. Контрольные вопросы

1. Какой газ называют идеальным?
2. Какой термодинамический процесс называют изобарным? Изохорным? Изотермическим?
3. Каким соотношением связаны термодинамическая температура, выраженная в кельвинах (К), и температура, выраженная в градусах Цельсия (°С)?
4. Почему при выполнении лабораторной работы на установке, изображенной на рис.3.1, термодинамический процесс нагревания воздуха в сосуде только приближенно можно считать изохорным?

4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА

4.1. Теоретические положения

Между параллельными слоями газа, движущимися с различными скоростями, возникают силы внутреннего трения. Действие этих сил проявляется в том, что на слой газа со стороны соседнего с ним слоя, движущегося быстрее, действует ускоряющая сила. И, наоборот, со стороны соседнего слоя, движущегося медленнее, действует тормозящая сила. Силы внутреннего трения направлены по касательной к поверхности соприкосновения слоев.

На рис. 4.1 изображен тонкий слой газа, движущийся со скоростью v_0 параллельно плоскости xy . Газовый поток течет вдоль оси y , а скорость течения изменяется только в направлении оси z . На рассматриваемый слой со стороны соприкасающегося с ним сверху слоя газа действует сила трения F' , а со стороны соприкасающегося снизу слоя газа – сила трения F'' . Эти силы направлены в противоположные стороны и равны по модулю

$$F' = F'' = F .$$

Модуль силы трения можно найти по закону Ньютона:

$$F = \eta \left| \frac{dv}{dz} \right| S ,$$

где η – динамический коэффициент вязкости; $\frac{dv}{dz}$ – градиент скорости в направлении оси z , перпендикулярной к поверхности слоя; S – площадь поверхности слоя.

Все сказанное выше справедливо и для жидкостей. Чем больше коэффициент вязкости, тем больше сила внутреннего трения. Коэффици-

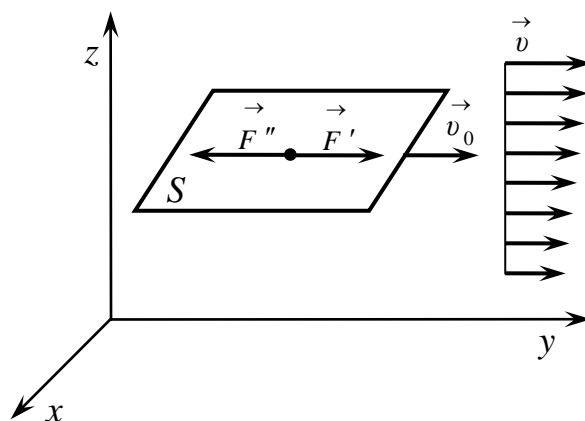


Рис. 4.1. Силы трения
в газовом потоке

коэффициент вязкости зависит от температуры. При увеличении температуры коэффициенты вязкости газов возрастают, а у жидкостей уменьшаются.

С молекулярно-кинетической точки зрения внутреннее трение в газах обусловлено наложением направленного движения слоев газа с различными скоростями и хаотического теплового движения молекул, которое приводит к обмену молекулами между слоями. В результате такого обмена импульс слоя, движущегося быстрее, уменьшается, а импульс слоя, движущегося медленнее, наоборот, увеличивается.

Молекулярно-кинетическая теория дает для динамического коэффициента вязкости идеального газа такое выражение:

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle l \rangle, \quad (4.1)$$

где ρ – плотность газа; $\langle v \rangle$ – средняя арифметическая скорость движения молекул; $\langle l \rangle$ – средняя длина свободного пробега молекул.

Соотношение (4.1) справедливо, если значение $\langle l \rangle$ мало по сравнению с размерами сосуда, в котором газ находится.

Плотность газа

$$\rho = n m_0, \quad (4.2)$$

где n – концентрация молекул; m_0 – масса одной молекулы.

Средняя арифметическая скорость движения молекул газа зависит от его температуры T и массы молекулы m_0 :

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}}, \quad (4.3)$$

где k – постоянная Больцмана.

Средняя длина свободного пробега молекул зависит от их эффективного диаметра d и концентрации n :

$$\langle l \rangle = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n}. \quad (4.4)$$

Подставляя выражения (4.2), (4.3) и (4.4) в формулу (4.1), получаем

$$\eta \sim \frac{\sqrt{m_0}}{d^2} \sqrt{T}.$$

4.2. Экспериментальная установка

В лабораторной работе требуется определить коэффициент вязкости воздуха. Экспериментальная установка, схема которой изображена на рис. 4.2, состоит из капилляра 1,

микроманометра 2, соединительных трубок 3 и цилиндрического сосуда 4. В сосуд предварительно наливают воду. Если слегка приоткрыть кран К, то вода начнет медленно вытекать из сосуда. Уровень жидкости в сосуде будет понижаться. Понизится и давление над уровнем жидкости в сосуде и трубках, соединяющих сосуд с микроманометром и капилляром. По капилляру возникнет течение воздуха

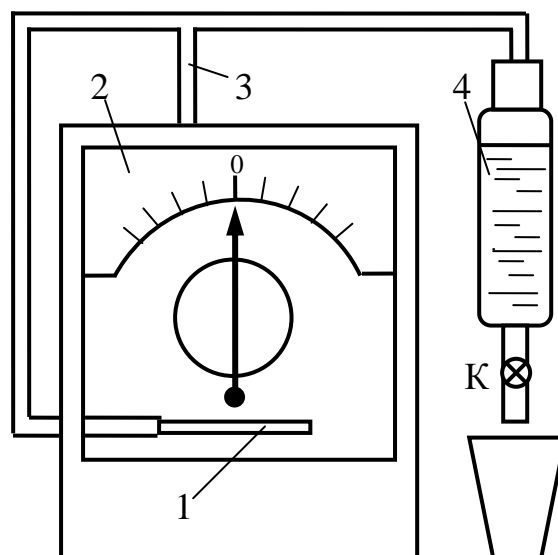


Рис. 4.2. Схема экспериментальной установки

в область пониженного давления, микроманометр при этом будет показывать разность давлений на концах капилляра. Длина и радиус капилляра указаны на лицевой панели микроманометра.

Если режим установившегося течения газа в капилляре является ламинарным, то динамический коэффициент вязкости можно определить, используя формулу Пуазейля:

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta p \tau}{8 l V}, \quad (4.5)$$

где r – радиус капилляра; Δp – перепад давлений на концах капилляра; l – длина капилляра; V – объем газа, прошедшего через капилляр за время τ .

Судить о режиме течения можно, рассчитав безразмерную величину

$$\text{Re} = \frac{\rho v d}{\eta}, \quad (4.6)$$

где ρ – плотность газа; v – скорость течения газа по капилляру; d – диаметр капилляра.

Эту безразмерную величину называют критерием Рейнольдса. Ламинарный режим течения наблюдается, если $Re < 2000$, а турбулентный – если $Re > 2000$.

4.3. Порядок выполнения работы и обработки результатов измерений

4.3.1. Ознакомиться с устройством экспериментальной установки, записать перечень приборов и принадлежностей и их характеристики в отчет о лабораторной работе.

4.3.2. Приоткрывая кран К, добиться такой скорости истечения жидкости из сосуда, чтобы перепад давлений на концах капилляра был не менее $2/3$ предельного значения по шкале микроманометра.

4.3.3. Убедившись в том, что стрелка микроманометра установилась и не меняет своего положения, подставить под вытекающую из сосуда жидкость вместо лабораторного стакана мензурку и включить секундомер. Измерить время τ , в течение которого в мензурку набирается $30\text{--}50\text{ см}^3$ жидкости (такой же объем газа проходит за это время через капилляр). Закрыть кран К и пополнить сосуд водой, доведя ее уровень до исходного положения.

4.3.4. Повторить опыт не менее четырех раз. Для всех опытов рассчитать динамический коэффициент вязкости по формуле (4.5). Результаты измерений и расчетов записать в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Результаты измерений и расчетов

Номер опыта	$l = \dots\dots\dots; \quad r = \dots\dots\dots$			
	Δp	τ	V	η

4.3.5. Рассчитать среднее арифметическое из всех измеренных значений η .

4.3.6. Оценить случайную абсолютную и относительную погрешности измерения η .

4.3.7. Используя справочные и экспериментальные данные, рассчитать по формуле (4.6) для одного из опытов критерий Рейнольдса. Убедиться в том, что режим течения газа по капилляру является ламинарным.

4.3.8. Используя справочное значение эффективного диаметра молекул азота, выполнить расчеты по формуле (4.4) и сопоставить среднюю длину пробега молекул азота с диаметром капилляра.

4.3.9. Проанализировать полученные результаты.

4.4. Контрольные вопросы

1. Что понимают под внутренним трением? Чем обусловлено внутреннее трение в газах с точки зрения молекулярно-кинетической теории?

2. Что понимают под эффективным диаметром молекулы? Под длиной свободного пробега молекулы?

3. В каких единицах Международной системы (СИ) выражают динамический коэффициент вязкости?

4. Зависит ли динамический коэффициент вязкости газа от его температуры и давления? Если зависит, то как?

5. Какой режим течения газа (жидкости) называют ламинарным? Турбулентным?

5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ ПАРА ЛЕТУЧЕЙ ЖИДКОСТИ В ВОЗДУХЕ

5.1. Теоретические положения

Если герметичный сосуд, из которого предварительно удален воздух, частично заполнить жидкостью, то она начнет испаряться, то

есть переходить из жидкого состояния в газообразное. Процесс испарения обусловлен тем, что часть молекул жидкости переходит границу жидкой фазы и попадает в газообразную. Одновременно с процессом испарения происходит и обратный процесс – конденсация, обусловленный переходом части молекул из газообразной фазы в жидкую. По истечении некоторого времени, которое зависит от конкретных условий, в сосуде установится динамическое равновесие между жидкостью и паром. В состоянии равновесия число молекул, переходящих из жидкости в пар, равно числу молекул, переходящих из пара в жидкость за то же время. Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называют насыщенным. Давление насыщенного пара является функцией только его температуры.

Молекулярной диффузией называют явление самопроизвольного взаимного проникновения и перемешивания соприкасающихся газов, жидкостей и даже твердых тел. Молекулярная диффузия обусловлена хаотическим тепловым движением молекул. В смеси газов диффузия возникает в том случае, если концентрация компонентов смеси в различных точках пространства неодинакова. Такую диффузию называют концентрационной. В однородной по температурам и давлениям смеси процесс концентрационной диффузии сопровождается переносом массы вещества из мест с большей концентрацией в места с меньшей его концентрацией и стремится к выравниванию концентраций компонентов смеси.

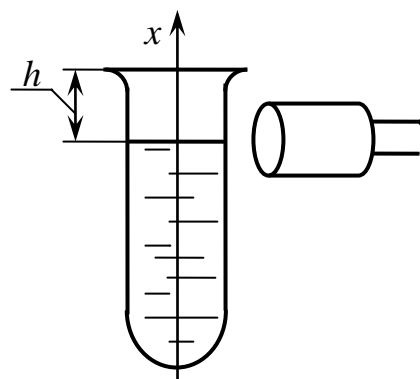


Рис. 5.1. Схема проведения эксперимента

Заполним частично жидкостью открытую вертикально расположенную пробирку (рис. 5.1). Жидкость начнет испаряться. Молекулы жидкости, перешедшие в газообразную фазу, вследствие хаотического теплового движения будут перемешиваться с молекулами воздуха и диффундировать в направлении верхнего открытого конца пробирки. Молекулы воздуха будут диффундировать в направлении, обрат-

ном направлению диффузии молекул пара, то есть к поверхности жидкости. По истечении некоторого времени установится стационарный режим, при котором распределение концентраций компонентов парогазовой смеси над поверхностью жидкости не будет изменяться с течением времени.

Плотность потока массы $j_{\text{п}}$ пара, диффундирующего от поверхности жидкости в направлении оси x , можно определить по закону Фика

$$j_{\text{п}} = -Dm_{0\text{п}} \frac{dn_{\text{п}}}{dx}, \quad (5.1)$$

где D – коэффициент диффузии; $m_{0\text{п}}$ – масса одной молекулы пара; $n_{\text{п}}$ – концентрация молекул пара; $\frac{dn_{\text{п}}}{dx}$ – градиент концентрации молекул пара в направлении оси x .

В формуле (5.1) знак « \rightarrow » указывает на то, что молекулы пара перемещаются в направлении убывания их концентрации.

Будем считать, что пар подчиняется законам идеального газа. В этом случае

$$n_{\text{п}} = \frac{p_{\text{п}}}{kT},$$

где $p_{\text{п}}$ – парциальное давление пара; k – постоянная Больцмана; T – температура.

Подставляя значение $n_{\text{п}}$ в формулу (5.1), получаем

$$j_{\text{п}} = -\frac{Dm_{0\text{п}}}{kT} \frac{dp_{\text{п}}}{dx} = -\frac{DM}{RT} \frac{dp_{\text{п}}}{dx},$$

где M – молярная масса пара; R – молярная газовая постоянная.

Плотность потока массы $j_{\text{ж}}$ испаряющейся жидкости

$$j_{\text{ж}} = \rho_{\text{ж}} v,$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости; v – скорость понижения уровня жидкости в пробирке.

Так как при стационарном режиме $j_{\text{п}} = j_{\text{ж}}$, то

$$-\frac{DM}{RT} \frac{dp_{\text{п}}}{dx} = \rho_{\text{ж}} v. \quad (5.2)$$

Примем допущение, что вблизи поверхности жидкости ее пар является насыщенным. Тогда парциальное давление p'_n пара в этой области

$$p'_n = p_{n,n},$$

где $p_{n,n}$ – давление насыщенного пара при температуре T .

У открытого конца пробирки концентрация молекул пара мала вследствие их рассеивания в воздушной среде. Поэтому примем допущение, что у открытого конца пробирки парциальное давление пара

$$p''_n = 0.$$

Коэффициент диффузии в газовой смеси слабо зависит от концентраций ее компонентов. Пренебрегая зависимостью коэффициента диффузии от состава смеси и учитывая, что при стационарном режиме испарения жидкости $v = \text{const}$, можно заменить производную в формуле (5.2) отношением конечных разностей:

$$\frac{dp_n}{dx} = \frac{p''_n - p'_n}{h} = -\frac{p_{n,n}}{h},$$

где h – расстояние от поверхности жидкости до верхнего конца пробирки.

Подставив значение $\frac{dp_n}{dx}$ в формулу (5.2), выражаем коэффициент диффузии D :

$$D = \frac{\rho_{ж} v h R T}{M p_{n,n}}. \quad (5.3)$$

Молекулы пара могут свободно диффундировать в парогазовую среду. Для молекул воздуха поверхность жидкости является непроницаемой преградой, поэтому концентрация молекул воздуха у поверхности жидкости должна непрерывно увеличиваться. Так как при стационарном режиме распределение концентраций компонентов парогазовой смеси над поверхностью жидкости с течением времени не изменяется, то диффузионный поток молекул воздуха к поверхности жидкости должен компенсироваться конвективным потоком парогазовой смеси, направленным от поверхности жидкости к верхнему открытому концу пробирки. Этот поток называют стефановым потоком.

Зависимость (5.3) является приближенной, так как получена без учета конвективного потока, и, кроме того, при ее выводе были приняты допущения.

5.2. Экспериментальная установка

Исследуемую жидкость наливают в вертикально расположенную пробирку (см. рис. 5.1). Уровень испаряющейся жидкости измеряют с помощью микроскопа с окулярной шкалой. Температуру T жидкости и парогазовой смеси над ее поверхностью считают равной комнатной. При стационарном режиме скорость понижения уровня жидкости в пробирке $v = \text{const}$.

В качестве летучей жидкости в опытах используется этанол (химическая формула C_2H_5OH , молярная масса $M = 46,1 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, плотность $\rho_{ж} = 790$ кг/м³ при температуре $t = 20$ °C).

Давление $p_{н.п}$ насыщенных паров в зависимости от температуры T можно рассчитать по уравнению Антуана

$$\ln p_{н.п} = A - \frac{B}{T + C},$$

где A , B , C – характерные для конкретного вещества постоянные величины.

Для паров этанола в интервале давлений от 10 до 1500 мм рт. ст. [2]

$$\ln p_{н.п} = 18,9119 - \frac{3803,98}{T - 41,68}, \quad (5.4)$$

где $p_{н.п}$ – давление, мм рт. ст. (1 мм рт. ст. = 133,3 Па); T – температура, К.

5.3. Порядок выполнения работы и обработки результатов измерений

5.3.1. Записать перечень приборов и принадлежностей и их характеристики в отчет о лабораторной работе.

5.3.2. При помощи линейки измерить расстояние h от поверхности жидкости в пробирке до ее верхнего края.

5.3.3. Навести микроскоп на мениск жидкости в пробирке и установить резкое изображение мениска. По окулярной шкале микроскопа выполнить отсчет положения верхней кромки мениска и включить секундомер или отметить этот момент времени по часам. Аналогичные измерения выполнять через каждые 5 мин в течение 30–40 мин. Результаты измерений положения верхней кромки мениска x и времени τ записать в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Изменение уровня жидкости в зависимости от времени

τ									
x									

5.3.4. Используя данные табл. 5.1, построить график зависимости $x = f(\tau)$ и по графику рассчитать среднюю скорость v понижения уровня жидкости

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta \tau},$$

где Δx – понижение уровня жидкости за время $\Delta \tau$.

5.3.5. По термометру измерить температуру T в помещении и рассчитать давление насыщенного пара жидкости по формуле (5.4).

5.3.6. Используя справочные данные, результаты измерений и расчетов, найти коэффициент диффузии по формуле (5.3). Полученные данные записать в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Результаты измерений и расчетов

T	$\rho_{ж}$	$p_{н.п}$	h	v	D

5.3.7. Сравнить полученное значение коэффициента диффузии D со справочными данными, приведенными в табл. 3 приложения.

5.3.8. Проанализировать полученные результаты.

5.4. Контрольные вопросы

1. Какой пар называют насыщенным? От каких параметров зависит его давление?
2. Какое явление называют молекулярной диффузией? Чем обусловлено это явление?
3. Какие причины вызывают появление диффузии в смесях газов? Как называют такую диффузию?
4. В каких единицах Международной системы (СИ) выражают коэффициент диффузии?
5. Что означает термин «парциальное давление»?

6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.5. ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

6.1. Теоретические положения

В газах молекулы не связаны или очень слабо связаны друг с другом силами взаимодействия. Молекулы свободно движутся и в результате соударений разлетаются в разные стороны, поэтому газ занимает весь предоставленный ему объем. Жидкость, как и газ, принимает форму того сосуда, в котором она находится. Однако в жидкостях, в отличие от газов, силы взаимодействия между молекулами удерживают их на определенных расстояниях друг от друга. Поэтому жидкости сохраняют свой объем практически неизменным.

При движении жидкостей (как и газов) между их слоями возникают силы внутреннего трения. Модуль силы внутреннего трения можно найти по закону Ньютона:

$$F = \eta \left| \frac{dv}{dz} \right| S ,$$

где η – динамический коэффициент вязкости; $\frac{dv}{dz}$ – градиент скорости в направлении оси z , перпендикулярной к поверхности слоя; S – площадь поверхности слоя.

Коэффициенты вязкости жидкостей существенно больше, чем у газов. При увеличении температуры коэффициенты вязкости жидкостей уменьшаются.

В газах молекулы движутся хаотически. В жидкостях тепловое движение молекул сводится в основном к их колебаниям и скачкообразным переходам из одного места локализации в другое. Такие переходы возможны потому, что в жидкостях имеются свободные места – «дырки», благодаря чему молекулы и могут перемещаться, покидая свое место и занимая одну из соседних «дырок».

На каждую молекулу в жидкости действуют силы притяжения со стороны соседних молекул. Для того чтобы молекула покинула свое место, она должна обладать энергией, достаточной для преодоления силы взаимодействия с ближайшими молекулами. Минимальную энергию, необходимую молекуле для преодоления сил взаимодействия с ближайшими молекулами и скачка в новое положение, называют энергией активации ΔE молекул данной жидкости.

Переходы молекул в жидкостях из одного положения в другое происходят сравнительно редко и на малые расстояния порядка 10^{-10} м. Такой характер движения молекул объясняет то, что коэффициенты диффузии в жидкостях существенно меньше, чем в газах, а коэффициенты вязкости, наоборот, больше. Чем больше температура жидкости, тем больше молекул совершают переходы из одного места в другое, тем меньше время нахождения молекулы во временном положении равновесия между очередными скачками.

Сущность явления внутреннего трения в жидкостях состоит в том, что молекулы, находящиеся под действием внешней силы, совершают скачки преимущественно в направлении этой силы. Чем чаще способны молекулы жидкости перемещаться из одного мгно-

венного положения равновесия в другое, тем меньше вязкость жидкости.

Для большинства жидкостей зависимость динамического коэффициента вязкости η от температуры T в узком интервале температур можно описать формулой Андраде:

$$\eta = A e^{\frac{B}{T}},$$

где A, B – константы, зависящие от свойств конкретной жидкости.

Я.И.Френкель связал константу B с энергией активации молекулярного скачка ΔE :

$$\eta = A e^{\frac{\Delta E}{kT}},$$

где k – постоянная Больцмана.

Прологарифмируем это выражение:

$$\ln \eta = \ln A + \frac{\Delta E}{kT}. \quad (6.1)$$

Из формулы (6.1) видно, что зависимость $\ln \eta = f\left(\frac{1}{T}\right)$ является линейной.

6.2. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка, схема которой изображена на рис.6.1, состоит из вискозиметра 1, пробирки 2 с исследуемой жидкостью, цилиндрического сосуда 3. Пробирка помещена в воду, температуру которой можно изменять с помощью нагревателя. На капилляре вискозиметра нанесены метки m и n , позволяющие определить объем жидкости, проходящей через капилляр.

Если течение жидкости является ламинарным, то динамический коэффициент ее вязкости можно выразить из формулы Пуазейля:

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta p \tau}{8lV}, \quad (6.2)$$

где r – радиус капилляра; Δp – перепад давлений на участке капилляра длиной l ; V – объем жидкости, прошедшей через капилляр за время τ .

Если жидкость опускается вниз по капилляру под действием силы тяжести, то

$$\Delta p = \rho gh ,$$

где ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения; h – высота столба жидкости.

Подставляя значение Δp в формулу (6.2), получаем

$$\eta = \frac{\pi r^4 \rho gh \tau}{8lV} .$$

Предварительно опыты проводят с эталонной жидкостью (водой), коэффициенты вязкости которой при различных температурах известны. Опыты с исследуемой жидкостью проводят с тем же капилляром, при тех же значениях r , h , l , V . В этом случае коэффициент вязкости $\eta_{\text{ж}}$ исследуемой жидкости можно рассчитать по формуле

$$\eta_{\text{ж}} = \eta_{\text{в}} \frac{\rho_{\text{ж}} \tau_{\text{ж}}}{\rho_{\text{в}} \tau_{\text{в}}} , \quad (6.3)$$

где $\eta_{\text{в}}$ – динамический коэффициент вязкости воды; $\rho_{\text{ж}}$, $\rho_{\text{в}}$ – плотности соответственно исследуемой жидкости и воды; $\tau_{\text{ж}}$, $\tau_{\text{в}}$ – время истечения из капилляра соответственно исследуемой жидкости и воды.

При домашней подготовке к выполнению лабораторной работы следует изучить теоретический материал, изложенный в описании к лабораторной работе № 2.3. Определение коэффициента вязкости воздуха.

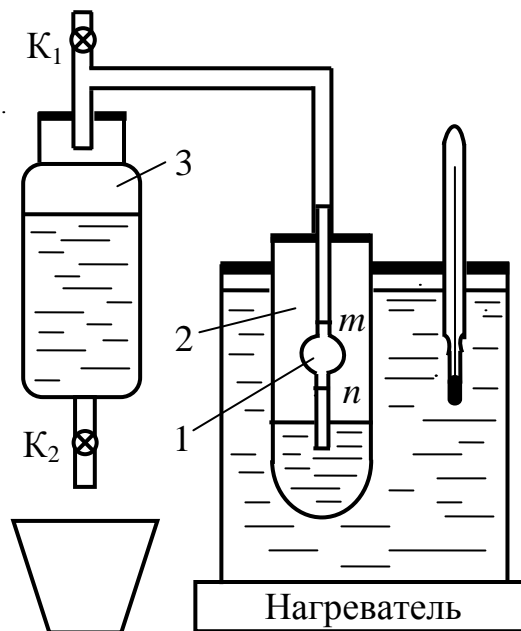


Рис. 6.1. Схема экспериментальной установки

6.3. Порядок выполнения работы и обработки результатов измерений

6.3.1. Ознакомиться с устройством экспериментальной установки, записать перечень приборов и принадлежностей и их характеристики в отчет о лабораторной работе.

6.3.2. При комнатной температуре заполнить капилляр и шарик вискозиметра исследуемой жидкостью немного выше метки m . Для этого, закрыв кран K_1 , открыть кран K_2 так, чтобы вода по каплям вытекала из цилиндрического сосуда. После заполнения вискозиметра исследуемой жидкостью закрыть кран K_2 , открыть кран K_1 и измерить с помощью секундомера время истечения жидкости от метки m до метки n . Выполнить аналогичные операции, постепенно нагревая воду на $5\text{ }^\circ\text{C}$ до $60\text{ }^\circ\text{C}$.

6.3.3. Рассчитать плотность $\rho_{\text{ж}}$ исследуемой жидкости при всех измеренных значениях температуры t по формуле

$$\rho_{\text{ж}} = \frac{\rho_{0\text{ж}}}{1 + \beta t},$$

где $\rho_{0\text{ж}}$ – плотность жидкости при температуре $0\text{ }^\circ\text{C}$; β – коэффициент объемного расширения жидкости (значения $\rho_{0\text{ж}}$ и β приведены в справочных данных к лабораторной установке).

6.3.4. Вычислить значения динамического коэффициента вязкости $\eta_{\text{ж}}$ исследуемой жидкости при всех измеренных значениях температуры по формуле (6.3). Значения $\eta_{\text{в}}$ и $\rho_{\text{в}}$ при различных температурах приведены в табл.4 приложения, а $\tau_{\text{в}}$ – в справочных данных к лабораторной установке.

6.3.5. Рассчитать значения $1/T$ и $\ln \eta_{\text{ж}}$. Результаты всех измерений и расчетов записать в табл.6.1.

Таблица 6.1

Результаты измерений и расчетов

Номер опыта	t	T	$1/T$	$\tau_{\text{ж}}$	$\rho_{\text{ж}}$	$\eta_{\text{ж}}$	$\ln \eta_{\text{ж}}$

6.3.6. Построить график зависимости $\ln \eta_{ж} = f\left(\frac{1}{T}\right)$. На графике выбрать две удаленные точки с координатами соответственно $\ln \eta_{ж 1}$, $1/T_1$ и $\ln \eta_{ж 2}$, $1/T_2$, по координатам этих точек найти значение

$$\frac{\Delta E}{k} = (\ln \eta_{ж 1} - \ln \eta_{ж 2}) \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)^{-1}$$

и затем – значение ΔE энергии активации молекул исследуемой жидкости.

6.4. Контрольные вопросы

1. Что понимают под внутренним трением? Чем обусловлено внутреннее трение в жидкостях с точки зрения молекулярно-кинетических представлений?

2. В каких единицах Международной системы (СИ) выражают динамический коэффициент вязкости?

3. Как зависит динамический коэффициент вязкости жидкости от ее температуры?

4. Какой режим течения жидкости (газа) называют ламинарным? Турбулентным?

7. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.6.* ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ МЕТАЛЛОВ

7.1. Теоретические положения

Термодинамической системой называют совокупность тел, имеющих непосредственное отношение к рассматриваемой термодинамической задаче. Всякая термодинамическая система может находиться в различных состояниях, отличающихся значениями темпера-

* При постановке лабораторных работ № 2.6 и 2.7 использовано оборудование, разработанное НТЦ «Владис» (Московский инженерно-физический институт).

туры, давления, объема, концентрации и т.д. Такие величины, характеризующие состояние системы, называют параметрами ее состояния. Под термодинамическим процессом понимают всякое изменение состояния рассматриваемой термодинамической системы, при котором происходит изменение ее параметров.

Равновесным состоянием термодинамической системы называют такое состояние, при котором все параметры ее состояния при неизменных внешних условиях остаются неизменными сколь угодно долго. В термодинамически неравновесных системах возникают необратимые процессы, которые называют явлениями переноса. К явлениям переноса относят теплопроводность, диффузию, внутреннее трение.

Теплопроводность обусловлена переносом энергии в форме теплоты без переноса вещества и возникает при наличии разности температур, вызванной какими либо внешними причинами. Если тело нагрето неравномерно, то происходит перенос теплоты от его более нагретых участков к менее нагретым.

Перенос теплоты путем теплопроводности подчиняется закону Фурье

$$dQ = -\lambda \frac{dT}{dx} dS d\tau, \quad (7.1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); dQ – количество теплоты, проходящей за время $d\tau$ через плоскую изотермическую поверхность площадью dS , расположенную перпендикулярно оси x , Дж; $\frac{dT}{dx}$ – градиент температуры в направлении оси x , К/м.

Знак « $-$ » в этой формуле указывает на то, что теплота переносится в направлении убывания температуры.

Коэффициент теплопроводности λ является физическим параметром вещества и в общем случае зависит от температуры, давления и рода вещества. Коэффициенты теплопроводности большинства металлов в области температур, близких к 300 К, имеют значения, нахо-

дящиеся в пределах от 20 до 400 Вт/(м·К). Коэффициенты теплопроводности строительных и теплоизоляционных материалов находятся в пределах от 0,02 до 3 Вт/(м·К).

Теплопроводность металлов обусловлена в основном свободными электронами, которые можно рассматривать как своеобразный электронный газ, к которому применимы законы идеальных газов. В результате постоянных соударений свободных электронов с атомами происходит перенос избыточной энергии из более нагретых частей твердого тела в менее нагретые. Этот процесс сопровождается выравниванием температур.

В диэлектриках теплопроводность в основном обусловлена колебаниями атомов, находящихся в узлах кристаллической решетки. Такие колебания распространяются по кристаллу со скоростью звука. Распространение звуковых колебаний в кристалле сопровождается переносом энергии из более нагретых частей твердого тела в менее нагретые и выравниванием температур.

7.2. Экспериментальная установка

Рассмотрим однородную пластину (рис. 7.1), длина которой равна l , а площадь поперечного сечения – s . На левом и правом основаниях пластины поддерживаются постоянные температуры T_1 и T_2

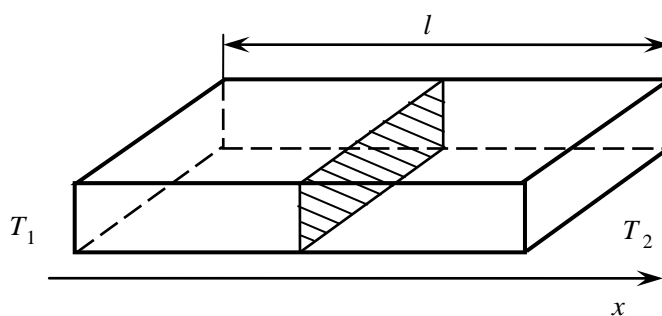


Рис. 7.1. Однородная пластина

($T_1 > T_2$), а температура изменяется только вдоль оси x .

Если пластина имеет постоянный коэффициент теплопроводности λ , то в соответствии с законом Фурье (7.1) за промежуток времени τ через произвольное поперечное сечение пластины будет проходить количество теплоты

$$Q = \lambda \frac{T_1 - T_2}{l} S \tau.$$

Выразим из этой формулы коэффициент теплопроводности λ :

$$\lambda = \frac{Ql}{(T_1 - T_2)S\tau} = \frac{ql}{T_1 - T_2},$$

где $q = \frac{Q}{S\tau}$ – плотность теплового потока, Вт/м².

Как видно из этой формулы, коэффициент теплопроводности можно определить экспериментально, если известны длина пластины l , разность температур на ее концах $(T_1 - T_2)$ и плотность теплового потока q через поперечное сечение пластины.

Измерительный модуль для экспериментального определения коэффициентов теплопроводности металлов изображен на рис. 7.2.

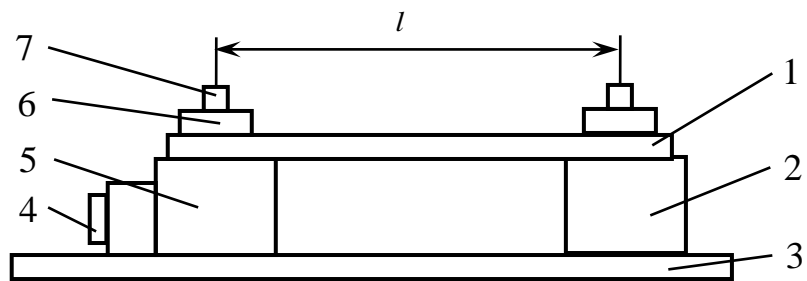


Рис.7.2. Измерительный модуль

Исследуемые образцы металлов в виде пластин 1 закрепляются на нагревателе 5 и радиаторе 2 с помощью винтов 7 и гаек 6. Внутри винтов расположены датчики температуры для измерения температур t_1 и t_2 в двух точках образца, находящихся на расстоянии $l = 65$ мм друг от друга. Радиатор охлаждается установленным внутри него вентилятором. Все элементы модуля установлены на основании 3.

Нагреватель, вентилятор и датчики температуры через разъем 4 посредством кабеля подключаются к разъему 2 измерительного прибора ИСТ-4К, фрагмент передней панели которого изображен на рис. 7.3 (модификации прибора могут иметь незначительные конструктивные различия элементов управления на передней панели). Этот прибор работает от электрической сети напряжением 220 В и включается с помощью тумблера 1. О включении прибора свидетельствует свечение 4-разрядного цифрового индикатора 4. Регуля-

тор напряжения 6 позволяет варьировать напряжение, подаваемое на нагреватель измерительного модуля. Включение нагревателя производится с помощью тумблера 7, при этом автоматически включается вентилятор в радиаторе.

Переключатель 3 позволяет устанавливать режимы измерения температуры t_1 на горячем конце пластины, температуры t_2 на холодном конце пластины, силы тока I_1 в нагревателе и напряжения U_1 на нагревателе. Температура измеряется в градусах Цельсия с разрешением $0,1\text{ }^\circ\text{C}$, сила тока – в миллиамперах, напряжение – в вольтах.

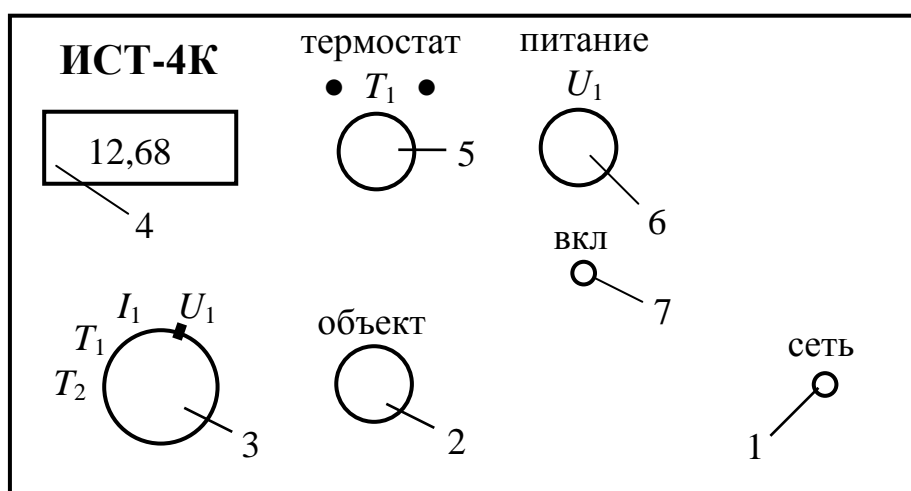


Рис. 7.3. Фрагмент передней панели измерительного прибора ИСТ-4К

Регулятор 5 с индикаторами позволяет устанавливать требуемую температуру нагревателя. Если температура нагревателя меньше заданной, то светится зеленый индикатор, а если температура нагревателя больше заданной, то светится красный индикатор. В установленном режиме светятся оба индикатора.

7.3. Порядок выполнения работы и обработки результатов измерений

7.3.1. Ознакомьтесь с устройством экспериментальной установки, запишите перечень приборов и принадлежностей и их характеристики в отчет о лабораторной работе.

7.3.2. С помощью штангенциркуля измерить толщину h и ширину b металлического образца, выданного преподавателем, рассчитать площадь S его поперечного сечения. Результаты записать в табл. 7.1.

7.3.3. Закрепить исследуемый образец на нагревателе и радиаторе. Подсоединить измерительный модуль к прибору ИСТ-4К с помощью кабеля и подключить прибор к электрической сети.

Таблица 7.1

Исходные данные				
Материал образца	l	h	b	S

7.3.4. Включить нагреватель, установив регулятором 6 напряжение в диапазоне 12–18 В.

7.3.5. Регулятором температуры 5 задать температуру 70 °С. Требуемая температура установится через 15–20 мин, при этом будут гореть и зеленый и красный индикаторы.

7.3.6. Измерить температуры t_1 и t_2 , силу тока I_1 и напряжение U_1 . Повторить измерение этих величин не менее четырех раз с промежутком времени в две минуты.

7.3.7. Для оценки тепловых потерь снять металлический образец и установить на нагреватель алюминиевую калибровочную шайбу диаметром 30 мм и толщиной 5 мм. Не меняя положение регулятора температуры 5, установить регулятором 6 напряжение в диапазоне 5–10 В. Через 5–10 мин измерить температуру t'_1 , силу тока I'_1 и напряжение U'_1 .

7.3.8. Рассчитать мощность нагревателя для всех опытов по формуле

$$P_1 = I_1 U_1.$$

7.3.9. Рассчитать потери мощности в окружающую среду:

$$P'_1 = I'_1 U'_1.$$

7.3.10. Для каждого из опытов определить плотность теплового потока через поперечное сечение образца по формуле

$$q = \frac{P_1 - P'_1}{S}$$

и рассчитать коэффициент теплопроводности:

$$\lambda = \frac{ql}{t_1 - t_2}.$$

Результаты измерений и расчетов записать в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Результаты измерений и расчетов

Номер опыта	$t'_1 = \dots\dots\dots; \quad I'_1 = \dots\dots\dots; \quad U'_1 = \dots\dots\dots; \quad P'_1 = \dots\dots\dots$						
	t_1	t_2	I_1	U_1	P_1	q	λ

7.3.11. Найти среднее арифметическое полученных значений коэффициента теплопроводности.

7.3.12. Проанализировать полученные результаты, сравнив их со справочными данными, приведенными в табл.5 приложения.

7.4. Контрольные вопросы

1. Какое физическое явление называют теплопроводностью?
2. Какому закону подчиняется перенос теплоты путем теплопроводности? Запишите этот закон.
3. В чем различие механизмов теплопроводности в металлах и диэлектриках?

8. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.7. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ДИЭЛЕКТРИКОВ

8.1. Экспериментальная установка

При домашней подготовке следует проработать теоретический материал, изложенный в описании к лабораторной работе № 2.6. Теплопроводность металлов, и ответить на контрольные вопросы к этой работе.

Измерительный модуль для экспериментального определения коэффициентов теплопроводности диэлектриков изображен на рис.8.1. Исследуемые образцы диэлектриков в виде дисков 9 помещают на

нагреватель 3, температура t_1 которого в течение эксперимента поддерживается неизменной. На диск устанавливают калориметр 6, представляющий собой алюминиевый цилиндр, окруженный снаружи теплоизолирующим кожухом. Стержень 5 посредством двух пружин 8 прижимает исследуемый образец к нагревателю, что обеспечивает хороший тепловой контакт между соприкасающимися поверхностями нагревателя, образца и калориметра. Внутри нагревателя и калориметра установлены датчики температуры, позволяющие определять температуры нижней и верхней поверхностей исследуемых образцов.

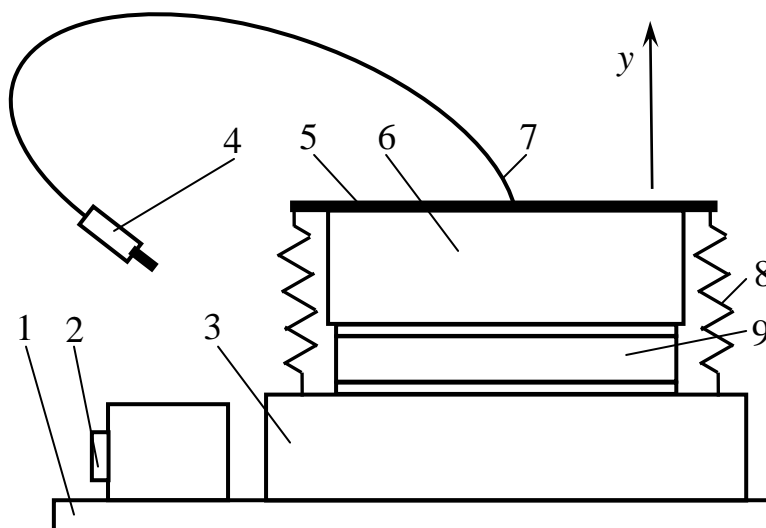


Рис. 8.1. Измерительный модуль

Нагреватель и датчик температуры нагревателя посредством кабеля через разъем 2 подключают к разъему 2 измерительного прибора ИСТ-4К, фрагмент передней панели которого изображен на рис. 8.2 (модификации прибора могут иметь незначительные конструктивные различия элементов управления на передней панели). Датчики температуры калориметра подключают к гнезду 6 измерительного прибора с помощью кабеля 7 и разъема 4.

Измерительный прибор работает от электрической сети напряжением 220 В и включается с помощью тумблера 1. О включении прибора свидетельствует свечение 4-разрядного цифрового индикатора 4. Регулятор напряжения 7 позволит варьировать напряжение, подаваемое на нагреватель измерительного модуля. Включение нагревателя производится с помощью тумблера 8.

Переключатель 3 позволяет устанавливать режимы измерения температуры t_1 на нижней поверхности исследуемого образца, темпе-

ратуры t_2 на его верхней поверхности, силы тока I_1 в нагревателе и напряжения U_1 на нагревателе. Температура измеряется в градусах Цельсия с разрешением $0,1\text{ }^\circ\text{C}$, сила тока – в миллиамперах, напряжение – в вольтах.

Регулятор 5 с индикаторами позволяет устанавливать требуемую температуру нагревателя. Если температура нагревателя меньше заданной, то светится зеленый индикатор, а если температура нагревателя больше заданной, то светится красный индикатор. В установленном режиме светятся оба индикатора.

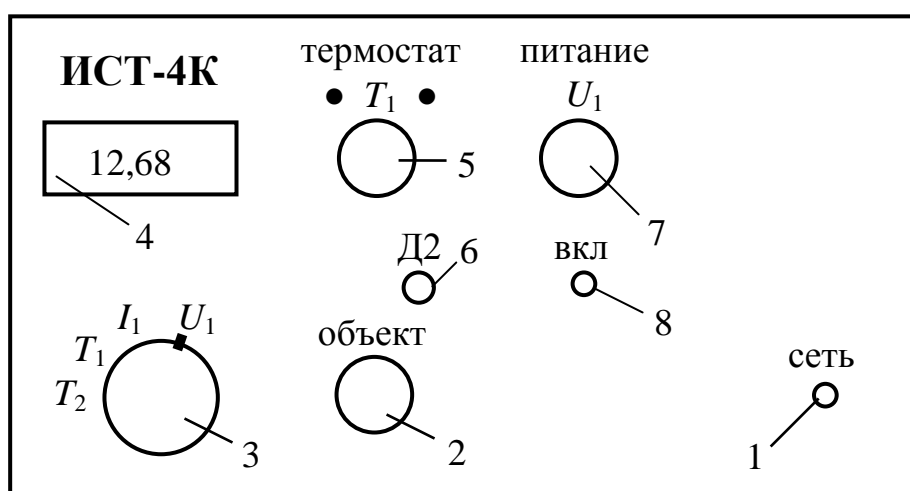


Рис. 8.2. Фрагмент передней панели измерительного прибора ИСТ-4К

На нагреватель устанавливают исследуемый образец, температура которого меньше температуры нагревателя. При соприкосновении образца с нагревателем температура нижней поверхности образца быстро сравнивается с температурой t_1 нагревателя и в дальнейшем не изменяется, а температура t_2 верхней поверхности образца будет сравнительно медленно возрастать с течением времени. Вследствие высокой теплопроводности алюминиевого калориметра он быстро нагревается и его температуру можно считать приближенно равной температуре верхней поверхности образца.

Толщина b образца, имеющего форму диска, намного меньше его диаметра d , поэтому потерями теплоты через боковую поверх-

ность образца можно пренебречь и считать, что его температура изменяется только вдоль оси y .

В соответствии с законом Фурье за бесконечно малый промежуток времени $d\tau$ через поперечное сечение образца площадью S , перпендикулярное оси y , пройдет количество теплоты

$$dQ = -\lambda \frac{dt}{dy} S d\tau, \quad (8.1)$$

где $\frac{dt}{dy}$ – градиент температуры в направлении оси y , К/м.

Если образец имеет постоянный коэффициент теплопроводности λ , то, как показывает теоретический анализ, через некоторое время после начала нагрева температура образца будет изменяться вдоль оси y по линейному закону. Такой режим нагревания называют регулярным. В случае регулярного теплового режима формулу (8.1) можно записать так:

$$dQ = \lambda \frac{t_1 - t_2}{b} S d\tau. \quad (8.2)$$

Если за бесконечно малый промежуток времени $d\tau$ температура верхней поверхности образца изменится на бесконечно малую величину dt_2 , то калориметр при этом получит количество теплоты

$$dQ = C dt_2, \quad (8.3)$$

где C – теплоемкость калориметра, Дж/К.

Введем обозначение для разности температур:

$$t_1 - t_2 = \vartheta.$$

Используя это обозначение, формулы (8.2) и (8.3) можно записать так:

$$dQ = \lambda \frac{\vartheta}{b} S d\tau;$$

$$dQ = -C d\vartheta.$$

Приравняем правые части последних двух выражений, выполним деление переменных и проинтегрируем:

$$\int_{\tau_1}^{\tau_2} \lambda \frac{S}{bC} d\tau = \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} - \frac{d\vartheta}{\vartheta}.$$

После интегрирования выразим коэффициент теплопроводности:

$$\lambda = \frac{bC}{S(\tau_2 - \tau_1)} \ln \frac{\vartheta_1}{\vartheta_2}, \quad (8.4)$$

где ϑ_1, ϑ_2 – разность температур $t_1 - t_2$ нижней и верхней поверхностей образца соответственно в моменты времени τ_1 и τ_2 .

8.2. Порядок выполнения работы и обработки результатов измерений

8.2.1. Ознакомиться с устройством экспериментальной установки, записать перечень приборов и принадлежностей и их характеристики в отчет о лабораторной работе.

8.2.2. С помощью штангенциркуля измерить толщину b и диаметр d образца диэлектрика, выданного преподавателем, рассчитать площадь S его поперечного сечения. Результаты записать в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Исходные данные

Материал образца	b	d	S

8.2.3. Подсоединить нагреватель, датчики температуры нагревателя и калориметра к измерительному прибору ИСТ-4К и подключить прибор к электрической сети.

8.2.4. Включить нагреватель с помощью тумблера 8 и установить регулятором 7 напряжение в диапазоне 12–18 В.

8.2.5. Регулятором температуры 5 задать температуру 60–70 °С. Требуемая температура установится через 15–20 мин, при этом будут гореть и зеленый и красный индикаторы.

8.2.6. После того, как установится заданная температура, поместить исследуемый образец на нагреватель. На образец установить калориметр и прижать образец к нагревателю посредством стержня с пружинами.

8.2.7. Выполнить измерение температур нижней t_1 верхней t_2 поверхностей образца с промежутком времени 60 с. Полученные данные записать в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Результаты измерений и расчетов

$\tau, \text{с}$	0	60	120	180	240	300	360	420	480	540
$t_1, \text{°C}$										
$t_2, \text{°C}$										
$\vartheta, \text{°C}$										
$\ln \vartheta$										

8.2.8. Рассчитать для всех опытов разность температур $t_1 - t_2 = \vartheta$ и $\ln \vartheta$. Результаты записать в табл. 8.2.

8.2.9. Построить график зависимости $\ln \vartheta = f(\tau)$. Выделить на графике (рис. 8.3) линейный участок и, используя координаты точек A и B , лежащих на его концах, рассчитать коэффициент теплопроводности образца по формуле (8.4). При малой толщине образца и относительно высоком значении коэффициента его теплопроводности начало прямолинейного участка может находиться на оси ординат.

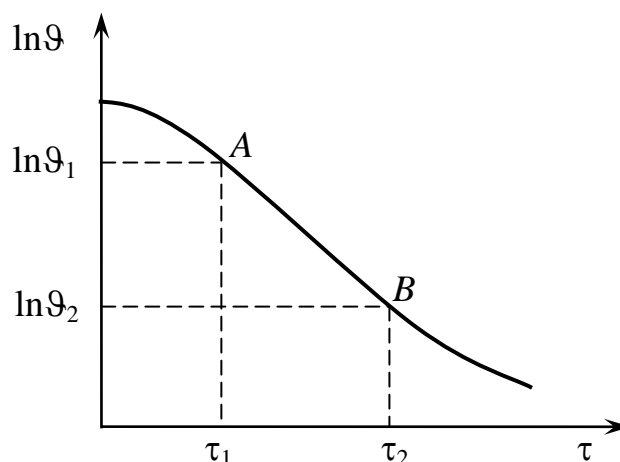


Рис. 8.3. Зависимость $\ln \vartheta = f(\tau)$

8.2.10. Проанализировать полученный результат, сравнив его со справочными данными, приведенными в табл.6 приложения.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Коэффициенты Стьюдента

Число измерений	Доверительная вероятность α				
	0,90	0,95	0,98	0,99	0,999
3	2,9	4,3	7,0	9,9	32
4	2,4	3,2	4,5	5,8	13
5	2,1	2,8	3,7	4,6	8,7
6	2,0	2,6	3,4	4,0	6,9
7	1,9	2,4	3,1	3,7	6,0
8	1,9	2,4	3,0	3,5	5,4
9	1,9	2,3	2,9	3,4	5,0
10	1,8	2,3	2,8	3,3	4,8
11	1,8	2,2	2,8	3,2	4,6
12	1,8	2,2	2,7	3,1	4,5
∞	1,6	2,0	2,3	2,6	3,3

Таблица 2

Значения плотности ρ , эффективного диаметра d молекул и динамического коэффициента вязкости η некоторых газов при нормальных условиях

Вещество	ρ , кг/м ³	$d \cdot 10^9$, м	$\eta \cdot 10^5$, Па·с
Азот	1,25	0,37	1,67
Воздух	1,29	–	1,72
Кислород	1,43	0,35	1,92

Таблица 3

Значения коэффициента диффузии D паров этанола (C₂H₅OH) в воздухе при различных температурах t и давлении $p = 1,01 \cdot 10^5$ Па

t , °C	14	16	18	20	22	24	26
$D \cdot 10^5$, м ² /с	1,15	1,16	1,18	1,19	1,20	1,22	1,23

Таблица 4

Значения плотности ρ и динамического коэффициента вязкости η воды при различных температурах t и давлении $p = 1,01 \cdot 10^5$ Па

t , °C	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
ρ , кг/м ³	998,2	997,1	995,7	994,1	992,2	990,2	988,1	985,7	983,1	980,5	977,8
$\eta \cdot 10^3$, Па·с	1,004	0,894	0,801	0,722	0,653	0,599	0,549	0,506	0,470	0,435	0,406

Таблица 5

Коэффициенты теплопроводности некоторых металлов

Вещество	Алюминий	Латунь	Бронза	Сталь
λ , Вт/(м·К)	160 – 210	70 – 120	60 – 80	40 – 48

Таблица 6

Коэффициенты теплопроводности некоторых диэлектриков

Вещество	Стекло	Картон	Пенопласт	Текстолит
λ , Вт/(м·К)	0,8 – 1,2	0,14 – 0,35	0,04 – 0,05	0,2 – 0,4

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курс физики: учебник для вузов. В 2 т. Т.2. / под ред. В.Н.Лозовского. – 4-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2006. – 592 с.
2. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: справочное пособие / пер. с англ.; под ред. В.И.Соколова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1982. – 592 с.
3. Савельев И.В. Курс общей физики: учеб. пособие: в 3 т. Т. 1. Механика. Молекулярная физика. – 8-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2007. – 432 с.
4. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. – 16-е изд., стер. – М.: Академия, 2008. – 560 с.

Учебное издание

Аникин Андрей Иванович

**СВОЙСТВА ГАЗОВ.
СВОЙСТВА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ**

Лабораторный практикум