

10 класс

Задача 1. Термодинамический черный ящик (М. Л. Карманов)

Для начала изготовим из пробирки мензурку. От листа миллиметровки отрежем полоску, нарисуем на ней шкалу в сантиметрах. Получившуюся шкалу с помощью скотча прикрепим к пробирке. Далее наберем полный шприц воды, и нальем немного воды в пробирку так, чтобы она закрыла нижнюю не цилиндрическую часть. Отметим начальный уровень воды h_0 в пробирке, затем дольем в нее определенный объем воды V из шприца и отметим конечный уровень h воды в пробирке.

$$h_0 = 0,0 \text{ см} \quad h = 12,6 \text{ см} \quad V = 20,0 \text{ мл} \quad \Rightarrow \quad S = V/(h - h_0) = 1,59 \text{ см}^2$$

Измерим площадь сечения трубки (без учета внутренней полости). Для этого обернем трубку полоской миллиметровки и измерим длину окружности. Можно сделать два оборота.

$$L = 4,0 \text{ см}, \quad \Rightarrow \quad r = L/(4\pi), \quad \Rightarrow \quad S_{\text{тр}} = \pi r^2 = \frac{L^2}{16\pi} = 0,32 \text{ см}^2.$$

Разобранный шприц присоединяем к длинной трубке и, используя его в качестве воронки, заполняем бутылку горячей водой до тех пор, пока вода не начнет выливаться из короткой трубки. Теперь отсоединяем шприц от длинной трубки, собираем его, заполняем водой и присоединяем к короткой. В дальнейшем шприц будет играть роль заглушки. Внутри длинной трубки вставляем термопару так, чтобы ее конец уходил внутрь бутылки примерно до ее середины. Это позволит измерять температуру воды в бутылке без риска поверить пакет термопарой. Второй конец длинной трубки помещаем в пробирку, предварительно прикрепленную скотчем к бутылке и заполненную водой (рис. 46).

Удаляем воздух из длинной трубки, для этого выдавливаем некоторое количество воды из шприца, присоединенного к короткой трубке.

Вода в бутылке остывает, вместе с ней остывает и воздух зажатый в пакете, его объем уменьшается, и в бутылку затягивается вода из пробирки. Снимаем зависимость уровня воды в пробирке от температуры воздуха.

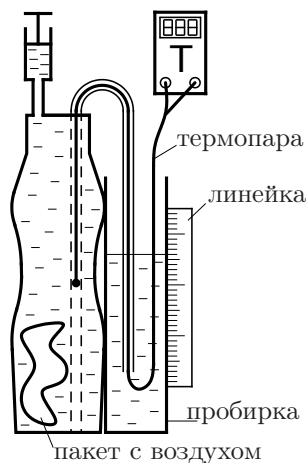


Рис. 46

$$P(S - S_{\text{тр}})\Delta h = \nu RT,$$

P — атмосферное давление, Δh — изменение уровня воды в пробирке.

$t, ^\circ\text{C}$	61	57	53	50	47	45	42	38	35
$h, \text{см}$	9,1	7,9	6,9	6,1	5,7	5,0	4,2	3,6	3,0

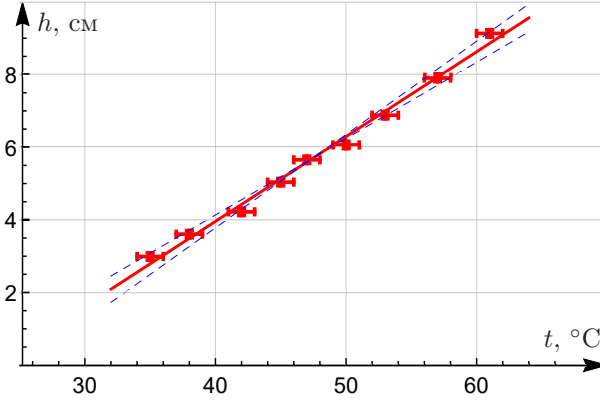


Рис. 47

$$k = \frac{\nu R}{P(S - S_{\text{тр}})} = 0,234 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{см}$$

$$\nu = \frac{kP(S - S_{\text{тр}})}{R} = \frac{0,234 \cdot 10^{-2} \cdot 10^5 \cdot (1,59 - 0,32) \cdot 10^{-4}}{8,31} \text{ моль} = 3,5 \text{ ммоль.}$$

Оценим погрешность. Погрешности определения температуры и высоты $\sigma_T = 3 \text{ } ^\circ\text{C}$ и $\sigma_h = 0,1 \text{ см}$. Из графика $\sigma_k = (k_{\text{max}} - k_{\text{min}})/2 = 0,02 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{см}$.

$$\Delta S = (\varepsilon_{h-h_0} + \varepsilon_V) \cdot S = \left(\frac{0,2}{12,6} + \frac{0,5}{20} \right) \cdot 1,59 \text{ см}^2 = 0,065 \text{ см}^2,$$

$$\Delta S_{\text{тр}} = 2\varepsilon_L \cdot S_{\text{тр}} = 2 \frac{0,1}{4,0} \cdot 0,32 = 0,016 \text{ см}^2,$$

$$\Delta(S - S_{\text{тр}}) = 0,08 \text{ см}^2,$$

$$\varepsilon_\nu = \varepsilon_P + \varepsilon_{S-S_{\text{тр}}} + \varepsilon_k = \frac{1}{100} + \frac{0,08}{1,27} + \frac{0,02}{0,23} = 0,16,$$

$$\sigma_\nu = 0,16 \cdot 3,5 \text{ ммоль} = 0,6 \text{ ммоль.}$$

Окончательно получаем $\nu = (3,5 \pm 0,6) \text{ ммоль}$.

Задача 2. Термоэлектронная эмиссия (А. А. Ноян)

При нагреве одной из нитей накала некоторые электроны приобретают достаточную энергию для того, чтобы из неё вылететь. Приложив напряжение между спиралью, мы можем добиться того, чтобы вылетевшие электроны попадали на вторую спираль. Для определения работы выхода нужно измерить зависимость эмиссионного тока от температуры нити накала.

$$n = A^{-W/kT} \Rightarrow I_{\text{эм}} = A_1^{-W/kT} \Rightarrow \ln I_{\text{эм}} = \ln A_1 - \frac{W}{kT}$$

Чтобы определить работу выхода W , нужно построить график зависимости $\ln I_{\text{эм}}$ от $1/T$ и вычислить его угловой коэффициент.

Для измерений следует использовать схему, изображенную на рисунке 48.

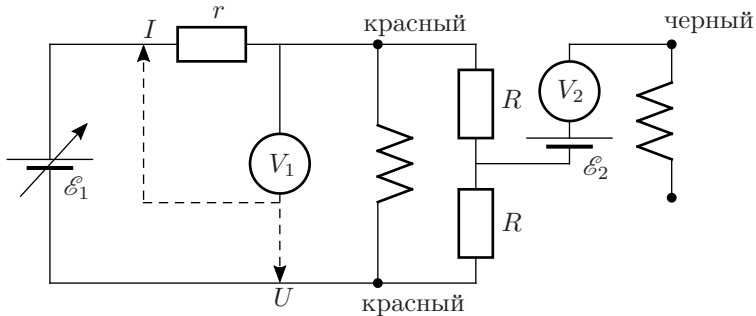


Рис. 48

\mathcal{E}_1 — регулируемый источник тока. Примем потенциал его минуса за 0 В. Вольтметр V_1 используется попеременно для измерения напряжения на нити накала лампочки и на резисторе сопротивлением $r = 4,7$ Ом, который нужен для определения силы тока через лампочку.

Нить накала лампочки должна быть подключена напрямую к минусу источника, так как туда же подключается экран вокруг лампочки. Если между лампой и минусом источника будут стоять резисторы, то это приведет к заметному изменению разности потенциалов между экраном и нитью лампы во время опытов, что может внести дополнительные изменения в эмиссионный ток.

Потенциал разных точек нити накала линейно изменяется от 0 до U_1 , значит средний потенциал нити накала равен $U_1/2$. Так как необходимо обеспечить постоянную разгонную разность потенциалов, то параллельно нити накала подключены два одинаковых высокоомных резистора, потенциал точки между которыми будет в точности равен среднему потенциалу нити накала.

Так как эмиссионный ток очень маленький, то для его измерения будем использовать второй вольтметр в качестве наноамперметра. В качестве \mathcal{E}_2 — батарейка 9 В (рис. 48). Малый ток определяется по формуле

$$I_{\text{эм}} = U_2/R_V$$

Внутреннее сопротивление мультиметра в режиме вольтметра R_V можно измерить другим мультиметром, переключив его в режим омметра: $R_V = 1 \text{ МОм}$. Температуру лампочки определяем по её сопротивлению, используя формулу, данную в условии. Сопротивление лампочки при комнатной температуре $R_0 = 2,5 \text{ Ом}$ измеряем при маленьких токах через неё, например омметром. Комнатную температуру оценим в $T_0 = (300 \pm 5) \text{ К}$. Как показывает значение температуры спирали лампы, точность нашей оценки является достаточной. Результаты измерений представлены в таблице.

$U_1, \text{ В}$	$U_{\text{рез}}, \text{ В}$	$R_{\text{л}}, \text{ Ом}$	$U_2, \text{ мВ}$	$I_{\text{эм}}, \text{ нА}$	$T, \text{ К}$	$T^{-1}, \text{ К}^{-1}$	$\ln(I)$
9,06	1,783	23,9	35	35	2201	0,454	3,555
8,87	1,760	23,7	31	31	2183	0,458	3,434
8,72	1,747	23,5	28	28	2163	0,462	3,332
8,58	1,740	23,2	25	25	2138	0,468	3,219
8,50	1,729	23,1	22	22	2132	0,469	3,091
8,39	1,718	23,0	20	20	2118	0,472	2,996
8,30	1,708	22,8	17	17	2108	0,474	2,833
8,14	1,696	22,6	14	14	2083	0,480	2,639
8,08	1,687	22,5	13	13	2079	0,481	2,565
7,96	1,675	22,3	11	11	2063	0,485	2,398
7,89	1,669	22,2	9	9	2053	0,487	2,197
7,60	1,641	21,8	6	6	2013	0,497	1,792
7,40	1,620	21,5	4	4	1986	0,503	1,386
7,32	1,614	21,3	4	4	1973	0,507	1,386

Построим график $\ln(I_{\text{эм}})$ от $1/T$.

Умножая угловой коэффициент графика (рис. 49) на постоянную Больцмана k , получаем ответ $W = (3,8 \pm 0,4) \text{ эВ}$.

