

Молекулярная физика и термодинамика

*Рабочая тетрадь
для выполнения лабораторных работ
студентами физического факультета*

2010

УДК 539.19(075.8)+536.7(075.8)
ББК 22.36я73+22.317.1я73
М75

Авторы: доцент кафедры общей физики и астрономии УО «ВГУ им. П.М. Машерова», кандидат технических наук **В.П. Яковлев**; доцент кафедры общей физики и астрономии УО «ВГУ им. П.М. Машерова», кандидат физико-математических наук **Ф.П. Коршиков**; доцент кафедры экспериментальной физики УО «МГПУ им. М. Танка», кандидат физико-математических наук **С.Н. Пастушонок**; преподаватель кафедры теоретической физики УО «ВГУ им. П.М. Машерова» **Ю.А. Шиёнок**

Рецензент:
доцент кафедры инженерной физики УО «ВГУ им. П.М. Машерова»,
кандидат технических наук *В.И. Жидкевич*

Рабочая тетрадь подготовлена в соответствии с учебной программой по дисциплине «Молекулярная физика и термодинамика» для специальности 1-31 04 01 «Физика (по направлениям)». Содержит теорию, методику выполнения, контрольные вопросы, материалы для самостоятельной работы, справочные материалы и список литературы. Издание предназначено для студентов физических специальностей.

УДК 539.19(075.8)+536.7(075.8)
ББК 22.36я73+22.317.1я73

© Яковлев В.П. [и др.], 2010
© УО «ВГУ им. П.М. Машерова», 2010

**Сводная таблица
учета выполнения и защиты лабораторных работ**

студента _____ группы ____ курса физического факультета

(Ф. И. О. студента)

№ л/р	Название лабораторной работы	Дата выполнения	Роспись преподавателя о выполнении и оформлении л/р	Оценка и роспись преподавателя о защите л/р
1	Изучение основных газовых законов			
2	Определение молярной газовой постоянной и средней квадратичной скорости молекул			
3	Исследование барометрической формулы и распределения частиц в поле силы тяжести			
4	Определение отношения молярных теплоемкостей воздуха C_p/C_v методом Рухардта			
5	Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса			
6	Изучение зависимости коэффициента вязкости жидкости от температуры			
7	Определение удельной теплоты парообразования воды			
8	Измерение коэффициента поверхностного натяжения жидкости			
9	Определение линейной скорости роста кристаллов			
10	Определение коэффициента линейного термического расширения (КЛТР) металлов			
11	Изучение явления теплоемкости			
12	Определение температурной зависимости удельной теплоемкости металлов методом охлаждения			

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	5
Лабораторная работа № 1. Изучение основных газовых законов	11
Лабораторная работа № 2. Определение молярной газовой постоянной и средней квадратичной скорости молекул воздуха	15
Лабораторная работа № 3. Исследование барометрической формулы и распределения частиц в поле силы тяжести	19
Лабораторная работа № 4. Определение отношения молярных теплоемкостей воздуха C_p/C_v методом Рухардта	24
Лабораторная работа № 5. Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса	29
Лабораторная работа № 6. Изучение зависимости коэффициента вязкости жидкости от температуры	34
Лабораторная работа № 7. Определение удельной теплоты парообразования воды	39
Лабораторная работа № 8. Измерение коэффициента поверхностного натяжения жидкости	43
Лабораторная работа № 9. Определение линейной скорости роста кристаллов	47
Лабораторная работа № 10. Определение коэффициента линейного термического расширения (КЛТР) металлов	51
Лабораторная работа № 11. Изучение явления теплоемкости	55
Лабораторная работа № 12. Определение температурной зависимости удельной теплоемкости металлов методом охлаждения	62
ПРИЛОЖЕНИЕ	68
ЛИТЕРАТУРА	73

ВВЕДЕНИЕ

Инструкция №19

по охране труда для студентов, занимающихся в лабораториях
физического факультета

I. Общие требования безопасности

1.1. К работе в лабораториях физического факультета допускаются студенты, которые получили инструктаж преподавателя и хорошо усвоили требования безопасности. Студенты должны выполнять работу только в присутствии проводящего занятия преподавателя или лаборанта и только под его руководством.

1.2. Допуск посторонних лиц в лабораторию физики в момент проведения занятий разрешается только преподавателем физики.

1.3. Соблюдение требований настоящей инструкции обязательно для студентов, работающих в лаборатории физики.

1.4. Во время проведения работы на студентов могут воздействовать следующие опасные и вредные факторы:

- колющие и режущие инструменты;
- высокая температура;
- электрическое напряжение;
- ионизирующие излучения;
- лазерное излучение;
- химические вещества;
- поля высокой напряженности;
- возможен взрыв вакуумных приборов или приборов, находящихся под давлением.

ПОМНИТЕ, ЧТО ОПАСНО ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ И ЖИЗНИ ЧЕЛОВЕКА НАПРЯЖЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА ЛЮБОЙ ВЕЛИЧИНЫ, ЕСЛИ НЕ СОБЛЮДАТЬ ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ.

1.5. При обнаружении каких-либо неисправностей в приборах электросети, повреждений лабораторной посуды, электроизоляции проводов надо прекратить работу, отключить электросеть и предупредить преподавателя.

1.6. В случае получения травмы, плохом самочувствии студенты должны сообщить об этом преподавателю.

1.7. Во время работы в лаборатории необходимо проявлять осторожность, соблюдать порядок и гигиену на рабочем месте.

1.8. Поспешность и небрежность в работе, нарушение или невыполнение требований данной инструкции могут привести к несчастному случаю, травме.

II. Требования безопасности перед началом работы

Перед началом работы студент обязан:

2.1. Изучить по пособию последовательность проведения работы.

2.2. Убедиться (при внешнем осмотре), что все приборы, провода, клеммы, защитное заземление находятся в исправном состоянии; Эксплуатация оборудования с неисправными сетевыми вилками, без защитного заземления, без крышек корпуса и т.п. запрещается.

2.3. Изучить опасные факторы, возникающие при проведении работ в лаборатории и способы их предупреждения.

2.4. Освободить рабочие места от всех ненужных для работы предметов.

2.5. Ознакомиться с оборудованием и методическими рекомендациями по выполнению предстоящей работы.

2.6. Соблюдать образцовую дисциплину и тишину, не заниматься ничем посторонним.

2.7. Выполнять все требования преподавателя и лаборанта, вытекающие из хода учебного процесса. Бережно относиться к оборудованию, инструментам, приспособлениям и прочим учебным пособиям.

III. Требования безопасности при выполнении работы

При выполнении работы студент сталкивается со следующими видами работ:

1. Монтаж лабораторных установок.
2. Демонстрация физических экспериментов.
3. Работа с химическими веществами.
4. Научно-исследовательская работа.
5. Работа с лазером.
6. Пайка и электромонтажные работы.
7. Работа на ПЭВМ.
8. Вспомогательные работы.

При выполнении всех видов работ студент обязан соблюдать меры безопасности, оговоренные ниже.

1. При подготовке оборудования к работе необходимо проверить его исправность. Ввод в действие новых приборов произвести согласно инструкции по эксплуатации. Эксплуатация приборов, имеющих знак "!", разрешается только после детального ознакомления с инструкцией по эксплуатации. В ходе работы избегать перегрузок приборов и следить за их исправностью. Приборы, имеющие клеммы, обозначенные знаком "⊥" должны быть заземлены.

2. При монтаже лабораторных установок оборудование располагать согласно схеме. Перед тем, как приступить к выполнению работы, тщательно изучите ее описание, уясните ход выполнения, выясните наиболее опасные места установки, изучите правила безопасного проведения. Соединительные провода должны иметь исправную изоляцию. Сборку электрических цепей, монтаж и ремонт электрических устройств производить только при отключенном источнике питания. Не включать источники электропитания без проверки цепей преподавателем или лаборантом.

3. Проверять наличие напряжения на источнике питания или других частях электроустановки разрешается с помощью измерителя напряжения. При сборке электрической цепи провода располагать аккуратно, а концы плотно зажимать клеммами.

4. Наблюдения, измерения и опыты производить, соблюдая осторожность, для того чтобы:

- случайно не прикоснуться к оголенным проводам или токоведущим частям, находящимся под напряжением;
- избежать поражения осколками стекла в результате возможного взрыва при работе с вакуумными приборами или приборами, находящимися под давлением;
- предотвратить утечку химических, радиоактивных и огнеопасных веществ;
- свести к минимуму ионизирующее и лазерное облучение, действие электрических и магнитных полей на людей.

5. При проведении демонстрационных опытов необходимо выполнять все требования п. 2-5. Опыты должны отвечать требованиям пожарной безопасности. Пути эвакуации людей должны быть свободным, их не должны пересекать никакие проводящие шнуры, проходы должны быть свободны от оборудования, мебели и одежды. Запрещается держать на рабочем месте предметы, не требующиеся

при выполнении задания. Число студентов не должно превышать число оборудованных мест.

6. При работе с химическими веществами необходимо соблюдать правила:

- Работы с ядовитыми, едкими и т.п. веществами проводить в вытяжном шкафу, надев спецодежду, исключив попадание веществ на кожу, слизистые оболочки или внутрь организма.
- По окончании работ тщательно вымыть руки. Запрещается выливать ядовитые вещества (например, ртуть) в канализационную сеть. Их необходимо сдавать лаборантам по окончании работы.

7. При проведении научно-исследовательской работы необходимо соблюдать п.п. 1-11 настоящей инструкции. Работать на специальном оборудовании можно только тщательно изучив инструкцию по эксплуатации, технике безопасности и получив допуск к работе от ответственного за технику безопасности в лаборатории.

8. При работе с лазером следует располагать лазер и облучаемые объекты так, чтобы избежать попадания прямого, отраженного или преломленного луча в глаза или на незащищенные участки кожи.

9. При проведении пайки электрическим паяльником свинцовосодержащими припоями необходимо помнить, что свинец относится к сильнотоксичным веществам. Поэтому пайку лучше проводить в помещении, оборудованном вытяжной вентиляцией, а при невыполнении этого условия чаще проветривать помещение. При пайке необходимо избегать ожогов паяльником или каплями припоя. По окончании работ необходимо убрать припой в место исключаящее испарение свинца (плотно закрывающаяся коробка) и тщательно вымыть руки.

10. При работе на ПЭВМ необходимо соблюдать правила гигиены зрения и эл. безопасности. Запрещается работать у монитора без перерыва более 2 часов. Периодически необходимо делать перерывы в работе для отдыха глаз.

11. При выполнении вспомогательных работ необходимо получить дополнительный инструктаж по ТБ, соответственно с видом работ. Например, ТБ при переноске приборов, при подготовке к зимнему сезону и т.п.

СТУДЕНТАМ ЗАПРЕЩАЕТСЯ

- Включать в розетку собранную по схеме электрическую цепь без разрешения преподавателя или лаборанта. В случае необходимости каких-либо присоединений в цепи, включать ее можно вторично после просмотра преподавателем или лаборантом.
- Переносить приборы без разрешения преподавателя с одного стола на другой.
- Включать и выключать рубильники группового щита (за исключением оказания помощи пострадавшему от электрического тока).
- Делать какие-либо переключения в схеме при включенном напряжении.
- Касаться руками неизолированных проводов и зажимов в схеме, находящейся в данный момент под напряжением.
- Снимать или перевешивать запрещающие или предупреждающие плакаты.
- Категорически запрещается гасить горящую электропроводку находящуюся под напряжением химически пенным огнетушителем ОХП.
- При попадании человека под напряжение немедленно обесточить всю лабораторию (в каждой учебной лаборатории физического факультета установлены УЗОШ, которые обеспечивают отключение всей лаборатории от электрического тока).

- Если по каким-то причинам не удалось отключить электрическую сеть, то необходимо оттащить пострадавшего за одежду в сторону от устройства, находящегося под напряжением.
- При возникновении аварийной ситуации строго выполнять все указания руководителя, проводящего занятия.

IV. Требования безопасности в аварийных ситуациях

К аварийным ситуациям могут привести:

- отсутствие должной организованности, требовательности и контроля за состоянием охраны труда;
- несоответствие нормам и правилам ТБ рабочих мест и оборудования, на котором работают;
- несоблюдение правил ТБ или их незнание;
- работа на неисправном оборудовании, работа без защитных средств.

При возникновении аварийных ситуаций студент должен немедленно отключить электропитание, воду, газ и сообщить об этом преподавателю или лаборанту, оказать помощь пострадавшему в соответствии с инструкцией №2 по оказанию первой помощи, при необходимости принять меры по срочной эвакуации. После чего, под руководством ответственных лиц, должны быть приняты меры по устранению аварии и ее последствий с привлечением соответствующих служб.

V. Требования безопасности по окончании работы

По окончании работы необходимо проверить оборудование, о неисправных приборах сообщить лаборанту или преподавателю. Сдать химические реактивы, радиоактивные препараты лаборанту. Дождаться пока нагревающиеся приборы (паяльники, муфельные печи и т.п.) остынут до безопасной температуры. Перед уходом выключить электропитание, воду.

ГРАФ-СХЕМА ПОДСЧЁТА ПОГРЕШНОСТЕЙ

1. Подсчитать среднее арифметическое $\langle x \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$.
2. Определить случайные отклонения $\Delta x = x_i - \langle x \rangle$.
3. Подсчитать случайную погрешность (при $P=0,95$):

$$\Delta x_{сл} = t_{n,P} \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \Delta x_i^2}.$$

где $t_{n,P}$ – коэффициент Стьюдента (табл. 1.1).

4. Определить приборную погрешность $\Delta x_{пр}$ по формулам:

$$\Delta x_{пр} = \frac{\lambda_P}{3,0} \delta = \frac{\lambda_P}{3,0} \frac{k \cdot x_{\max}}{100\%},$$

где δ – предельная абсолютная погрешность прибора, k – класс точности прибора, λ_P – коэффициент, который зависит от доверительной вероятности P (табл. 12 приложения). При $P = 0,95$ $\lambda_P = 2,0$.

5. Определить погрешность округления $\Delta x_{окр}$ ($P = 0,95$)

$$\Delta x_{окр} = P \frac{h}{2},$$

где h – интервал округления. Если измерение производится с точностью до целого деления, то интервал округления равен цене деления прибора.

6. Определить полную погрешность прямого измерения:

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_{сл}^2 + \Delta x_{пр}^2 + \Delta x_{окр}^2}.$$

7. Вычислить относительную погрешность прямого измерения:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{\langle x \rangle} 100\% = \sqrt{\varepsilon_{сл}^2 + \varepsilon_{пр}^2 + \varepsilon_{окр}^2}.$$

8. Записать окончательный результат в виде:

$$x = (\langle x \rangle \pm \Delta x); \quad \varepsilon.$$

Расчёт погрешностей по приведенной схеме проводится для каждой физической величины, измеренной прямым методом.

9. Вычислить абсолютную и относительную погрешности косвенных измерений по формулам:

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta y}{y} = \sqrt{\sum_{k=1}^N \left(\frac{1}{y} \frac{\partial y}{\partial x_k} \Delta x_k \right)^2} = \sqrt{\sum_{k=1}^N \left(\frac{\partial \ln y}{\partial x_k} \Delta x_k \right)^2}, \quad \Delta y = \varepsilon_y \cdot y$$

или

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{k=1}^N \left(\frac{\partial y}{\partial x_k} \Delta x_k \right)^2}, \quad \varepsilon_y = \Delta y / y.$$

10. Окончательный результат записать в виде:

$$y = (y_{изм} \pm \Delta y); \quad \varepsilon_y.$$

ПРАВИЛА ПОСТРОЕНИЯ ГРАФИКОВ

1. Графики строят на миллиметровой бумаге. Размер бумаги определяется интервалом измеряемых величин и выбранным для них масштабом.

2. На оси ординат откладывают значение функции, по оси абсцисс – значение аргумента.

3. На каждой из осей приводят только тот интервал изменения соответствующей физической величины, в котором велось исследование.

4. Масштаб графика выбирают не произвольно. Он определяется абсолютными погрешностями тех величин, которые откладываются по осям. Масштабы на каждой из осей выбирают независимо друг от друга.

5. Шкалы на осях, как правило, наносят в виде равноотстоящих чисел.

6. На осях указывают обозначения и единицы измерения соответствующих физических величин.

7. На координатных осях численные значения величин не указывают, а только проводят пунктирные линии до пересечения.

8. Точки на графике наносят и обводят кружком (треугольником и т.д.).

9. Кривую по нанесённым точкам проводят карандашом плавно, без изломов и перегибов, так, чтобы она располагалась возможно ближе ко всем точкам, и по обе стороны оказывалось приблизительно равное их количество. Если на одном графике строят несколько кривых, то используют различные линии: сплошные, штриховые и т.д.

10. Каждый график подписывают; в подписи отражается его основное содержание, объясняются все приведённые кривые.

ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЁТОВ

В отчётах лабораторных работ указывают:

1. номер и название работы;
2. цель работы;
3. схематический рисунок установки, схемы, чертежи с обозначениями отдельных элементов и приборов, пояснения этих обозначений. Для электроизмерительных приборов указывают название, систему, класс точности, предельное значение измеряемой величины, цену деления шкалы;
4. расчётные формулы (для искомых величин и погрешностей) с пояснениями обозначений;
5. таблицы с данными, полученными в эксперименте. В таблицах указывают обозначение и единицу измерения каждой физической величины. В случае отсутствия каких-либо данных ставят прочерк. Если числовые значения какой-либо физической величины имеют общий множитель, например, вида $10^{\pm n}$, то в таблицу удобно записывать не саму величину, а уменьшенную или увеличенную в $10^{\pm n}$ раз. Показания измерительных приборов часто удобно сначала записывать в делениях шкалы, а в соседнем столбце – в единицах измеряемой величины.
6. расчёт искомой величины по средним значениям прямых измерений величин, входящих в расчётную формулу;
7. расчёт погрешностей;
8. графики;
9. окончательный результат измерений;
10. выводы и замечания.

Лабораторная работа №1

Изучение основных газовых законов

Цель работы: изучить основные газовые законы, построить графики зависимости $p = f(T)$ и $pV = f(T)$ для воздуха и проанализировать эти графики.

Оборудование: колба с газом (воздухом), трубка-манометр с закрытым концом, водяной манометр, термостат, контактный и контрольный термометры, барометр.

Теория работы и описание установки.

Состояние определенной массы газа принято характеризовать физическими параметрами: давлением p , объемом V и температурой T . Изменение состояния газа, которое сопровождается изменением всех или нескольких из этих параметров, называется газовым процессом. Поведение газов в этих процессах подчиняется определенным газовым законам.

Для данной массы идеального газа:

при изотермическом процессе ($T = \text{const}$) $pV = \text{const};$

при изохорном процессе ($V = \text{const}$) $\frac{p}{T} = \text{const};$

при изобарном процессе ($p = \text{const}$) $\frac{V}{T} = \text{const}.$

В равных объемах любого газа при одинаковых давлениях и температурах содержится одинаковое количество молекул (закон Авогадро), а при нормальных условиях оно равно $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$.

Давление смеси газов равно сумме парциальных давлений ее компонентов (закон Дальтона):

$$p = \sum p_i.$$

Если одновременно изменяются все три параметра газа, то при постоянной массе газа ($m = \text{const}$)

$$\frac{pV}{T} = \text{const}. \quad (\text{уравнение Клапейрона})$$

Для произвольной массы газа:

$$pV = \frac{m}{M} RT, \quad (\text{уравнение Клапейрона-Менделеева})$$

где m – масса газа, M – его молярная масса, R – универсальная газовая постоянная.

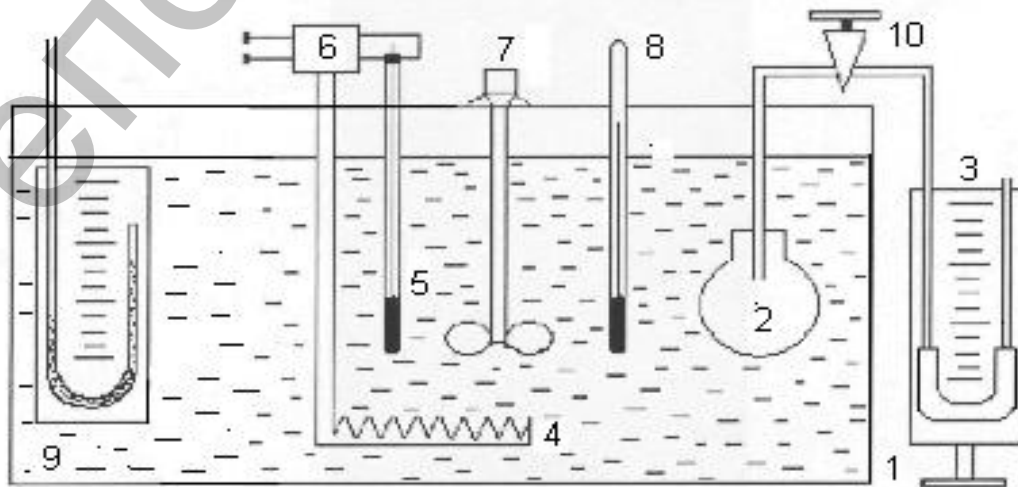


Рис. 1.

В данной работе предлагается лабораторным путем построить графики зависимости $p = f(T)$ при $V = \text{const}$ и $pV = f(T)$, т.е. экспериментально проверить уравнение изохорного процесса и уравнение Клапейрона-Менделеева.

В работе используется установка (рис.1), которая состоит из термостата 1, внутри которого находится стеклянная колба 2 с воздухом и трубка-манометр с закрытым концом 9. Системой трубок колба с воздухом 2 соединена с водяным манометром 3. Вода в термостате нагревается с помощью электрического нагревателя 4. Для этого термостат включается в электрическую сеть с напряжением 220 В.

Для установления необходимой температуры в термостате используется контактный термометр 5, который соединен с электромагнитным реле 6.

Контактный термометр (рис. 2) состоит из магнитной головки 1, термометра 2, ползунка 3, который может скользить по винтовому стержню, контакта 4 в виде тонкого проводка, соединенного с ползунком, и контакта 5, которым является столбик ртути термометра.

Выводы 6 этих контактов находятся в головке термометра. Если контакт 4 не дотрагивается до столбика ртути, то контактное реле, с которым соединена спираль нагревателя, находится в таком положении, при котором нагреватель включен, и температура жидкости в сосуде повышается. Если столбик ртути поднимается выше и дотрагивается до контакта 4, реле отключает нагреватель. Для того, чтобы провести нагревание дальше, необходимо поворотом магнитной головки 1 по часовой стрелке поднять ползунок 3, а вместе с ним и контакт 4 так, чтобы он не дотрагивался до столбика ртути. Реле снова включает нагреватель, температура повышается, столбик ртути поднимается до соприкосновения с контактом 4, и нагреватель снова отключается. Таким образом, при помощи контактного термометра можно регулировать и поддерживать постоянную температуру жидкости в термостате.

Вода в термостате (рис. 1) перемешивается при помощи электрической мешалки 7. Температура контролируется контрольным термометром 8. При нагревании воздуха в колбе 2 его объем и давление будут меняться. Но если перемещать подвижное правое колено манометра 3, можно добиться такого положения, когда уровень жидкости в неподвижном левом колене манометра будет при разных температурах на одном и том же делении шкалы, т.е. объем воздуха в колбе 2 можно поддерживать одинаковым при разных температурах. Давление в колбе 2 можно определить по формуле:

$$p_k = p_0 + \rho gH,$$

где H – разность уровней жидкости в трубках открытого манометра, p_0 – атмосферное давление, ρ – плотность жидкости.

Таким образом, получив в колбе несколько значений давления p_k при разных значениях температуры T воздуха в ней, можно построить график зависимости $p_k = f(T)$ и сравнить его с теоретическим.

Для экспериментальной проверки уравнения Клапейрона-Менделеева в работе используется манометрическая стеклянная трубка 9, один конец которой закрыт, и в нем над жидкостью находится столбик воздуха. При нагревании воды

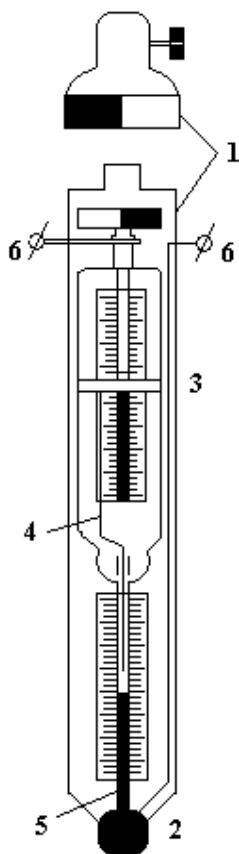


Рис. 2.

в термостате нагревается и воздух в трубке 9, что приводит к изменению разности уровней жидкости в закрытом манометре. Давление, под которым находится воздух в закрытом колене манометра, будет равно:

$$p_m = p_0 \pm \rho gh,$$

где h – разность уровней жидкости в манометрической трубке.

Получив несколько значений давления воздуха в манометрической трубке при разных температурах, можно построить график $pV = f(T)$, где V – объем воздуха в манометрической трубке, и сравнить его с теоретическим:

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (1)$$

Объем воздуха в закрытом колене манометрической трубки можно определить по формуле:

$$V = Sl,$$

где l – длина столбика воздуха, S – площадь поперечного сечения трубки.

Если учесть, что площадь поперечного сечения трубки S меняется незначительно, то уравнение (1) можно представить следующим образом:

$$p_m l = \frac{mRT}{MS}$$

и построить график $p_m l = f(T)$. Очевидно, что этот график будет иметь такой же вид, как и график $p_m V = f(T)$, который отображает уравнение Клапейрона-Менделеева.

Порядок выполнения работы

1. Определить по барометру атмосферное давление p_0 .
2. Открыть кран 10 так, чтобы давление в колбе 2 и в манометре 3 было одинаковым и равнялось атмосферному давлению.
3. Путем перемещения трубки подвижного колена манометра установить уровень жидкости в неподвижном колене на нулевую отметку.
4. Измерить длину воздушного столба l в манометрической трубке 9 и разность уровней жидкости h .
5. Измерить начальную температуру на термометре T_1 .
6. Включить термостат и снять необходимые показания l , h , H , при разных температурах (не менее 5 измерений).
7. Результаты измерений записать в таблицу (плотность воды в зависимости от температуры указана в приложении):

№ п/п	p_0 , Па	T , К	ρ , кг/м ³	p_k , Па	H , м	h , м	l , м	p_m , Па	$p_m l$, Па·м
1									
2									
3									
4									
5									

7. Рассчитать давление воздуха в колбе по формуле $p_k = p_0 + \rho gH$ и в манометрической трубке по формуле $p_m = p_0 + \rho gh$.

Вычисления:

$$p_{к1} =$$

$$p_{м1} =$$

$$p_{к2} =$$

$$p_{м2} =$$

$$p_{к3} =$$

$$p_{м3} =$$

$$p_{к4} =$$

$$p_{м4} =$$

$$p_{к5} =$$

$$p_{м5} =$$

8. Построить графики зависимости $p_k = f(T)$ при $V = \text{const}$ (рис.1) и $p_m l = f(T)$ (рис.2), проанализировать их.

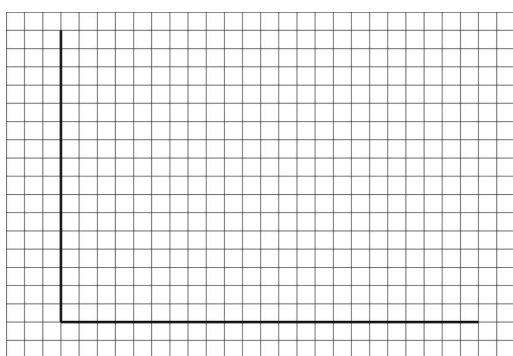


Рис.1

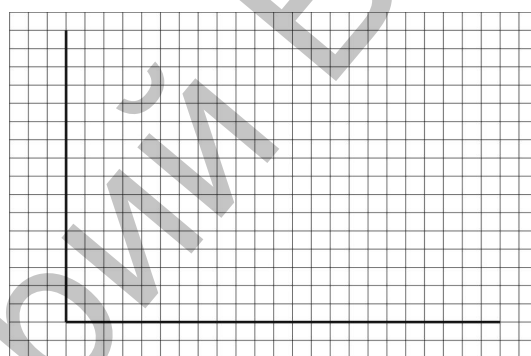


Рис.2.

Анализ зависимостей $p_k = f(T)$ и $p_m l = f(T)$:

Вывод:

Контрольные вопросы:

1. Какой газ называется идеальным?
2. Какой процесс называется изопроцессом?
3. В каком состоянии реальные газы можно принять за идеальные газы?
4. Сформулировать основные законы идеального газа.
5. Изобразить графически основные газовые законы в разных координатных осях (pV , pT , VT).

Литература:

[1: §§4,5]; [2: §10]; [3: §§8,9]; [4: §§2.2,2.3,2.5]; [5: §7].

Лабораторная работа №2

Определение молярной газовой постоянной и средней квадратичной скорости молекул воздуха

Цель работы: определить молярную газовую постоянную и среднюю квадратичную скорость молекул воздуха.

Оборудование: стеклянный шар для взвешивания воздуха, резиновая трубка, винтовой зажим, металлический манометр, насос, технические весы, термометр, разновесы, мензурка.

Теория работы и описание установки

Молярную газовую постоянную можно определить путем сравнения двух различных состояний воздуха, который находится в стеклянном шаре. Пусть в шаре объемом V при давлении p_1 и температуре T содержится воздух массой m_1 . Тогда состояние газа можно описать уравнением Клапейрона-Менделеева:

$$p_1 V = \frac{m_1}{M} RT, \quad (1)$$

где M – молярная масса воздуха, R – молярная газовая постоянная.

Путем откачивания воздуха из шара без изменения его температуры можно получить второе состояние газа, которое характеризуется параметрами m_2 , p_2 , V и T . Уравнение Клапейрона-Менделеева для этого случая будет таким:

$$p_2 V = \frac{m_2}{M} RT. \quad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) получаем, что

$$(p_2 - p_1) V = \frac{(m_2 - m_1)}{M} RT,$$

отсюда молярная газовая постоянная:

$$R = \frac{MV(p_2 - p_1)}{T(m_2 - m_1)} = \frac{MV\Delta p}{T\Delta m}. \quad (3)$$

В уравнении (3) $M = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, объем шара $V = 1,27 \cdot 10^{-3}$ м³. Температура воздуха определяется термометром, а давление воздуха в шаре – манометром.

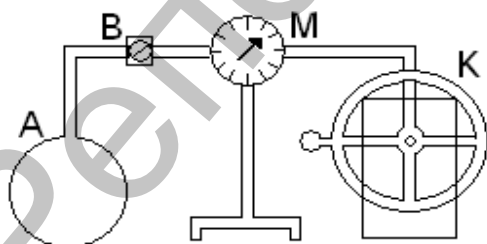


Рис. 1.

Для определения разности масс Δm необходимо определить массу шара с воздухом для первого и второго состояний и найти их разность.

Экспериментальная установка (рис. 1) состоит из стеклянного шара А, который резиновой трубкой соединяется с манометром М. На резиновую трубку надевается винтовой зажим В. Манометр резиновой трубкой соединяется также с насосом К.

Средняя квадратичная скорость молекул газа определяется по формуле:

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{M}}. \quad (4)$$

Из уравнения Клапейрона-Менделеева $pV = \frac{m}{M}RT$ получаем

$$R = \frac{pVM}{mT}.$$

Подставим это значение в уравнение (4). Получим

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3pV}{m}}. \quad (5)$$

Таким образом, для определения средней квадратичной скорости молекул газа достаточно знать его массу и объем. Все эти величины можно определить опытным путем. Для этой цели используется стеклянный шар. Перед началом опыта он открыт, и давление воздуха в нем равно атмосферному. Это давление определяют с помощью барометра. Техническими весами определяется масса стеклянного шара вместе с резиновой трубкой и винтовым зажимом. После этого с помощью насоса нужно откачать из шара большую часть воздуха и повторно определить массу шара вместе с резиновой трубкой и винтовым зажимом, а затем и массу откачанного воздуха. Часть объема, который занимал откачанный воздух, можно определить, если дать возможность жидкости через резиновую трубку занять тот же объем. Потом при помощи мерного сосуда (мензурки) определяется объем воды в шаре. Таким образом, зная объем V и массу m воздуха, первоначальное давление p , по формуле (5) можно определить среднюю квадратичную скорость молекул воздуха.

Порядок выполнения работы

Упражнение 1. Определение молярной газовой постоянной

1. С помощью технических весов определить массу стеклянного шара вместе с резиновой трубкой, винтовым зажимом и воздухом, который находится внутри шара.
2. Присоединить стеклянный шар к манометру, как это показано на рис.1, и поставить на нем краны в положение «открыто».
3. Насосом откачать воздух из шара приблизительно до $(0,4-0,5) \cdot 10^5$ Па. Определить разность давлений Δp .
4. Закрыть краны манометра и зажать резиновую трубку винтовым зажимом так, чтобы в шар не поступал воздух.
5. С помощью технических весов определить массу шара после откачки из него части воздуха.
6. Определить массу откачанного воздуха Δm .
7. Повторить опыт при различных значениях понижения давления Δp в шаре. Данные измерений занести в таблицу.

Таблица 1

№ п/п	Δp , Па	Δm , кг	R , Дж/(моль·К)
1			
2			
3			
ср	-----	-----	

8. Выслить по формуле (3) универсальную газовую постоянную R и найти ее среднее значение $\langle R \rangle$. Результаты вычислений занести в таблицу 1.

9. Рассчитать погрешности для одного из измерений.

Вычисления:

$$M = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}, V = 1,27 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

$$T =$$

$$R_1 =$$

$$R_2 =$$

$$\langle R \rangle =$$

$$R_3 =$$

Расчет погрешности измерений

Записать окончательный результат:

$$R = (\quad \pm \quad) \quad ; \quad \varepsilon = \quad \%$$

Упражнение 2. Определение средней квадратичной скорости молекул воздуха

1. Определить по барометру атмосферное давление p .
2. С помощью технических весов определить массу шара с воздухом, резиновой трубкой, винтовым зажимом.
3. Откачать с помощью насоса часть воздуха из шара и еще раз определить массу шара с резиновой трубкой и винтовым зажимом.
4. Определить массу m откачанного из шара воздуха.
5. Опустить конец резиновой трубки в сосуд с водой и ослабить винтовой зажим. Вода заполнит объем шара, который занимал откачанный воздух.
6. Определить объем воды V в шаре с помощью мерного сосуда (мензурки).
7. Опыт (пп 1-5) повторить несколько раз. Данные измерений занести в таблицу 2.
8. По формуле (5) вычислить величину $\langle v_{\text{KB}} \rangle$. Определить ее среднее значение. Данные вычислений занести в таблицу 2.
9. Рассчитать погрешности для одного из измерений.

Таблица 2

№ п/п	p , Па	V , м^3	m , кг	$\langle v_{\text{KB}} \rangle$, м/с
1				
2				
3				
ср	-----	-----	-----	

Вычисления:

$$\langle v_{KB} \rangle_1 =$$

$$\langle v_{KB} \rangle_2 =$$

$$\langle v_{KB} \rangle =$$

$$\langle v_{KB} \rangle_3 =$$

Расчет погрешности измерений

Записать окончательный результат:

$$\langle v_{KB} \rangle = (\quad \pm \quad) \quad ; \quad \varepsilon = \quad \%$$

Вывод:

Контрольные вопросы:

1. Записать уравнение Клапейрона-Менделеева и объяснить его.
2. Каков физический смысл молярной газовой постоянной?
3. При каких условиях воздух считают идеальным газом?
4. Сформулировать основные законы идеального газа.
5. От каких параметров газа зависит средняя квадратичная скорость его молекул?
6. Получить расчетную формулу для определения R .

Литература:

[1: §§4,6,14]; [3: §§9,10]; [4: §§2.3,2.7]; [5: §§7,8].

Лабораторная работа №3

Исследование барометрической формулы и распределения частиц в поле силы тяжести

Цель работы: исследовать зависимость атмосферного давления от высоты и распределение частиц по высоте в поле силы тяжести Земли.

Оборудование: барометр, термометр, ПЭВМ.

Теория работы и описание установки

Барометрическая формула – это уравнение, которое выражает зависимость атмосферного давления от высоты h над поверхностью Земли:

$$p = p_0 \exp\left[\frac{-m_0 gh}{kT}\right] \quad \text{или} \quad p = p_0 \exp\left[\frac{-Mgh}{RT}\right],$$

где p_0 – атмосферное давление на высоте $h = 0$, m_0 – масса молекулы, M – молярная масса воздуха, R – молярная газовая постоянная. Эта формула является приближенной, поскольку предполагается, что температура T по всей высоте воздушного столба одинаковая и ускорение свободного падения g изменяется незначительно в пределах рассматриваемых высот.

Из барометрической формулы видно, что значение атмосферного давления p зависит как от высоты h , так и от температуры T столба воздуха. В лабораторной работе нужно исследовать зависимость атмосферного давления от этих величин.

При проведении исследований необходимо проделать большое количество вычислений, построить соответствующие графики. Поэтому вычисления проводятся на ПЭВМ. В ЭВМ вводится специальная программа. На экране монитора результаты исследований имеют вид таблиц, графиков. Их необходимо проанализировать и сделать выводы.

ЭВМ работает в диалоговом режиме. Внимательно познакомьтесь с текстами, которые будут появляться на экране. Затем выполняйте те операции и действия, которые требует машина. При появлении команды «Ввести любой символ» необходимо набрать на клавиатуре любую букву или цифру, или любую комбинацию букв или цифр. Потом необходимо нажать клавишу «ввод». Чтобы избежать сбоя в работе ЭВМ при вводе значений физических величин (давления p , температуры T и т.д.), необходимо набирать на клавиатуре только численные значения этих величин, в соответствии с их размерностью. Наименования набирать не нужно. При наборе цифр с дробной частью необходимо помнить, что дробная часть отделяется от целой точкой, а не запятой, как это принято обычно. Например, набирать нужно 9.81; 0.032, к тому же при желании ноль целых можно не набирать. Тогда цифры, которые набираются, могут иметь вид .002; .028 и т.д.

При наборе значений высот необходимо иметь ввиду следующее. Минимальная высота $h_{\min}$ может быть любой, но лучше начать исследования с $h_{\min} = 0$. Максимальную высоту лучше взять в пределах 20-40 км (подумайте, почему?). Для построения графиков зависимости атмосферного давления p от высоты h достаточно иметь 10-15 точек. Поэтому шаг изменения высоты dh следует взять в пределах 2-4 км. Можно взять и меньшее значение шага, но в этом случае получается много рабочих точек, таблицы значений будут длинными, что усложняет обработку результатов исследований.

Концентрация молекул газа n на высоте h над поверхностью Земли равна

$$n = n_0 \exp\left[-\frac{m_0 gh}{kT}\right] \text{ или } n = n_0 \exp\left[-\frac{Mgh}{RT}\right],$$

где n_0 – концентрация молекул газа на высоте $h = 0$, n – концентрация молекул газа на высоте h . Мы видим, что число молекул газа n в единице объема в поле силы тяжести Земли зависит как от высоты h , так и от молярной массы M газа и его температуры T .

Исследование распределения молекул газа по высоте состоит из двух частей. Сначала необходимо выяснить, как влияет значение молярной массы газа M на распределение молекул при $T = \text{const}$, а затем исследовать влияние температуры.

Для упрощения будет рассчитываться не концентрация молекул n на данной высоте h , а часть молекул $z = n/n_0$, которая находится на этой высоте.

Порядок выполнения работы

Упражнение 1. Исследование барометрической формулы

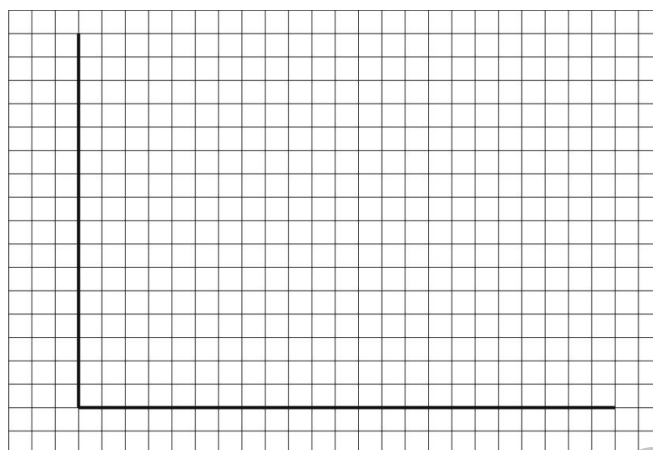
1. Включить ПЭВМ и монитор.
2. Определить по барометру атмосферное давление p_0 (в паскалях).
3. Выбрать минимальную $h_{\min}$ и максимальную $h_{\max}$ высоту (в метрах) над уровнем Земли и шаг изменения высоты dh .
4. Измерить комнатную температуру и перевести ее в кельвины.
5. Получить на экране монитора таблицу значений атмосферных давлений p на различных высотах h . Переписать полученные данные в таблицу 1.

Таблица 1

№	h , м	p , Па		
		$T_{11} =$	$T_{12} =$	$T_{13} =$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				

6. Провести аналогичные исследования для температур выше и ниже комнатной. Для того, чтобы графики зависимости атмосферного давления p от высоты заметно отличались от графика, полученного для комнатной температуры, температуры должны быть на 50-70 К больше или меньше комнатной. Полученные данные занести в таблицу 1.

7. Перечертить полученные графики зависимости атмосферного давления p от высоты h , проанализировать их и сделать выводы.



Вывод:

Упражнение 2. Исследование распределения по высоте молекул газа в поле силы тяжести Земли

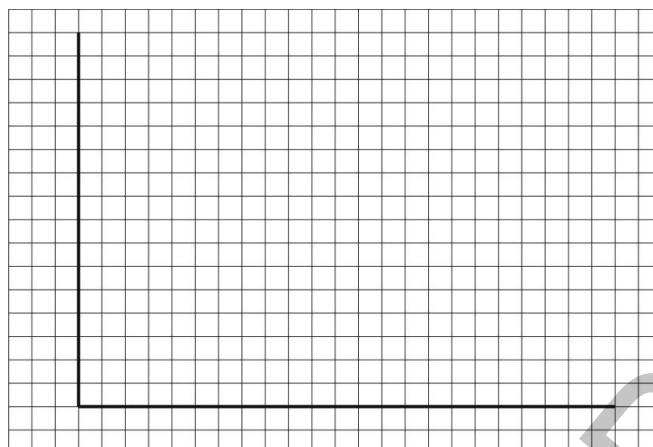
1. Запустить программу по исследованию распределения молекул по высоте.
2. Выбрать минимальную $h_{\min}$ и максимальную $h_{\max}$ высоту (в метрах) над уровнем Земли и шаг изменения высоты dh .
3. Измерить комнатную температуру T .
4. Выбрать газ, распределение молекул которого необходимо исследовать, определить его молярную массу по таблице приложения.
5. Получить и переписать (в таблицу 2) значения части молекул $z = n/n_0$, которые находятся на высоте h .
6. Провести аналогичные исследования распределения молекул для других газов, которые имеют молярную массу M меньшую и большую, чем у первого газа. Чтобы графики зависимости части молекул z от высоты h значительно отличались друг от друга, выбрать газы, у которых молярные массы существенно разнятся. Полученные результаты вписать в таблицу 2.

T, K	
--------	--

Таблица 2

№	h, m	z		
		$M_{11} =$	$M_{12} =$	$M_{13} =$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				

7. Перечертить полученные графики.



Вывод:

8. Снова выбрать газ, распределение молекул которого нужно исследовать. Определить его молярную массу M .

$$M = \text{_____ кг/моль.}$$

9. Выбрать минимальную $h_{\min}$ и максимальную $h_{\max}$ высоту (в метрах) над уровнем Земли и шаг изменения высоты dh .

$$h_{\min} = \text{_____ м; } h_{\max} = \text{_____ м; } dh = \text{_____ м.}$$

10. Получить на экране монитора таблицу значений части молекул $z = n/n_0$ на высоте h для комнатной температуры T . Переписать данные в таблицу 3.

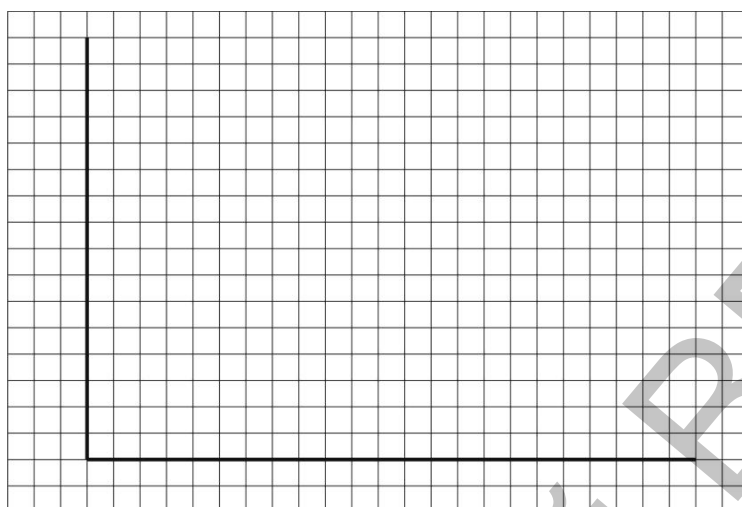
11. Провести исследования для температур выше и ниже комнатной. Чтобы полученные графики заметно отличались друг от друга, температуры должны отличаться от комнатной на 50-70 К. Полученные результаты вписать в таблицу 3.

M , кг/моль	
---------------	--

Таблица 3

№	h , м	z		
		$T_1 =$	$T_2 =$	$T_3 =$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				

11. Перечертить полученные графики, проанализировать их и сделать выводы.



Вывод:

Общий вывод:

Контрольные вопросы:

1. Какова природа атмосферного давления?
2. Как зависит атмосферное давление от высоты? Почему?
3. Записать барометрическую формулу. Объяснить ее.
4. Какими приборами измеряется атмосферное давление?
5. Как изменяется концентрация молекул с высотой в поле силы тяжести Земли?
6. Записать формулу распределения Больцмана.
7. Как влияет на распределение молекул действие силы тяжести и их тепловое движение?
8. Из каких газов, в основном, состоят верхние слои атмосферы?

Литература:

[1: §§8,9]; [2: §10]; [4: §§2.9,2.10]; [5: §§11,29].

Лабораторная работа №4

Определение отношения молярных теплоемкостей воздуха C_p/C_v методом Рухардта

Цель работы: измерить показатель адиабаты, т.е. отношение молярных теплоемкостей при постоянном давлении и при постоянном объеме $\gamma = C_p/C_v$ воздуха и проверить формулу для γ , следующую из классической теории теплоемкости газов:

$$\gamma = (i + 2)/i, \quad (1)$$

где i – число степеней свободы у молекул газа, по методике, впервые предложенной Рухардтом.

Оборудование: сосуд с исследуемым газом (воздухом), секундомер (таймер), барометр, воздуходувка, блок питания, шланги, зажимы. Задача снабжена программой обработки экспериментальных данных на персональном компьютере.

Теория работы и описание установки

Если взять прецизионно изготовленную стеклянную трубку, расположить ее вертикально, закрыть нижний конец и бросить в нее сверху стальной шарик, диаметр которого на несколько сотых долей миллиметра меньше диаметра трубки, то шарик, прежде чем упасть на дно трубки, совершит несколько быстрых колебаний, при которых роль упругого элемента играет газ в трубке под шариком.

Рухардт впервые предложил использовать это явление для измерения показателя адиабаты γ . Он заметил, что газ в трубке не находится в чисто адиабатических условиях, поскольку нельзя пренебречь его теплообменом с окружающей средой. Для уменьшения теплообмена целесообразно увеличить объем, присоединив трубку к большому сосуду с газом, например, вставив ее нижний конец через пробку в горлышко какой-либо бутылки. Это позволит считать процесс изменения состояния газа в бутылки при колебаниях шарика в трубке адиабатическим и сильно упростит теорию опыта.

Рухардт, кроме того, предложил пренебречь утечкой газа через зазор между стенкой трубки и шариком и не учитывать трение, поскольку затухание невелико – шарик до остановки успевает совершить порядка десяти колебаний. Если шарик массы m находится в трубке в равновесии, то давление в ее нижней части определяется по формуле:

$$p = p_0 = mg/S, \quad (2)$$

где p_0 – атмосферное давление, S – площадь поперечного сечения шарика (и трубки), mg – его вес. Если шарик смещен относительно положения равновесия на расстояние x , то на него действует возвращающая сила Sdp , где dp – приращение давления, возникающее из-за изменения объема газа, заключенного под шариком в бутылки и трубке, на величину $dV = Sx$. Так как процесс можно считать адиабатическим, а газ – идеальным, то давление и объем связаны между собой уравнением адиабаты:

$$pV^\gamma = \text{const}, \quad (3)$$

а связь между их приращениями находится дифференцированием:

$$dp = -\gamma p \frac{dV}{V} = -\gamma p \frac{Sx}{V}. \quad (4)$$

Тогда уравнение движения шарика имеет вид:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = Sdp = -\gamma p \frac{S^2 x}{V}, \quad (5)$$

или

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{\gamma p S^2}{mV} x = 0. \quad (6)$$

Это уравнение гармонического осциллятора. Квадрат частоты его собственных колебаний:

$$\omega_0^2 = \frac{\gamma p S^2}{mV}, \quad (7)$$

период колебаний:

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \left(\frac{mV}{S^2 p \gamma} \right)^{1/2}. \quad (8)$$

Поскольку $S = \pi d^2/4$, где d – диаметр шарика, для показателя адиабаты γ из (8) имеем:

$$\gamma = \frac{64mV}{d^4 p T_0^2}. \quad (9)$$

Это соотношение является основной расчетной формулой метода Рухардта. Из нее видно, что показатель адиабаты пропорционален отношению V/T_0^2 , так что увеличение объема приводит к росту периода колебаний и повышает точность измерений, поскольку большие периоды можно измерять с большей точностью.

Формула (9) является приближенной, поскольку при ее выводе не учитывались трение и утечка газа из бутылки. Реальное число колебаний, как уже отмечалось, редко превышает десять, что накладывает неустранимые ограничения на точность измерения периода и точность определения γ .

Позднее Фламмерсфельдом была предложена модификация метода, позволяющая резко увеличить его точность. Если компенсировать утечку газа путем поддува его в бутылку через небольшое отверстие, то в некоторых случаях удастся получить незатухающие автоколебания шарика в трубке. Такой режим, очевидно, возможен, когда энергия, теряемая системой за один период колебаний из-за наличия трения, компенсируется поступлением энергии за счет работы насоса, осуществляющего подачу газа, причем поступление энергии регулируется самой системой. Режим незатухающих установившихся колебаний позволяет наблюдать любое желаемое число колебаний и значительно повышает точность измерения периода. Шарик был заменен на цилиндр, на боковой поверхности которого сделан ряд проточек. Они служат для выравнивания давления по периметру цилиндра и улучшают его центровку в трубке. Вместо прецизионных цилиндрических трубок использовались конические, диаметр которых в верхней части на несколько десятых долей миллиметра больше, чем в нижней, или трубки с маленьким пропилом (площадью около 1 мм^2) в средней части, сделанным для отвода газа. Наличие пропила облегчает установление автоколебательного режима, а его место играет роль положения равновесия цилиндра в трубке.

Рассмотрим механизм, приводящий к возникновению автоколебаний. Наличие пропила в середине трубки или конусообразности самой трубки приводит к тому, что скорость утечки газа зависит от положения цилиндра. Когда цилиндр находится ниже пропила, скорость утечки газа меньше скорости притока от насоса, а когда выше – больше. В среднем за период установившихся колебаний утекает столько же газа, сколько притекает, но при этом появляются дополнительные

силы давления, работа которых и компенсирует потери энергии на трение. При движении цилиндра снизу вверх от наинизшего положения количество газа в бутылке за счет большей скорости его притока будет больше, чем в приборе Рухардта при отсутствии утечки и притока газа. Дополнительная сила давления этого газа направлена вверх и компенсирует силу трения, направленную вниз. После достижения наивысшего положения при движении цилиндра вниз за счет большей скорости оттока количество газа в бутылке будет меньше, чем в приборе Рухардта, и дополнительная сила давления будет направлена вниз, опять-таки компенсируя

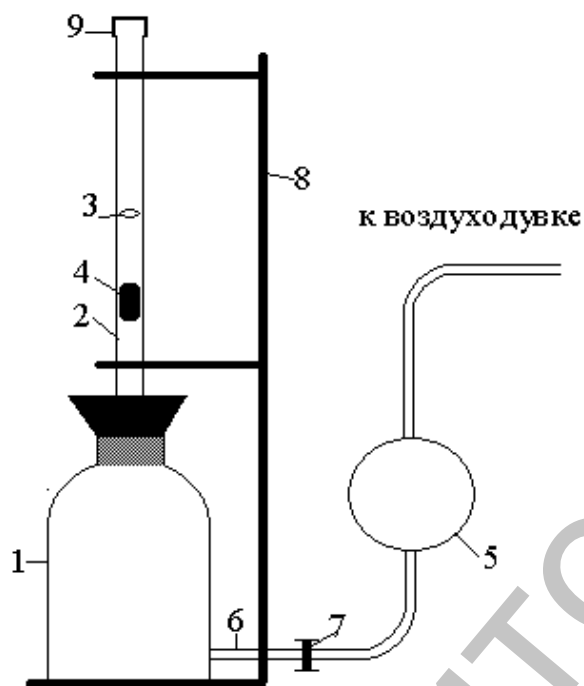


Рис. 1.

силу трения, направленную против движения, т.е. вверх. Таким образом, система сама регулирует подачу энергии, меняя скорость притока и оттока газа, и возможно установление автоколебаний, частота и амплитуда которых определяются параметрами системы. Амплитуда за счет нелинейных процессов в системе устанавливается такой, при которой работа дополнительных сил за период колебаний по величине точно равна работе сил трения (предельный цикл колебаний), а частота при малых потерях на трение, должна быть близка к частоте собственных незатухающих колебаний, определяемой формулой (7).

В работе используется установка, общий вид которой изображен на рис. 1: 1 – бутылка с исследуемым газом; 2 – коническая трубка; 3 – пропил; 4 – цилиндр; 5 – фильтр; 6 – впускная трубка; 7 – регулировочный зажим; 8 – стойка с держателями; 9 – наконечник трубки с отверстиями.

Сверху трубка 2 прикреплена к стойке специальным наконечником с отверстиями для выпуска газа, этот наконечник предотвращает выброс цилиндра из трубки в случае резкого повышения давления в бутылке и при смещении вниз может закрывать трубку. К прибору прилагаются шланги, регулировочный зажим, механический или электронный секундомер для измерения периода колебаний и барометр для измерения атмосферного давления. В качестве источника воздуха используется сеть со сжатым воздухом. Прибор устанавливается на столе таким образом, чтобы трубка находилась в вертикальном положении, и соединяется шлангом с источником газа. На шланг вблизи впускного отверстия бутылки ставится регулировочный зажим.

Порядок выполнения работы

1. Перед началом измерений убедиться в том, что отверстия для выхода газа из наконечника трубки открыты, затем включить воздуходувку. Рабочий расход газа невелик, так что пускать газ следует очень осторожно, почти перекрыв шланг регулировочным зажимом.

2. Меняя подачу газа регулировочным зажимом, добиться подъема цилиндра со дна трубки примерно до ее середины и возникновения его устойчивых колебаний вокруг середины трубки или того места, где сделан пропил. Регулирующее кольцо на трубке с пропилом установить так, чтобы амплитуда колебаний была не слишком велика, а поток газа из отверстия пропила был как можно меньше, но колебания оставались устойчивыми. Отклонения цилиндра вверх и вниз от положения равновесия должны быть одинаковыми в течение всего процесса измерений; для контроля на трубке на равных расстояниях от этого места снаружи наклеены кольца. При колебаниях цилиндр не должен ударяться о пробку бутылки и наконечник трубки, колебания должны быть практически бесшумными, без заметного дребезга и трения о стенки трубки.

3. После получения установившихся колебаний приступить к измерениям их периода. Для этого при помощи механического или электронного секундомера измерить время, в течение которого цилиндр совершает достаточно большое целое число циклов колебаний, например, 100 или 200. Измерения этого времени повторить не менее пяти раз. Затем рассчитать среднее арифметическое значение периода колебаний.

Параметры установки – V , d , и m , а также их стандартные отклонения указаны на подставке прибора и должны быть приведены в отчете. В массу цилиндра должна быть внесена поправка, учитывающая присоединенную массу газа в трубке, который совершает колебания вместе с цилиндром. В формулу (9) вместо m надо подставлять величину $m + \Delta m$, где $\Delta m = \rho l S$ (ρ – плотность газа, l – длина трубки, которую можно измерить линейкой).

4. Атмосферное давление измерить барометром.

Вычисления:

$$m + \Delta m =$$

$$\gamma_1 = \frac{\quad}{\quad} = \quad \quad \quad \gamma_4 = \frac{\quad}{\quad} =$$

$$\gamma_2 = \frac{\quad}{\quad} = \quad \quad \quad \gamma_5 = \frac{\quad}{\quad} =$$

$$\gamma_3 = \frac{\quad}{\quad} = \quad \quad \quad \langle \gamma \rangle = \frac{\quad}{5} =$$

5. После вычисления величины γ рассчитать ошибку ее определения с учетом погрешностей всех величин, входящих в формулу (9). Полученные данные и параметры установки занести в таблицы:

p , Па	m , кг	V , м ³	d , м

№	t , с	T_0 , с	γ
1			
2			
3			
4			
5			
ср			

6. Провести обработку результатов эксперимента на персональном компьютере. При этом компьютер будет запрашивать все параметры установки и их

стандартные отклонения в удобных единицах, без перевода в систему СИ. Поправка к массе цилиндра будет также автоматически учтена после ввода длины трубки. В компьютер вводится число измеряемых периодов и массив полученных времен, а расчет среднего значения периода и его погрешности осуществляется компьютером перед вычислением γ . В конце обработки выдается значение γ , найденное по формуле (9), и его стандартное отклонение. Записать выданный результат и сравнить его с рассчитанным в п.5.

Расчет погрешности измерений

Записать окончательные результаты:

$$\begin{aligned} \gamma &= (\quad \pm \quad) \quad ; \quad \varepsilon = \quad \% \text{ – экспериментально;} \\ \gamma &= (\quad \pm \quad) \quad ; \quad \varepsilon = \quad \% \text{ – по компьютерной модели.} \end{aligned}$$

Вывод:

Контрольные вопросы:

1. Что такое теплоемкость газа? Какова размерность этой физической величины?
2. Какова связь между C_p , C_V и числом i степеней свободы у молекул газа?
3. Как изменяется качественно теплоемкость двухатомного газа, например, H_2 , от температуры.
4. У какого из газов – H_2 , He , CH_4 , $\gamma = C_p/C_V$ имеет наибольшее значение?
- 5 Назвать условия возникновения автоколебаний. От чего зависит амплитуда колебаний в автоколебательном процессе?

Литература:

[1: §§24-27]; [3: §§27,29]; [4: §§3.3,3.4].

Лабораторная работа №5

Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса

Цель работы: измерить вязкость машинного масла.

Оборудование: штатив, стеклянная трубка с машинным маслом, пипетка, стакан, секундомер, линейка.

Теория работы и описание установки

Для жидкостей характерна достаточно плотная упаковка молекул (об этом свидетельствует их малая сжимаемость). Поэтому каждая молекула, постоянно сталкиваясь с соседними молекулами, в течение некоторого времени колеблется около определенного положения равновесия. Время от времени молекула, получив от соседних молекул достаточную энергию, скачком переходит в новое положение равновесия. Дальность этого скачка δ примерно равна размеру молекул (10^{-10} м). Среднее время $\langle \tau \rangle$, в течение которого молекула колеблется около данного положения равновесия, называется временем оседлой жизни молекулы. Рас-

четы показывают, что $\langle \tau \rangle = \tau_0 \exp \left[\frac{\Delta E}{kT} \right]$, (1)

где $\langle \tau_0 \rangle$ – средний период колебания молекулы; ΔE – минимальная энергия, которую нужно сообщить молекуле жидкости, чтобы она могла перейти из одного положения равновесия в другое ($\Delta E \sim 10^{-20}$ Дж); k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура жидкости. Для воды при комнатной температуре $\langle \tau_0 \rangle \sim 10^{-13}$ с, а $\langle \tau \rangle \sim 10^{-11}$ с. С повышением температуры подвижность молекул возрастает, время оседлой жизни уменьшается.

При движении жидкости (или газа) между слоями, перемещающимися с различной скоростью, возникают силы внутреннего трения (вязкости). Эти силы направлены так, что ускоряют медленно движущиеся слои и замедляют быстро движущиеся.

Рассмотрим ламинарный поток жидкости в направлении оси Y (рис.1). Слои жидкости движутся с разными скоростями. Скорости двух слоев, отстоящих друг от друга на расстояние dx , отличаются на dv . Величина $\frac{dv}{dx} \vec{n}$ – градиент ско-

рости – показывает, как быстро изменяется скорость слоев вдоль оси X . Здесь $\vec{n}$ – единичный вектор в направлении максимального возрастания скорости (в нашем случае в отрицательном направлении оси X).

Ньютон установил, что модуль силы внутреннего трения между слоями:

$$F = -\eta \frac{dv}{dx} S_n, \quad (2)$$

где η – коэффициент пропорциональности, называемый вязкостью (коэффициентом вязкости) жидкости; площадка S_n ориентирована перпендикулярно к градиенту скорости. Между слоями жидкости будет происходить передача импульса. По второму закону Ньютона $\frac{dp}{dt} = F$. С учетом (2) имеем:

$$dp = -\eta \frac{dv}{dx} S_n dt, \quad (3)$$

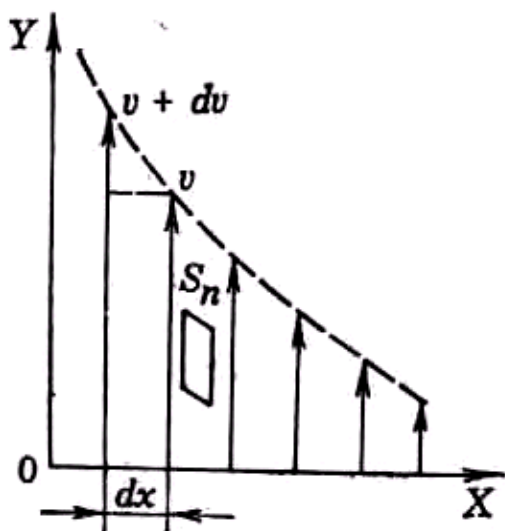


Рис. 1.

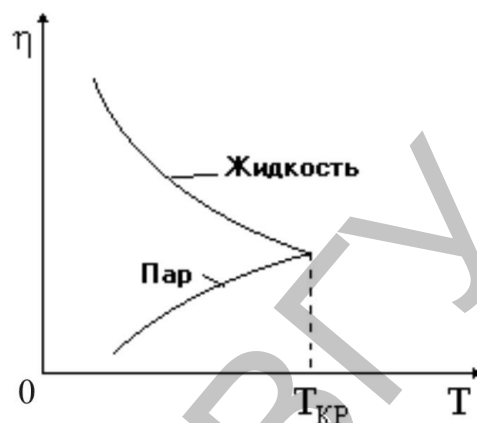


Рис. 2.

где dp – величина импульса, переносимого за время dt от слоя к слою через поверхность S_n , перпендикулярную к направлению переноса импульса. Знак минус указывает, что импульс переносится от слоев, движущихся с большей скоростью, к слоям, движущимся с меньшей скоростью (в нашем случае вдоль оси X).

Импульс, переносимый через единичную площадку, расположенную перпендикулярно к переносимому потоку импульса за единицу времени, называется плотностью потока импульса $\vec{L}_p$:

$$L_p = \frac{dp}{S_n dt} = -\eta \frac{dv}{dx}. \quad (4)$$

Соотношения (2), (3), (4) являются различными формами записи основного закона вязкости – **закона Ньютона**. Физический смысл коэффициента вязкости η можно определить из этих соотношений. Например, из (4) следует, что коэффициент вязкости η определяется плотностью потока импульса при градиенте скорости, равном единице.

Коэффициент вязкости жидкости зависит от ее химического состава, примесей и температуры. С повышением температуры T коэффициент вязкости жидкости уменьшается по закону:

$$\eta = A \exp \left[\frac{\Delta E}{kT} \right]. \quad (5)$$

Здесь коэффициент A для каждой конкретной жидкости можно приближенно считать постоянным.

Коэффициент вязкости газов (паров) в отличие от жидкостей с повышением температуры медленно увеличивается ($\sim \sqrt{T}$), при критической температуре $T_{кр}$ коэффициент вязкости жидкости и ее пара уравниваются (рис.2). Разный характер температурной зависимости коэффициента вязкости жидкостей и газов указывает на различие механизмов внутреннего трения в них. В газах перенос импульса осуществляется при переходе молекул из слоя в слой благодаря тепловому движению. В жидкостях большую часть времени молекулы колеблются около положения равновесия, скачкообразные переходы редки. Так как молекулы жидкости находятся близко друг к другу, силы молекулярного сцепления между ними значительны. Поэтому одни слои жидкости увлекают (тормозят) соседние слои в основном за счет сил притяжения. Перенос импульса вследствие скачкооб-

разных переходов молекул не играет решающей роли. С повышением температуры расстояния между молекулами увеличиваются, а силы притяжения уменьшаются и, как следствие, уменьшается вязкость.

Приборы для измерения коэффициента вязкости называются вискозиметрами. Существует несколько методов определения коэффициента вязкости: метод Стокса, основанный на измерении скорости падения шарика в исследуемой жидкости; метод Пуазейля, в основе которого лежит измерение объема жидкости (газа), протекающей через капиллярную трубку; метод затухающих колебаний тела, подвешенного на упругой нити в исследуемой среде, и другие. Мы воспользуемся методом Стокса.

Стокс установил, что сила внутреннего трения, действующая на шарик радиусом r , движущийся со скоростью v в жидкости, определяется по формуле:

$$F = 6\pi\eta rv. \quad (6)$$

Пусть плотность материала шарика ρ , а плотность исследуемой жидкости $\rho_0 < \rho$. Тогда на шарик, погруженный в жидкость, действует направленная вниз сила $F_1 = F_{\text{тяж}} - F_A$:

$$F_1 = \frac{4}{3}\pi r^3 (\rho - \rho_0) g. \quad (7)$$

Если шарик отпустить, то под действием силы F_1 он начнет падать. Его скорость вначале возрастает и, следовательно, возрастает сила внутреннего трения. Затем наступает такой момент, когда суммарная сила, действующая на шарик, станет равна нулю. После этого шарик падает с некоторой постоянной (установившейся) скоростью v . При равномерном падении

$$\frac{4}{3}\pi r^3 (\rho - \rho_0) g - 6\pi\eta rv = 0, \quad (8)$$

отсюда скорость

$$v = \frac{2}{9} gr^2 \frac{\rho - \rho_0}{\eta} \quad (9)$$

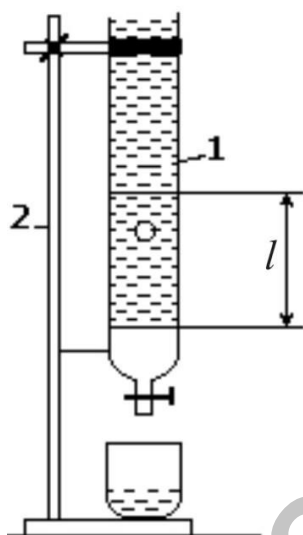


Рис. 3.

Соотношение (9), строго говоря, справедливо лишь тогда, когда шарик падает в безграничной среде. Если шарик падает вдоль оси трубки радиусом R , в (9) необходимо ввести поправку, учитывающую наличие стенок трубки. У стенок исследуемая жидкость покоится, а пограничный слой жидкости около шарика движется вместе с ним. Это приводит к увеличению градиента скорости, и, следовательно, скорость равномерного падения шарика в трубке будет меньше, чем в безграничной среде. Учет этого обстоятельства приводит к следующему выражению:

$$v = \frac{2}{9} gr^2 \frac{\rho - \rho_0}{\eta \left(1 + 2,4r/R\right)}. \quad (10)$$

Формула (10) применима к недеформирующимся шарикам.

Для случая падения капель жидкости, как показывает теория, коэффициент $2/9$ надо заменить на $1/3$. Тогда вязкость

$$\eta = \frac{1}{3} \frac{gr^2 (\rho - \rho_0) t}{l \left(1 + 2,4r/R\right)}, \quad (11)$$

где $l = vt$ – расстояние, проходимое каплей за время t

В работе используется установка, изображенная на рис. 3.

В стеклянной трубке 1, закрепленной на штативе 2, находится исследуемая жидкость (машинное масло).

Порядок выполнения работы

1. Определить путем взвешивания массу пустого стакана (m_1).
2. Накапать в него 50-100 капель воды из пипетки.
3. Определить массу стакана с водой (m_2) и найти массу воды $m_0 = m_2 - m_1$.
4. Рассчитать радиус капли

$$r = \sqrt[3]{\frac{3}{4} \frac{m_0}{\pi \rho n}}$$

5. Измерить расстояние l между метками на трубке.
6. Из пипетки капнуть одну каплю воды в трубку.
7. Определить время t прохождения капель этого расстояния l .
8. Повторить измерение времени прохождения расстояния l каждой из 5-ти капель. Вычислить среднее значение времени.
9. По формуле (11) рассчитать коэффициент вязкости масла, взяв среднее значение времени, вычисленное в п.8 Сравнить полученный результат с табличным (см. приложение).
10. Данные опыта занести в таблицы.

№	1	2	3	4	5	ср
t , с						

m_1 , кг	m_2 , кг	m_0 , кг	r , м	R , м	l , м	η , кг/м·с
				0,015		

11. Рассчитать погрешности измерений.

Вычисления:

$$r =$$

$$\eta = \frac{1}{3} \frac{m_0 g}{4 \pi r l n} =$$

Расчет погрешностей

Записать окончательный результат:
 $\eta = (\quad \pm \quad) \quad ; \quad \varepsilon = \quad \%$

Вывод:

Контрольные вопросы:

1. В чем различие механизмов вязкости в жидкостях и в газах?
2. Каков физический смысл коэффициента вязкости η ?
3. Как зависит коэффициент вязкости жидкостей от температуры?

Литература:

[1: §95]; [2: §56]; [3: §91]; [4: §7.1]; [5: §84].

Лабораторная работа №6

Изучение зависимости коэффициента вязкости жидкости от температуры

Цель работы: изучить зависимость коэффициента вязкости жидкости от температуры и определить энергию активации.

Оборудование: вискозиметр с исследуемой жидкостью и блоками регистрации, источник питания постоянного тока, термостат, счетчик-секундомер.

Теория работы и описание установки.

Механизмы переноса (диффузия, теплопроводность, вязкость) в жидкостях и газах существенно отличаются вследствие различия в их структуре. Молекулы в жидкости расположены близко друг к другу, поэтому свойства жидкостей в большей степени определяются характером межмолекулярных сил. Типичный вид зависимости межмолекулярных сил от расстояния $F(r)$ и соответствующая кривая потенциальной энергии $U(r)$ приведены на рис 1. При $r = r_0$ кривая потенциальной энергии имеет минимум $U_{\min}$, соответствующий энергии положения равновесия.

Каждая молекула жидкости окружена со всех сторон «соседями», отстоящими от нее в среднем на расстоянии, близком к r_0 . Тепловое движение молекул сводится в основном к колебаниям внутри потенциальной ямы, созданной ее ближайшим окружением (место временной локализации), и перескоками ее из одного места локализации в другое. Так, за 1 секунду молекула жидкости меняет свое положение приблизительно 10^8 раз, совершая между двумя перескоками 10^3 - 10^5 колебаний.

Минимальная энергия, необходимая молекуле для преодоления потенциального барьера сил взаимодействия с ближайшим окружением и перескока в новое положение равновесия, называется энергией активации ε данной жидкости.

На полное освобождение отдельной молекулы от действия всех остальных необходимо затратить теплоту испарения. На разрушение порядка расположения молекул нужно затратить теплоту плавления. Величина энергии активации лежит между теплотой плавления и теплотой испарения. Опыт подтверждает такое заключение.

Уравнение переноса для жидкостей формально сохраняет тот же вид, что и для газов. Однако вследствие различного механизма переноса количества движения выражения для коэффициентов вязкости газа и жидкости различны. Сущность явления внутреннего трения жидкости состоит в том, что молекулы, находящиеся под действием внешней силы, совершают перескоки преимущественно в направлении этой силы. Чем чаще способны молекулы жидкости перемещаться из одного мгновенного положения равновесия в другое, тем больше текучесть и меньше вязкость жидкости. Под текучестью жидкости понимают величину $1/\eta$, обратную вязкости.

Зависимость коэффициента вязкости от величин T и ε описывается соотношением Френкеля: $\eta = Ae^{\varepsilon/kT}$, где $A = \text{const}$. (1)

На рис. 2 приведены для сравнения зависимости коэффициентов вязкости от температуры для жидкости и пара. В отличие от газов с ростом температуры вязкость жидкости уменьшается.

При критической температуре значения коэффициентов вязкости пара и жидкости выравниваются.

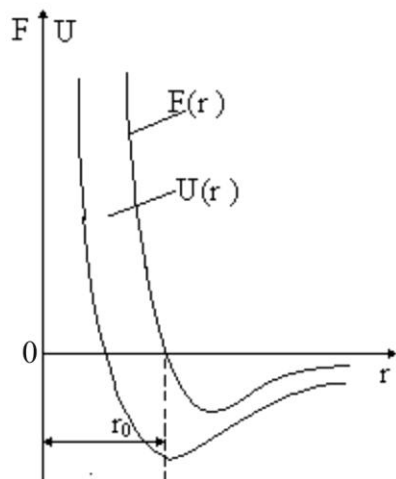


Рис. 1.

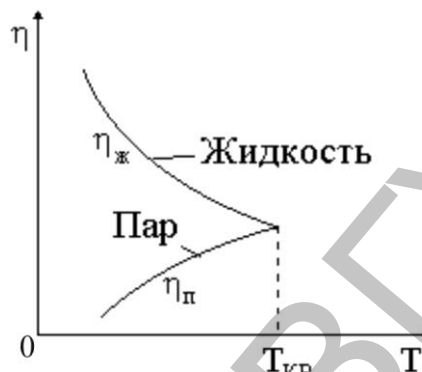


Рис. 2.

Из формулы (1) с учетом $A = \text{const}$ получаем:

$$\ln \eta = \ln A + \frac{\varepsilon}{k} \frac{1}{T}. \quad (2)$$

Это уравнение представляет собой уравнение прямой линии $\ln \eta = f(1/T)$.

Для определения энергии активации используем формулу (1).

Зная динамические вязкости η_1 и η_2 при двух близких значениях температуры, можно записать:

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \exp \left(\frac{\varepsilon}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right).$$

После логарифмирования этого выражения получим:

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\varepsilon}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right),$$

откуда

$$\varepsilon = \frac{kT_1T_2 \ln \eta_1 / \eta_2}{T_2 - T_1}. \quad (3)$$

В работе используется установка, блок-схема которой приведена на рис. 3. Исследуемая жидкость помещается в вертикальную запаянную трубку вискозиметра А. В трубке находится металлический шарик С. Диаметр шарика близок к диаметру трубки.

На трубке находится также отросток Д, в котором собирается остаточный газ, выделяющийся из жидкости в процессе работы.

На концах трубки расположены блоки регистрации шарика, которые состоят из лампочек накаливания Л, свет от которых проходит через трубку и попадает на фотодиоды Ф. Блоки питаются от источника питания ИП. Лампочки накаливания включены последовательно.

Для определения вязкости жидкости необходимо измерить время движения шарика между двумя фотодиодами. Время прохождения шариком t этого расстояния H пропорционально коэффициенту вязкости η : $\eta = Bt$. Коэффициент

пропорциональности B определяется при градуировке прибора и указан на установке.

В момент прохождения шарика мимо фотодиода система вырабатывает импульс, который подается на блок измерения времени. Для измерения времени используется счетчик-секундомер, который автоматически включается в момент прохождения шариком верхнего фотодиода и выключается в момент прохождения шариком нижнего фотодиода.

Трубка с исследуемой жидкостью окружена рубашкой, по которой циркулирует вода от термостата T . Температура воды, а вместе с ней и температура исследуемой жидкости, могут меняться заданным образом. Температура регистрируется по термометру, находящемуся на термостате.

Система трубки с блоками регистрации шарика может вращаться вокруг горизонтальной оси.

Порядок выполнения работы

1. Включить в сеть источник питания ИП блока регистрации, счетчик-секундомер, термостат. Нагреватель не включать.
2. Измерить температуру воды по термометру на термостате.
3. Перевернуть прибор вниз концом L (холостой ход). Дождаться, пока шарик дойдет до конца трубки. Нажать кнопки «стоп» и «сброс» на секундомере.
4. Повернуть прибор вниз концом K . После остановки секундомера записать время t движения шарика между фотодиодами. Опыт провести 2-3 раза.

Поворот прибора следует проводить аккуратно, чтобы не разбить трубку при столкновении с ограничителем поворота прибора.

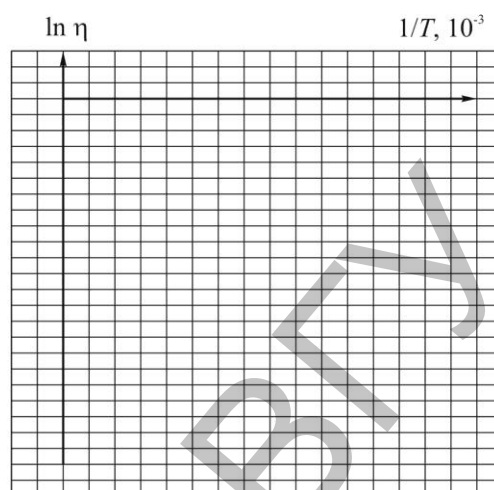
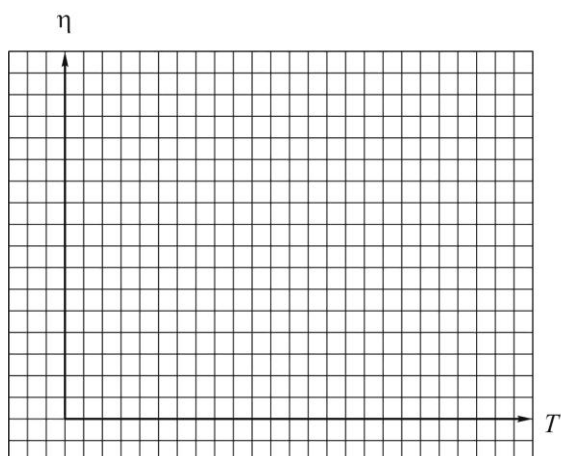
Вязкость рассчитывается по формуле $\eta = Bt$, где $B = 0,733 \text{ кг/м}\cdot\text{с}^2$.

5. Включить нагреватель термостата и установить на контактном термометре температуру на 2-5 К выше комнатной. Выждать время до установления в термостате этой температуры. Повторить действия, указанные в пп.2-4. Аналогично произвести измерения через 4-6 К ступенями до температуры 50°C.

Обработка данных. Рассчитать вязкость жидкости для разных температур. Построить графики зависимости η от T , $\ln \eta$ от $1/T$. По наклону последнего графика определить энергию активации ϵ . Оценить диапазон значений, в котором должна лежать величина энергии активации для воды. Для оценки использовать табличные значения теплоты плавления и теплоты испарения. Данные измерений и вычислений занести в таблицу:

$T, \text{ K}$							
$t, \text{ c}$	1						
	2						
	3						
	ср						
$\eta, \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$	1						
	2						
	3						
	ср						
$\ln \eta$							
$1/T$							

Рассчитать погрешности измерений вязкости жидкости для одного из значений температуры.



Вычисления:

(по определению энергии активации ϵ , см. п.5)

Расчет погрешности измерений

Записать окончательный результат:

$\eta = (\quad \pm \quad) \quad ; \quad \varepsilon = \quad \%$

Вывод:

Контрольные вопросы:

1. Какова размерность коэффициента вязкости в системе СИ?
2. Почему вязкость жидкостей с ростом температуры падает, а вязкость газов растет?
3. Почему необходимо соблюдать вертикальность прибора?
4. Почему в данной установке используется шарик, диаметр которого близок к диаметру трубки?
5. Как меняется вязкость жидкости и пара при приближении к критической точке?

Литература:

[2: §56]; [3: §91]; [4: §7.1]; [5: §84].

Лабораторная работа №7

Определение удельной теплоты парообразования воды

Цель работы: измерить удельную теплоту перехода воды в пар.

Оборудование: нагреватель, колба, конденсатор, амперметр, вольтметр, барометр, автотрансформатор, секундомер, весы.

Теория работы и описание установки

Для определения состояния вещества и происходящих в нем фазовых пе-

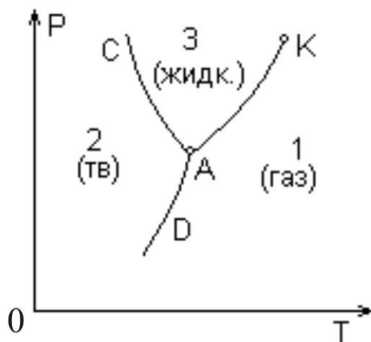


Рис. 1.

реходов удобнее всего пользоваться диаграммами состояния. Эти диаграммы строятся в координатах «давление-температура». Примером такой диаграммы является диаграмма состояния воды (рис. 1).

Приведенная на этом рисунке диаграмма не описывает всех возможных состояний воды, она отражает ситуацию только при сравнительно небольших давлениях и при небольших отрицательных температурах по шкале Цельсия.

Кривая АК является кривой испарения. Область ниже кривой АК является областью газообразного (парообразного) состояния. Область выше кривой АК – область жидкой фазы. Кривая AC соответствует равновесию состояния жидкой и твердой фаз (кривая плавления). Кривая AD изображает равновесное состояние «лед-пар» и называется кривой возгонки. Точка А, в которой сходятся все три кривые, называется тройной точкой. В тройной точке находятся в равновесии три фазы: твердая, жидкая и газообразная. Этой точке соответствует давление 4,58 мм.рт.ст. и температура +0,0075°C. Кривая АК обрывается в критической точке, выше которой жидкая и газообразная фазы совпадают. Для воды критическая температура и давление равны соответственно 647,30 К и 22,13 МПа.

Для того, чтобы испарение жидкости происходило при постоянной температуре, к жидкости необходимо подводить определенное количество теплоты. Величина, численно равная количеству теплоты, которое необходимо подвести к единице массы жидкости для превращения ее в пар при постоянной температуре, называется удельной теплотой парообразования (λ).

Теплота парообразования складывается из двух частей. Первая часть тратится на работу по преодолению притяжения поверхностного слоя (λ_1), вторая часть – на работу расширения (λ_2), равную $p\Delta V$, где ΔV – разность удельных объемов пара и жидкости:

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2. \quad (1)$$

При испарении жидкости объем чрезвычайно сильно увеличивается. Так, для воды при температуре 100°C и давлении 760 мм рт. ст. объем пара в сравнении с первоначальным объемом воды возрастает в 1650 раз.

Опытным путем легко найти полную величину λ . Для этого существует ряд методов, самый простой из которых – калориметрический. Непосредственно нельзя измерить силу молекулярного притяжения и величину λ_1 , но легко рассчитать λ_2 : при кипении воды при 100°C и нормальном атмосферном давлении ($p = 1,01 \cdot 10^5$ Па)

$$\Delta V = 1,65 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}, \lambda_2 = p\Delta V = 167 \text{ Дж/кг}. \quad (2)$$

Для воды различными методами было найдено, что $\lambda = 2260$ кДж/кг. Таким образом, на долю λ_1 приходится 2093 Дж/кг. Это та теплота, которую необходимо

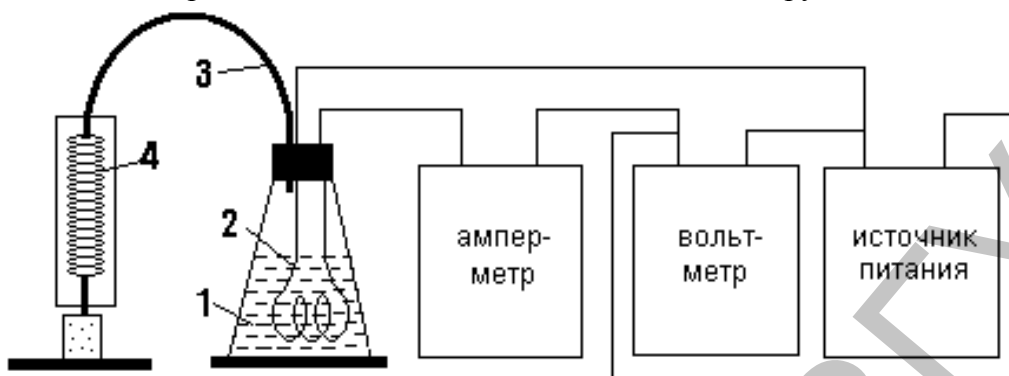


Рис. 2.

затратить на преодоление давления поверхностного слоя жидкости, на работу против сил молекулярного притяжения. Отсюда можно рассчитать силы молекулярного притяжения.

Удельная теплота перехода жидкости в пар зависит от природы жидкости, а для определенной жидкости является функцией температуры. С увеличением температуры удельная теплота парообразования уменьшается. В критическом состоянии различие между жидкостью и ее насыщенным паром исчезает и удельная теплота парообразования становится равной нулю.

Установка для определения удельной теплоты парообразования воды при температуре кипения изображена на рис. 2.

Колба 1, в которой находится вода, закрыта плотно резиновой пробкой, через которую проходят выводы спирали 2, служащей нагревателем. Через трубку 3 пар отводится в конденсатор 4. В конденсаторе циркулирует вода из крана водопровода. Пар, образующийся при кипении воды, проходит через конденсатор и превращается в воду, которую собирают в стеклянном сосуде. Спираль нагревается электрическим током, силу которого можно изменять с помощью автотрансформатора. Сила тока измеряется амперметром, напряжение на концах спирали — вольтметром.

Если нагреть воду в колбе до температуры кипения и дать ей кипеть 5 минут, то за это время колба прогреется настолько, что процессы, происходящие в ней, можно считать стационарными (не зависящими от времени). Это будет означать, что установится в среднем постоянная разность температур колбы и окружающей среды, и весь образующийся за некоторое время пар при прохождении через конденсатор будет превращаться в жидкость (за то же время).

Электрический ток, проходя по спирали, нагревает ее, при этом выделяется теплота Q , равная

$$Q = IUt \quad (3)$$

Эта теплота идет на превращение воды в пар при температуре кипения и на нагревание окружающей среды. Вследствие теплообмена между колбой и средой в случае стационарного режима тепловые потери за единицу времени постоянны, следовательно, постоянно и количество теплоты, идущее за единицу времени на превращение воды в пар. Тогда

$$Q = I_1 U_1 t = Q_1 + q, \quad (4)$$

где Q_1 — количество теплоты, идущее на образование пара в течение времени t , q — тепловые потери за то же время.

Если за время t испарилась масса воды m_1 , то $Q_1 = m_1\lambda$, где λ – удельная теплота парообразования воды при температуре кипения при атмосферном давлении.

В этом случае

$$I_1 U_1 t = m_1 \lambda + q. \quad (5)$$

Массу воды m_1 , которая испарилась за время t , можно найти экспериментально, потому что при стационарном режиме она будет равна массе воды, полученной за то же самое время при конденсации пара.

Тепловые потери q экспериментально трудно определить, поэтому с некоторой погрешностью их можно исключить, повторяя опыт при другой мощности электрического тока. При этом снова собирают конденсат в условиях стационарного режима за то же время. Масса пара, образовавшегося за единицу времени, в повторном опыте будет иной, поэтому для обеспечения его полной конденсации при увеличенной мощности электрического тока необходимо увеличить скорость течения охлаждающей воды. Тепловые потери во втором опыте можно принять приблизительно равными потерям в первом опыте. Тогда

$$I_2 U_2 t = m_2 \lambda + q. \quad (6)$$

Из (5), (6) находится λ

$$\lambda = (I_2 U_2 - I_1 U_1) t / (m_2 - m_1). \quad (7)$$

Основным недостатком данного метода, как и других методов определения удельной теплоты перехода жидкости в пар, является трудность получения сухого пара. В подобных установках всегда есть вероятность уноса с паром капелек кипящей жидкости, что приводит к ошибке при определении удельной теплоты парообразования. Большое значение для обеспечения необходимой точности измерения λ имеет стационарность режима, при котором проводятся измерения. В условиях нестационарного режима ошибка возникает за счет тепловых потерь и не полной конденсации пара в конденсаторе.

Порядок выполнения работы

1. Соединив с водопроводным краном конденсатор, заполнить его водой, плавно поворачивая кран. При этом вода должна поступать из крана в конденсатор, затем выливаться в раковину.
2. Через автотрансформатор подать на спираль электронагревателя напряжение, указанное преподавателем, и записать показания вольтметра и амперметра. Через 5 минут после того, как вода в колбе начала кипеть, в сухой стеклянный сосуд собирается конденсат на протяжении 4-х минут.
3. Взвесить сосуд с водой. Массу сосуда находить не нужно, потому что в расчетную формулу входит только разность масс воды, собранной в двух сериях измерений.
4. Изменив накал спирали, провести вторую серию измерений. Целесообразно во второй серии измерений использовать 2/3 или 3/4 мощности электрического тока первой серии.
5. По формуле (7) определить λ и сравнить с табличным значением. Рассчитать абсолютную и относительную погрешности измерений λ .

Замечания:

1. Нельзя допускать очень бурного кипения воды в колбе.
2. После окончания измерений не забудьте выключить источник тока и закрыть водопроводный кран.

I_1, A	U_1, B	$I_1 U_1, B\Gamma$	$m_1, кг$

I_2, A	U_2, B	$I_2 U_2, B\Gamma$	$m_2, кг$

$I_2 U_2 - I_1 U_1, B\Gamma$	$m_2 - m_1, кг$	t, c

Вычисления:

$$\lambda = \text{_____} =$$

Расчет погрешности измерений

Записать окончательный результат:

$$\lambda = (\quad \pm \quad) \quad ; \quad \varepsilon = \quad \%$$

Вывод:

Контрольные вопросы:

1. Как объяснить с точки зрения молекулярно-кинетической теории уменьшение удельной теплоты парообразования при возрастании температуры?
2. Сравнить работу выхода одной молекулы водяного пара из воды с величиной $kT/2$. Объяснить результат.
3. При каких условиях имеет место процесс кипения жидкости?
4. Как осуществить непрерывный переход вещества из жидкой фазы в газообразную (или обратно) без расслаивания системы на две фазы?
5. Какое значение имеют скрытая теплота парообразования и поверхностное натяжение жидкости в критической точке?

Литература:

[1: §104]; [2: §35]; [3: §114]; [5: §§81,82].

Лабораторная работа №8

Измерение коэффициента поверхностного натяжения жидкости

Цель работы: измерить коэффициент поверхностного натяжения воды методом отрыва кольца.

Оборудование: сосуд, стакан, пружина, кольцо, штатив универсальный, весы с разновесами.

Теория работы и описание установки

Силы притяжения между молекулами жидкости быстро убывают с увеличением расстояния. Они практически обращаются в нуль уже на расстоянии порядка 10^{-9} м. Поэтому результат воздействия на каждую молекулу определяется только ближайшими ее соседями. Он существенно зависит от того, где находится рассматриваемая молекула. Если последняя расположена внутри жидкости (на расстоянии, большем, чем 10^{-9} м от границы жидкости), то силы взаимодействия со всеми окружающими ее молекулами в среднем уравниваются. В отличие от этого, среднее значение силы, действующей на молекулу поверхностного слоя жидкости толщиной порядка 10^{-9} м, не равно нулю; это обусловливается тем, что молекула, расположенная на поверхности жидкости, частично граничит с молекулами той же жидкости, а частично – с молекулами другой среды, например, воздуха и пара или стенки сосуда. Вследствие разных плотностей и природы молекул, сила, действующая на выделенную молекулу жидкости со стороны другой среды, отличается от силы ее взаимодействия с молекулами жидкости. В итоге результирующая сила, действующая на каждую молекулу поверхностного слоя, направлена либо внутрь жидкости, либо в сторону граничащей с ней среды. Поэтому при перемещении молекул из поверхностного слоя вглубь жидкости или, наоборот, из глубины жидкости на поверхность совершается работа. Эта работа тем больше, чем больше различие между силами взаимодействия молекул поверхностного слоя с молекулами жидкости и молекулами граничащей среды.

Рассмотрим жидкость, граничащую со своим паром (в состоянии, далеко от критического). Концентрация молекул в воздухе и паре намного меньше, чем в жидкости. Поэтому на молекулы поверхностного слоя жидкости действует сила, направленная внутрь жидкости. Предположим теперь, что площадь поверхности жидкости при изотермическом обратимом процессе увеличилась на величину dS . Это значит, что некоторое количество молекул перешло из глубины жидкости в поверхностный слой. Следовательно, внешними силами совершена некоторая работа δA , которая прямо пропорциональна количеству молекул, перешедших в поверхностный слой, а значит, и увеличению площади поверхности жидкости dS :

$$\delta A = \sigma dS, \quad (1)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения.

Из (1) следует, что коэффициент поверхностного натяжения определяется работой, необходимой для изотермического, обратимого увеличения площади поверхности на единицу.

Поскольку работа при изотермическом, обратимом процессе равна изменению свободной энергии системы ($\delta A = dE$), то избыточная потенциальная энергия поверхности жидкости является ее свободной энергией E . Тогда коэффициент поверхностного натяжения можно определить как свободную энергию единицы площади поверхности жидкости:

$$\sigma = \frac{dE}{dS} \quad \text{или} \quad \sigma = \frac{E}{S}. \quad (2)$$

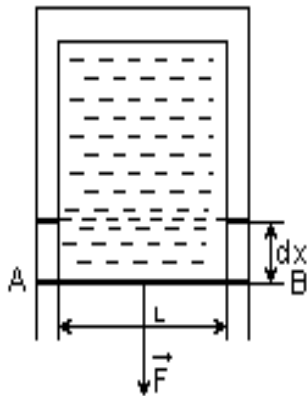


Рис. 1.

ка имеет две поверхности, вдоль каждой из которых действует сила поверхностного натяжения F_n , то

$$F = 2F_n. \quad (3)$$

Предположим, что при постоянной температуре бесконечно медленно перемычка АВ перемещается на расстояние dx (см. рис. 1). При этом внешняя сила совершает работу

$$\delta A = 2F_n dx. \quad (4)$$

Эта работа пойдет на увеличение свободной энергии поверхности пленки

$$\delta A = dE = \sigma dS = \sigma \cdot 2Ldx, \quad (5)$$

где L – длина перемычки АВ. Тогда из (4) и (5) получим:

$$\sigma = \frac{F_n}{L}. \quad (6)$$

Следовательно, коэффициент поверхностного натяжения можно определить как величину силы поверхностного натяжения, действующей на единицу длины линии раздела поверхности жидкости.

В работе используется установка, схема которой приведена на рис. 2.

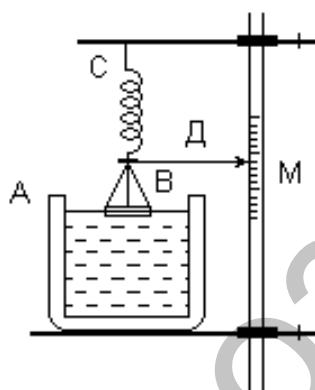


Рис. 2.

Исследуемая жидкость находится в сосуде А. Кольцо В, изготовленное из материала, хорошо смачиваемого этой жидкостью, подвешено на пружине С, к нижнему концу которой прикреплена стрелка Д. Удлинение пружины и, следовательно, сила ее натяжения определяются по шкале М, которая нанесена на штативе. При соприкосновении кольца с поверхностью исследуемой жидкости последняя, смачивая кольцо, поднимается по его стенкам и за счет силы поверхностного натяжения несколько втягивает кольцо внутрь жидкости.

По мере опускания поверхности воды пружина будет растягиваться, и в некоторый момент времени кольцо от поверхности оторвется. В этот момент сила поверхностного натяжения F_n , действующая на всю длину линии разрыва поверхности, будет равна упругой силе f , возникшей в растянутой пружине:

$$F_n = f. \quad (7)$$

(действие силы тяжести кольца, стрелки и самой пружины учитывается выбором начала отсчета удлинения пружины).

Поверхность жидкости разрывается по линиям двух окружностей (внешней и внутренней окружности кольца). Длина линии разрыва:

$$L = \pi(d_1 + d_2), \quad (8)$$

где d_1 и d_2 – внешний и внутренний диаметры кольца.

Из (6)-(8) найдем:

$$\sigma = \frac{f}{\pi(d_1 + d_2)}. \quad (9)$$

Порядок выполнения работы

1. Измерить массу кольца m .
2. Подвесив кольцо на пружину, определить коэффициент жесткости пружины k . При равновесии $F_{\text{упр}} = mg$. Тогда, по закону Гука, получим:

$$k\Delta l_1 = mg \quad (10)$$

откуда

$$k = mg/\Delta l_1, \quad (11)$$

где Δl_1 – удлинение пружины, измерить Δl_1 .

3. В сосуд налить исследуемую жидкость (воду) так, чтобы кольцо касалось поверхности жидкости.

4. Медленно опустить сосуд с жидкостью до отрыва кольца. Определить дополнительное удлинение пружины Δl_2 , обусловленное силой поверхностного натяжения.

5. Рассчитать силу поверхностного натяжения пружины:

$$F_n = k\Delta l_2. \quad (12)$$

6. Провести ряд повторных измерений согласно пунктам 1-5 и определить средние значения $\langle \Delta l_1 \rangle$, $\langle \Delta l_2 \rangle$ и $\langle F_n \rangle$.

7. Измерить внешний и внутренний диаметры кольца, найти их средние значения $\langle d_1 \rangle$ и $\langle d_2 \rangle$.

8. По формуле (9) с учетом формулы (7) и найденных средних значений $\langle F_n \rangle$, $\langle d_1 \rangle$ и $\langle d_2 \rangle$ определить коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

9. Рассчитать погрешность измерений.

10. Сравнить полученный результат с табличным.

11. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу.

$m =$ кг							
№ пп.	Δl_1 , м	Δl_2 , м	k , Н/м	F_n , Н	d_1 , М	d_2 , м	σ , Н/м
1							
2							
3							
4							
5							
среднее			—				

Вычисления:

Расчет погрешности измерений

Записать окончательный результат:

$$\sigma = (\quad \pm \quad) \quad ; \quad \varepsilon = \quad \%$$

Вывод:

Контрольные вопросы:

1. В чем сущность явления поверхностного натяжения?
2. Что является причиной поднятия жидкости в капиллярах?
3. Что такое краевой угол?
4. Что такое кривизна поверхности жидкости?
5. Каков физический смысл поверхностного натяжения жидкости? От чего зависит эта величина?

Литература:

[1: §98]; [2: §34]; [3: §§94-96]; [4: §7.2]; [5: §77].

Лабораторная работа №9

Определение линейной скорости роста кристаллов

Цель работы: определить линейную скорость роста кристалла медного купороса.

Оборудование: микроскоп, секундомер, насыщенный водный раствор медного купороса, пипетка.

Теория работы и описание установки

В физике твердыми телами обычно называются только кристаллические тела. Аморфные тела, хотя они могут быть твердыми, в обыденном смысле рассматриваются как очень вязкие жидкости. Свойства кристаллов неодинаковы по различным направлениям – кристаллы анизотропны. Скорость распространения света, коэффициенты теплопроводности, модуль упругости и многие другие физические свойства кристалла сильно зависят от направления в нем.

Кристаллы можно получить различными способами, например, охлаждением жидкости. При таком охлаждении, если не принять специальных мер предосторожности, в жидкой фазе возникает множество центров кристаллизации, вокруг которых происходит образование твердой фазы. Возникает множество мелких кристаллов, сливающихся друг с другом и образующих так называемое поликристаллическое тело. Хотя каждый из кристаллов, образующих такое тело, анизотропен, но ввиду хаотичности ориентировки этих кристалликов, поликристаллическое тело, в целом, является изотропным.

Если в охлажденную жидкость ввести затравку – маленький кристаллик, то кристаллизация начнется на нем, и можно вырастить большой монокристалл правильной формы. Для этого необходимо, чтобы условия роста кристалла были одинаковыми на всех его поверхностях, что может быть достигнуто вращением затравки в растворе. Одним из характерных признаков кристалла определенного вещества является постоянство углов между гранями и, как следствие этого, характерная форма каждого кристалла. Если из кристалла, имеющего определенную характерную форму, выточить шарик и поместить его в насыщенный раствор вещества кристалла, то форма кристалла будет стремиться восстановиться. Причиной такого восстановления формы кристалла является условие минимума потенциальной энергии: поверхностная энергия кристалла должна быть минимальной. Характерные для данного кристалла условия минимума поверхностной энергии соответствуют его структуре, углам между гранями и т.д.

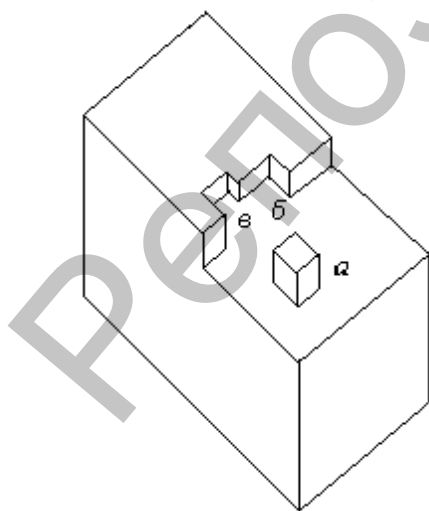


Рис. 1.

При помещении кристалла в насыщенный раствор или в расплав между твердой и жидкой фазами устанавливается динамическое равновесие: атомы из твердой фазы переходят в жидкую фазу, а из жидкой – в твердую. Но осаждение из жидкой фазы идет так, что образуется система с минимумом потенциальной энергии, т.е. образуется характерная для данного вещества форма кристалла, и все бывшие нарушения этой формы исчезают, поэтому шарик в описанном опыте стре-

мится превратиться в характерную кристаллическую форму.

Восстановление формы кристалла происходит даже в отсутствие раствора, из которого молекулы оседают на кристалл. Если повредить кристалл, срезав в некоторых местах выступающие части, а затем нагреть кристалл до достаточно высокой температуры, лишь на несколько градусов ниже точки плавления, то замечается, что форма кристалла в некоторой степени восстанавливается. Здесь происходит миграция атомов по поверхности, и перемещающиеся атомы располагаются так, что образуется структура с минимумом потенциальной энергии, то есть характерная для данного вещества правильная форма кристалла. Форма кристалла, при которой выполняется условие минимума поверхностной энергии, называется равновесной формой.

Равновесная форма кристалла возникает тогда, когда кристалл находится в окружении второй фазы того же вещества, например, в растворе, расплаве, газовой фазе. Простейшее представление о механизме роста кристалла состоит в том, что отдельные атомы из раствора или газа оседают на поверхности уже образовавшегося зародыша кристалла. Однако такое оседание не всегда возможно. Если поверхность зародыша представляет собой плоскость, то осевшему атому очень трудно на ней удержаться. Наличие энергии теплового движения приводит к отрыву этого атома от плоскости зародыша. Условия оседания атома значительно облегчаются, если поверхность зародыша кристалла неровная (рис. 1).

Атому значительно легче осесть в положении *б* и особенно в положении *в* и очень трудно удержаться в положении *а*. В положениях *в* и *б* силы сцепления между осевшим атомом и соседними атомами значительно больше, а следовательно, потенциальная энергия меньше, чем в положении *а*. В реальных кристаллах не бывает таких гладких поверхностей, как изображено на рис. 1. На поверхность кристалла выходят линейные и винтовые дислокации. Такие места выхода дислокаций служат центрами спирального роста кристалла.

Существует несколько методов выращивания монокристаллов, а именно: 1) из расплава; 2) из раствора; 3) из газовой фазы; 4) из твердой фазы (регулитализация).

В данной работе исследуется скорость роста определенной грани кристалла, выращиваемого из водного раствора. Это самый старый метод получения кристаллов. Он применяется при самых разнообразных производственных процессах получения кристаллических продуктов – от пищевого сахара до сульфата меди.

При выращивании из водных растворов монокристаллов, так же как и во

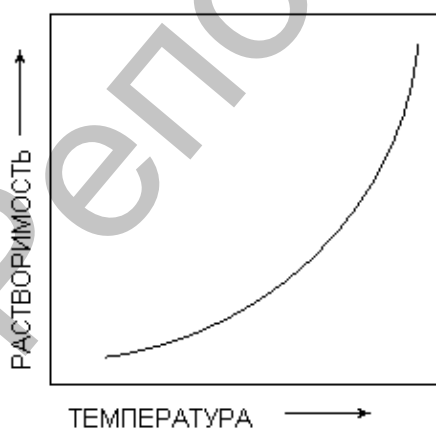


Рис. 2.

различными методами.

всех других методах выращивания из растворов, задача состоит в том, чтобы достичь пересыщения раствора без спонтанного (самопроизвольного) образования зародышей, а затем установить нужное пересыщение и тем самым соответствующие скорости роста, при которых уже возможен контролируемый рост на затравке кристалла нужной степени совершенства. Затравка представляет собой малый монокристалл вещества, вводимый в пересыщенный водный раствор данного вещества и служащий основой для выращивания больших монокристаллов. Создать пересыщенный раствор можно раз-

На рис. 2 приведена кривая зависимости растворимости от температуры для большинства веществ при обычных условиях. В большинстве случаев указанная зависимость описывается уравнением Вант Гоффа:

$$\frac{d \ln S}{dT} = \frac{\Delta H}{RT^2}, \quad (1)$$

где S – растворимость (выражаемая в атомных долях), T – абсолютная температура, ΔH – теплота растворения, R – универсальная газовая постоянная.

Если скорость роста кристалла определяется как количество вещества $\frac{dm}{dt}$, осажженного на грани в единицу времени, а линейная скорость роста $v_{\text{лин}}$ – как скорость, измеренная по перпендикуляру к грани, с которой грань передвигается параллельно самой себе в окружающем растворе, то эти две скорости связаны следующей формулой:

$$\frac{dm}{dt} = Fv_{\text{лин}}, \quad (2)$$

где F – площадь грани.

Встройка частиц в различные грани происходит с неодинаковой скоростью, поэтому для процесса встройки справедливо уравнение:

$$\frac{dm}{dt} = Fv_{\text{лин}} = \alpha F(C^{hkl} - C_0), \quad (3)$$

где C_0 – концентрация насыщения раствора, C^{hkl} – концентрация раствора у растущей грани hkl , числа h, k, l – индексы плоскости, α – коэффициент, неодинаковый для различных граней. В конечной стадии процесса роста кристалл должен быть ограничен гранями с минимальной скоростью перемещения.

Порядок выполнения работы

1. На предметное стекло микроскопа нанести 1-2 капли насыщенного водного раствора медного купороса при температуре на 10-15 градусов выше комнатной. На предметном стекле происходит испарение воды из раствора, температура раствора понижается, и он становится пересыщенным. Из него через несколько минут выпадает несколько кристалликов. Путем наблюдения в микроскоп выбрать один из них, удаленный от других кристалликов.

2. Передвигая предметное стекло, выбранный кристаллик вывести на середину поля зрения микроскопа.

3. Поворачивая окуляр микроскопа, отсчетную шкалу установить перпендикулярно выбранной грани. При этом штрихи делений шкалы будут параллельны грани, линейная скорость роста которой измеряется.

4. Произвести отсчет положения правой ($n^{\text{пр}}$) и левой ($n^{\text{л}}$) граней по шкале окуляра и одновременно пустить в ход секундомер. Определение положения граней производите через каждые 1-2 минуты.

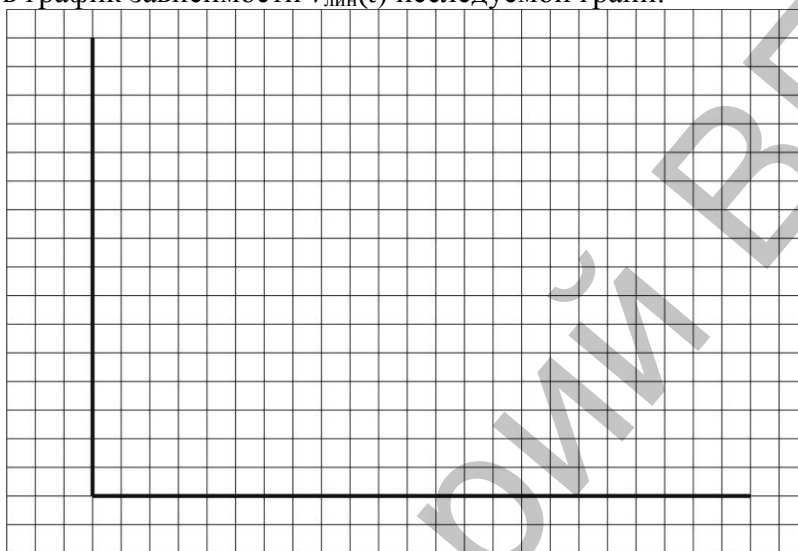
5. Определить линейные скорости роста правой и левой граней на каждом интервале времени из соотношения: $v_{\text{лин}} = 0,014(n_i - n_{i-1})/t$ мм/с, где n_i, n_{i-1} – числа делений шкалы в предыдущем и последующем отсчетах.

6. Полученные данные занести в таблицу.

Таблица

t , мин	$n^{\text{л}}$, дел.	$v_{\text{лин}}^{\text{л}}$, мм/с	$n^{\text{пр}}$, дел.	$v_{\text{лин}}^{\text{пр}}$, мм/с

7. Построить график зависимости $v_{\text{лин}}(t)$ исследуемой грани.



Вывод:

Контрольные вопросы:

1. Что такое элементарная ячейка?
2. Что называется узлами, параметрами и индексами плоскости пространственной решетки?
3. Сколько типов кристаллических систем имеется? Сколько имеется типов примитивных параллелепипедов Браве?
4. Каковы источники дефектов макромолекулярных кристаллов? Перечислить важнейшие дефекты.
5. Какие существуют методы выращивания монокристаллов? В чем сущность этих методов?

Литература:

[1: §§119,120]; [2: §§43,47]; [3: §§124,125]; [4: §§8.1,8.2]; [5: §§87-89].

Лабораторная работа №10

Определение коэффициента линейного термического расширения (КЛТР) металлов

Цель работы: освоить методы определения коэффициента линейного термического расширения металлов. Измерить КЛТР стали и латуни.

Оборудование: прибор с двумя металлическими трубками, индикатор, электроплитка, парообразователь.

Теория работы и описание установки

Твердое кристаллическое тело состоит из частиц (атомов, ионов, молекул), расположенных упорядоченно друг относительно друга и образующих кристаллическую пространственную решетку. В дальнейшем, для краткости, частицей у нас будет являться атом. Совокупность атомов кристаллической решетки, вследствие их взаимодействия друг с другом, создает потенциальное поле кристалла. Каждый атом этой кристаллической решетки находится в этом поле и колеблется относительно своего положения равновесия. Такой колеблющийся атом называется осциллятором.

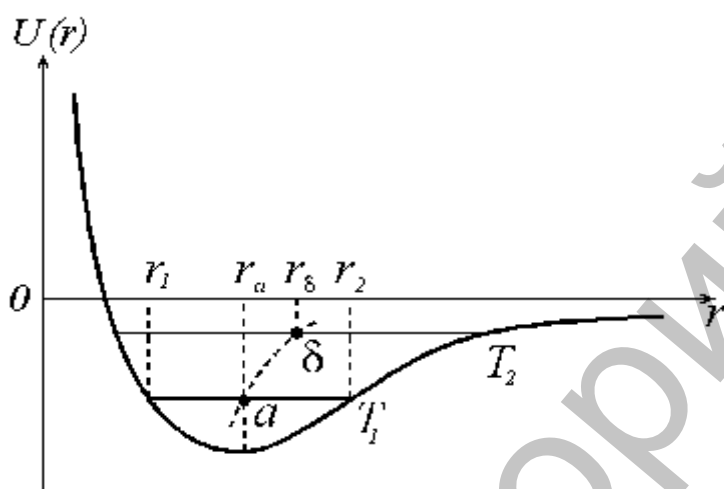


Рис. 1.

Кристалл, состоящий из N атомов, представляет собой систему N осцилляторов, взаимодействующих между собой.

На рис.1 приведена кривая полной энергии межатомного взаимодействия. Пусть горизонтальная прямая a изображает уровень энергии рассматриваемого атома в кристаллической решетке при температуре T_1 . Точки r_1 и r_2 определяют крайние положения, которые занимает атом в решетке при своих колебаниях. Середина прямой определяет положение равновесия атома в решетке при данной температуре T_1 . При повышении температуры атом переходит на более высокий энергетический уровень, определяемый прямой δ . Ввиду асимметрии кривой $U(r)$ центр прямой δ смещен относительно центра прямой a вправо. Это означает смещение положения равновесия атома: межатомное расстояние увеличивается, что и обуславливает расширение кристалла при нагревании.

Т.о., причиной увеличения линейных размеров тела при нагревании является не увеличение амплитуды колебаний атомов, а увеличение межатомных расстояний, характеризующих положение равновесия. Поэтому коэффициент линейного термического расширения вдоль оси Ox будет равен:

$$\alpha = \frac{r_{\delta} - r_a}{r_a (T_2 - T_1)} \quad (1)$$

Вследствие анизотропии кристаллов, коэффициент линейного термического расширения α может быть различным в разных направлениях. Это означает,

что если из данного кристалла выточить шар, то после его нагревания он потеряет сферическую форму. В самом общем случае такой шар при нагревании превращается в трехосный эллипсоид, оси которого связаны с кристаллографическими осями кристалла. Коэффициенты линейного термического расширения по трем осям этого эллипсоида называются главными КЛТР кристалла. Если их обозначить соответственно через α_1 , α_2 , α_3 , то коэффициент объемного термического расширения кристалла

$$\beta = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3. \quad (2)$$

Для кристаллов с кубической симметрией, так же как и для изотропных тел

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha \text{ и } \beta = 3\alpha. \quad (3)$$

Коэффициенты линейного и объемного термического расширения практически остаются постоянными, если интервалы температур, в которых они измеряются, малы, а сами температуры высокие. Вообще же, коэффициенты термического расширения зависят от температуры и при том так же, как и теплоемкость. Отношение коэффициента линейного термического расширения к молярной теплоемкости твердого тела для данного вещества, есть величина постоянная, не зависящая от температуры. Это закон Грюнайзена:

$$\alpha/C = \text{const}. \quad (4)$$

Фазовый переход 1-го рода сопровождается скачкообразным изменением объема при температуре перехода.

Поэтому на температурных зависимостях КЛТР при фазовом переходе 1-го рода наблюдается пик, подобный тому, что изображен на рис. 2. Установлена простая эмпирическая связь между КЛТР и температурой плавления:

$$\alpha T_m^n = A, \quad (5)$$

где A и n – постоянные величины, одинаковые для веществ с одинаковыми кристаллической решеткой и типом связи. Из соотношения (6) видно, что чем больше у вещества КЛТР, тем меньше его температура плавления.

В работе используется установка, схема которой приведена на рис. 3.

Прибор (рис.3) предназначен для лабораторных работ по определению с помощью индикатора КЛТР твердых тел в виде трубок. Он состоит из пластмассовой подставки 1, стойки 2 с зажимным винтом 3, стойки 4 с втулкой 5, в которую вставляется индикатор 6, закрепляемый винтом 7, двух металлических трубок (стальной и латунной) 8, на которых закреплена пластина 9.

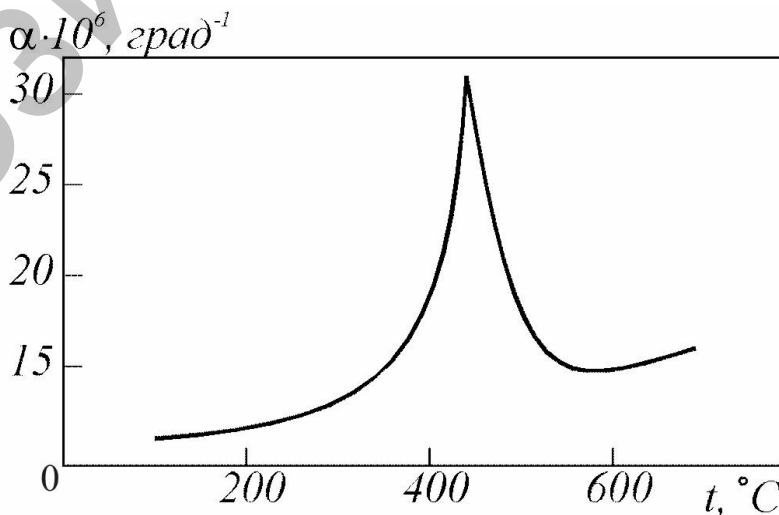


Рис. 2. Зависимость $\alpha = f(t)$ для кобальта.

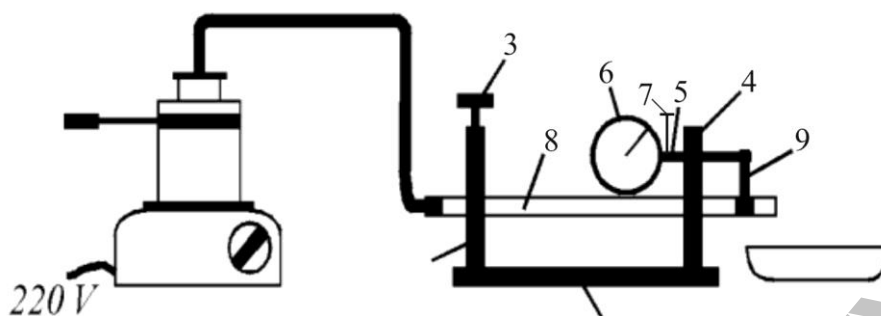


Рис. 3.

Порядок выполнения работы

1. Совместить нулевую отметку шкалы индикатора 6 со стрелкой путем поворота кольца индикатора.
 2. Измерить линейкой длину рабочего участка трубки L от центра винта 3 до ближайшей к нему стороны пластины 9.
 3. Определить комнатную температуру.
 4. Еще раз проверив установку индикатора на «0», налить воду в парообразователь и соединить его шлангом с прибором. Поставить парообразователь на электроплитку и включить ее. Пар, образовавшийся при кипении воды в парообразователе, проходя через металлическую трубку, нагревает ее.
 5. Производить нагрев трубки до тех пор, пока изменяются показания индикатора. При установившемся показании индикатора записать значение удлинения ΔL рабочей части трубки по красной шкале индикатора (цена одного малого деления 0,01 мм).
 6. Провести 3 измерения величины ΔL для каждой трубки и вычислить среднее значение.
- Для ускорения работы рекомендуется проводить эксперимент, чередуя различные трубки (одна участвует в опыте, другая тем временем охлаждается).
7. Определить КЛТР стали и латуни из соотношения

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L(T - T_k)} \quad (6)$$

где ΔL – удлинение рабочей части трубки при нагревании, L – длина рабочей части трубки при комнатной температуре, T – конечная температура, равная 373 К, T_k – начальная комнатная температура.

8. Данные эксперимента занести в таблицу 1.

Таблица 1

Сталь				Латунь			
№ п/п	L , мм	ΔL , мм	$\alpha \cdot 10^{-6}$, K^{-1}	№ п/п	L , мм	ΔL , мм	$\alpha \cdot 10^{-6}$, K^{-1}
1.				1.			
2.				2.			
3.				3.			
ср.	—	—		ср.	—	—	

9. Найти абсолютную и относительную погрешности в определении α .
10. Сопоставить результаты данной работы с данными таблицы 2 для α .

Таблица 2

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	$\alpha \cdot 10^{-6}, \text{град}^{-1}$
Алюминий	0-100	23,8
Железо	0-100	11,4
Сталь (1,5 % С)	0-100	10,5
Латунь (62 % Cu, 38 % Zn)	10-16	18,9
Медь	18	16,7

Вычисления:

$$T - T_k =$$

Сталь:

$$\alpha_1 =$$

$$\alpha_2 =$$

$$\alpha_3 =$$

$$\langle \alpha \rangle = \frac{\quad}{3} =$$

Латунь:

$$\alpha_1 =$$

$$\alpha_2 =$$

$$\alpha_3 =$$

$$\langle \alpha \rangle = \frac{\quad}{3} =$$

Расчет погрешности измерений

Записать окончательные результаты:

$$\alpha = (\quad \pm \quad) \quad ; \quad \varepsilon = \quad \% \quad (\text{для стали})$$

$$\alpha = (\quad \pm \quad) \quad ; \quad \varepsilon = \quad \% \quad (\text{для латуни})$$

Вывод:**Контрольные вопросы:**

1. Может ли быть КЛТР отрицательной величиной? Объяснить по кривой $U(r)$ (рис.1).
2. Где в технике необходимо учитывать термическое расширение твердых тел?
3. На каком принципе работает реле, в которое входит биметаллическая пластинка?

Литература:

[1: §139]; [3: §112]; [4: §8.6]; [5: §93].

Лабораторная работа №11

Изучение явления теплоемкости

Цель работы: измерение теплоемкости стали.

Оборудование: измеритель теплоемкости ИТ-С-400, блок питания и регулирования, микровольтнаноамперметр Ф136, секундомер.

Теория работы и описание установки

Внутренняя энергия твердого кристаллического тела представляет собой суммарную энергию колебательного движения частиц, находящихся в узлах кристаллической решетки, а также потенциальную энергию их взаимодействия. Из-за наличия сил взаимодействия между молекулами, их колебания нужно рассматривать как связанные. Однако, при достаточно высоких температурах силы взаимодействия между молекулами ослабевают настолько, что ими можно пренебречь и предположить, что вся внутренняя энергия тела – энергия колебательного движения частиц этого тела.

Частица, совершающая колебательное движение, в любой момент времени обладает как кинетической E_k , так и потенциальной энергией E_n колебаний, причем полная энергия равна их сумме:

$$E = E_k + E_n. \quad (1)$$

Средние значения кинетической и потенциальной энергии равны между собой, тогда среднее значение полной энергии равно:

$$\langle E \rangle = 2 \langle E_k \rangle. \quad (2)$$

Среднее значение кинетической энергии $\langle E_k \rangle = \frac{i}{2} kT$, следовательно, полную энергию можно записать как

$$E = i kT. \quad (3)$$

Полную внутреннюю энергию одного моля получим, умножив энергию одной молекулы на число Авогадро N_A :

$$U = \langle E \rangle N_A = i N_A kT = iRT. \quad (4)$$

Каждая из составляющих решетку частиц может совершать колебания в любом направлении, т.е. она имеет три степени свободы ($i=3$). Тогда

$$U = 3RT. \quad (5)$$

Изменение объема твердых тел при нагревании мало, поэтому, в отличие от газов, имеет смысл говорить лишь об изохорической теплоемкости, равной

$$C_V = C = dU/dT. \quad (6)$$

Возьмем производную по T от U (формула 5), получим выражение для молярной теплоемкости твердого кристаллического вещества.

$$C = 3R. \quad (7)$$

Формула (7) является математической записью закона Дюлонга и Пти: молярная теплоемкость всех химически простых кристаллических твердых тел при достаточно высокой температуре равна $3R$.

Этот результат хорошо согласуется с опытными данными, полученными при комнатной температуре. Исключение составляют алмаз, бериллий, бор, кремний и алюминий, теплоемкость которых значительно меньше $3R$ при комнатной температуре. Кроме того, классическая теория не объясняет температурной зависимости теплоемкости кристаллов. Строгую теорию теплоемкости можно построить лишь на основании квантовой механики.

Модели для объяснения температурной зависимости теплоемкости кристаллов были предложены Эйнштейном и Дебаем. Согласно модели Эйнштейна

каждый атом представляет собой квантовый осциллятор, энергия которого может принимать только дискретные значения кратные $h\nu_0$, где ν_0 – частота колебаний, одинаковая для всех осцилляторов, h – постоянная Планка. Средняя энергия трехмерного квантового осциллятора равна

$$\langle W \rangle = \frac{3h\nu_0}{\exp\left(\frac{h\nu_0}{kT}\right) - 1}. \quad (8)$$

Чтобы получить внутреннюю энергию одного моля кристаллического вещества, нужно умножить энергию одного осциллятора на число Авогадро N_0 :

$$U = \frac{3N_0 h\nu_0}{\exp\left(\frac{h\nu_0}{kT}\right) - 1}. \quad (9)$$

Теплоемкость кристаллов определяем, продифференцировав (9) по T

$$C_V = \frac{dU}{dT} = 3N_0 k \left(\frac{h\nu_0}{kT}\right)^2 \frac{\exp\left(\frac{h\nu_0}{kT}\right)}{\left(\exp\left(\frac{h\nu_0}{kT}\right) - 1\right)^2}. \quad (10)$$

Температурная зависимость теплоемкости, вычисленная по теории Эйнштейна, близка к экспериментально наблюдаемой, и только при низкой температуре расхождение значительно. Недостаток модели объясняется слишком упрощенным предположением Эйнштейна о равенстве частот всех осцилляторов.

Эти недостатки устранил Дебай. Он предположил, что частота колебания узлов решетки растет с повышением температуры, что является причиной роста теплоемкости. При некоторой температуре Θ , называемой температурой Дебая, частота достигает своего предельного значения $\nu_{\max} = 10\text{--}12$ Гц, после чего рост теплоемкости прекращается.

Приведем полученное Дебаем выражение для температурной зависимости теплоемкости без вывода, т.к вывод требует определенных знаний по квантовой механике. По Дебаю теплоемкость кристаллов при низких температурах

$$C = \frac{12\pi^4 N_0 k}{5} \left(\frac{T}{\Theta_D}\right)^3, \quad (11)$$

где $\Theta_D = \frac{h\nu_{\max}}{k}$ (температура Дебая).

Соотношение (11) можно записать в виде:

$$C = at^3. \quad (12)$$

Выражение (12) – закон кубов Дебая – дает хорошее качественное и количественное соответствие экспериментальным данным. При $T \gg \Theta_D$ теплоемкость кристаллов равна $3R$.

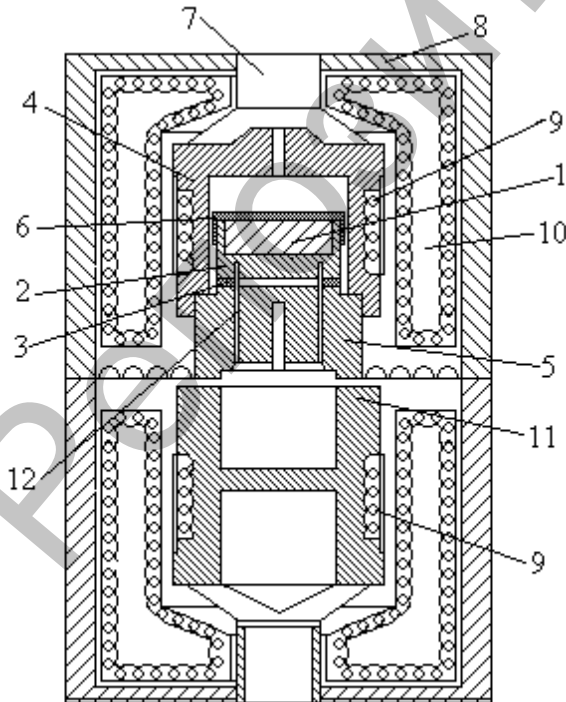


Рис. 1

Теоретической основой всех известных методов измерения теплоемкости является первое начало термодинамики и закон теплопроводности Фурье.

Само явление теплопроводности заключается в переносе некоторого количества теплоты ΔQ от горячего слоя материала к холодному. Экспериментально установлено, что количество теплоты ΔQ , проходящее через площадь ΔS за время Δt в направлении уменьшения температуры прямо пропорционально градиенту температуры:

$$\Delta Q = -\lambda \cdot \text{grad } T \Delta S \Delta t ,$$

где λ – коэффициент теплопроводности.

Тепловой поток

$$q = \frac{\Delta Q}{\Delta S \Delta t} , \quad q = -\lambda \text{ grad } T . \quad (13)$$

В зависимости от условий проведения экспериментальные методы делятся на стационарные и нестационарные (динамические), абсолютные и относительные. В стационарных методах тепловые условия (температура, тепловые потоки) не меняются со временем. В динамических – меняются.

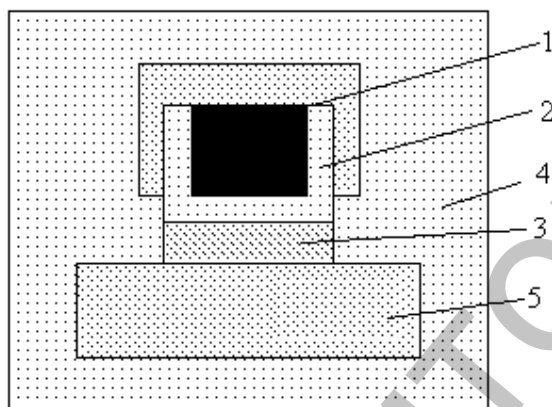


Рис. 2.

В абсолютных методах отдельно измеряются параметры, на основании которых определяется теплоемкость, в остальных она определяется путем сравнения с эталонными образцами, свойства которых известны. В зависимости от организации теплового потока методы делятся на методы с косвенным подогревом и внутренним. При косвенном подогреве тепловой поток создается внешними тепловыми источниками – нагревателями, при внутреннем – выделяется в самом

образце (например, при пропускании через него электрического тока).

Данная лабораторная работа поставлена на промышленном приборе «Измеритель теплоёмкости ИТ-С-400», в котором используется динамический метод с косвенным подогревом.

Тепловая схема метода динамического С-калориметра приведена на рис.2, а схема измерительной ячейки – на рис. 1. Испытуемый металлический (или твердотельный) образец (1) в форме цилиндра размещается внутри металлической ампулы (2) с крышкой (6). Образец и ампула монотонно нагреваются за счёт тепла, поступающего через цилиндрический стальной тепломер (3) от медного основания (5). Основание нагревается блоком нагревателей (11). Температура блока нагревателей возрастает со временем по линейному закону, что обеспечивается плавным ростом подаваемого напряжения. Скорость нагрева медного основания $v = T/t$ составляет около 0,1 К/с. На границах тепломера (3) с основанием с одной стороны и ампулой с другой – размещены термопары T_1 и T_2 (12) соответственно. Они позволяют измерить температуру по краям тепломера.

Для уменьшения неучтенных тепловых потерь во внешнюю среду ячейка окружена адиабатной оболочкой (4) с нагревателем. Нагреватель обеспечивает выравнивание температуры внутренней стенки с температурой ячейки, поэтому вдоль оси, перпендикулярной оси симметрии, температура воздуха меняется не-

значительно. Кроме того, λ для воздуха существенно ниже, чем для металлов, поэтому тепловой поток в воздухе пренебрежительно мал.

С учетом последнего при переходе тепла от тепломера к ампуле и образцу из закона сохранения энергии следует:

$$dQ_t = dQ_a = dQ_0, \quad (14)$$

где dQ_t – элементарное количество теплоты, отданное тепломером; dQ_a , dQ_0 – элементарные количества теплоты, полученные ампулой и образцом соответственно. Поскольку передача теплоты увеличивает температуру ампулы (T_a) и образца (T_0), то

$$dQ_a = C_a \Delta T_a, \quad (15)$$

$$dQ_0 = c_{p0} m_0 \Delta T_0, \quad (16)$$

где C_a – теплоемкость ампулы, c_{p0} – удельная теплоемкость образца, m_0 – масса образца, ΔT – изменение температуры.

Передача тепла осуществляется в направлении, параллельном оси тепломера (ось x). По закону Фурье:

$$dQ_t = \lambda_t \frac{dT_{tx}}{dx} S_t dt, \quad (17)$$

где λ_t – удельная теплопроводность тепломера, dT_{tx}/dx – модуль градиента температуры вдоль оси тепломера, t – время, в течение которого теплота передавалась от тепломера к ампуле и образцу.

В условиях эксперимента температура тепломера вдоль его оси изменяется по линейному закону, поэтому $dT_{tx}/dx = \Delta T_{tx}/h$, где ΔT_{tx} – разность температур на краях термометра (или разность показаний термопар), h – длина тепломера.

Следовательно:

$$\frac{\lambda_t |\Delta T_{tx}| S_t \Delta t}{h_t} = C_a \Delta T_a + c_{p0} m_0 \Delta T_0; \quad (18)$$

откуда:

$$\frac{\lambda_t |\Delta T_{tx}| S_t}{h_t} = C_a \frac{\Delta T_a}{\Delta t} + c_{p0} m_0 \frac{\Delta T_0}{\Delta t}. \quad (19)$$

В условиях эксперимента скорости нагрева тепломера, ампулы и образца совпадают:

$$v = \frac{\Delta T_a}{\Delta t} = \frac{\Delta T}{\Delta t};$$

поэтому:

$$\frac{\lambda_t |\Delta T_{tx}| S_t}{h_t} = C_a v + c_{p0} m_0 v,$$

откуда:

$$c_{p0} = \frac{\lambda_t |\Delta T_{tx}| S_t}{h_t m_0 v} - \frac{C_a}{m_0}, \quad (20)$$

обозначим $K_T = \frac{\lambda_t S_t}{h_t}$.

Тогда:

$$c_{p0} = \frac{K_T |\Delta T_{tx}|}{m_0 v} - \frac{C_a}{m_0}. \quad (21)$$

Если в некоторый момент времени термопара T_1 будет фиксировать температуру T_0 , то термопара T_2 покажет $T_0 - \Delta T_{\text{тх}}$. Время τ , в течение которого показание T_2 достигает величины T_0 , может быть определено из скорости нагрева (она одинакова для всех точек тепломера). Положив $\Delta T = \Delta T_{\text{тх}}$, имеем:

$$v = \Delta T_{\text{тх}} / \tau \quad \text{или} \quad \tau = \Delta T_{\text{тх}} / v.$$

С учетом этого

$$c_{p0} = (K_T \tau - C_a) / m_0. \quad (22)$$

Чтобы исключить из (22) C_a и определить K_T , проводятся дополнительные градуировочные эксперименты. Если проводить измерения τ вообще без образца ($m_0 = 0$), то из (22) получаем:

$$C_a = K_T \tau_a, \quad (23)$$

где τ_a – время запаздывания показаний термопар в случае отсутствия образца. Для устранения K_T проводятся еще измерения τ для эталонного образца (обычно медного), масса $m_{\text{эт}}$ и теплоемкость $c_{\text{эт}}$ которого известны.

$$c_{\text{эт}} m_{\text{эт}} = K_T \tau_{\text{эт}} - C_a = K_T \tau_{\text{эт}} - K_T \tau_a = K_T (\tau_{\text{эт}} - \tau_a), \quad (24)$$

из (24) имеем:

$$K_T = c_{\text{эт}} m_{\text{эт}} / (\tau_{\text{эт}} - \tau_a). \quad (25)$$

Учитывая (25), для удельной теплоемкости исследуемого образца получаем соотношение

$$C_0 = \frac{K_T (\tau_0 - \tau_a)}{m_0}. \quad (26)$$

Градуировочные измерения с пустой ампулой и с эталонным медным образцом проводятся только перед запуском прибора в эксплуатацию. При выполнении данной лабораторной работы эти измерения не производятся, а используются значения T_a и K_T , полученные из градуировочных измерений. Значения данных параметров могут изменяться с ростом температуры.

Порядок выполнения работы

1. Провести измерения в интервале температур 333-623 К для образца из стали.

На основе полученных данных вычислить удельную теплоемкость стали. Данные занести в таблицу.

Для этого:

- 1) смазать основания образца смазкой;
- 2) установить образец в ампулу измерительной ячейки;
- 3) включить микровольтнаноамперметр Ф136, установить: измерение – « μV »; предел – «500»; кнопка «APP» нажата;
- 4) включить прибор кнопкой «СЕТЬ», установить на блоке питания прибора ИТ-С-400 напряжение $U = 40$ В;

№ п/п	t , °C	τ_a , с	τ_0 , с	$(\tau_0 - \tau_a)$, с	C_0 , Дж/ (кг·К)	K_T , Вт/К
1	50	12,97				0,366
2	75	12,51				0,366
3	100	12,33				0,369
4	125	12,03				0,378
5	150	11,99				0,382
6	175	11,55				0,396
7	200	11,49				0,407
8	225	11,47				0,417
9	250	10,83				0,426
10	275	10,35				0,428
11	300	10,09				0,430
12	325	9,99				0,440
13	350	9,86				0,459
ср						

- 5) на измерителе ИТ-С-400 установить:
температура, С – «50»;
измерение – «t1»;
- 6) отжать кнопку «АРР»;
- 7) включить кнопкой «НАГРЕВ» основной нагреватель;
- 8) при достижении нулевого показания на Ф136 одновременно включить секундомер, переключить измерение в «t2» и при достижении нулевого показания на Ф136 выключить секундомер, записать температуру и измеренное время;
- 9) повторить измерения для температур 75-350 °С;
- 10) нажать кнопку «АРР» на Ф136;
- 11) выключить аппаратуру в обратной последовательности.
2. Вычислить теплоемкость по формуле (26).
3. Рассчитать погрешности.

Вычисления:

$$m_0 =$$

$$C_{01} =$$

$$C_{03} =$$

$$C_{05} =$$

$$C_{07} =$$

$$C_{09} =$$

$$C_{011} =$$

$$C_{013} =$$

$$C_{02} =$$

$$C_{04} =$$

$$C_{06} =$$

$$C_{08} =$$

$$C_{010} =$$

$$C_{012} =$$

$$\langle C_0 \rangle = \frac{\quad}{13} =$$

Расчет погрешности измерений

Записать окончательный результат:
 $C_0 = (\quad \pm \quad) \quad ; \quad \varepsilon = \quad \%$.

Вывод:

Контрольные вопросы:

1. В чем заключается методика измерения теплоемкости?
2. Что называется удельной теплоемкостью вещества?
3. Сформулировать закон Дюлонга и Пти.
4. Что такое температура Дебая?
5. Чему равна по Дебаю теплоемкость кристаллов при низких температурах?
6. Объяснить температурную зависимость теплоемкости, вычисленную по теории Эйнштейна.

Литература:

[1: §137]; [2: §46]; [3: §§31,32]; [4: §§8.7,8.8]; [5: §94].

Лабораторная работа №12

Определение температурной зависимости удельной теплоемкости металлов методом охлаждения

Цель работы: исследовать температурную зависимость удельной теплоемкости стали, алюминия, латуни.

Оборудование: исследуемые образцы, термopара, печь, потенциометр.

Теория работы и описание установки.

1. Классическая теория теплоемкости твердых тел

Простейшей моделью кристалла является правильно построенная кристаллическая решетка, в узлах которой помещаются атомы, принимаемые за материальные точки. Атомы совершают тепловые колебания около положения равновесия. Чтобы описать положение колеблющегося атома в данный момент времени, необходимо задать 6 координат: 3 координаты характеризуют положение равновесия и 3 координаты – координаты этого атома относительно положения равновесия. Применяя постулат Больцмана о равномерном распределении энергии по степеням свободы, при котором на одну степень свободы приходится энергия $\varepsilon = \frac{1}{2}kT$, получаем, что колеблющаяся молекула твердого тела при температуре T дает вклад во внутреннюю энергию кристалла, равный $E = 6 \cdot \frac{1}{2}kT = 3kT$. Умножив эту величину на число Авогадро N_A , найдем внутреннюю энергию моля твердого тела:

$$U = 3kT \cdot N_A = 3RT, \quad (1)$$

отсюда для молярной теплоемкости твердого тела получаем:

$$C_V = \frac{dU}{dT} = 3R \approx 24,9 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}. \quad (2)$$

Соотношение (2) является математическим выражением закона Дюлонга и Пти.

Согласно эмпирическому закону Коппа молярная теплоемкость твердого соединения равна сумме молярных теплоемкостей элементов, из которых она состоит.

По классической теории теплоемкость твердого тела не зависит от температуры. На самом же деле теплоемкость уменьшается с понижением температуры и стремится к нулю при приближении температуры к абсолютному нулю. Общий характер зависимости теплоемкости некоторых простых кристаллических тел от температуры изображен на рис. 1. Из рис. 1 видно, что при каких-то «достаточно высоких» температурах атомная

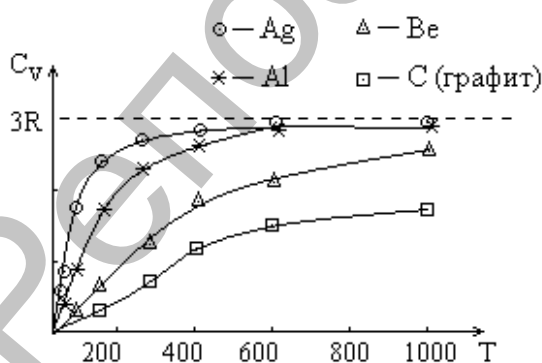


Рис. 1.

теплоемкость простых твердых тел достигает величины $24,9 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}$, соответствующей закону Дюлонга и Пти.

Вторым недостатком классической теории является то, что она не может объяснить теплоемкость металлов с учетом наличия в них свободных электронов, так называемого электронного газа. По классической теории теплоемкость электронного газа должна бы быть сравнимой с теплоемкостью, связанной с колебанием атомов кристаллической решетки, давая в сумме $C_V \approx \frac{9}{2}R$. Опыт, однако, показывает, что свободные электроны практически не вносят никакого вклада в теплоемкость металла.

2. Основные представления квантовой теории теплоемкости

Частицы, находящиеся в узлах кристаллической решетки, участвуя в тепловом движении, колеблются около положения равновесия. Характер этого колебания весьма сложен из-за взаимодействия частицы со своими соседями. Колебания передаются от частицы к частице и распространяются в виде волн. Эти волны доходят до поверхности кристалла, отражаются от нее и, налагаясь на встречные волны, образуют сложную систему стоячих волн. Скорость распространения тепловых волн совпадает со скоростью распространения звука. Теория тепловых упругих волн в кристаллах была разработана голландским физиком Дебаем в 1912 году. Подобно энергии электромагнитных волн, энергия тепловых акустических волн тоже квантована. Аналогично кванту световой энергии фотону, квант звуковой энергии назван фононом. Энергия фонона $\varepsilon = h\nu$, где h – постоянная Планка, ν – частота колебаний. Фононы – это квазичастицы.

Фононы являются носителями движения или энергии. Распространяясь в кристалле, они рассеиваются при встрече друг с другом и с дефектами решетки.

Дискретность (квантовый характер) тепловых волн проявляется при температуре, ниже характеристической температуры Дебая Θ_D , определяемой соотношением:

$$\Theta_D = \frac{h\nu_{\max}}{k}, \quad (3)$$

где $\nu_{\max}$ – максимальная частота тепловых колебаний частиц, свойственных данному твердому телу, k – постоянная Больцмана.

Исследуя теоретически с позиции квантовой теории вопрос о внутренней энергии кристаллов, Дебай нашел, что при температурах, близких к абсолютному нулю, внутренняя энергия твердого тела пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры

$$U = aT^4, \quad (4)$$

где a – постоянный множитель, зависящий от природы кристалла. Из этого соотношения можно найти соотношение для теплоемкости:

$$C_V = \frac{dU}{dT} = 4aT^3. \quad (5)$$

Применительно к атомной теплоемкости в формуле (5) коэффициент

$$a = \frac{3\pi^4 R}{5\Theta_D^3},$$

где R – универсальная газовая постоянная.

Следовательно, вблизи абсолютного нуля теплоемкость твердого тела пропорциональна кубу абсолютной температуры. Эта закономерность носит название закона кубов Дебая. Область применения закона кубов Дебая лежит ниже температуры, равной $\Theta_D/50$. При более высоких температурах от $\Theta_D/50$ до Θ_D находится промежуточная область, для которой пока не удалось установить количественную

связь между теплоемкостью и температурой. Выше характеристической температуры Дебая Θ_D теплоемкость твердого тела практически не зависит от температуры (закон Дюлонга и Пти).

Дебаевская модель твердого тела является упрощенным представлением твердого тела в виде изотропной упругой среды, способной совершать колебания в конечном интервале частот от нуля до $\nu_{\max} = \frac{k\Theta_D}{h}$. Поэтому и выводы этой теории (например, зависимость теплоемкости от температуры) хорошо совпадают с экспериментальными данными только для кристаллов с простыми решетками. К веществам сложной структуры теория Дебая неприменима, так как энергетический спектр колебаний таких тел оказывается чрезвычайно сложным. Например, в молекулярных кристаллах кроме поступательно-колебательного движения молекулы как целого, приходится учитывать ее крутильные колебания и колебания атомов или групп атомов внутри молекулы.

3. Теория метода

Металлический образец, имеющий температуру более высокую, чем температура окружающей среды, в этой среде охлаждается. Количество теплоты dQ , теряемое элементарным объемом dV металла за малый промежуток dt :

$$dQ = c\rho \frac{dT}{dt} dV dt, \quad (6)$$

где c – удельная теплоемкость металла, $\frac{dT}{dt}$ – скорость изменения температуры.

Это же количество теплоты выражается по закону Ньютона:

$$dQ = \alpha(T - T_0) dS dt, \quad (7)$$

где T_0 – температура окружающей образец среды, α – коэффициент теплоотдачи, dS – элемент площади поверхности.

Приравнивая (6) и (7), получаем:

$$c\rho \frac{dT}{dt} dV = \alpha(T - T_0) dS. \quad (8)$$

Количество теплоты, которое теряет весь образец

$$Q = \int_V c\rho \frac{dT}{dt} dV = \int_S \alpha(T - T_0) dS. \quad (9)$$

Учитывая, что величины $\frac{dT}{dt}$, c , ρ не зависят от координат точек объема, а величины α , T и T_0 не зависят от координат точек поверхности образца, можно написать:

$$c\rho \frac{dT}{dt} V = \alpha(T - T_0) S, \quad (10)$$

где V – объем образца, S – его поверхность. Если взять два образца, имеющих одинаковую форму и объем, и охлаждать их в одинаковых условиях в одном и том же интервале температур, то для них $S_1 = S_2$, $V_1 = V_2$, $\alpha_1 = \alpha_2$, $T_1 = T_2$. Тогда согласно (10) для двух образцов можно написать:

$$c_1 m_1 \left(\frac{dT}{dt} \right)_1 = c_2 m_2 \left(\frac{dT}{dt} \right)_2. \quad (11)$$

Из соотношения (11) можно найти удельную теплоемкость одного из образцов при любой температуре, если известна удельная теплоемкость другого образца (эталоны) при той же температуре

$$c_2 = c_1 \frac{m_1 \left(\frac{dT}{dt} \right)_1}{m_2 \left(\frac{dT}{dt} \right)_2}. \quad (12)$$

Порядок выполнения работы

1. Внутри образца 1 (рис.2) вставить конец одной из термопар 2. Образец опустить в печь 3 и нагревать до 550 °С. Отсчет температуры производить по потенциометру 4, который градуирован по температуре.

2. Образец вместе с термопарой вынуть из печи, крышку печи установить на подставке, образец охладить в неподвижном воздухе.

3. Записать время, соответствующее показаниям потенциометра 500, 480, 460...100 °С через каждые 20°С. Данные внести в таблицу 1.

4. Измерения по пунктам 1-3 произвести для образцов из алюминия, стали и латуни.

5. По данным таблицы 1 построить на миллиметровой бумаге графики зависимостей $T(t)$ для каждого из образцов.

6. Графическим методом по кривым $T(t)$ найти функцию $T'(t) = \frac{dT}{dt}$, для чего кривые $T(t)$ разбить через равные интервалы Δt на участки. Для каждого из участков найти величину

$$\left(\frac{\Delta T}{\Delta t} \right)_i = \frac{T_i - T_{i+1}}{\Delta t},$$

которая характеризует скорость охлаждения образца при температуре $\frac{T_i + T_{i+1}}{2}$.

Числовые значения $\frac{T_i - T_{i+1}}{\Delta t}$ и соответствующие им температуры $\frac{T_i + T_{i+1}}{2}$ внести в таблицу 2 и построить на миллиметровой бумаге графики зависимости $T^1(t)$ для каждого образца.

7. Взвешиванием определить массы образцов из алюминия, стали и латуни. (m_1, m_2, m_3).

8. Приняв за эталонный алюминиевый образец, температурная зависимость удельной теплоемкости которого приведена в таблице 3, по (12) определить температурные зависимости удельных теплоемкостей стали и латуни. Данные поместить в таблицу 3 и построить на миллиметровой бумаге графики зависимости удельных теплоемкостей стали и латуни от температуры.

9. Используя температуры Дебая для алюминия, стали и латуни построить на миллиметровой бумаге графики зависимости удельных теплоемкостей алюминия, стали и латуни от $\frac{T}{\Theta_D}$. Температура Дебая для алюминия $\Theta_D = 418$ К, для стали $\Theta_D = 467$ К, для латуни $\Theta_D = 323$ К.

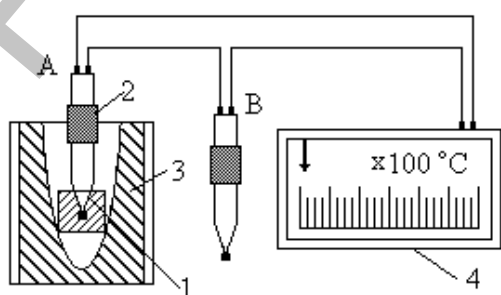


Рис. 2.

Таблица 1

T, K		773	753	733	713	693	673	653	633	613
t, c	Al									
	Fe									
	Лат.									
T, K		593	573	553	533	513	493	473	453	433
t, c	Al									
	Fe									
	Лат.									

Таблица 2

$\frac{T_i - T_{i+1}}{\Delta t}$	Al									
	Fe									
	Лат.									
$\frac{T_i + T_{i+1}}{2}$	Al									
	Fe									
	Лат.									
$\frac{T_i - T_{i+1}}{\Delta t}$	Al									
	Fe									
	Лат.									
$\frac{T_i + T_{i+1}}{2}$	Al									
	Fe									
	Лат.									

Вычисления:

 $m_1 =$ $m_2 =$ $m_3 =$

Таблица 3

$T,$ К		433	473	513	553	593	633	673	713	753
$c,$ Дж/(кг·К)	Al	970	990	1008	1024	1038	1048	1056	1062	1068
$c,$ Дж/(кг·К)	Fe									
$c,$ Дж/(кг·К)	Лат.									
T/Θ_D	Al									
T/Θ_D	Fe									
T/Θ_D	Лат.									

Вывод:

Контрольные вопросы:

1. Выше или ниже температуры Дебая производились измерения удельных теплоемкостей для алюминия, стали и латуни?
2. Что такое фонон?
3. Какой физический смысл температуры Дебая?
4. Как математически можно записать зависимость молярной теплоемкости вещества от температуры в широком интервале температур? Предполагается, что у вещества нет фазовых переходов.

Литература:

[1: §137]; [3: §§31,32]; [4: §§8.7,8.8]; [5: §94].

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Фундаментальные физические постоянные

Нормальное ускорение свободного падения	$g = 9,807 \text{ м/с}^2$
Нормальное атмосферное давление	$P_0 = 101325 \text{ Па}$
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Объем 1 моля идеального газа при нормальных условиях	$V_0 = 22,414 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$
Универсальная (молярная) газовая постоянная	$R = 8,314 \text{ Дж/(К} \cdot \text{моль)}$
Постоянная Лошмидта	$L = 2,7 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Скорость света в вакууме	$c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Масса покоя электрона	$m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Элементарный заряд	$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Постоянная Планка	$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
	$\hbar = 1,055 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Атомная единица массы	$1 \text{ а.е.м.} = 1,660 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$

Таблица 2

Физические свойства воды при различных температурах

Температура, °C	Плотность, ρ , кг/м ³	Удельная теплоемкость, c , Дж/(кг·К)	Удельная теплота парообразования, λ , 10 ⁶ Дж/кг	Коэффициент вязкости, η , 10 ⁻³ Па·с	Коэффициент поверхностного натяжения, σ , 10 ⁻³ Н/м
0	999,8	4217	2,50	1,787	75,6
4	1000,0	4204	2,49	1,567	75,0
10	999,7	4192	2,48	1,305	74,1
20	998,2	4182	2,45	1,004	72,6
30	995,6	4178	2,43	0,803	71,0
40	992,2	4178	2,41	0,655	69,4
50	988,0	4180	2,38	0,551	67,8
60	983,2	4184	2,36	0,470	66,0
70	977,7	4189	2,33	0,407	64,3
80	971,8	4196	2,31	0,357	62,5
90	965,3	4205	2,28	0,317	60,7
100	958,3	4216	2,26	0,284	58,8

Таблица 3

Вещество	Плотность, ρ , кг/м ³	Удельная теплоемкость, c , Дж/(кг·К)	Коэффициент объемного расширения, β , 10 ⁻³ К	Коэффициент вязкости, η , 10 ⁻³ Па·с	Коэффициент поверхностного натяжения, σ , 10 ⁻³ Н/м
1	2	3	4	5	6
Ацетон	790	2100	1,49	0,23	23,7
Бензол	880	1705	1,24	0,65	28,9
Вода (4°C)	1000	4190	0,21	1,004	72,8
Уксус	1020	1785	1,11	1,27	27,8
Керосин	800	2085	0,90	1,8	24,0
Глицерин	1260	2430	0,51	1500	63,0
Молоко	1030	3936	0,22	1,79	47,2
Масло касторовое	950	2219	0,72	1200	36,4
Масло машинное	910	2000	0,92	113	33,1
Масло трансформаторное	880	1880	0,60	19,8	31,8
Ртуть	13600	139	0,18	1,59	513,0
Спирт	789	2470	1,10	1,19	22,0
Эфир	714	2340	1,65	0,24	17,0

Таблица 4

Вещество	Температура жидкости, T , °C	Скорость звука в жидкостях, c , м/с	Температурный коэффициент скорости звука, α , м/(с·К)
Анилин	20	1656	-4,6
Ацетон	20	1192	-5,5
Вода	17	1497	2,5
Глицерин	20	1923	-1,8
Ртуть	20	1451	-0,46
Спирт (мет.)	20	1123	-3,3
Спирт (эт.)	20	1180	-3,6

Таблица 5

Удельная теплоемкость меди при различных температурах

Температура, °C	0	100	200	300	400
Удельная теплоемкость c , Дж/(кг·К)	381,3	393,9	408,5	422,4	434,9

Таблица 6

Физические свойства газов при нормальном давлении и 20 °С

Вещество	Формула	Молярная масса M , 10^{-3} кг/моль	Плотность, ρ , кг/м ³	Коэффициент вязкости, η , 10^{-3} Па·с	Эффективный диаметр, d , 10^{-9} м	Скорость звука, м/с
Азот	N ₂	28	1,251	16,6	0,31	334
Аммиак	NH ₃	17	0,771	9,4	0,30	415
Аргон	Ar	40	1,783	20,8	0,29	1284
Водород	H ₂	2	0,090	8,4	0,23	1286
Водяной пар	H ₂ O	18	0,804	8,8	0,26	494
Оксид углерода	CO	28	1,250	16,6	0,32	337
Углекислый газ	CO ₂	44	1,977	13,7	0,33	259
Гелий	He	4	0,179	18,6	0,19	970
Кислород	O ₂	32	1,429	19,1	0,29	316
Воздух		29	1,293	17,1		332

Таблица 7

Теплопроводность λ некоторых сплавов (при $t = 20$ °С)

Сплав	λ	
	Вт/(м·К)	ккал/(м·ч·°С)
Алюмель	32,6	28,1
Латунь (Л-62; Л-68)	106	91
Сплав Вуда	13	11
Сталь углеродистая	45-58	39-50
Хромель	16,0	13,8
Чугун	58	50

Таблица 8

Теплопроводности λ твердых веществ при температуре 20°С (если не указана иная температура)

Вещество	λ	
	Вт/(м·К)	ккал/(м·ч·°С)
Алмаз	133,3	118,8
Бумага	0,140	0,120
Вазелин	0,174	0,150
Лед (при $t = 0$ °С)	2,26	1,94
Лед (при $t = -20$ °С)	2,44	2,10

Таблица 9

Тепловые свойства твердых тел (при 20 °С)

Вещество	Температура плавления, °С	Удельная теплоемкость, с, Дж/(кг·К)	Удельная теплота плавления, λ , 10^5 Дж/кг	Коэффициент линейного расширения, α , 10^{-5} К ⁻¹	Коэффициент теплопроводности, К, Вт/(К·м)
Алюминий	660	898	3,22	2,4	207
Олово	232	230	0,60	2,7	65
Железо	1535	460	2,72	1,2	75
Латунь	900	386	1,92	1,9	80-180
Медь	1083	384	1,74	1,7	400
Сталь	1300	460	2,94	1,1	40

Таблица 10

**Температура кипения воды при различных давлениях
(давление в мм.рт.ст.)**

	680	690	700	710	720	730	740	750	760	770	780
0	69,2	73,2	77,1	81,1	84,9	88,8	92,6	96,3	100,00	3,70	7,30
1	69,6	73,6	77,5	81,4	85,3	89,1	92,9	96,7	0,40	4,00	7,60
2	70,0	74,0	77,9	81,8	85,7	89,5	93,3	97,0	0,70	4,40	8,00
3	70,4	74,4	78,3	82,2	86,1	89,9	93,7	97,4	1,10	4,80	8,70
4	70,8	74,8	78,7	82,6	86,5	90,3	94,1	97,8	1,80	5,10	9,10
5	71,2	75,2	79,1	83,0	86,9	90,7	94,4	98,2	1,90	5,50	9,40
6	71,6	75,6	79,5	83,4	87,2	91,0	94,8	98,5	2,20	5,80	9,60
7	72,0	76,0	79,9	83,8	87,6	91,4	95,2	98,9	2,60	6,20	9,80
8	72,4	76,3	80,3	84,2	88,0	91,8	95,6	99,3	2,90	6,60	10,2
9	72,8	76,7	80,7	84,5	88,4	92,2	95,9	99,6	3,30	6,90	10,5

Таблица 11

**Теплопроводность λ чистых металлов
при различной температуре**

Металл	t, °С	λ	
		Вт/(м·К)	ккал/(м·ч·°С)
Алюминий	-100	209	180
	0	209	180
	100	207	178
Железо	20	73,3	63,0
	100	67,5	58,0
Медь электротехническая	-180	488,5	420,0
	0	395,4	340,0
	100	392	337
	800	367,5	316,0
Олово	-100	74,4	64,0
	0	66,1	56,8
	100	59,3	51,0

Таблица 12

**Коэффициенты Стюдента для доверительной вероятности P
при различных количествах измерений**

№ п.п. \ P	0,5	0,9	0,95	0,99
2	1,60	6,31	12,7	63,7
3	0,82	2,92	4,30	9,92
4	0,77	2,35	3,16	5,94
5	0,74	2,13	2,78	4,60
6	0,73	2,02	2,67	4,03
7	0,72	1,94	2,45	3,71
8	0,71	1,89	2,36	3,50
9	0,71	1,86	2,31	3,36
10	0,70	1,83	2,26	3,25
15	0,69	1,76	2,14	2,98
20	0,69	1,73	2,09	2,86
∞	0,68	1,65	1,96	2,59

Замечание: При $n \rightarrow \infty$ приведены значения коэффициентов λ_p .

Таблица 13

Предельные значения погрешностей приборов

Приборы и меры	Значение предела	Предельная погрешность
Линейки металлические	150, 300, 500 мм	0,1 мм
>> >>	1000 мм	0,2 мм
>> деревянные	200, 250, 300 мм	0,1 мм
>> >>	400, 500, 1000 мм	0,5 мм
>> пластмассовые	200, 250, 300 мм	1 мм
Гири для техн. анализа	10, 20, 50, 100 мг	1 мг
>>	200 мг	2 мг
>>	500 мг	4 мг
>>	1 г	6 мг
>>	2 г	8 мг
>>	5 г	12 мг
Мензурки 2-го класса	100, 200 см ³	5 см ³
Штангенциркули		
с ценой деления 0,1 мм	0-155 мм	0,1 мм
>> 0,05 мм	0-200; 0-250; 0-350 мм	0,05 мм
Микрометры 0,01 мм	0,25, 25-50 мм	4 мкм
Индикаторы 0,01 мм	0-2 мм	12 мкм
>>	0-5 мм	16 мкм
>>	0-10 мм	20 мкм
Весы лабораторные	5-100, 10-200 г	3 цены деления шкалы
Секундомеры технич.	30-60 мин	1,5 цены деления шкалы
>> электромеханич.	30 мин	0,5 цены деления шкалы
Термометры стекл.жидк	от -20 ⁰ до 100 ⁰	1 цена деления шкалы

Литература:

1. А.К. Кикоин, И.К. Кикоин. Молекулярная физика. – М., 1976. – 500 с.
2. А.Н. Матвеев. Молекулярная физика. – М., 1981. – 400 с.
3. Р.В. Телеснин. Молекулярная физика. – М., 1973. – 300 с.
4. М.С. Цэдрык. Курс агульнай фізікі: Цеплыня і малекулярная фізіка. – Мн., 1994. – 232 с.
5. В.Ф. Яковлев. Теплота и молекулярная физика. – М., 1976. – 320 с.
6. Д.В. Сивухин. Общий курс физики. – М., 1979. – Т. 2.
7. Физический практикум. Механика и молекулярная физика / под ред. В.И. Ивероновой. – М., 1967.
8. П.С. Булкин, И.И. Попова. Общий физический практикум. Молекулярная физика. – М., 1988.
9. С.П. Стрелков. Введение в теорию колебаний. – М., 1968.
10. С.Э. Хайкин. Механика. – М.-Л., 1970.