

Экспериментальный тур

9 класс

Задача 1. Легкоплавкий металл

Исследуйте физические характеристики металла, удельная теплоемкость которого в жидком состоянии равна $c = 410$ Дж/(кг · °С), а температура плавления лежит в интервале от 25°С до 50°С. Плотность воды $\rho_0 = 1000$ кг/м³.

Определите:

1. плотность ρ металла в твердом состоянии;
2. температуру $t_{пл}$ плавления металла;
3. удельную теплоту плавления λ металла.

Оцените погрешность полученных результатов.

Оборудование. Порция исследуемого металла на нитке и микропорция этого же металла в микропробирке; микропробирка с прикрепленной к ней термомпарой и проволочным фиксатором; микропробирка с водой; пинцет; мультиметр; секундомер; весы; кусок проволоки для изготовления подставки под микропробирку; горячая вода в стакане (по требованию); салфетки для поддержания порядка; миллиметровая бумага (2 листа формата А4) для построения графиков.

Примечание.

1. При охлаждении расплава данного металла его кристаллизация начинается при температурах ниже температуры плавления, и даже при комнатной температуре он остается жидким, находясь в метастабильном (переохлажденном) состоянии. Для запуска процесса кристаллизации из этого состояния в расплав необходимо добавить микропорцию этого же твердого металла.
2. Удельная теплота плавления λ исследуемого металла лежит в диапазоне от 40 до 150 кДж/кг.
3. Не используйте горячую воду для определения плотности металла и не трогайте его руками (используйте пинцет). Тщательно планируйте эксперимент. *Дополнительная порция металла вам выдаваться не будет!*

Задача 2. Магнитики

Исследуйте зависимость силы F отталкивания двух, расположенных соосно, магнитов от расстояния x между ними. Для изменения внешней силы, прижимающей один магнит к другому, воспользуйтесь латунными (немагнитный материал) стержнями и деревянным желобом. Кроме этого, вы можете проводить измерения на двух углах наклона желоба, используя для его крепления два больших отверстия в вертикальной части штатива. Предложите способ уменьшения влияния силы трения.

1. Постройте график полученной экспериментальной зависимости $F(x)$.
2. В предположении, что полученная зависимость является степенной функцией вида $F = kx^{-\beta}$, где k — размерный коэффициент, а β — целое число, равное 1 или 2, найдите значения k и β .
3. Не наклоняя желоб, определите силу трения скольжения $F_{\text{тр}}$ и коэффициент трения μ между магнитом и измерительной лентой, наклеенной на желоб.
4. Оцените погрешность полученных результатов.

Ускорение свободного падения $g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

Оборудование. Деревянный желоб с неподвижным магнитом, системой крепления к штативу и наклеенными полосками измерительной ленты, деревянный штатив, подвижный магнит массой $m_{\text{м}} = 2,10 \pm 0,05 \text{ г}$, латунные стержни массой $m_1 = 6,00 \pm 0,05 \text{ г}$, $m_2 = 14,3 \pm 0,1 \text{ г}$ и $m_3 = 28,7 \pm 0,3 \text{ г}$, измерительная лента, разделитель магнитов из медной проволоки для облегчения их разъединения в случае случайного слипания, миллиметровая бумага (2 листа формата А4) для построения графиков.

ВНИМАНИЕ. Наносить какие-либо пометки на обе стороны наклеенной измерительной ленты и на сам деревянный желоб *категорически запрещено!*

Экспериментальный тур

9 класс

Задача 1. Легкоплавкий металл (*С. В. Кармазин*)

Изготовим из проволоки держатель для микропробирок.

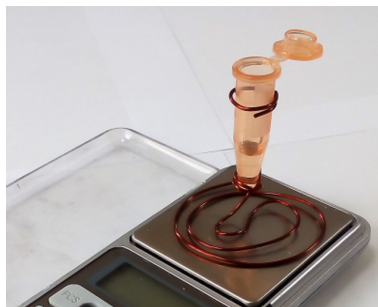


Рис. 40

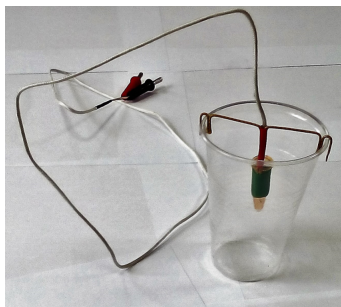


Рис. 41

Для определения плотности металла взвесим его порцию (далее приведены цифры для одного случайно выбранного образца) $m = 1,98$ г. Так как погрешность весов составляет 3 знака последнего разряда, то масса оказывается определенной с точностью 1,5%. Затем найдем изменение веса микропробирки с водой при полном погружении в нее порции металла и вычислим объем V порции (гидростатическое взвешивание). $V = 0,34$ см³ (погрешность 10%) и, следовательно, плотность $\rho = (5,8 \pm 0,6)$ г/см³. Табличная плотность данного металла (галлий) $\rho_T = 5,90$ г/см³.

Для определения тепловых параметров образца проведем исследование зависимости температуры его расплава от времени в процессе остывания и последующей кристаллизации. Поместим порцию металла в микропробирку с держателем и опустим ее на 5 – 7 мин в стакан с горячей водой при температуре не ниже 65 °С.

Визуально убедимся, что весь металл расплавился. На этапе нагрева и плавления контролировать температуру образца в пробирке можно, но большого смысла в этом нет, так как термомпара в начальной стадии процесса измеряет температуру воздуха, а не металла. После окончания плавления, вынем пробирку из горячей воды и установим на столе в проволочном держателе. С этого момента начнем снимать зависимость температуры t расплава от времени τ . Результаты измерений представлены в таблице 1.

После охлаждения металла почти до комнатной температуры (на 1 – 2 градуса выше), он остается в жидком состоянии. Бросим в расплав микропорцию твердой фазы металла. Очень быстро (за несколько секунд) температура в пробирке достигнет значения 28 – 30 °С градусов и остается неизменной

τ , с	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
t , °C	55	50	47	45	43	41	40	38	38	37	36	34	34
τ , с	130	140	150	160	170	180							
t , °C	33	32	30	29	29	28							

Таблица 1

в течение примерно $\tau_k = 40 - 60$ мин, а затем постепенно начнет снижаться до комнатной. Следовательно, температура кристаллизации данного вещества равна $t_{пл} = (29 \pm 2)$ °C.

При охлаждении металл остывает на Δt градусов за $\Delta \tau$ секунд, следовательно $Q = mC\Delta t = \alpha\Delta\tau$, где α — коэффициент теплоотдачи. При кристаллизации $\lambda m = \alpha\tau_k$, где λ — удельная теплота кристаллизации. Из этих двух уравнений выразим:

$$\lambda = \frac{C\Delta t\tau_k}{\Delta\tau}.$$

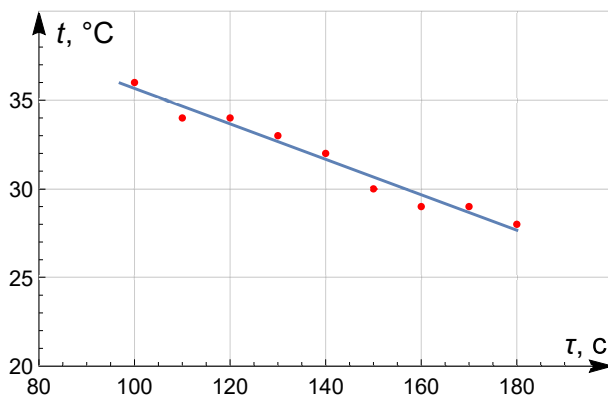


Рис. 42

Видно, что для расчета λ не нужно знать массу и коэффициент теплоотдачи. Достаточно лишь найти скорость остывания порции металла при температуре примерно равной температуре кристаллизации $\frac{\Delta t}{\Delta \tau}$. Эту величину можно определить с помощью графика (рис. 42), построенного для последних 8 – 9 точек таблицы 1.

По угловому коэффициенту наклона $\frac{\Delta t}{\Delta \tau} = (0,10 \pm 0,01)$ °C/с получим $\lambda = (74 \pm 8)$ кДж/кг (табличное значение λ для галлия 80 кДж/кг).

Задача 2. Магнитики (С. В. Кармазин)

Примечание: численные результаты, полученные на различных комплектах оборудования, могут отличаться друг от друга.

Фиксируем желоб в штативе под одним из двух возможных углов и кладем в него магнит так, чтобы он отталкивался от второго закреплённого. Влияние силы трения, действующей на подвижный магнит, устраняем легкими постукиваниями по желобу в результате которых магнит слегка подпрыгивает и силы нормальной реакции и трения обращаются в ноль. Измеряем расстояние x между ближайшими торцами магнитов, на котором подвижный остается в равновесии. Для проверки воспроизводимости результатов, измерения проводим трехкратно.

Повторяем эксперимент несколько раз для других сил, прижимающих магниты друг к другу, нагружая подвижный сверху разными комбинациями латунных стержней. Всего удастся получить 7 различных значений силы при одном наклоне желоба. В таблице 2 приведены результаты измерений для углов наклона $\sin \alpha_1 = 0,74$ и $\sin \alpha_2 = 0,61$. Прижимающая магниты сила при этом рассчитывается по формуле: $F = mg \sin \alpha$.

На рис. 43 представлен график полученной зависимости F от x .

Для проверки характера зависимости $F = \alpha x^{-\beta}$, перестраиваем ее в осях $F(x^{-1})$

(рис. 44) и $F(x^{-2})$ (рис. 45). В последнем случае график оказывается ближе к линейному, из чего делаем вывод, что $\beta \approx 2$, а $k = (2,7 \pm 0,4) \cdot 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{м}^2$.

Заметим, что исследование зависимости с помощью графика, построенного в логарифмическом масштабе (что не требовалось от участников), дает значение показателя степени $\beta \approx 2,6$.

Для определения силы трения, действующей со стороны мерной ленты в горизонтальном положении желоба, приблизим подвижный магнит к закреплённому на расстояние X и отпустим его. Из теоремы об изменении кинетической

		m , г	x , мм	F , мН
Большой угол ($\sin \alpha_1 = 0,74$)	Магнит	2,1	28	15,2
	М+1	8,1	18	58,7
	М+2	16,4	14	119
	М+1+2	22,4	12	162
	М+3	30,8	11	223
	М+1+3	36,8	10	267
	М+2+3	45,1	9	327
	М+1+2+3	50,1	9	363
Малый угол ($\sin \alpha_2 = 0,61$)	Магнит	2,1	30	12,6
	М+1	8,1	20	48
	М+2	16,4	16	98
	М+1+2	22,4	13	134
	М+3	30,8	12	184
	М+1+3	36,8	11	220
	М+2+3	45,1	10	270
	М+1+2+3	50,1	10	300

Таблица 2

энергии получим: $F_{\text{тр}}L + A = 0$, где L — расстояние на которое сместился подвижный магнит, а A — работа силы отталкивания, которая пропорциональна площади под графиком $F(x)$ на участке от X до $X + L$. Необходимо проверить воспроизводимость результатов при проведении этого эксперимента на разных участках мерной ленты. $F_{\text{тр}} = (11 \pm 2)$ мН. Силу трения также можно найти, определяя границу области «застоя» подвижного магнита в поле неподвижного, интерполируя полученную зависимость $F(x)$.

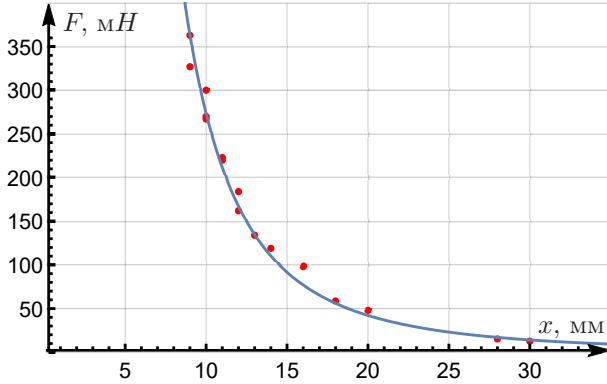


Рис. 43

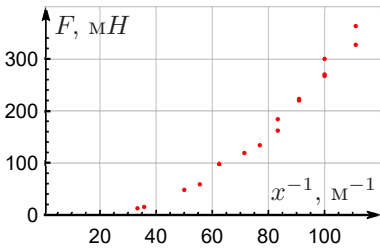


Рис. 44

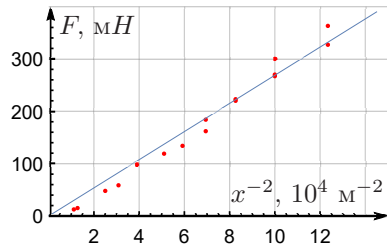


Рис. 45

Коэффициент трения можно рассчитать по формуле

$$\mu = \frac{F}{\sqrt{2}mg} = 0,37 \pm 0,02.$$

10 класс

Задача 1. Термодинамический черный ящик

Внутри выданной вам бутылки находится герметичный пакет, частично заполненный воздухом. Ваша задача – определить количество воздуха (в молях) в пакете, не вскрывая бутылку. Откручивать крышку и вырывать трубочки тоже запрещено!

Из крышки бутылки выходят две трубки: длинная идет от самого дна бутылки, а короткая от самого верха. Считайте, что давление воздуха внутри пакета всегда равно давлению среды, окружающей пакет. Атмосферное давление считайте равным $P_0 = (100 \pm 1)$ кПа. Подробно опишите, как вы проводили эксперимент. Какие действия предприняли для повышения точности?

ВНИМАНИЕ.

1. На первой странице чистовика укажите номер выданной вам бутылки.
2. Если вы повредите пакет, находящийся внутри бутылки, то не сможете сделать работу. Замена оборудования не производится.

Оборудование. Бутылка с запаянным пакетом внутри, мультиметр с термомпарой, шприц, скотч, ножницы, миллиметровка А5, пробирка, стакан с водой, горячая вода (по требованию), поднос, салфетки для поддержания порядка на рабочем месте.

Задача 2. Термоэлектронная эмиссия

При сильном нагреве металла некоторые электроны приобретают достаточную энергию для того, чтобы из него вылететь. Этот процесс называется термоэлектронной эмиссией. Количество вылетевших электронов в единицу времени зависит от температуры металла:

$$n = A \exp^{-W/(kT)},$$

где A — константа, W — энергия, которую нужно сообщить электрону, чтобы перенести его из металла в вакуум (работа выхода), $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана.

Определите значение работы выхода для материала, из которого изготовлена спираль лампочки с красными выводами. Ответ выразите в электронвольтах.

Примечание.

1. Выданные вам мультиметры можно использовать только в качестве вольтметров или омметров.
2. Сопротивление нити лампочки линейно зависит от температуры:

$$R = R_0(1 + \alpha(T - T_0)), \text{ где } \alpha = (4,5 \pm 0,1) \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}.$$

3. Внутри колбы лампочки находятся две независимые спирали. Выводы одной спирали красного цвета, а к другой припаян один чёрный провод. Используйте красную спираль в качестве излучающего электрода, подавая на неё напряжение в диапазоне от 7,0 до 9,0 В.
4. Считайте, что внутри лампочки находится вакуум.
5. Считайте, что в случае поддержания постоянной разности потенциалов между излучающим электродом и принимающим доля электронов, вылетевших с излучающего электрода и долетевших до принимающего, не зависит от температуры излучающего электрода. Под потенциалом излучающего электрода понимается среднее значение его потенциала.
6. Для исключения влияния внешних полей следует обернуть лампочку фольгой и соединить фольгу с минусом источника.
7. 1 электронвольт (эВ) = $1,60 \cdot 10^{-19}$ Дж.
8. На источнике тока установите ручку выбора диапазона напряжений в положение «0–15V» (крайнее правое положение). Когда ручка в этом положении, вы можете регулировать выходное напряжение в указанном диапазоне ручками «грубо» и «плавно». Не стоит пользоваться индикаторами встроеными в источник.

Оборудование. Лампа с двумя нитями накала, регулируемый источник тока, батарейка 9 В, резистор сопротивлением $r = 4,7$ Ом ($\pm 5\%$), два резистора сопротивлением $R = 1$ кОм ($\pm 1\%$), два мультиметра, кусочек фольги, макетная плата, соединительные провода.

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 термомпару так, чтобы ее конец уходил внутрь бутылки примерно до ее середины. Это позволит измерять температуру воды в бутылке без риска поверить пакет термомпарой. 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

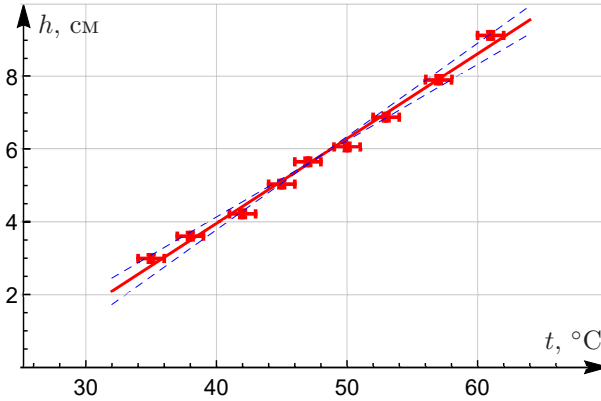


Рис. 47

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

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

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 спиралями, 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.

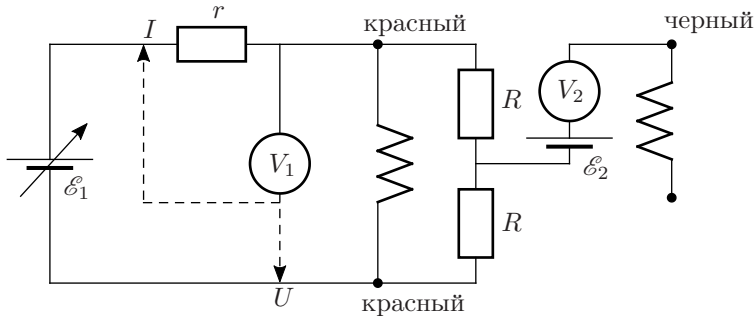


Рис. 48

\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

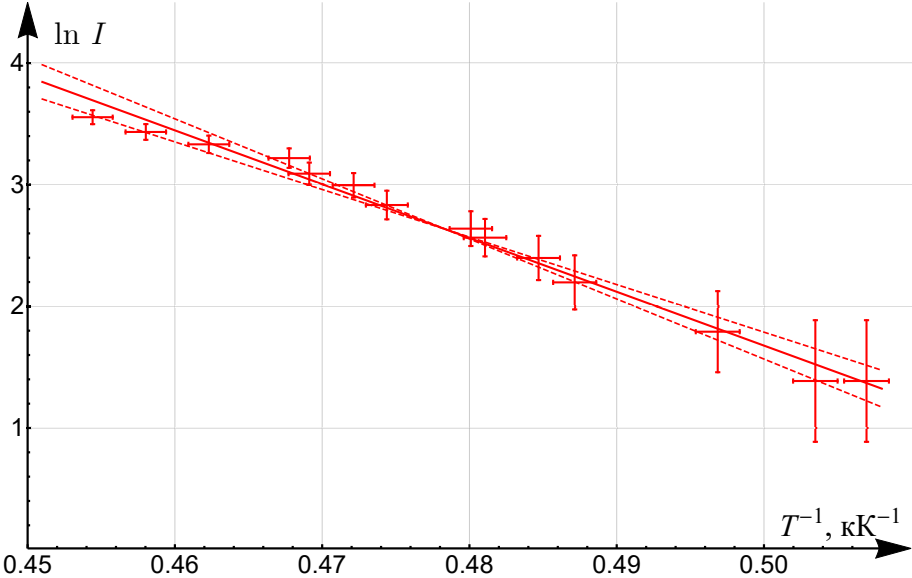
$$I_{\text{эм}} = U_2/R_V$$

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 $W = (3,8 \pm 0,4) \text{ эВ}$.



11 класс

Задача 1. Катушка

В выданном вам черном ящике находится катушка с большим числом витков. Ось катушки совпадает с осью отверстия в черном ящике. В этой работе ваша задача — определить параметры катушки, исследуя ее взаимодействие с постоянным магнитом (магнитным шариком).

Магнитные свойства постоянных магнитов характеризуются магнитным моментом p_m . Магнитный момент шарика направлен вдоль оси латунной трубки, поэтому в рамках данной задачи сила, действующая на шарик со стороны катушки, направлена по оси катушки и определяется выражением $F = p_m \frac{dB}{dx}$, где $p_m = (0,10 \pm 0,01) \text{ А} \cdot \text{м}^2$, B — индукция магнитного поля на оси катушки, x — расстояние между шариком и центром катушки.

Подайте на катушку напряжение $U = 12 \text{ В}$ с помощью блока питания. Убедитесь, что переключатель на блоке питания установлен в положение «12В». Если это не так, обратитесь к ответственным за аудиторию.

Соберите установку так, чтобы магнитный шарик, прикрепленный к латунной трубке, мог перемещаться вдоль оси катушки. Запишите номер установки.

1. Снимите зависимость силы F , действующей на магнитный шарик со стороны катушки, от расстояния x между шариком и центром катушки. Учтите, что центр катушки может не совпадать с центром черного ящика. Постройте график этой зависимости.
2. Определите индукцию магнитного поля B_0 в центре катушки.
3. Получите теоретическую формулу для индукции магнитного поля B на оси витка радиуса r на расстоянии x от центра витка, по которому течет ток I .
4. Определите радиус катушки R в предположении, что высота катушки много меньше диаметра, а все витки имеют один радиус (короткая катушка).
5. Определите количество витков в катушке N и диаметр проволоки d , по-прежнему считая катушку короткой.

Масса медной обмотки составляет 70% массы черного ящика. Плотность меди $\rho = 8,96 \text{ г/см}^3$. Удельная проводимость (величина, обратная удельному сопротивлению) меди $\lambda = 59 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

Оборудование. Весы электронные, катушка индуктивности в черном ящике, латунная трубка с неодимовым магнитным шариком, блок питания, штатив, деревянная линейка, плоская клипса, две клипсы для бумаги, деревянный кубик, прищепка.

Примечание. Согласно закону Био–Савара–Лапласа, индукция магнитного поля, создаваемого в точке C элементом тока I длиной dl , находящимся в точке

D , равна $dB = \frac{kI dl \sin \alpha}{r^2}$, где r — длина отрезка CD , α — угол между отрезком CD и направлением тока, $k = 10^{-7}$ Гн/м. Вектор индукции поля перпендикулярен как направлению тока, так и отрезку CD (рис. 15).

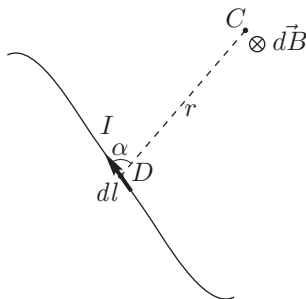


Рис. 15

Задача 2. Пограничное кипение

Вам выдано 30 мл неизвестной жидкости NN. Категорически запрещено её пить! Также избегайте ее попадания в глаза! Неизвестная жидкость не вызывает ожогов кожи.

Если две несмешивающиеся жидкости налить в сосуд и начать греть, при некоторой температуре начнется образование пузырей *на границе раздела* двух жидкостей. Это явление называется пограничным кипением. Температура пограничного кипения *ниже* температуры кипения чистых жидкостей.

Задание

1. Определите плотность ρ жидкости NN.
2. Определите молярную массу μ жидкости NN.
3. Измерьте температуру пограничного кипения $T_{\text{погр}}$ в системе NN+вода.
4. Определите удельную теплоту парообразования L жидкости NN (на единицу массы). Считайте, что L не зависит от температуры.

Уравнение Клапейрона-Клаузиуса определяет изменение давления насыщенного пара жидкости при изменении её температуры:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\mu LP}{RT^2}.$$

Зависимость давления $P_{\text{в}}$ насыщенного водяного пара от температуры приведена в таблице.

$T, \text{ }^\circ\text{C}$	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$P_{\text{в}}, \text{ кПа}$	1,2	2,3	4,2	7,4	12,3	19,9	31,2	47,4	70,1

Оборудование. Весы, электронный термометр, шприц 3 мл, шприц 20 мл, 3 воздушных шарика, неизвестная жидкость NN, четыре стакана различно объёма, мерный цилиндр, гайки, деревянная палочка, ножницы, горячая и холодная вода (по требованию), салфетки (по требованию).

Примечание.

1. Исследуемая жидкость достаточно дорогая, поэтому ее запасы у жюри крайне ограничены! Если вы все же оказались в безвыходной ситуации, мы выдадим вам еще 10 мл NN в течение 30 минут.
2. Жидкость NN кипит при температуре существенно ниже $100 \text{ }^\circ\text{C}$.
3. Атмосферное давление равно $P_0 = (100 \pm 1) \text{ кПа}$.

11 класс

Задача 1. Катушка (И. С. Юдин)

1. Установка: крепим зажимом типа «бульдог» латунную трубку вдоль линейки. Линейку крепим к выступу деревянного штатива шкалой наружу с помощью двух больших зажимов. Перемещая трубку с «бульдогом» относительно линейки, будем изменять высоту шарика. Под шарик располагаем весы, на который ставим кубик, на кубик ящик с катушкой. Прищепку используем для закрепления провода питания, чтобы его перемещения не влияли на показания весов.

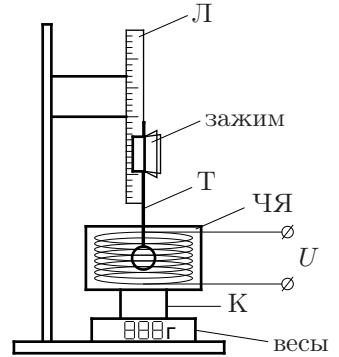


Рис. 50

Включаем весы, убеждаемся, что при выключенном питании на них 00.0, при необходимости сбрасываем. Включением и выключением питания катушки убеждаемся в воспроизводимости показаний весов и снимаем зависимость показаний от координаты h (снятой с линейки).

Заметим, что при нахождении шарика в центре катушки сила равна нулю (так как индукция магнитного поля максимальна), что позволяет определить координату центра катушки и получить искомую зависимость простым сдвигом.

h , мм	158	160	162	164	166	168	170
F , г сила	-0.93	-0.63	-0.36	-0.12	0.19	0.54	0.83
x , мм	-7	-5	-3	-1	1	3	5
F , мН	-9.114	-6.174	-3.528	-1.176	1.862	5.292	8.134
h , мм	172	174	176	178	180	182	184
F , г сила	1.03	1.27	1.46	1.72	1.77	1.79	1.67
x , мм	7	9	11	13	15	17	19
F , мН	10.094	12.446	14.308	16.856	17.346	17.542	16.366
h , мм	190	195	200	205	210	215	220
F , г сила	1.46	1.14	0.9	0.68	0.52	0.39	0.31
x , мм	25	30	35	40	45	50	55
F , мН	14.308	11.172	8.82	6.664	5.096	3.822	3.038
h , мм	225	230	235	240	245	250	
F , г сила	0.24	0.17	0.12	0.1	0.09	0.07	
x , мм	60	65	70	75	80	85	
F , мН	2.352	1.666	1.176	0.98	0.882	0.686	

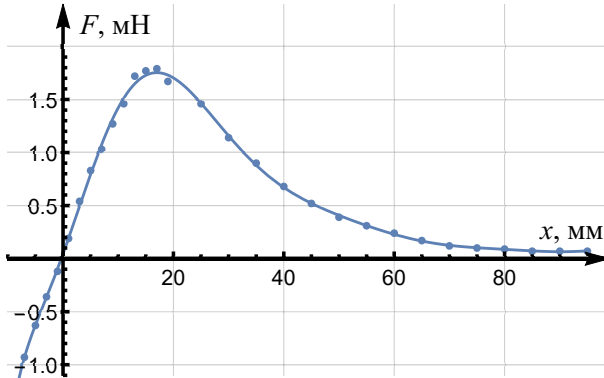


Рис. 51

2. Так как сила зависит, согласно условию задачи, от градиента поля $F = p_m \frac{dB}{dx}$, то изменение поля будет пропорционально силе, т.е. $\Delta B = \frac{F}{p_m} \Delta x$. Вычислим изменение поля при движении по оси из «бесконечности», найдя площадь под графиком силы от перемещения. Так как магнитным полем Земли можно пренебречь, т.е. вдали от катушки поле 0, то это изменение и есть поле катушки. Его можно определить по площади под графиком $F(x)$:

$$B_0 = \frac{1}{p_m} \int_1^2 F dx = 5,95 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}$$

3. Разобьем кольцо на элементы длины dl . Каждый из них будет создавать индукцию

$$dB = \frac{kI dl}{r^2 + x^2},$$

поскольку направление тока перпендикулярно направлению на элемент. Вектор индукции поля, создаваемой элементом, направлен под углом β к оси витка $\left(\cos \beta = \frac{r}{\sqrt{r^2 + x^2}} \right)$, поэтому его проекция на ось

$$dB_x = \frac{kI r dl}{(r^2 + x^2)^{3/2}}$$

Суммируем поля от элементов:

$$B = \frac{2\pi k I r^2}{(r^2 + x^2)^{3/2}} \quad (9)$$

4. Искать радиус катушки можно либо по положению максимума зависимости $F(x)$, либо по значению производной dF/dx при $x = 0$.

Рассмотрим сначала первый вариант.

Поскольку катушка считается короткой, воспользуемся формулой из предыдущего пункта для витков катушки радиусом R . Обозначим за I сумму токов во всех витках катушки ($I = NI_1$, где I_1 — ток в одном витке). Найдем первую производную, которая будет пропорциональна силе, и вторую производную, показывающую градиент силы:

$$\begin{aligned}\frac{dB}{dx} &= -\frac{6\pi kIR^2x}{(R^2+x^2)^{5/2}} \\ \frac{d^2B}{dx^2} &= -\frac{6\pi kIR^2(4x^2-R^2)}{(R^2+x^2)^{7/2}}\end{aligned}\quad (10)$$

Отсюда видно, что максимум силы достигается при

$$x = R/2$$

Снимая с графика положение максимума $x_0 = 1,7$ см, получаем $R = 3,4$ см.

Теперь рассмотрим второй вариант.

Из уравнения (10) получаем производную силы при $x = 0$:

$$\frac{dF}{dx} = \kappa_0 = p_m \frac{6\pi kI}{R^3}$$

Определяем κ_0 по наклону графика в нуле: $\kappa_0 = 1,6$ Н/м.

Из уравнения (9) найдем индукцию поля в центре катушки:

$$B_0 = \frac{2\pi kI}{R}\quad (11)$$

Зная B_0 и κ_0 , найдем радиус катушки:

$$\begin{aligned}\frac{p_mB_0}{\kappa_0} &= \frac{R^2}{3} \\ R &= \sqrt{\frac{3p_mB_0}{\kappa_0}} = 3,3 \text{ см}\end{aligned}$$

5. Из уравнения (11)

$$I = \frac{B_0 R}{2\pi k} = 320 \text{ А}$$

Напряжение на одном витке катушки

$$U_1 = \frac{U}{N},$$

Из закона Ома для одного витка

$$\frac{U_1}{I_1} = \frac{U}{I} = \frac{2\pi R}{\lambda\pi d^2/4} = \frac{8R}{\lambda d^2}$$

$$d = \sqrt{\frac{8IR}{\lambda U}} = 0,35 \text{ мм}$$

Чтобы найти массу черного ящика, поставим кубик на весы и обнулим их показания. После этого положим на кубик черный ящик. Зная массу черного ящика, рассчитаем массу катушки: $M = 204$ г. Для определения количества витков N выпишем:

$$\frac{M}{\rho} = \frac{\pi d^2}{4} N 2\pi R \Rightarrow N d^2 = \frac{2M}{\pi^2 R \rho}$$

$$N = \frac{\lambda U M}{4\pi^2 I R^2 \rho} = 1,1 \cdot 10^3$$

Задача 2. Пограничное кипение (А. М. Киселев)

Неизвестной жидкостью был фторкетон ФК-5-1-12 (Noves 1230), иногда ее называют «сухой водой». Noves является диэлектриком, слабо смачивает бумагу и не является растворителем. Поэтому Noves применяется в системах пожаротушения для серверных помещений и другой электроники, библиотек, музеев.

1. Используя большой шприц, взвешиваем $V = (10,0 \pm 0,4)$ мл неизвестной жидкости, находим $m = 15,6$ г. Вычисляем плотность:

$$\rho = \frac{m}{V} = 1,56 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}.$$

2. Помещаем внутрь воздушного шарика все грузы и заливаем внутрь $m_0 = 2,01$ г неизвестной жидкости. Максимально выпустив воздух, плотно завязываем шарик. Измеряем начальный объем шарика $V_{\text{нач}} = 13,6$ мл. Наливаем в сосуд с мерными делениями горячую воду. Начальный объем воды $V_1 = (200 \pm 10)$ мл. Помещаем шарик в сосуд с горячей водой, ждем некоторое время, пока весь Noves испарится. Шарик должен целиком находиться под водой. Если веса грузов не хватает, топим шарик в воде с помощью термометра. Измеряем объем «вода+шарик», $V_2 = (390 \pm 10)$ мл и температуру воды $T = 66$ °С = 338 К. Вычисляем объем газообразного

вещества Noves: $\Delta V = V_2 - V_1 - V_{\text{нач}} = 176 \pm 20$ мл. По закону Менделеева-Клапейрона

$$P_0 \Delta V = \frac{m_0}{\mu} RT,$$

где P_0 — атмосферное давление. Отсюда вычисляем молярную массу Noves

$$\mu = (320 \pm 40) \text{ г/моль}.$$

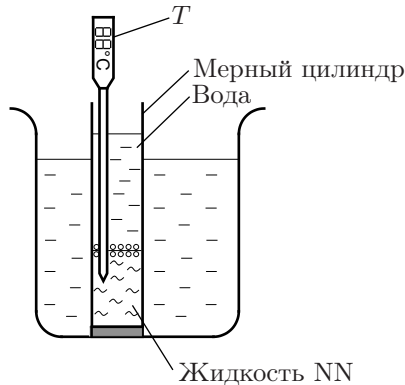


Рис. 52

3. Наливаем в пробирку (с подставкой) сначала неизвестную жидкость, потом воду. Между жидкостями есть четкая граница раздела. Ставим пробирку в стакан с водой. Чтобы не возникало перегретой жидкости, опускаем внутрь пробирки деревянную палочку как источник центров парообразования. Температуру системы измеряем термометром, опущенным внутрь пробирки (рис. 52). Температуру воды во внешнем стакане изменяем, доливая туда горячую или холодную воду. Так находим

$$T_{\text{погр}} = (46 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}.$$

При температуре чуть выше граничной на границе раздела жидкостей медленно образуется один пузырь. При температуре ниже граничной пузырей не образуется.

4. Наливаем в пробирку чистый Noves, опускаем туда деревянную палочку. Ставим пробирку внутрь стакана с горячей водой. Через некоторое время Noves начинает активно кипеть. Измеряем его температуру, которая равна температуре кипения

$$T_{\text{кип}} = (49 \pm 0.5) \text{ }^\circ\text{C}.$$

Условие кипения чистой жидкости: давление насыщенных паров равно атмосферному давлению: $P_{\text{NN}}(T_{\text{кип}}) = P_0$.

Поскольку жидкости не смешиваются, пограничное кипение начинается, когда сумма давлений насыщенных паров воды и Noves равно атмосферному:

$$P_{\text{NN}}(T_{\text{погр}}) + P_{\text{в}}(T_{\text{погр}}) = P_0.$$

Из этих соотношений оценим изменение давления насыщенных паров неизвестной жидкости при изменении её температуры:

$$\frac{dP}{dT} \approx \frac{P_{\text{NN}}(T_{\text{кип}}) - P_{\text{NN}}(T_{\text{погр}})}{T_{\text{кип}} - T_{\text{погр}}} = \frac{P_{\text{в}}(T_{\text{погр}})}{T_{\text{кип}} - T_{\text{погр}}}.$$

С помощью интерполяции из таблицы находим давление насыщенных паров воды $P_{\text{в}}(46 \text{ }^\circ\text{C}) = 10.3 \text{ кПа}$. Пользуясь уравнением Клапейрона-Клаузиуса, вычисляем удельную теплоту парообразования Noves:

$$L = \frac{RT_{\text{погр}}^2}{\mu P_0} \frac{P_{\text{в}}(T_{\text{погр}})}{T_{\text{кип}} - T_{\text{погр}}} = (90 \pm 40) \text{ кДж/кг}.$$

Основной источник погрешности определения L — неточное измерение температур $T_{\text{кип}}$ и $T_{\text{погр}}$.