

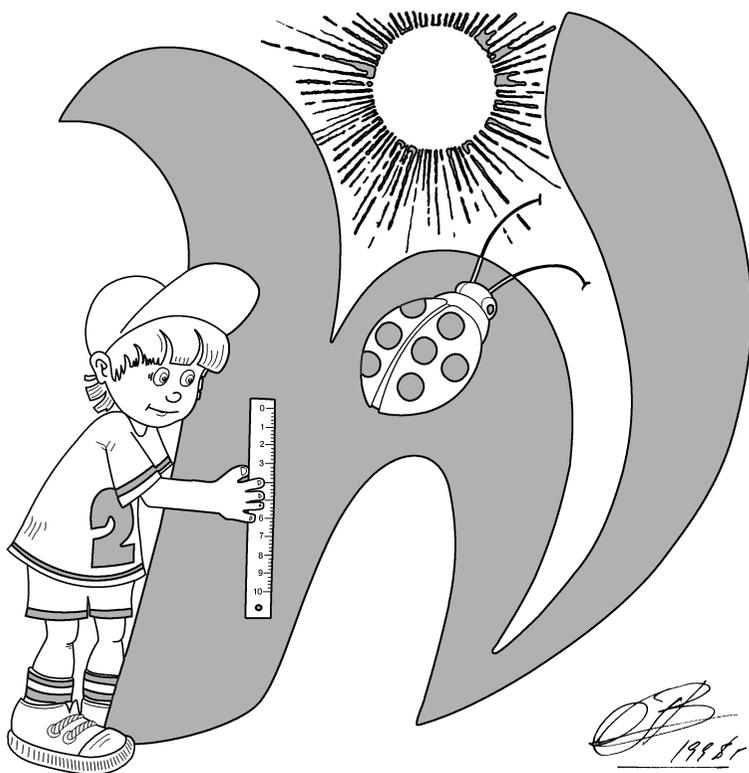
Методическая комиссия по физике
при центральном оргкомитете
Всероссийских олимпиад школьников

XLIX Всероссийская олимпиада школьников по физике

Заключительный этап

Экспериментальный тур

Методическое пособие



Екатеринбург, 2015 г.

Комплект задач подготовлен методической комиссией по физике при центральном оргкомитете Всероссийских олимпиад школьников
Телефоны: (495) 408-80-77, 408-86-95.

E-mail: physolymp@gmail.com

Сайт физических олимпиад школьников: physolymp.ru

Авторы задач

9 класс

1. Воронов А.,
Гуденко А.
2. Осин М.,
Кармазин С.

10 класс

1. Лящев А.,
Осин М.
2. Варламов С.,
Слободянин В.

11 класс

1. Гуденко А.

Общая редакция — Слободянин В.

При подготовке оригинал-макета использовалась издательская система \LaTeX 2 ϵ .

© Авторский коллектив
141700, Московская область, г. Долгопрудный
Московский физико-технический институт

9 класс

Задача 1. Песочные часы

Часть 1. Масса песка.

1.1. (1 балл) Исследуйте, зависит ли массовый расход μ (кг/с) песка в песочных часах от высоты h столба песка в верхней колбе (рис. 1). Сделайте вывод.

1.2. (4 балла) Определите массу m песка внутри песочных часов. Обратите внимание на то, что колбы песочных часов имеют разную длину. Колбы часов можно считать цилиндрическими.

Внимание! Следует аккуратно обращаться с песочными часами, не сломать узкую горловину, соединяющую верхнюю и нижнюю колбы. Пластмассовые опоры снимать можно. За поломку колбы часов снимается **5 баллов** и новые часы не выдаются!

Часть 2. Скорость хода часов. В этой части эксперимента вы работаете с моделью песочных часов, собранных вами.

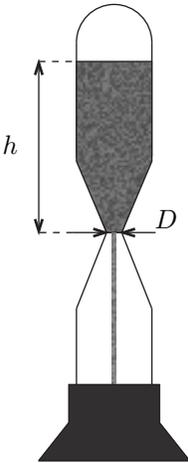


Рис. 1

2.1. (2 балла) Предположим, что массовый расход песка μ зависит только от его плотности ρ , ускорения свободного падения g , высоты h столба песка, и разности $(D - d)$, где D — диаметр отверстия в пробке, d — параметр, зависящий от свойств песка, C — безразмерная константа. Методом размерностей и по результатам предыдущего опыта определите коэффициенты α , β , γ , δ в формуле:

$$\mu = C \rho^\alpha g^\beta h^\gamma (D - d)^\delta.$$

2.2. (3 балла) Снимите зависимость массового расхода μ (мг/с) песка, высыпавшегося из отверстия в пробке бутылки, от диаметра отверстия D . Так как эксперимент может оказаться продолжительным, то для проверки воспроизводимости достаточно трижды повторить опыт по измерению массового расхода μ только для отверстия диаметром $D = 3$ мм. Определите наибольшее отклонение от среднего значения.

2.3. (4 балла) Определите значение параметра d .

2.4. (1 балл) Оцените погрешность d .

Внимание! Будьте аккуратны и не рассыпайте песок мимо ёмкости.

Оборудование. Песочные часы, миллиметровая бумага, секундомер, весы (до 200 г), брусок, пластмассовая бутылка без дна, пластиковые крышки от бутылок с отверстиями различного диаметра (3; 4; 5; 6) мм, 2 прямоугольные ёмкости для песка (одна из них с песком), деревянный штатив.

Задача 2. Грелка

Саморазогревающаяся солевая грелка (рис. 2) представляет собой тонкий прочный пакет с ацетатом натрия, в котором плавает легкая белая таблетка (кнопка-активатор). Ацетат натрия при комнатной температуре является переохлажденной жидкостью (комнатная температура **ниже** температуры ее кристаллизации).

При нажатии на кнопку активатора запускается процесс кристаллизации с выделением большого количества теплоты. Вы увидите, как внутри пакета распространяется волна кристаллизации. После нажатия кнопки активатора остановить работу **невозможно!**

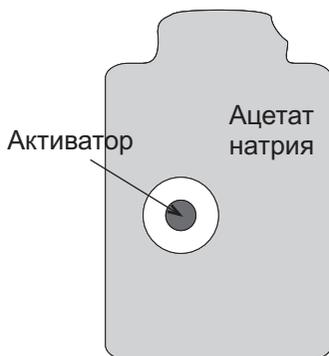


Рис. 2

Внимание! Перед тем как активировать грелку (запустить процесс кристаллизации), прочитайте условие до конца. Продумайте, что и в какой последовательности вы будете измерять. Подготовьте оборудование. Вам выдано две одинаковые грелки. В процессе эксперимента вам придется их обе активировать, но эксперимент с ними вы сможете провести только один раз! **Дополнительные грелки вам выдаваться не будут!**

Задание.

1. (2 балла). Используя первую из грелок, определите температуру кристаллизации ацетата натрия.

2. (5 балла). Положите в большую кювету вторую грелку и залейте ее водой массой 120 г. **Запомните уровень воды!** Запустите процесс кристаллизации, закройте кювету крышкой с ручкой и отверстием под термометр.

- Снимите зависимость температуры воды от времени (в диапазоне от 0 до 30 минут с момента активации).
- Постройте график этой зависимости.
- Оцените время протекания процесса кристаллизации.

3. (4 балла). Налейте в большую кювету теплую воду примерно той же температуры, которой достигала вода в п.2. эксперимента до прежнего уровня.

Закройте кювету крышкой и определите мощность тепловых потерь кюветы с водой в окружающую среду.

4. (4 балла). По результатам п.2 и п.3 определите удельную теплоту кристаллизации λ_a ацетата натрия.

При расчетах примите: удельная теплоемкость воды $c_v = 4200 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$, удельная теплоемкость ацетата натрия $c_a = 2300 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ в жидком и твёрдом состоянии одинаковая, удельная теплоемкость пластика большой кюветы $c_k = 2000 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$.

Примечание. В данной работе погрешность рассчитывать **не требуется**. За порчу термометра возможен штраф **–5 баллов!** Будьте аккуратны с горячей водой!

Оборудование. 2 солевых грелки, термометр, вода, секундомер, один большой и два маленьких пластиковых кювета, крышка большого кювета с прорезью для термометра, пластиковая лента для извлечения крышки, вода, весы (нагружать которые *не более* чем до 290 г !), измерительная лента, шприц, самоклеющиеся стикеры.

10 класс

Задача 1. Затухающие колебания

В этой задаче исследуются колебания теннисного шарика на нитке.

Часть 1. В данной части работы следует проводить измерения при постоянном начальном отклонении шарика 40° .

1.1. Нить рекомендуется взять такой длины, чтобы расстояние от точки подвеса до центра шарика было 60–70 см. Снимите зависимость времени τ , за которое амплитуда колебаний уменьшается вдвое, от массы m шарика (не менее 7 точек).

1.2. Известно, что $\tau(m) = km^\alpha$, где k , α — постоянные коэффициенты. Найдите k , α .

Часть 2. В данной части работы следует проводить измерения при максимальной массе шарика. Амплитуда колебаний A — длина дуги окружности между равновесным положением шарика и максимальным отклонением шарика от положения равновесия.

2.1. Снимите зависимость амплитуды колебаний от времени t при угловом значении амплитуд в диапазоне от 60° до 20° (не менее 7 точек).

Рассмотрим результаты двух теорий, описывающие зависимость $A(t)$:

2.2.1. Ламинарное обтекание шарика воздухом. $A(t) = A_0 e^{-\delta t}$, где A_0 — начальная амплитуда колебаний, $\delta = 3\pi r \eta / m$, r — радиус шарика, m — масса шарика, η — вязкость воздуха. Известно, что $\eta \in [0,5; 5] \cdot 10^{-5}$ Па·с. Проверьте применимость теории к вашим результатам.

2.2.2. Турбулентное обтекание шарика воздухом. $A(t) = A_0 / (1 + \beta A_0 t)$, где $\beta = \pi \rho d^2 C_d / (3mT)$, $\rho = 1,17$ кг/м³ — плотность воздуха, d — диаметр шарика, T — период колебаний, C_d — некоторый коэффициент. Из теоретических соображений известно, что $C_d \in [0,4; 4]$. Проверьте применимость теории к вашим результатам.

Сделайте оценки погрешности ваших результатов.

Указание. Период малых колебаний шарика на длинной нити примерно равен $2\pi\sqrt{l/g}$, где l — расстояние от точки подвеса до центра масс груза, $g = 9,8$ м/с² — ускорение свободного падения на Земле. **Во всех частях работы зависимостью периода колебаний от их амплитуды и массы шарика можно пренебречь.**

Оборудование. Штатив, измерительная лента, нитка, бумажный транспортир, теннисный шарик известной массы 2,4 г, шприц, стакан с водой, миллиметровая бумага (для построения графиков).

Задача 2. Диод Зенера

- 1. Определите ёмкость конденсатора C_2 . 2 балла
 - 2. Определите сопротивление мультиметра в режиме вольтметра постоянного тока (на всех пределах измерения) 1 балл
 - 3. Определите сопротивления резисторов R_1 и R_2 . 3 балла
 - 4. Снимите вольтамперную характеристику диода Зенера. 9 баллов
- Погрешности оценивать не требуется.

Примечание. При подключении электролитических конденсаторов подключайте длинный вывод к «+», короткий — к «-».

Оборудование.

Электролитический конденсатор $C_1 = 1000$ мкФ, электролитический конденсатор C_2 , два резистора R_1 и R_2 , два мультиметра (режим амперметра отключён), диод Зенера, батарейки, макетная плата, миллиметровая бумага.

Примечание. Каждые пять выводов макетной платы, расположенные в одном столбце по одну сторону от середины платы, соединены внутри платы друг с другом. Например, выводы, отмеченные серым (рис. 3), замкнуты между собой.

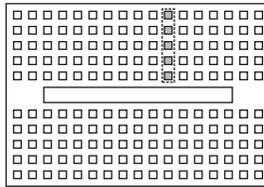


Рис. 3

11 класс

Задача 1. Магнитные шары

Поле однородно намагниченного шара радиусом R на расстояниях $r \geq R$ от центра шара совпадает с полем точечного диполя \vec{P}_m , равного полному магнитному моменту шара, расположенного в его центре и направленного от южного (S) к северному (N) магнитному полюсу. Например, магнитное поле Земли хорошо описывается полем точечного магнитного диполя, расположенного в ее центре.

Полный магнитный момент определяется намагниченностью \vec{p} вещества, из которого изготовлен шар. По определению, намагниченность — это магнитный момент единицы объёма. Для однородно намагниченного шара намагниченность равна: $\vec{p} = \vec{P}_m/V$, где V — объём шара.

Если шар изготовлен из магнитожёсткого материала, то можно считать, что под действием внешних магнитных полей его намагниченность не изменяется и шар ведёт себя как жёсткий диполь.

Электрическим аналогом магнитного шара из магнитожёсткого материала является диэлектрический шар, изготовленный из электрета — материала с «замороженной» поляризацией. Шар, изготовленный из электрета, ведёт себя в электрическом поле точно так же, как и шар с постоянной намагниченностью в магнитном поле. Это означает, что формулы, описывающие взаимодействие постоянных шарообразных магнитов между собой и с магнитным полем, полностью — с точностью до обозначений — идентичны формулам, описывающим поведение электрических диполей в электрическом поле.

Напомним основные формулы, которые могут вам потребоваться в предлагаемой работе:

1. Индукция поля \vec{B} точечного магнитного диполя \vec{P}_m в точке с радиус-вектором \vec{r} относительно диполя (система СИ):¹

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(3 \frac{(\vec{P}_m, \vec{r})}{r^5} \vec{r} - \frac{\vec{P}_m}{r^3} \right),$$

где μ_0 — магнитная константа.

2. На магнитный диполь \vec{P}_m в поле \vec{B} действует момент сил:²

$$\vec{M} = [\vec{P}_m, \vec{B}].$$

3. Энергия диполя \vec{P}_m в поле \vec{B} :

$$W = -(\vec{P}_m, \vec{B}).$$

¹Здесь за (\vec{a}, \vec{b}) обозначено скалярное произведение векторов \vec{a} и \vec{b} .

²Здесь за $[\vec{a}, \vec{b}]$ обозначено векторное произведение векторов \vec{a} и \vec{b} .

Задание:

1. Для магнита с диаметром $d_5 = 15$ мм определите расположение его северного (N) и южного (S) полюсов и подробно опишите способ определения полюсов. Отметьте синим фломастером северный полюс магнита, а красным — южный.

2. Снимите зависимость максимальной силы притяжения $F(r)$ от расстояния r между центрами шаров диаметром $d = 15$ мм. Опишите метод измерений, результаты измерений занесите в таблицу 1. Считая $F \sim r^n$, определите n . Сравните результат с теорией. При расчетах считайте, что взаимодействие двух однородно намагниченных шаров можно рассматривать как взаимодействие точечных диполей, расположенных в центрах шаров.

3. Измерьте максимальную силу сцепления F_{ii} двух одинаковых шаров с диаметрами $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6$, результаты занесите в таблицу 2. Проанализируйте полученные результаты и сравните намагниченности шаров.

4. Найдите отношение p_{20}/p_{10} намагниченности p_{20} шара диаметром $d_6 = 20$ мм к намагниченности p_{10} шара диаметром $d_4 = 10$ мм, внесите результат в таблицу 3.

5. Найдите отношение B_{20}/B_{10} величины индукции магнитного поля B_{20} на полюсе магнита диаметром $d_6 = 20$ мм к величине индукции магнитного поля B_{10} на полюсе магнита диаметром $d_4 = 10$ мм, внесите результат в таблицу 3.

6. Измерьте максимальные силы сцепления шаров F_{ij} различных диаметров для всевозможных пар, занесите результаты в таблицу 4.

7. Выразите максимальную силу сцепления F_{ij}^t шаров разных диаметров d_i и d_j , используя значения сил сцепления шаров с одинаковыми диаметрами F_{ii} и F_{jj} .

8. Рассчитайте значения F_{ij}^t , результаты занесите в таблицу 5. Сравните полученные расчетные значения силы с экспериментальными, измеренными в пункте 6.

Оборудование.

Шарообразные магниты различных диаметров из магнитожёсткого материала (по паре каждого диаметра): $d_1 = 3$ мм, $d_2 = 5$ мм, $d_3 = 7$ мм, $d_4 = 10$ мм, $d_5 = 15$ мм и $d_6 = 20$ мм, точность измерения диаметров $d - 0,1$ мм; электронные весы (безмен); штатив с закреплёнными уголками с отверстиями; четыре немагнитные чашечки на коромыслах; 8 пластинок толщиной $h = 1,2 \pm 0,05$ мм каждая.

ВНИМАНИЕ. Уважаемые участники олимпиады! Рекомендуем вам не располагать механические часы вблизи магнитных шариков. Обращаем также ваше внимание на то, что магнитные шарики могут нанести вред в случае заземления участка кожи между двумя шариками.

Возможные решения

9 класс

Задача 1. Песочные часы

Часть 1. Масса песка.

1.1. Расположим часы вертикально и пересыпем весь песок полностью в одну половину часов. Перевернём часы и засечём время t_1 . Затем быстро перевернём часы и измерим время t_2 , за которое песок высыпется обратно. Эти времена равны в пределах погрешности. В первом случае высота столба максимальна, а во втором во много раз меньше. Равенство времён указывает на то, что массовый расход от высоты не зависит.

1.2. Пересыпем весь песок полностью в одну половину часов и расположим часы горизонтально. Добьёмся того, чтобы поверхность песка была горизонтальной. Поместим часы одной опорой на весы, а другой — на брусок (измерение 1). Затем пересыпем песок в другую колбу и положим часы так же (колба с песком на весах, измерение 2). Обозначим m_0 — масса часов вместе с песком, m — масса песка, m_1 — показания весов в измерении 1, m_2 — показания весов в измерении 2. Пусть центр масс часов без песка находится на расстоянии x от перемычки, а длины колб составляют l_1 и l_2 соответственно. Запишем уравнения моментов для обоих измерений:

$$m_1(l_1 + l_2) = m(l_2 + \frac{l_1}{2}) + (m_0 - m)(l_2 - x),$$

$$m_2(l_1 + l_2) = m\left(l_1 + \frac{l_2}{2}\right) + (m_0 - m)(l_1 + x).$$

Сложив эти уравнения, получим:

$$(m_1 + m_2)(l_1 + l_2) = m \cdot \frac{3}{2}(l_1 + l_2) + (m_0 - m)(l_1 + l_2)$$

Отсюда:

$$m = 2(m_1 + m_2 - m_0).$$

Часть 2. Скорость хода часов.

2.1. В пункте 1.1 установлено, что массовый расход от высоты не зависит, значит $\gamma = 0$. Размерности $[g] = \text{м}/\text{с}^2$, $[D - d] = \text{м}$, $[\rho] = \text{кг}/\text{м}^3$, $[\mu] = \text{кг}/\text{с}$. Размерность времени входит только в g , отсюда определяем, что $\beta = 1/2$. Размерность массы входит только в ρ , отсюда определяем, что $\alpha = 1$. Чтобы размерность длины была правильной, $\delta = 5/2$, значит:

$$\mu = C\rho g^{1/2}(D - d)^{5/2}.$$

2.2. С помощью секундомера и весов снимем зависимость массового расхода песка от диаметра отверстия. Для наименьшего диаметра проведем несколько

измерений, результаты усредним. Разброс значений от среднего примерно 5 %, следовательно, значения массового расхода при остальных диаметрах можно находить по 1 точке. Данные занесём в таблицу.

μ , г/с	d , мм	$\mu^{2/5}$, (г/с) ^{2/5}
0,73	3	0,88
1,67	4	1,23
2,83	5	1,52
4,86	6	1,88

2.3. Для нахождения величины d линеаризуем зависимость, полученную в п. 2.1 и построим график в координатах $\mu^{2/5}(D)$, он будет пересекать ось абсцисс при $D = d$. Найдём из графика $d = 0,56$ мм.

Задача 2. Грелка

1. Для решения пункта необходимо активировать первую грелку.

При этом от кнопки активатора начнет распространяться волна кристаллизации ацетата, которая в течении нескольких секунд распространится на всю грелку. Однако это не означает, что кристаллизация прошла полностью, ведь грелка остается мягкой на ощупь и продолжает нагреваться. Следовательно, между первичными кристаллами, формирующими видимый фронт кристаллизации, захватываются объемы жидкого раствора (процесс инклюзии), а их кристаллизация происходит уже значительно позднее.

Достаточно долгое время ацетат будет находиться в состоянии смеси твердого и жидкого вещества при определенной температуре. Этой температурой будет температура кристаллизации, потому что в состоянии устойчивого теплового равновесия система жидкость-твердое тело может существовать только при этой температуре. Ее можно измерить непосредственно термометром, обернув активированную грелку вокруг него. Когда температура перестанет расти, термометр покажет искомое значение. Ответ: $T_{кр} = 53$ °С.

2. При подготовке к выполнению эксперимента необходимо измерить массы кюветы m_k , воды m_v и грелки $m_{гр}$ (можно считать равной массе ацетата ввиду тонкости пленки и легкости активатора). При этом нужно следить за тем, не превышает ли масса кюветы с содержимым 290 грамм, иначе измерения на весах провести невозможно. Также необходимо измерить начальную температуру воды $T_{в0}$ и окружающей среды (холодной грелки) T_c , они могут немного отличаться. После того, как залитая водой грелка будет готова к выполнению задания, необходимо запомнить уровень воды, это можно сделать с помощью стикера.

а) Для более точного исследования зависимости $T(t)$, показания термометра необходимо снимать не менее чем через каждые 30 секунд до выхода на установившуюся температуру. Далее измерения следует проводить не реже, чем через минуту для отсечки времени начала спада.

б) График зависимости $T(t)$ должен включать в себя 3 участка:

- Быстрый рост температуры (0; $t_1 \approx 4-5$ минут).
- Постоянная температура ($T = T_B$) ($t_1; t_2 \approx 15-25$ минут).
- Медленно убывающая температура ($t_2; t_3 \approx 30$ минут).

в) На втором участке мощность тепловых потерь системы в окружающую среду равна мощности тепла, поступающего от грелки. Эти мощности зависят от разности температур между водой и окружающей средой и между водой и грелкой соответственно. Поскольку температура среды и воды постоянны, постоянна и температура грелки, а значит в ней продолжается кристаллизация. Уменьшение температуры воды говорит о начале падения температуры грелки, что в свою очередь свидетельствует о прекращении процесса кристаллизации. Следовательно, время кристаллизации $t_{кр} = t_2$.

3. Пусть за малый промежуток времени Δt температура воды изменилась на ΔT . Вместе с водой остывает и кювета, поэтому энергия, выделившаяся из системы равна $(c_B m_B + c_K m_K) \Delta T$, а мощность тепловых потерь равна

$$P = \frac{(c_B m_B + c_K m_K) \Delta T}{\Delta t} \quad (1)$$

Задача этого пункта — как можно точнее определить значение величины $\alpha = \Delta T / \Delta t$ в окрестности $T = T_B$. Очевидно, что $T(t)$ не является линейной. Следовательно, α лучше всего определить с помощью касательной ($T = \alpha t + B$) к $T(t)$.

Снимем зависимость $T(t)$ кюветы с водой. Цена деления термометра достаточно велика, поэтому самым лучшим методом будет измерение температуры через одинаковые (30–60 с) промежутки времени. После построения графика, проведем касательную к точке, соответствующей температуре $T = T_B$. По угловому коэффициенту ее наклона определим α . Подставив значение α в (1) получим:

$$P = (c_B m_B + c_K m_K) \alpha = 5,0 \text{ Вт.}$$

4. Уравнение теплового баланса за время кристаллизации должно учитывать:

- Нагревание грелки до температуры $T_{кр}$ (до окончания кристаллизации она не остывает!): $Q_1 = c_{гр} m_{гр} (T_{кр} - T_c)$.
- Нагревание воды до температуры T_B : $Q_2 = c_B m_B (T_B - T_{B0})$.
- Нагревание кюветы до температуры T_B : $Q_3 = c_K m_K (T_B - T_{B0})$.
- Тепловые потери в окружающую среду: $Q_4 = P (t_{кр} - \frac{t_1}{2})$.
- Количество теплоты, выделившееся при полной кристаллизации грелки: $\lambda m_{гр}$.

Уравнение теплового баланса имеет вид:

$$\lambda m_{гр} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4,$$

откуда численное значение $\lambda = 2,0 \cdot 10^5$ Дж/кг.

10 класс

Задача 1. Затухающие колебания

Часть 1.

Время в данной задаче нужно измерять по числу колебаний маятника. Можно заметить, что использование бифилярного подвеса значительно улучшает качество измерений, так как фиксирует плоскость колебаний маятника.

1.1. Добавляя в шарик определенные порции воды с помощью шприца, снимем зависимость $\tau(m)$. Данные приведены в таблице 1 для длины нити $l \approx 67$ см. Погрешность измерения массы определяется ценой деления шприца и накапливается с увеличением массы. Погрешность же измерения времени постоянна и равна половине периода.

Таблица 1.

τ/T	2	6	9	13	16	19	22	25	28	32	35
$m, \text{ г}$	2,4	5,4	8,4	11,4	14,4	17,4	20,4	23,4	26,4	29,4	32,4

1.2. Построив график полученной зависимости (рис. 4), убеждаемся что он линеен, и $\alpha = 1$. Из коэффициента наклона полученной прямой находим, что $k = (1,77 \pm 0,03) \text{ с/г}$.

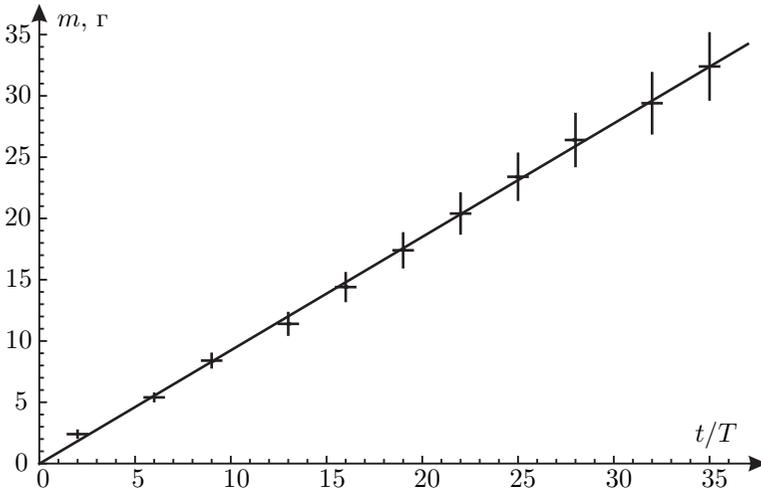


Рис. 4

Часть 2.

2.1. Снимем зависимость угловой амплитуды φ от времени.

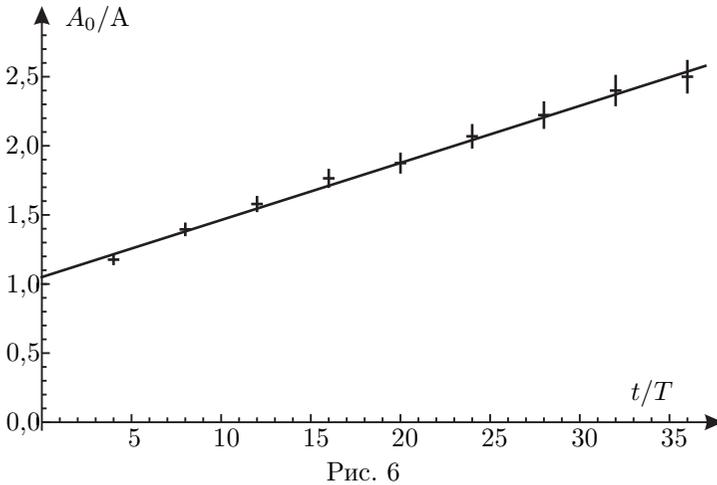
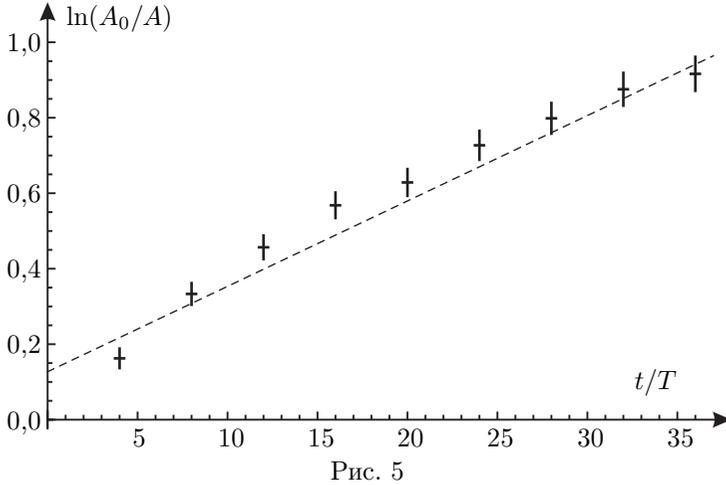
Таблица 2.

t/T	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44
$\varphi, ^\circ$	60	51	43	38	34	32	29	27	25	24	22,5	21

2.2.1. Линеаризуем заданную в этом пункте зависимость. $\ln(A_0/A) = \delta t$. Построим график зависимости $\ln(A_0/A)$ от (t/T) (рис. 5).

Таблица 3.

t/T	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36
$\ln(A_0/A)$	0,00	0,16	0,33	0,46	0,57	0,63	0,73	0,80	0,88	0,92



Как мы видим, полученная зависимость не является линейной. Но, даже если мы примем ее за линейную, оценив из графика значение $\eta \approx 2 \cdot 10^{-3}$ Па·с, мы обнаружим расхождение на два порядка с величиной, предложенной в условии. Следовательно, данная теория неприменима.

2.2.2. Линеаризуем заданную в данном пункте зависимость. $A_0/A = 1 + \beta A_0 t$. Построим график зависимости A_0/A от t/T (рис. 6).

Таблица 4.

t/T	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36
A_0/A	1,00	1,18	1,40	1,58	1,76	1,88	2,07	2,22	2,40	2,50

Как мы видим, полученная зависимость линейна в пределах погрешности. Однако, для подтверждения теории необходимо проверить, что значение C_d лежит в заданном промежутке. Это значение мы можем вычислить из коэффициента наклона полученной прямой. $C_d = (0,88 \pm 0,02)$, что окончательно подтверждает применимость второй теории.

Задача 2. Диод Зенера

1. Для определения неизвестной ёмкости соединим последовательно конденсаторы неизвестной и известной ёмкостей и зарядим их от батарейки (рис. 7). После этого измерим напряжения на конденсаторах U_1 и U_2 . Через конденсаторы протёк заряд $q = C_1 U_1 = C_2 U_2$, откуда получаем ответ:

$$C_2 = C_1 \frac{U_1}{U_2} = 100 \text{ мкФ.}$$

2. Подключим мультиметр в режиме омметра к вольтметру постоянного тока и получим, что сопротивление вольтметра равно $R_V = 1 \text{ МОм}$ на всех пределах измерения.

3. Значение меньшего из сопротивлений измерим непосредственно мультиметром в режиме омметра, получим $R_1 = 10 \text{ кОм}$. Для измерения сопротивления другого резистора соединим вольтметр и этот резистор параллельно и подключим к омметру. Обозначим общее сопротивление $R_{\text{общ}}$. Получим, что сопротивление неизвестного резистора:

$$R_2 = \frac{R_V R_{\text{общ}}}{R_V - R_{\text{общ}}} = 10 \text{ МОм.}$$

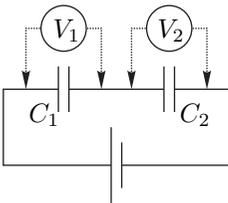


Рис. 7

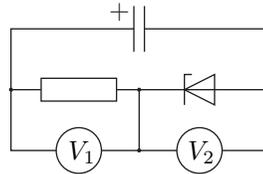


Рис. 8

4. Для того, чтобы снять вольтамперную характеристику диода Зенера (разг. стабилитрон), в качестве источника переменного напряжения используем предварительно заряженный конденсатор $C_1 = 1000 \text{ мкФ}$. Напряжение на

стабилитроне U_2 определяем с помощью параллельно подключенного вольтметра (рис. 8). Для определения тока используем балластный резистор $R_1 = 10$ кОм, на котором измеряем напряжение U_1 . Тогда ток, текущий через стабилитрон, равен:

$$I = \frac{U_1}{R_1} - \frac{U_2}{R_V}.$$

Эта формула учитывает то, что при некоторых напряжениях U_2 ток, текущий через стабилитрон, сравним с током, текущим через вольтметр U_2 .

Для увеличения диапазона можно в качестве источника использовать заряженный конденсатор с последовательно включенной батарейкой. Данные приведены в таблице, ВАХ — на рис. 9.

U_s , В	I_s , мкА						
-3,80	-188,9	-2,80	-9,6	0,00	0,0	0,59	21,3
-3,60	-107,4	-2,70	-6,8	0,46	0,6	0,60	29,6
-3,40	-62,0	-2,60	-4,7	0,47	0,8	0,63	71,7
-3,30	-46,4	-2,50	-3,2	0,48	1,1	0,64	97,9
-3,20	-34,9	-2,40	-2,1	0,50	1,8	0,65	133,9
-3,10	-25,3	-2,30	-1,4	0,52	3,2	0,66	182,9
-3,00	-18,6	-2,20	-0,9	0,54	5,5	0,67	254,9
-2,99	-17,9	-2,10	-0,5	0,55	7,2	0,68	344,7
-2,90	-13,3	-2,00	-0,4	0,57	12,8	0,69	474,0

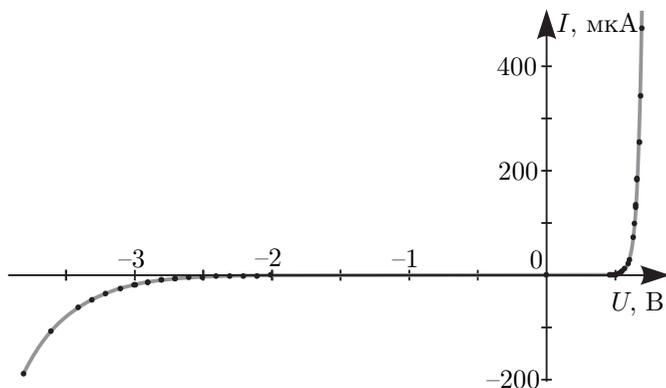


Рис. 9

Будем считать, что тока через стабилитрон больше нуля тогда, когда вывод с черной меткой подключен к «+» источника. В этом случае стабилитрон ведет себя как обыкновенный диод. В обратном направлении стабилитрон находится при напряжениях меньших напряжения стабилизации (для данного стабилитрона $U_S = 5,1$ В), поэтому, ВАХ имеет не характерный для стабилитрона вид.

11 класс

Задача 1. Магнитные шары

направление на север ←

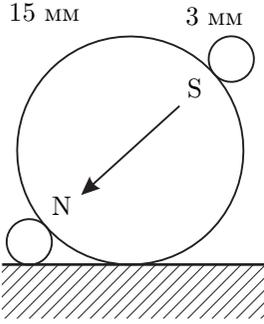


Рис. 10

1. Если взаимодействующие шары расположить недалеко друг от друга и при этом не препятствовать их свободному вращению, то их магнитные моменты выстроятся вдоль линии, соединяющей центры шаров. Такое расположение соответствует минимуму энергии магнитного взаимодействия шаров. Если шары отпустить, то они сцепятся противоположными полюсами.

Для определения северного и южного полюсов шара диаметром $d_5 = 15$ мм подцепим к его противоположным полюсам два маленьких 3-х миллиметровых шарика и положим его на поверхность стола. Расположим наш шар подальше от магнитных предметов и других магнитов. Шар под действием магнитного поля Земли развернётся так, что один из подцепленных маленьких магнетиков будет смотреть вверх, а другой — вниз (рис. 10). Нижний шарик соответствует северному, а верхний — южному полюсу большого шара. Это связано с тем, что Екатеринбург — город, где проходит олимпиада — находится в северном полушарии Земли, и силовые линии магнитного поля наклонены под углом к горизонту вниз. Пометим полюса магнита фломастером: синим цветом — северный полюс, красным — южный. Аналогичным образом определим и пометим полюса остальных шариков.

2. Снимем зависимость силы взаимодействия $F(r)$ шаров диаметром $d = 15$ мм от расстояния r между центрами шаров. Для этого соберём схему, показанную на рис. 11.

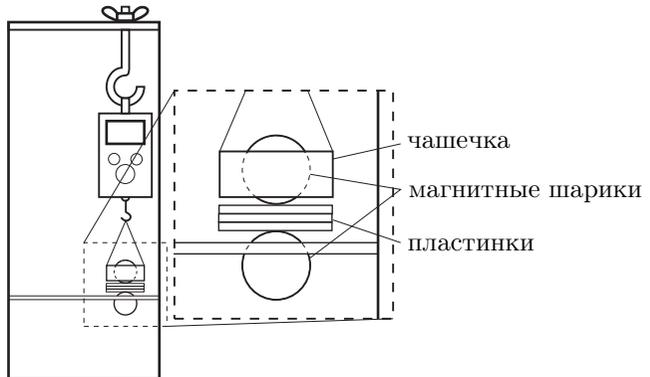
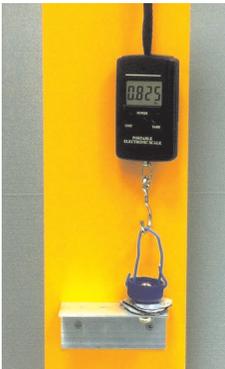


Рис. 11

Отверстия в чашке и уголке должны быть такими, чтобы шары соприкасались, причём соприкасались полюсами: сила притяжения шаров при этом будет максимальная. Силу притяжения измеряем с помощью весов следующим образом: вращая барашек крюка, опустим чашечку до заведомого соприкосновения верхнего шара с нижним. В этом случае часть силы сцепления магнитных шаров уравновешивается силой упругости шаров, а часть — натяжением весов. Будем медленно затягивать барашек, приподнимая чашечку. Сила упругости будет уменьшаться и достигнет нуля в момент отрыва верхнего шара от нижнего. В этот момент показания весов M максимальны. Дальнейшее поднятие чашки приведёт к увеличению расстояния между шарами и ослабевания магнитной силы. Таким образом, максимальные показания весов соответствуют силе взаимодействия шаров при их соприкосновении.

Для учёта веса чашки с шаром, подвешиваем шар с чашкой на весах вдали от магнитов и с помощью клавиши «TARE» обнуляем показание весов. Расстояние между шарами можно изменять, прокладывая между шарами разное количество пластин известной толщины, при этом так же будем записывать максимальные показания весов, соответствующие отрыву верхнего шара от пластин. Результаты измерений представлены в Таблице 1, где m — количество пластинок между шарами, $r = d + mh$ — расстояние между центрами шаров, M — показания весов, F — сила взаимодействия шаров, $r_0 = 1$ мм, $F_0 = 1$ гс¹.

Таблица 1. Зависимость $F(r)$.

m	r , мм	M , кг	F , гс	r^{-4} , 10^{-6} мм ⁻⁴	$\ln r/r_0$	$\ln F/F_0$
0	15,0	2,800	2800	19,8	2,708	7,94
1	16,2	2,080	2080	14,5	2,785	7,64
2	17,4	1,520	1520	10,9	2,856	7,33
3	18,6	1,140	1140	8,4	2,923	7,04
4	19,8	0,865	865	6,5	2,986	6,76
5	21,0	0,680	680	5,1	3,045	6,52
6	22,2	0,540	540	4,1	3,100	6,29
7	23,4	0,430	430	3,3	3,153	6,06
8	24,6	0,350	350	2,7	3,203	5,86

Чтобы определить степень, построим график $F(r)$ в двойном логарифмическом масштабе (рис. 12). По наклону графика определим $n = -4,23 \pm 0,25$.

Найдём теоретическое значение n . Энергия взаимодействия двух сонаправленных точечных диполей P_1 и P_2 , ориентированных вдоль соединяющей их линии:

$$W = -\frac{\mu_0}{2\pi} \frac{P_1 P_2}{r^3}.$$

¹В данном случае удобно пользоваться такой внесистемной единицей измерения как грамм-сила, гс. Сила в 1 гс соответствует весу 1 грамма.

Тогда сила их взаимодействия:

$$F = -\frac{\partial W}{\partial r} = -\frac{3\mu_0}{2\pi} \frac{P_1 P_2}{r^4}.$$

Знак «минус» означает, что шары притягиваются. Таким образом, теоретическое значение $n = -4$.

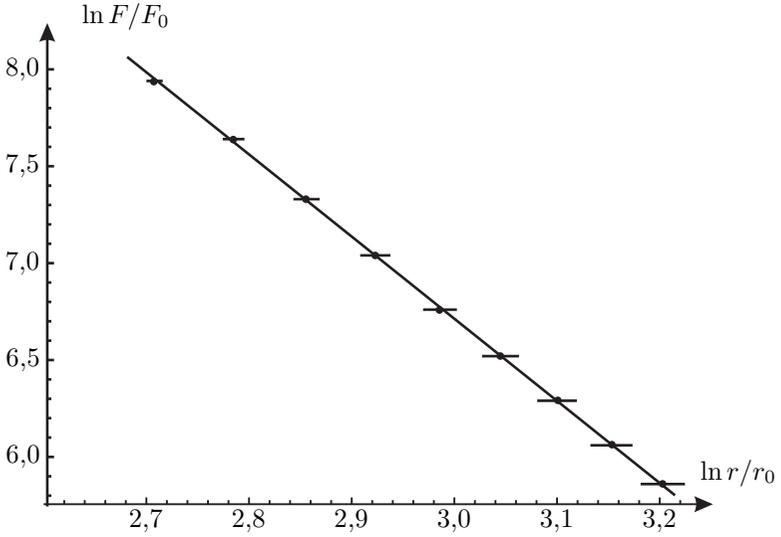


Рис. 12

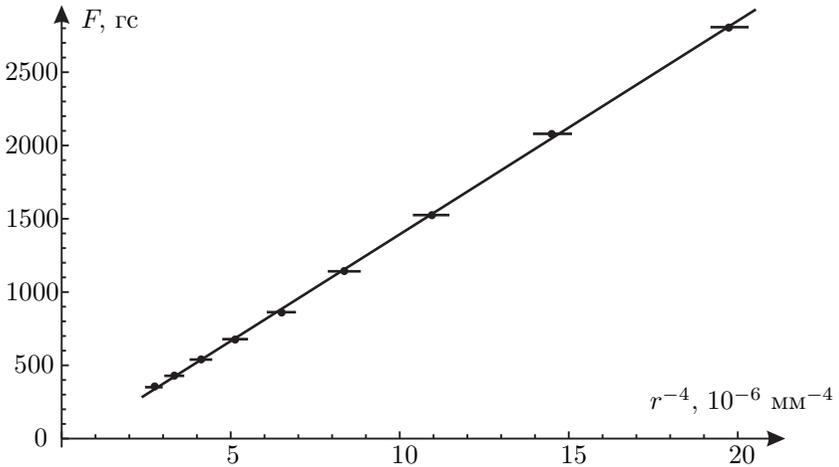


Рис. 13

Видно, что в пределах погрешности теоретическое значение n совпадает с экспериментальным, а значит, магнитные шары действительно взаимодействуют как жёсткие точечные диполи, расположенные в центрах шаров.

Соответствие теории эксперименту можно также показать, построив график зависимости $F(r^{-4})$ (рис. 13). Через экспериментальные точки можно провести прямую, проходящую через начало координат, что подтверждает совпадение теории с экспериментом в пределах погрешности.

3. Таким же методом измеряем максимальную силу сцепления одинаковых шаров. Максимальная сила будет достигаться при их касании разноимёнными полюсами. Данные приведены в таблице 2.

Таблица 2. Зависимость $F_{ii}(d)$

i	d_i , мм	F_{ii} , гс	$\sqrt{F_{ii}}$, гс ^{1/2}
1	3	113	10,6
2	5	305	17,5
3	7	630	25,1
4	10	1350	36,7
5	15	2800	52,9
6	20	430	20,7

Если предположить, что некоторые шары намагничены одинаково и взаимодействуют как точечные жёсткие диполи, то силы сцепления увеличиваются пропорционально квадрату диаметра:

$$F \sim \frac{P_m^2}{d^4} = \frac{(pV)^2}{d^4} \sim \frac{p^2 d^6}{d^4} = p^2 d^2.$$

Для проверки этой зависимости строим график зависимости в координатах (d, \sqrt{F}) . Видно, что точки, соответствующие шарам 1–5, лежат на одной прямой, проходящей через начало координат, а точка, соответствующая шару 6, не лежит на этой прямой. Это означает, что намагничённость шаров 1–5 диаметрами $d_{1-5} = 3-15$ мм в пределах точности измерений одинакова, а намагничённость шарика диаметра $d_6 = 20$ мм заметно меньше.

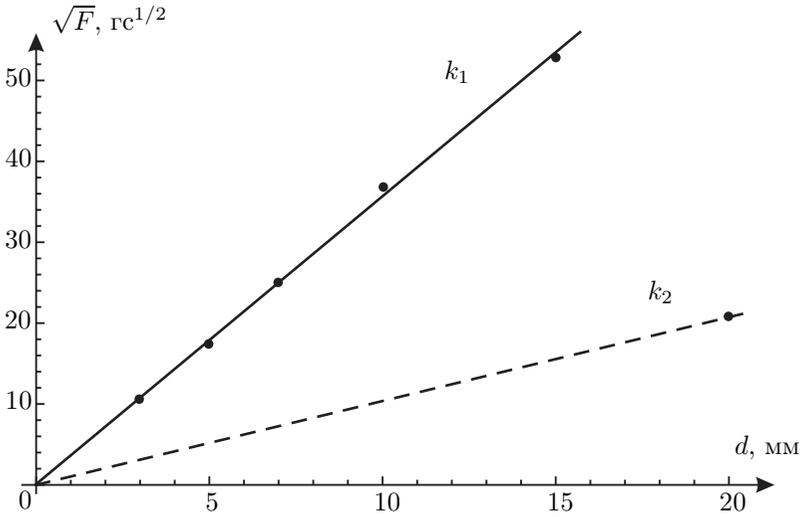


Рис. 14

4. Определим отношение намагниченностей p_{20}/p_{10} шариков $d_6 = 20$ мм и $d_4 = 10$ мм. Проще всего это сделать по графику в пункте 3, найдя отношение угловых коэффициентов построенных прямых:

$$\frac{p_{20}}{p_{10}} = \frac{k_2}{k_1} = 0,285 \pm 0,010.$$

5. Найдём отношение полей B_{20}/B_{10} на полюсах магнитов с $d_6 = 20$ мм и $d_4 = 10$ мм. Величина магнитного поля на полюсе шара пропорциональна его намагниченности и не зависит от его радиуса $R = d/2$:

$$B \sim \frac{P_m}{R^3} = \frac{pV}{R^3} \sim p, \quad \text{тогда} \quad \frac{B_{20}}{B_{10}} = \frac{p_{20}}{p_{10}} = 0,285 \pm 0,010.$$

6. Измерим максимальные силы взаимодействия F_{ij} шаров разных диаметров. Результаты измерений представлены в таблице 3.

Таблица 3. Экспериментальные значения силы взаимодействия F_{ij} и их теоретические значения F_{ij}^t .

$F_{ij}, \text{ Гс}$ $F_{ij}^t, \text{ Гс}$	1	2	3	4	5	6
1	113	170 163	205 188	210 196	190 173	45 45
2		305	420 414	505 507	540 520	175 148
3			630	895 866	1025 1000	315 307
4				1350	1835 1792	660 602
5					2800	1135 1053
6						430

7. Рассчитаем силу взаимодействия двух шаров разных диаметров d_i и d_j :

$$F_{ij} = -\frac{3\mu_0}{2\pi} P_i P_j \left(\frac{d_i + d_j}{2} \right)^{-4} \sim \frac{P_i P_j}{(d_i + d_j)^4}.$$

Для одинаковых шаров $i = j$ эта формула даёт:

$$F_{ii} \sim \frac{P_i^2}{16d_i^4}, \quad F_{jj} \sim \frac{P_j^2}{16d_j^4}.$$

Окончательно получим:

$$F_{ij} = \sqrt{F_{ii} F_{jj}} \frac{16d_i^2 d_j^2}{(d_i + d_j)^4}. \tag{2}$$

Эта формула позволяет теоретически выразить силу F_{ij} сцепления шаров разных диаметров через силы сцепления одинаковых шаров F_{ii} и F_{jj} .

8. Рассчитаем по формуле (2) теоретические значения F_{ij}^t и внесём их в таблицу 3. По таблице видно, что для большинства ячеек различие экспериментальных значений с расчётными не превышает 2–5 %, таким образом в пределах точности измерений эксперимент согласуется с теорией.