

УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ ЦЕНТР –
факультет МГУ им. М.В.Ломоносова,
Школа имени А.Н. Колмогорова

Кафедра физики

ОБЩИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ

Термодинамика и молекулярная физика

Экземпляр № _____

Москва 2012

«Теория - хорошая вещь, но правильный эксперимент остается навсегда.»

П.Л. Капица

Приставки десятичных кратных и дольных единиц

Кратные		Дольные	
Приставка, обозначение	множитель	Приставка, обозначение	множитель
пета, П	10^{15}	фемто, ф	10^{-15}
тера, Т	10^{12}	пико, п	10^{-12}
гига, Г	10^9	нано, н	10^{-9}
мега, М	10^6	микро, мк	10^{-6}
кило, к	10^3	милли, м	10^{-3}
гекто, г	10^2	санци, с	10^{-2}
дека, да	10^1	деци, д	10^{-1}

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПОСТОЯННЫЕ

Гравитационная постоянная $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$

Постоянная Больцмана $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$

Постоянная Планка $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$

Число Авогадро $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$

Скорость света в вакууме $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ м/с}$

Заряд электрона $e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$

Плотность веществ

Твердые тела, $\times 10^3 \text{ кг/м}^3$

Алюминий 2,70	Свинец 11,3
Лед 0,92	Серебро 10,5
Медь 8,93	Сталь 7,88

Жидкости, $\times 10^3 \text{ кг/м}^3$

(при температуре 0°C)

Вода 1,0	Ртуть 13,6
Керосин 0,80	Спирт 0,79

Газы, кг/м^3

(при нормальных условиях)

Азот 1,25	Воздух 1,29
Водород 0,09	Кислород 1,43

2.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Теоретическая часть

Опыт показывает, что линейные размеры твёрдых тел при нагревании увеличиваются (за редким исключением) по закону:

$$l = l_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (T - T_0)) \quad (1)$$

Где l – длина тела при температуре T , l_0 – длина тела при температуре T_0 , α – температурный коэффициент линейного расширения твёрдого тела. Коэффициент α для твёрдых веществ имеет величину порядка $\sim 10^{-5} - 10^{-6}$ град $^{-1}$ и практически не зависит от температуры.

Физическое объяснение теплового расширения твёрдых тел связано с тем, что потенциальная энергия взаимодействия U двух молекул в зависимости от расстояния r между ними несимметрична относительно своего минимума (Рис.1).

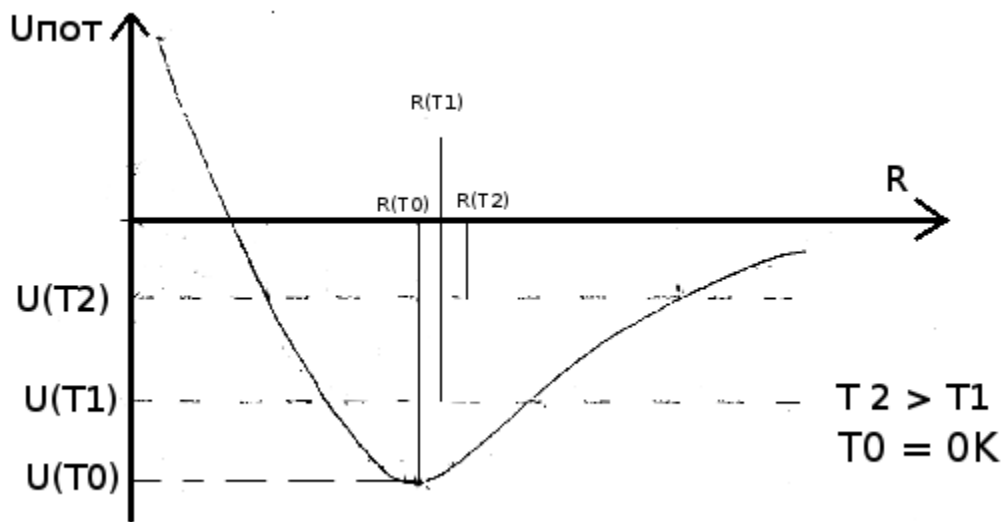


Рис. 1 График зависимости потенциальной энергии взаимодействия U двух молекул в зависимости от расстояния R между ними.

Действительно, при увеличении температуры увеличивается среднее значение полной энергии E (сумма кинетической и потенциальной энергий), приходящейся на одну молекулу. Из рис.1 видно, что вместе с E

растёт не только величина $\Delta R = R_{\text{max}} - R_{\text{min}}$ но и $R_{\text{cp}} = \frac{R_{\text{min}} + R_{\text{max}}}{2}$, т.е. с ростом температуры увеличивается не только амплитуда колебаний молекул около положения равновесия, но и среднее расстояние между ними.

Экспериментальная часть

Идея эксперимента:

Из формулы (1) получаем выражение для коэффициента линейного расширения твердого тела α :

$$\alpha = \frac{l - l_0}{l_0 \cdot (T - T_0)}, \quad (2)$$

В работе необходимо измерить величины $l_0, (l - l_0), T, T_0$, оценить коэффициент α и вычислить его ошибку.

В состав оборудования входят:

нагревательный прибор, штангенциркуль, стержневые образцы (стальной, алюминиевый и стеклянный), стеклянные пробирки, термометр лабораторный (диапазон измеряемых температур от 0 до 150 °С).

Принцип работы с прибором.

Испытуемый образец твердого тела нагревается в воде, находящейся в пробирке. Измерение величины абсолютного удлинения нагреваемого тела по сравнению с его первоначальной длиной (при комнатной T_0) производится индикатором малых перемещений.

Конструкция прибора.

Прибор представляет собой перфорированный стакан, в толстых стенках которого вмонтирован электронагреватель. При проведении опытов в стакан помещается пробирка (с водой и стержнем). На корпусе прибора устанавливается стойка с кронштейном для индикатора малых перемещений. Кронштейн может поворачиваться вокруг оси стойки на 90°. На панели корпуса расположена индикаторная лампа и кнопочный выключатель.

Работа с прибором.

1. Измерьте штангенциркулем длину каждого из образцов.
2. Пробирки из комплекта принадлежностей прибора на 2/3 объёма наполнить водой при комнатной температуре, опустить в каждую по испытуемому образцу с пробкой и поместить на штатив.
3. Обратить внимание на то, что нижний конец образца упирался бы в дно пробирки, а не висел на пробке.
4. В поворотный кронштейн вставить индикатор и отвести его на четверть оборота в сторону от упора.
5. Лабораторным термометром измерить температуру воды в одной из пробирок (стержень с пробкой при этом извлекается из пробирки).
6. Пробирку с испытуемым стержнем через отверстие в крышке прибора ввести в нагреватель.

7. Оттянуть шток индикатора вверх, установить индикатор над пробиркой (повернуть кронштейн в прорези до упора) и опустить шток на конец стержня.

8. Заметить положение стержня на шкале индикатора (для первого опыта стрелку лучше ставить на нулевую отметку).

9. Штепсельную вилку прибора вставить в электрическую розетку.

10. Только после этого можно включить питание прибора кнопочным выключателем. При этом должна загореться индикаторная лампа.

При закипании воды в пробирке испытуемый образец принимает температуру, равную температуре кипения воды. Увеличение длины образца определяется по отклонению стрелки индикатора от первоначального положения. Отсчет ведут с точностью до половины деления шкалы, т.е с точностью до 5 микрон (убедиться в этом самостоятельно).

Для проведения работы и продолжения опытов с другими образцами необходимо:

1. Кнопочным выключателем отключить питание прибора.
2. Индикатор на поворотном кронштейне отвести в сторону до упора.
3. Извлечь из прибора нагретую пробирку и поместить её в штатив.
4. Повторить операции п.3-7 для другого образца.

Поскольку дальнейшая работа производится при разогретом приборе, во избежание заметных искажений в замерах, время с момента помещения пробирки в зону нагрева до фиксации первоначального положения стрелки индикатора не должно превышать 30-40 секунд.

Указания по технике безопасности.

При эксплуатации прибора необходимо учитывать следующие виды опасности:

- электрический ток напряжением 220 В.
- температурный нагрев перфорированного стакана.

По этим причинам **при включенной в сеть вилке прибора не касаться!**

Расчётная часть

Определение коэффициента α :

По окончании работы с прибором (после снятия показаний по всем

образцам) приступают к подсчету численного значения коэффициента линейного расширения, который определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot (T - T_0)}, \quad (3)$$

где в условиях настоящего эксперимента Δl - увеличение длины образца в мм, l_0 - начальная длина образца в мм, T_0 - первоначальная температура образца в пробирке, T – конечная температура образца в пробирке после нагревания воды до кипения ($T = 100^\circ\text{C}$)

Произвести расчет ошибки метода с учетом следующих данных:

- абсолютная погрешность длины образца равна 1 мм;
- абсолютная погрешность приращения длины образца при нагреве составляет 0,01 мм;
- погрешность измерения температуры принимается равной 1°C .

Суммарная погрешность определения коэффициента линейного расширения рассчитывается с использованием формулы (2) в соответствии с теорией расчёта погрешностей для функций при известных погрешностях аргументов [3].

Вопросы к допуску

1. Почему пробирку следует наполнить водой не полностью, а на 2/3?
2. Какая из погрешностей измерений наибольшим образом влияет на погрешность определения коэффициента линейного расширения?

Вопросы к защите

1. Одинаково ли меняются при нагревании размеры сплошного стержня и трубки, если у них одинаковый внешний диаметр и длина?
2. Почему при нагревании и при охлаждении железобетона бетон не отделяется от железа?
3. Почему металл не дает трещин при резких колебаниях температуры, а камень при тех же условиях дает трещины?

Рекомендуемые источники

1. Мякишев Г.Я., Синяков А.З., «Молекулярная физика и термодинамика», учебник Физика-10 класс.
2. Матвеев А.Н. «Молекулярная физика: учебное пособие», т. 2.
3. Сивухин Д.В. «Общий курс физики», т.2.
4. Телеснин Р.В. «Молекулярная физика».
5. Путилов К.А. «Курс физики», т.1.
6. Больцман Л. «Лекции по теории газов»
7. Сергеев С.Н. «Обработка результатов физического эксперимента»

2.2. ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ВОДЫ ПО МЕТОДУ МАКСИМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ В ВОЗДУШНОМ ПУЗЫРЬКЕ

Теоретическая часть

В данной работе используется явление перепада давления ΔP при переходе через сферическую границу раздела жидкой и газообразной сред. Как известно, стремление поверхности жидкости к сокращению приводит к возникновению давления, дополнительного к тому, которое испытывает жидкость с плоской поверхностью (см. Рис.1).

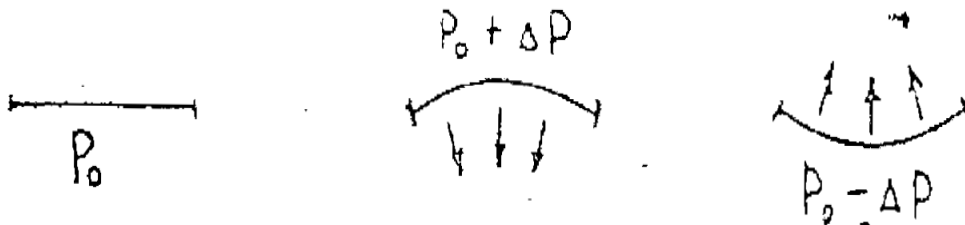


Рис.1 К пояснению природы появления дополнительного давления при изменении площади поверхности жидкости.

Для жидкости с радиусом кривизны сферической поверхности R и коэффициентом поверхностного натяжения σ известна формула для величины избыточного давления:

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{R}, \quad (1)$$

Формула (1) впервые была выведена Лапласом, а ΔP называется Лапласовским избыточным давлением.

Экспериментальная часть

I. Оборудование:

1. Пробирка с боковым отростком и исследуемой жидкостью;
2. Пробка со стеклянной трубкой, конец которой оттянут на капилляр;
3. Соединительный тройник;
4. Аспиратор;
5. Спиртовой манометр;
5. стакан с водой и крышкой;

6. Электроплитка;
7. Термометр;
8. стакан;
9. Соединительные трубки.

II. Описание прибора.

Прибор (см. рис.2) состоит из пробирки с боковым отростком (1), в которой находится исследуемая жидкость (дистиллированная вода). Пробирка герметически закрывается пробкой со стеклянной трубкой (2), конец которой оттянут на капилляр. При этом конец капилляра должен касаться поверхности жидкости. Через боковой отросток и тройник (3) пробирка сообщается с аспиратором (4) и спиртовым манометром (5). Для измерения и контроля температуры исследуемой жидкости пробирка помещается в стакан с водой (6), который находится на электроплитке (7). В воду опущен термометр (8). Вытекающая из аспиратора (4) вода собирается в стакане (9).

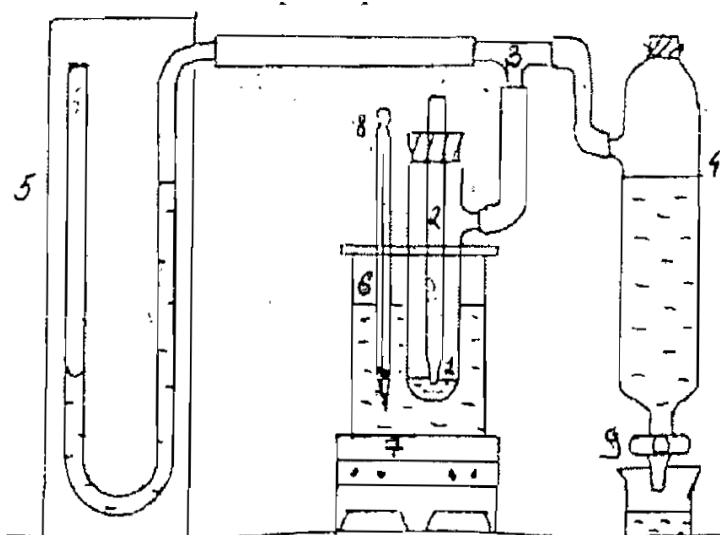


Рис.2 Эскиз экспериментальной установки.

Если приоткрыть кран аспиратора, то вода начнет медленно вытекать из него, и в верхней части аспиратора, а, следовательно, в пробирке и манометре будет создаваться разрежение, благодаря этому, атмосферный воздух через трубку с капилляром начнет выдувать пузырек воздуха из капилляра в воду. По мере выдувания пузырьке поверхность жидкости, ограничивающая его поверхность, будет проходит положения «а» => «б» => «в». При этом наименьший радиус будет соответствовать положению «б» и равняться радиусу капилляра. Таким образом, наибольший перепад давлений, фиксируемый манометром будет равен:

$$\Delta P_{\max} = \frac{2\sigma}{R}, \quad (2)$$

где R - радиус капилляра.

При нагревании жидкости изменением радиуса капилляра можно пренебречь, а коэффициент σ сильно зависит от температуры. Поэтому, измеряя ΔP_{\max} можно установить зависимость $\sigma(T)$:

$$\sigma(T) = \sigma(T_0) \cdot \frac{\Delta P_{\max}(T)}{\Delta P_{\max}(T_0)}, \quad (3)$$

где T_0 – комнатная температура.

Порядок проведения измерений.

1. Открыть пробку аспиратора (4) и налить в него воду из стакана (9).
2. Плотнo закрыть аспиратор пробкой.
3. Налить в стакан (6) воду из водопроводного крана и поставить стакан на электроплитку(7), закрыв его крышкой, на которой закреплены пробирка (1) и термометр (8);
4. Через 2-3 минуты приоткрыть кран аспиратора и записать в таблицу показания термометра и соответствующее ему ΔP_{\max} согласно показаниям манометра;
5. С помощью электроплитки нагреть исследуемую жидкость. За 5° до нужной температуры плитку выключить, чтобы дать достаточно медленно прогреться жидкости и успеть произвести измерение ΔP_{\max} при нужной температуре;
6. Сделать соответствующие измерения через каждые 15° - 20°C до 90° (не выше).

Расчётная часть

1. Зная, что коэффициент поверхностного натяжения чистой воды при $T_0 = 20^\circ\text{C}$ равен $\sigma_0 = 0,07253$ Н/м, рассчитайте значения $\sigma(T)$.
2. Постройте график зависимости $\sigma(T)$.
3. Рассчитайте погрешности σ , с учётом погрешностей определения T ;
4. Отложите эти погрешности на графике зависимости $\sigma(T)$.

Вопросы к допуску

1. Зачем требуется обеспечивать очень медленное вытекание воды из аспиратора?

2. Почему в капилляре выдувается воздушный пузырек?
3. Как зависит погрешность метода от радиуса капилляра?

Вопросы к защите

1. Объясните полученный график зависимости σ (T).
2. Может ли $\sigma = 0$? Почему?
3. Какова природа сил поверхностного натяжения?
4. Куда направлена сила поверхностного натяжения в точке, находящейся на плоской поверхности жидкости (вдали от стенок)?
5. Существует ли поверхностное натяжение у твёрдых тел?

Рекомендуемые источники

1. Мякишев Г.Я., Синяков А.З., «Молекулярная физика и термодинамика», учебник Физика-10 класс.
2. Матвеев А.Н. «Молекулярная физика: учебное пособие», т. 2.
3. Сивухин Д.В. «Общий курс физики», т.2.
4. Телеснин Р.В. «Молекулярная физика».
5. Путилов К.А. «Курс физики», т.1.
6. Больцман Л. «Лекции по теории газов»
7. Сергеев С.Н. «Обработка результатов физического эксперимента».
8. wikipedia.org

2.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ ПАРООБРАЗОВАНИЯ ВОДЫ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 100 °С

Теоретическая часть

Среди многих возможных состояний вещества можно выделить три основные: твердое, жидкое и газообразное. Или, как еще говорят в термодинамике, вещество может находиться в трех основных фазах: жидкой, твердой и газообразной. Например, лёд, вода и водяной пар. В общем случае в термодинамике *фазой* называют совокупность *однородных, одинаковых по своим свойствам* частей системы. Состояние, в котором находится система, определяется её параметрами: давлением и температурой. Причём для равновесного состояния одного и того же вещества сразу в двух фазах необходимы определённые соотношения между температурой и давлением. И, наконец, при единственном значении давления $P = P_{тр}$ и температуры $T = T_{тр}$ в равновесии могут находиться сразу три фазы данного вещества (Рис. 1).

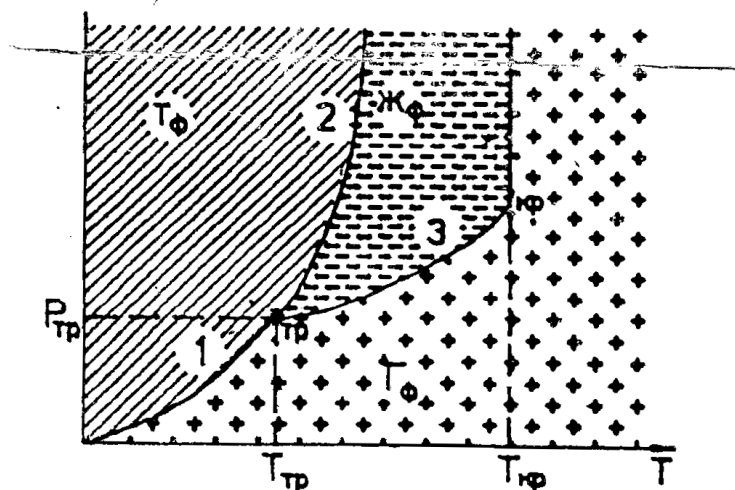


Рис. 1 Фазовая диаграмма состояний: 1 - кривая-равновесия твердой и газообразной фаз, 2 – кривая равновесия твердой и жидкой фаз, 3 - кривая равновесия жидкой и газообразной фаз, «тр» - тройная точка, «кр» - критическая точка.

Каждой точке фазовой диаграммы соответствуют определённые значения давления и температуры и, вообще говоря, определённое значение внутренней энергии системы. Переход из области одной фазы в область другой фазы почти всегда совершается через равновесное двухфазное состояние. При этом в равновесном состоянии давление и температура обеих фаз одинаковы, но характер упаковки частиц различный, т.е. плотность вещества в каждой фазе своя.

Отсюда ясно, что даже при одинаковых температурах внутренняя энергия единичной массы одной фазы вещества не равна внутренней энергии единичной массы другой фазы вещества, поэтому переход из одной фазы в другую также требует изменения внутренней энергии системы.

Изменить внутреннюю энергию системы можно либо посредством совершения работы, либо в процессе теплопередачи. Напомним, что *теплота* есть мера изменения внутренней энергии системы в процессе теплопередачи. Количество теплоты, необходимое для перехода системы из одной фазы в другую при постоянной температуре, называют *скрытой теплотой перехода*.

Основные фазовые переходы

1. Сублимация - переход в газообразное состояние твёрдого тела;
 2. Плавление - переход в жидкое состояние твёрдого тела;
 3. Испарение - переход в газообразное состояние жидкости.
- (Важно заметить, что существуют и обратные им переходы).

Даже для одного перехода, но совершаемого в различных условиях, скрытая теплота имеет разные значения.

Наряду с понятием теплоты перехода вводится понятие удельной теплоты перехода.

Пример

Количество теплоты, необходимое для превращения при постоянной температуре единицы массы жидкости в пар, называют *удельной теплотой парообразования*. Заметим, что удельная теплота парообразования уменьшается с увеличением температуры. Она равна нулю при критической температуре, когда не существует различия между жидкостью и газом. Значение удельной теплоты перехода находят опытным путём.

Экспериментальная часть.

Одним из методов определения удельной теплоты парообразования является метод конденсации. При конденсации выделяется точно такое же количество теплоты, которое поглощается при испарении.

Эскиз экспериментальной установки

В состав экспериментальной установки для определения удельной теплоты парообразования воды входят следующие приборы (рис.2):

1. Электроплитка;
2. Парообразователь;
3. Сухопарник;
4. Калориметр;
5. Термометр;
6. Весы с разновесами;
7. Соединительные шланги.

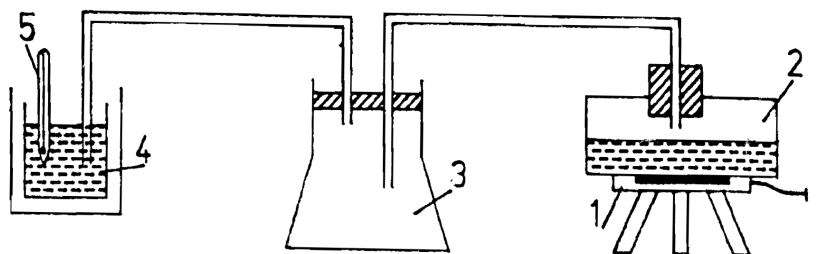


Рис. 2 Эскиз экспериментальной установки для определения удельной теплоты парообразования воды.

Связь измеряемых величин

Водяной пар, полученный при температуре кипения воды, попадает в

калориметр с водой. Конденсируется, отдает воде в калориметре количество теплоты Q_1 . Полученный конденсат имеет температуру пара. Охлаждаясь, он отдает воде в калориметре количество теплоты Q_2 . Таким образом, вода вместе с калориметром получает количество теплоты:

$$Q = Q_1 + Q_2, \quad (1)$$

Введем следующие обозначения:

T - конечная температура воды;

T_0 - начальная температура воды;

T_n - температура пара;

m_B - масса воды в калориметре;

m_{II} - масса пара;

m_K - масса калориметра;

C_K - удельная теплоемкость калориметра (алюминиевого);

C_B - удельная теплоемкость воды;

λ - удельная теплота парообразования воды.

Тогда:

$$Q = C_K m_K (T - T_0) + C_B m_B (T - T_0)$$

$$Q_1 = \lambda m_{II}$$

$$Q_2 = C_B m_{II} (T_{II} - T)$$

$$(2)$$

Подставляя (2) в (1), получаем:

$$\lambda = \frac{(C_B \cdot m_B + C_K \cdot m_K) \cdot (T - T_0) - C_B \cdot m_{II} \cdot (T_{II} - T)}{m_{II}}, \quad (3)$$

План эксперимента

- Налейте воду в водяную баню (2/3 её высоты);
- Поставьте водяную баню на плитку, закройте её пробкой. Включите плитку;
- Взвесьте внутренний стакан калориметра;
- Налейте в калориметр 50-70 грамм воды и взвесьте ее вместе со стаканом;
- Соберите калориметр и измерьте температуру T_0 . Подождите, пока из конца трубки, которую нужно опустить в калориметр, не пойдет достаточно сухой пар, и опустите трубку в воду в калориметре;
- Опыт заканчивают, когда вода в калориметре нагреется до 70° - 80° С.
- Взвесьте воду в стакане калориметра и найдите массу конденсата.

- Результаты всех измерений запишите.

Расчётная часть

1. Выпишите из таблиц значения удельной теплоемкости воды и алюминия;
2. Рассчитайте λ по формуле (3).
3. Сравните результат с табличным значением и проанализируйте возможность ошибок.

Вопросы к допуску

1. Почему нужно дождаться, чтобы из трубки пошел сухой пар и не проводить эксперимент с паром, содержащим капельки воды?
2. Почему нужно заканчивать эксперимент при температуре $70^{\circ}\text{--}80^{\circ}\text{C}$, не больше и не меньше?

Вопросы к защите

1. Что такое фаза вещества?
2. Как выглядит фазовая диаграмма?
3. Что такое внутренняя энергия?
4. Что понимают под количеством теплоты?
5. Что такое скрытая теплота перехода?
6. Как определяется удельная теплота парообразования и как она зависит от температуры?
7. Что такое критическое состояние вещества?
8. Можно ли осуществить переход жидкость-газ, минуя двухфазное состояние?
9. Какие процессы происходят в калориметре?
10. Что такое «сухой пар»?

Рекомендуемые источники

1. Мякишев Г.Я., Синяков А.З., «Молекулярная физика и термодинамика», учебник Физика-10 класс.
2. Матвеев А.Н. «Молекулярная физика: учебное пособие», т. 2.
3. Сивухин Д.В. «Общий курс физики», т.2.
4. Телеснин Р.В. «Молекулярная физика».
5. Путилов К.А. «Курс физики», т.1.
6. Больцман Л. «Лекции по теории газов»
7. Сергеев С.Н. «Обработка результатов физического эксперимента».
8. wikipedia.org

2.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЁМКОСТИ МЕТАЛЛОВ

Теоретическая часть

В качестве модели твердого тела использована модель кристаллической решетки, в узлах которой частицы (атомы, ионы, молекулы), принимаемые за материальные точки, колеблются около своих положений равновесия — узлов решетки — в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Таким образом, каждой составляющей кристаллическую решетку частице приписывается три колебательных степени свободы, каждая из которых, согласно закону равнораспределения энергии по степеням свободы, обладает энергией kT .

Внутренняя энергия моля твердого тела равна

$$U = 3 N_A k T = 3 R T, \quad (1)$$

тогда молярная теплоемкость твердого тела равна:

$$C_v = \frac{dU}{dT} = 3R = 25 \text{ Дж/(мольК)} \quad (2)$$

Это утверждение составляет закон Дюлонга и Пти.

Удельная теплоемкость химически простых веществ равна:

$$C_{yo} = \frac{3R}{\mu} \quad (3),$$

где μ — молярная масса вещества.

Молярная теплоемкость *химически простых тел* в кристаллическом состоянии одинакова, равна $3R$ и не зависит от температуры. Металлы являются химически простыми веществами, то есть состоят из одного вида атомов.

В том случае, если твердое тело является химическим соединением (например, NaCl), то число частиц в моле не равно постоянной Авогадро, а равно nN_A , где n — число атомов в молекуле (для NaCl число частиц в моле равно $2N_A$, так, в одном моле NaCl содержится N_A атомов Na и N_A атомов Cl). Таким образом, молярная теплоемкость *твердых химических соединений* равна:

$$C_v = 3nR \approx 25 nR \text{ Дж/(мольК)} \quad (4),$$

где n — число разных атомов в молекуле.

Как показывают опытные данные, для многих веществ закон Дюлонга и Пти выполняется с довольно хорошим приближением, хотя некоторые вещества (C , Be , B) имеют значительные отклонения от вычисленных

теплоемкостей. Кроме того, так же как и в случае газов, опыты по измерению теплоемкости твердых тел при низких температурах показали, что она зависит от температуры. Вблизи 0К теплоемкость веществ

3

пропорциональна T^3 , и только при достаточно высоких температурах, характерных для каждого вещества справедлив закон Дюлонга и Пти.

Для некоторых веществ закон Дюлонга и Пти начинает выполняться только при достаточно высоких температурах. Например, молярная теплоемкость алмаза равна $3R$ только при 1800 К. Однако для большинства твердых тел комнатная температура является уже достаточно высокой и закон Дюлонга и Пти для них справедлив.

Экспериментальная часть

Приборы и оборудование

1. Калориметр
2. Электроплитка
3. Весы
4. Термометр
5. Стакан для нагревания тел
6. Исследуемые образцы (латунь, сталь, алюминий)

Методика измерений

Измерение теплоемкости металлов в данной работе проводится калориметрическим способом.

Исследуемое тело, нагретое до температуры T_0 опускают в калориметр с водой температуры $T_1 < T_0$. При этом значение теплоёмкости $C_{мет}$ получают из уравнения теплового баланса для изолированной системы тел: металлическое тело, вода, внутренний сосуд калориметра:

$$C_{мет} m_{мет}(T - T_0) + C_{вод} m_{вод}(T - T_1) + C_{Al} m_{Al}(T - T_1) = 0, \quad (1)$$

где:

$C_{мет}$ - искомая удельная теплоёмкость вещества;

$C_{вод}$ — удельная теплоемкость воды

$m_{мет}$ - масса исследуемого тела (металл);

$m_{вод}$ - масса воды в калориметре

C_{Al} - удельная теплоёмкость внутреннего стакана калориметра (алюминий);

m_{Al} - масса внутреннего стакана калориметра;

T – установившаяся температура в калориметре.

Порядок эксперимента

1. Взвесьте калориметр, воду в калориметре и исследуемое тело. Оцените ошибку каждого измерений.
2. Нагрейте исследуемое тело в стакане с водой до температуры кипения воды, погрузив его полностью в стакан. Измерьте эту температуру (T_0).
3. Измерьте температуру воды в калориметре (T_1).
4. Перенесите нагретое тело в калориметр, через 1-2 минуты измерьте установившуюся температуру в воды в калориметре. При переносе тела из стакана в калориметр постарайтесь стряхнуть с тела капли воды.
5. Данные измерений занесите в таблицу, подготовленную заранее. Удельная теплоёмкость алюминия $C_{Al} = 881$ Дж/(кг·К).

Расчётная часть.

1. Вычислите удельные теплоёмкости исследуемых тел и сравните полученные результаты с табличными данными;
2. Рассчитайте молярные теплоемкости исследуемых тел. Проверьте справедливость закона Дюлонга и Пти.
2. Оцените погрешности определения полученных величин;
3. Объясните получившиеся расхождения.

Вопросы к допуску

1. Почему исследуемое тело должно быть погружено полностью в стакан с водой при нагревании?
2. Как зависит систематическая погрешность измерения теплоемкости исследуемых тел от того факта, что калориметр не идеальный?
3. Как зависит значение измеренной температуры в калориметре от размера и типа используемого термометра?

Вопросы к защите

1. Что такое внутренняя энергия? Количество теплоты? Работа в термодинамике?
2. Сформулируйте первое начало термодинамики.
3. Что такое уравнение теплового баланса?
4. Можно ли считать нашу систему изолированной?
5. Чем изолированные системы отличаются от замкнутых?
6. Что называется теплоёмкостью тела? Удельной теплоёмкостью?
7. Почему в таблицах приводятся два значения теплоёмкости газов: C_p и C_v , а для жидких и твёрдых тел - только одно значение C ?
8. Как экспериментально определить молярную массу неизвестного

металла с помощью установки по измерению удельной теплоемкости?

Рекомендуемые источники

1. Мякишев Г.Я., Синяков А.З., «Молекулярная физика и термодинамика», учебник Физика-10 класс.
2. Матвеев А.Н. «Молекулярная физика: учебное пособие», т. 2.
3. Сивухин Д.В. «Общий курс физики», т.2.
4. Телеснин Р.В. «Молекулярная физика».
5. Путилов К.А. «Курс физики», т.1.
6. Больцман Л. «Лекции по теории газов»
7. Сергеев С.П. «Обработка результатов физического эксперимента».
8. wikipedia.org

2.5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ УДЕЛЬНЫХ ТЕПЛОЁМКОСТЕЙ ВОЗДУХА C_p/C_v

Теоретическая часть

Для измерения показателя адиабаты γ воздуха допустимо практически без погрешностей использовать модель идеального газа. Центральным уравнение модели идеального газа является уравнение состояния. Это уравнение называется уравнением Менделеева-Клапейрона:

$$PV = \frac{m}{\mu} RT$$

где P — давление, V — объем, R — универсальная газовая постоянная, T — температура, m — масса газа, μ — молярная масса. Для определения теплоемкости нужно использовать еще одно уравнение — первый закон термодинамики, который представляет собой закон сохранения энергии, записанный для тепловых процессов:

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

здесь Q — теплота, полученная телом. U — измерение внутренней энергии тела. A — совершение этим телом работы. Для того, чтобы рассчитать теплоемкость тела, нужно количество теплоты разделить на измерение температуры. При различных условиях ($V = \text{const}$, $P = \text{const}$, ...) теплоемкость тела будет различной.

Если процесс происходит без обмена теплотой с внешней средой (то есть $Q = 0$), то такой процесс называется адиабатическим.

$$PV^\gamma = \text{const}$$

Это может быть достигнуто, например, с помощью изоляции системы или проведением процесса быстро, так, чтобы обмен энергией между системой и окружающей средой не успевал произойти. Важной характеристикой адиабатического процесса является показатель адиабаты $\gamma = C_p/C_v$.

Экспериментальная часть

Приборы и оборудование

Прибор для измерения C_p/C_v показан на рис. 1а. Он представляет собой сосуд, который с помощью трёхходового крана может быть соединён с атмосферой, с насосом или закрыт герметично. Давление в сосуде измеряется с помощью водяного манометра.

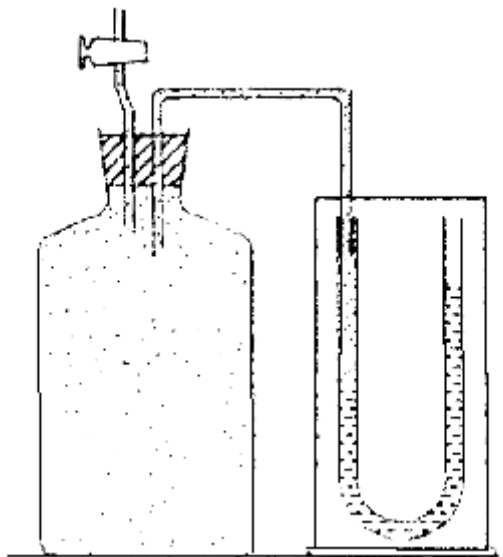


Рис. 1 Эскиз прибора для измерения отношения C_p/C_v .

Порядок проведения эксперимента

1. Накачайте в сосуд некоторое количество воздуха, чтобы разность уровней в манометре была 20-25 см. Делайте это медленно и осторожно, чтобы вода не выплеснулась из манометра. При этом давление и температура воздуха в сосуде повысятся.

Если теперь сосуд закрыть, то через некоторое время температура в нём станет равной температуре окружающей среды T_0 , а давление примет некоторое значение P_1 . Этому значению будет соответствовать разность уровней в манометре.

Можно измерять давление в миллиметрах водяного столба, тогда $P_1 = P_0 + h_1$, где P_0 – атмосферное давление, измеренное в мм водяного столба.

2. На некоторое время соедините сосуд с атмосферой. Воздух будет выходить из сосуда со свистом, давление сравняется с атмосферным, а температура понизится до некоторого значения T . Кран следует закрыть сразу же при изменении тона звука, производимого выходящим воздухом. Процесс выравнивания давления может быть описан уравнением адиабаты в переменных P и T :

$$\frac{P_1^{\gamma-1}}{T_0^\gamma} = \frac{P_0^{\gamma-1}}{T^\gamma}, \quad (1)$$

где $\gamma = C_p/C_v$.

3. Через некоторое время температура в сосуде снова станет равной температуре окружающей среды T_0 , а давление примет значение $P_2 = P_0 + h_2$, где h_2 - показание манометра. Этот процесс описывается уравнением изохоры:

$$\frac{P_0}{T} = \frac{P_2}{T_0} \quad \text{или} \quad \frac{P_0}{T} = \frac{P_0 + h_2}{T_0}, \quad (2)$$

Возведём уравнение (2) в степень γ :

$$\frac{P_0^\gamma}{T^\gamma} = \frac{(P_0 + h_2)^\gamma}{T_0^\gamma}, \quad (3)$$

Разделив уравнение (3) на уравнение (1), получим:

$$\frac{(P_0 + h_2)^\gamma}{(P_0 + h_1)^{\gamma-1}} = P_0, \quad \text{или} \quad \frac{(1 + \frac{h_2}{P_0})^\gamma}{(1 + \frac{h_1}{P_0})^{\gamma-1}} = 1,$$

$$(1 + \frac{h_2}{P_0})^\gamma = (1 + \frac{h_1}{P_0})^{\gamma-1} \quad (4)$$

так как $\frac{h_1}{P_0} \ll 1$ и $\frac{h_2}{P_0} \ll 1$, получаем по формуле бинома Ньютона

$$(1 + \frac{h_1}{P_0})^{\gamma-1} \approx 1 + (\gamma-1) \cdot \frac{h_1}{P_0}$$

$$(1 + \frac{h_2}{P_0})^\gamma \approx 1 + \gamma \cdot \frac{h_2}{P_0}$$

И уравнение (4) принимает вид:

$$1 + \gamma \cdot \frac{h_2}{P_0} = 1 + (\gamma-1) \cdot \frac{h_1}{P_0}$$

Откуда:

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (5)$$

Таким образом, для определения величины γ необходимо снять два соответствующих показания манометра h_1 и h_2 .

Опыт необходимо повторить не менее 10 раз. Результаты измерений занести в таблицу. Оценить ошибку эксперимента.

Выполните расчет среднего значения γ по формуле (5) и экспериментальной ошибки согласно теории обработки ошибок [7]

Вопросы для допуска

1. Почему нужно закрыть кран именно после прекращения звука, а не после выравнивания давлений в манометре?
2. Почему температура газа в 1-й стадии опыта повышается?

Вопросы для защиты

1. Что называется теплоёмкостью процесса?
2. Что такое теплоёмкости C_p и C_v ?
3. Что такое адиабатический процесс?
4. Почему в таблицах теплоёмкостей для газов даются два значения C_p и C_v ?
5. Каковы теплоёмкости газов при адиабатическом и изотермическом процессах?
6. Какие процессы называются квазистатическими? Можно ли сжатие газа и его расширение в данном эксперименте считать квазистатическими процессами? Почему?

Рекомендуемые источники

1. Мякишев Г.Я., Синяков А.З., «Молекулярная физика и термодинамика», учебник Физика-10 класс.
2. Матвеев А.Н., «Молекулярная физика: учебное пособие», т. 2.
3. Сивухин Д.В., «Общий курс физики», т.2.
4. Телеснин Р.В., «Молекулярная физика».
5. Путилов К.А. «Курс физики», т.1.
6. Больцман Л., «Лекции по теории газов»
7. Сергеев С.П. «Обработка результатов физического эксперимента».
8. wikipedia.org

2.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ВОЗДУХА И УНИВЕРСАЛЬНОЙ ГАЗОВОЙ ПОСТОЯННОЙ

Оборудование:

1. Стеклянная шароподобная колба с чехлом, резиновым патрубком и винтовым зажимом (краном) на нём;
2. Стрелочный манометр;
3. Насос Комовского;
4. Весы;
5. Резиновые трубки длиной 20-30 см;
6. Мензурка;
7. Сосуд для воды.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ВОЗДУХА

Экспериментальная часть

Цель эксперимента – определить плотность воздуха при нормальных условиях. В данной задаче доказывается весомость воздуха и определяется его плотность при атмосферном давлении P_0 и комнатной температуре T_0 . Для этого используется прибор, представляющий из себя пустотелый шар с горловиной, на которую надевается резиновая трубка с винтовым зажимом. Сосуд находится в матерчатом чехле, предохраняющем экспериментатора от осколков в случае повреждения сосуда.

Порядок выполнения работы.

Ослабив зажим трубки, шар взвешивают на весах, определяют массу m_1 . Затем шар подсоединяют к ручному насосу и производят откачку воздуха. Перед откачиванием необходимо обратить внимание на то, чтобы, чехол закрывал весь шар и был завязан у отростка шара.

Когда разрежение в шаре достигнет предельно возможного для этого насоса значения, кран закрывают. Отсоединив от насоса шар, его снова взвешивают и определяют массу m_2 . Разность между первым и вторым взвешиванием $\Delta m = m_1 - m_2$ и есть масса воздуха, откачанного из шара.

Объем воздуха (с давлением P_0 и температурой T_0), который был откачан, определяют следующим образом. После выкачивания воздуха снимают с шара чехол, опускают отросток шара в сосуд с водой и отворачивают зажим. Вода частично заполняет шар. После этого зажим заворачивают до отказа. Объем воды, вошедшей в шар, измеряют с

помощью мензурки, вылив в неё воду из шара.

Расчётная часть

Плотность воздуха определяется по формуле:

$$\rho = \frac{\Delta m}{V}, \quad (1)$$

где Δm – масса воздуха, откачанная из шара, V - объем воды, вошедшей в шар.

Оценить абсолютную ошибку определения плотности воздуха.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ГАЗОВОЙ ПОСТОЯННОЙ

Теоретическая часть

Если в шаре объемом V при давлении P_1 и температуре T содержится воздух массой m_1 , то это состояние можно описать уравнением Клапейрона-Менделеева:

$$P_1 \cdot V = \frac{m_1}{\mu} \cdot R \cdot T, \quad (2)$$

где μ - молярная масса воздуха, R - универсальная газовая постоянная.

Путём откачки или нагнетания воздуха в шар без изменения его температуры можно получить второе состояние, для которого будет справедливо уравнение

$$P_2 \cdot V = \frac{m_2}{\mu} \cdot R \cdot T, \quad (3)$$

где m_2 – масса новой порции воздуха в шаре, а P_2 – его давление.

Вычитая (3) из (2) и выражая R , получим:

$$R = \frac{\mu \cdot V}{T} \cdot \frac{(P_2 - P_1)}{(m_2 - m_1)}, \quad (4)$$

Здесь $\mu = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, объем V обозначен да стенке шара, температуру T в помещении измеряют с помощью термометра, а давления P_1 и P_2 с помощью манометра. Для определения $\Delta m = m_1 - m_2$ производят взвешивание шара с воздухом в состояниях 1 и 2.

Экспериментальная часть

Порядок выполнения работы.

1. Взвесьте на весах шар с открытым патрубком.
2. С помощью резиновых трубок и стеклянного тройника соедините шар с манометром и откачивающим патрубком насоса.
3. Медленно откачивая воздух, доведите давление в шаре до 0,5 атм. При этом следует учесть, что манометр измеряет избыточное давление в технических атмосферах. Поэтому обозначениям шкалы -1; -0,5; 0; 0,5; 1; 1,5 атм соответствуют давления 0; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5 атм.
4. Сожмите резиновый патрубок шара винтовым зажимом, отсоедините шар от установки и взвесьте его.
5. Опыт повторите ещё два раза для -0,7 атм и -0,9 атм
6. Результаты измерений выразите в единицах СИ и занесите в таблицу, учитывая, что 1 атм = 10^5 Па.
7. Измерьте температуру T воздуха в помещении
8. Найдите на установке число, обозначающее его объем V , и запишите это значение.

Расчётная часть

1. Вычислите постоянное для всех опытов выражение $\frac{\mu \cdot V}{T}$;
2. Пользуясь данными таблицы, вычислите значение универсальной газовой постоянной для любых двух состояний по формуле (4);
3. Результаты вычислений занесите в таблицу;
4. Определить среднее значение R ;
5. Вычислите абсолютную погрешность результата.

Вопросы для допуска

8. Как оценить давление воздуха, оставшегося в шаре после откачки?
9. Чему равно давление воздуха в шаре, когда вода частично заполняет шар?
10. Как повлияет на точность результата капля воды, случайно оказавшаяся в шаре перед началом опыта?

Вопросы для защиты

1. Какая из измеряемых величин более всего влияет на относительную ошибку определения R ?
2. Каков физический смысл универсальной газовой постоянной?

3. Какова связь между давлением и плотностью для идеального газа?

Рекомендуемые источники

1. Мякишев Г.Я., Синяков А.З., «Молекулярная физика и термодинамика», учебник Физика-10 класс.
2. Матвеев А.Н. «Молекулярная физика: учебное пособие», т. 2.
3. Сивухин Д.В. «Общий курс физики», т.2.
4. Телеснин Р.В. «Молекулярная физика».
5. Путилов К.А. «Курс физики», т.1.
6. Больцман Л. «Лекции по теории газов»
7. Сергеев С.Н. «Обработка результатов физического эксперимента».
8. wikipedia.org

Тепловые свойства веществ

Твердые тела

Вещество	Удельная теплоемкость кДж/(кг·К)	Температура плавления °С	Удельная теплота плавления кДж/кг
Алюминий	0,88	660	380
Лед	2,1	0	330
Медь	0,38	1080	180
Олово	0,23	232	59
Сталь	0,46	1400	82

Жидкости

Вещество	Удельная теплоемкость кДж/(кг·К)	Температура кипения °С
Вода	4.2	100
Ртуть	0.12	357
Этанол	2.39	78.4
Глицерин	2.43	290

Ускорение свободного падения для разных широт на уровне моря, м/с²

0°	9,780	60°	9,819
30°	9,793	90°	9,832

Скорость звука в некоторых средах при нормальных условиях, м/с

Воздух	342	Вода	1460
Водород	1300	Железо	5200

Диэлектрическая проницаемость некоторых веществ

Вода81	Масло	2,5
Керосин2,1	Стекло	7

Магнитная проницаемость некоторых веществ

Парамагнетики			
Азот	1,000013	Алюминий	1,000023
Кислород	1,000017	Платина	1,000253

Диамагнетики			
Вода	0,999991	Медь	0,999912
Водород	0,999937	Серебро	0,999981
Золото	0,999963	Цинк	0,999991

Цвета видимого спектра и соответствующие им диапазоны длин волн, нм

Красный	620 – 760	Голубой	480 – 500
Оранжевый	590 – 620	Синий	450 – 480
Желтый	560 – 590	Фиолетовый	380 – 450
Зеленый	500 – 560		