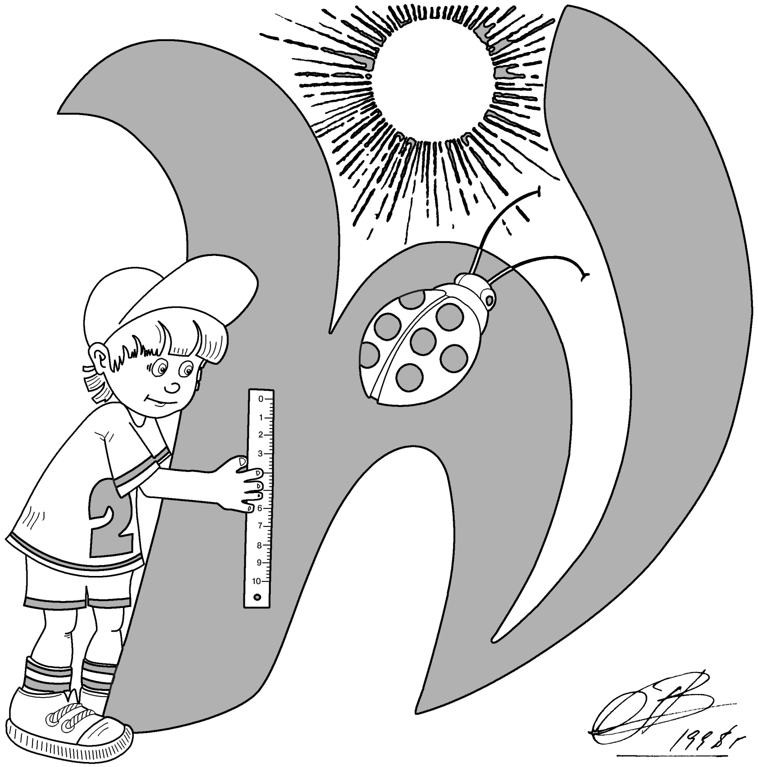
Методическая комиссия по физике
при центральном оргкомитете
Всероссийских олимпиад школьников

XLIII Всероссийская олимпиада школьников по физике

Заключительный этап

Экспериментальный тур

Методическое пособие



Жуковский, 2009 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**

Авторы задач

9 класс	10 класс	11 класс
1. Шеронов А., Осин М.	1. Кобякин А.	1. Богер Е.
2. Осин М.	2. Осин М.	2. Слободянин В.

Общая редакция — Ко́зел С., Слободянин В.

Оформление и вёрстка — Ерофеев И.

При подготовке оригинал-макета
использовалась издательская система $\LaTeX\,2_\varepsilon$.

Подписано в печать 6 мая 2009 г. в 19:45.

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

9 класс

Задача 1. Исследование стекла

1. Определите плотность ρ стекла, из которого сделана бутылка.

2. Определите суммарную теплоёмкость C кусочков стекла.

Указание. Для определения теплоёмкости стекла исследуйте зависимости температуры содержимого пластмассового стакана от времени и постройте графики этих зависимостей. Выведите формулу для расчёта теплоёмкости стекла по результатам этих исследований. Считайте, что мощность тепловых потерь пропорциональна разности температур между содержимым стакана и комнатной температурой.

3. Считая, что плотность кусочков стекла равна плотности бутылочного стекла, определите удельную теплоёмкость c стекла.

Примечание. Плотность воды $\rho_0 = 1000$ кг/м^3, удельная теплоёмкость воды $c_0 = 4200$ Дж/(кг $\cdot$ °C).

ВНИМАНИЕ. При работе с горячей водой будьте предельно аккуратны! При измерении температуры придерживайте термометры рукой, чтобы не разбить их.

Оборудование. Стеклянная бутылка; кусочки стекла; пластиковый сосуд; мерный цилиндр; пластиковый стаканчик; пенопластовая крышка; термометр; секундомер; полоска скотча; горячая и холодная вода (по требованию); поднос и салфетки для поддержания в чистоте рабочего места.

Задача 2. Ураган

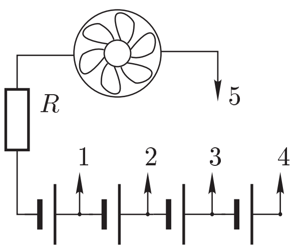


Рис. 1

Измерьте КПД η вентилятора. Исследуйте зависимость КПД от подаваемого на вентилятор напряжения U.

Вентилятор включён в электическую цепь, приведённую на рисунке 1. Для соединения контакта 5 с контактами 1, 2, 3 и 4 используйте зажим «крокодил». Представьте свои результаты в виде таблицы.

Примечание. Согласно второму закону Ньютона, если на тело действует постоянная сила F, изменение импульса тела Δp за время Δt равно импульсу силы:

$$\Delta p = F\Delta t.$$

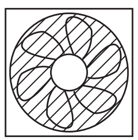


Рис. 2

Указание. Считайте, что при заданном напряжении U скорость v потока воздуха постоянна по всему сечению потока, идущего от лопастей, а в центральной части она равна нулю (рис. 2). Полезной мощностью P вентилятора считайте кинетическую энергию, передаваемую воздуху за единицу времени. Плотность воздуха $\rho = 1{,}29$ кг/м^3.

ВНИМАНИЕ. Закорачивать батарейки запрещено! Разряженные батарейки не заменяются!

Оборудование. Электрическая цепь с вентилятором известной массы M (масса указана на корпусе вентилятора); мультиметр в режимах вольтметра и омметра; штатив с муфтой и лапкой; две линейки; канцелярский зажим; зажим «крокодил»; две тонкие проволоки.

10 класс

Задача 1. «Звёздный ящик»

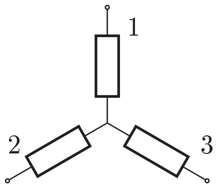


Рис. 3

Внутри «чёрного ящика» находятся 3 элемента, соединённых «звездой» (рис. 3). Убедитесь в линейности этих элементов, получив для каждого элемента его вольт-амперную характеристику, постройте её график (не менее 10 точек). Определите параметр $R_i = \Delta U_i/\Delta I_i$ для каждого из них. В состав одного из элементов включён источник постоянного тока. Определите номер этого элемента и ЭДС $\mathscr{E}$ источника.

Примечание. Напряжение выданной батарейки должно превышать 1 В.

ВНИМАНИЕ. Будьте предельно аккуратны с ящиками — не переворачивайте и не трясите их. В случае, если между любыми двумя выводами неподключенного «чёрного ящика» напряжение превышает 4 В, следует обязательно обратиться к дежурным для проверки ящика.

Оборудование. «Чёрный ящик» с тремя выводами; мультиметр в режиме вольтметра; мультиметр в режиме амперметра; соединительная колодка; отвёртка; батарейка; два провода; резистор переменного сопротивления.

Задача 2. Ураган в трубе

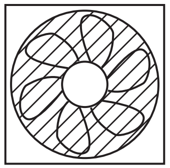


Рис. 4

1. Измерьте КПД η вентилятора. Исследуйте зависимость КПД от подаваемого на вентилятор напряжения U.

Указание. Считайте, что при заданном напряжении U скорость v потока воздуха постоянна по всему сечению потока, идущего от лопастей, а в центральной части она равна нулю (рис. 4). Полезной мощностью P вентилятора считайте кинетическую энергию, передаваемую воздуху за единицу времени. Плотность воздуха $\rho = 1{,}29$ кг/м^3.

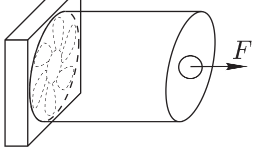


Рис. 5

2. Поставьте вентилятор вплотную к одному из концов выданной вам бумажной трубы (рис. 5). Поток воздуха должен быть направлен внутрь трубы. Вблизи другого конца трубы на её оси симметрии расположите теннисный шарик. Найдите силу F, действующую на шарик, помещённый в поток воздуха, выходящий из трубы. Считая, что сила $F = Av^2$, найдите коэффициент A. Считайте, что скорость воздуха на выходе из трубы равна скорости воздуха, создаваемой вентилятором.

Оборудование. Вентилятор известной массы M; шарик для настольного тенниса известной массы m (массы указаны на вентиляторе и шарике соответственно); регулируемый источник постоянного тока; два мультиметра; две линейки; канцелярский зажим; штатив; соединительные провода и тонкая проволока; нитки; бумажная труба; ножницы и скотч (по требованию).

11 класс

Задача 1. Формула Герца

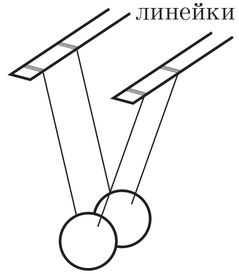


Рис. 6

Подвесьте шарики на бифиллярных подвесах (рис. 6). Исследуйте, как зависит время соударения τ двух одинаковых стальных шариков, от их относительной скорости v, предполагая, что оно удовлетворяет зависимости $\tau = Bv^{\alpha}$. Определите показатель степени α. По полученным данным определите время соударения τ_1 при относительной скорости $v_1 = 10$ м/с.

Проведите измерения для не менее чем семи различных относительных скоростей шариков. Погрешность измерения времени для каждого значения скорости не должна превышать 20 %.

Примечание. Если незаряженный конденсатор большой ёмкости заряжается в течение небольшого промежутка времени и напряжение на нём достаточно мало, так что ток зарядки I_C практически не меняется, то справедливо соотношение:

$$I_C = \frac{dq_C}{dt} \simeq \frac{\Delta q_C}{\Delta t} = \frac{q_C}{t}.$$

Оборудование. Два стальных шарика; тонкая медная проволока без изоляции; бумажный транспортир; три деревянных линейки; конденсатор известной ёмкости С = 20 мкФ; резистор с известным сопротивлением $R = 68$ Ом; батарейка; две кнопки; соединительные провода; мультиметр в режиме вольтметра с внутренним сопротивлением $R_V = 1{,}0$ МОм, последовательно соединённый с резистором r_V (номинальное значение в МОм написано на рабочем месте); шесть клеммных колодок; отвёртка; два провода с зажимами «крокодилами»; скотч.

Задача 2. Колебания линейки

Постройте таблицу зависимости периода круговой частоты ω колебаний свободного конца металлической линейки от длины L её свободного конца в диапазоне от 10 см до 20 см с шагом 2 см.

Оборудование. Прикреплённая к столу металлическая линейка; длинная деревянная линейка; канцелярский зажим; шарики из бумаги; штатив.

Возможные решения
9 класс

Задача 1. Исследование стекла

1. Сначала найдем объём стекла бутылки. Нальём в стеклянную бутылку воду до самого верха. Поставим бутылку в пластиковый сосуд и заполним его водой так, чтобы уровень совпадал с уровнем горлышка бутылки или был несколько выше. Отметим на сосуде этот уровень (например, полоской скотча). Затем достанем стеклянную бутылку из сосуда, выльем из неё воду в сосуд, и, используя мерный цилиндр, дольём воды в сосуд до прежнего уровня. При этом заметим, что объём долитой воды равен объёму $V_с$ стекла бутылки.

Найдём массу бутылки M. Заполним мерный цилиндр водой из сосуда. Погрузим бутылку в сосуд (она будет плавать). Отметим уровень воды, уберём бутылку. Теперь будем доливать из мерного цилиндра воду в сосуд и заметим момент, когда она достигнет прежней отметки. Согласно закону Архимеда масса долитой воды равна массе M бутылки:

$$M = \rho_0 V_д, \qquad \text{откуда} \qquad \rho = M/V_c = \rho_0 V_д / V_с,$$

где $V_д$ — объём долитой воды.

Погрешность измерений при этом будет определяться погрешностью мерного цилиндра и погрешностью определения уровня воды.

2. Нальём в стаканчик горячей воды (почти доверху, но так, чтобы осталось место для крышки) и закроем его пенопластовой крышкой со вставленным в неё термометром. Выждем 2–3 минуты, пока не установится тепловое равновесие в стакане. Используя секундомер, снимем зависимость температуры воды от времени (8–12 точек в промежутке температур 60–70 °C). Воду из стаканчика перельём в мерный цилиндр и измерим её объём. Зная объём и плотность воды, найдем её массу . Затем построим на миллиметровой бумаге кривую остывания, то есть зависимость температуры от времени. Положим в стаканчик несколько кусочков стекла (чем больше, тем лучше, но нужно, чтобы вода полностью скрывала стекло) и дольём горячей воды до того же уровня, что и в предыдущем опыте. Проделаем аналогичную процедуру и построим вторую кривую остывания.

Рассмотрим процесс остывания в стаканчике. Пусть C — суммарная теплоёмкость содержимого стаканчика (теплоёмкостью стенок, крышки и термометра пренебрежём), t — температура воды, t_0 — температура окружающей среды. Как известно, мощность тепловых потерь прямо пропорциональна разности температур, то есть $P = \alpha(t - t_0)$, где α — некий постоянный коэффициент. Пусть за небольшой промежуток времени $\Delta\tau$ температура изменится на Δt. Запишем уравнение теплового баланса:

$$C\Delta t + \alpha(t - t_0)\Delta\tau = 0, \qquad \text{откуда} \qquad k = \frac{\Delta t}{\Delta\tau} = -\frac{\alpha(t - t_0)}{C}.$$

Но k есть угловой коэффициент кривой остывания при заданной температуре t. Таким образом, необходимо измерить угловые коэффициенты на обоих графиках при одной и той же температуре (её лучше выбрать в середине диапазона измеряемых температур). Пусть эти коэффициенты получились соответственно k_1 и k_2, теплоёмкости содержимого стаканчика в этих случаях: $C_1 = c_0\rho_0 V_0$ и $C_2 = c_0\rho_0(V_0 - V) + c\rho V$, где V_0 — объём налитой воды в первом случае, а V — объём стекла во втором случае. Тогда получим систему:

$$k_1 = -\frac{\alpha(t - t_0)}{c_0\rho_0 V_0}, \qquad k_2 = -\frac{\alpha(t - t_0)}{c_0\rho_0(V_0 - V) + c\rho V},$$

решая которую, получим выражение для нахождения теплоемкости кусочков стекла:

$$c = c_0 \frac{\rho_0}{\rho}\frac{V_0}{V}\left(\frac{k_1}{k_2} + \frac{V}{V_0} - 1\right).$$

Плотность стекла ρ уже найдена, объём стекла V найдём способом, описанным ранее.

Критерии оценивания

Определён объёма бутылки	2
Определён массы бутылки	2
Найдена плотность стекла	1
Построена кривая остывания для воды	2
Построена кривая остывания для воды и стекла	2
Получена теплоёмкость стекла	1

Задача 2. Ураган

В лапке штатива закрепляем линейку и подвешиваем вентилятор на бифилярном подвесе (рис. 7). Для большей точности длина подвеса должна быть максимально возможной, около 60 см. Подключаем вентилятор к источнику тока последовательно с резистором. Измеряем напряжение на вентиляторе мультиметром. Ток через вентилятор находим, измеряя напряжение на резисторе. Прикрепляем угольник клипсой к стойке штатива для измерения отклонения вентилятора x от вертикали. Расстояние от угольника до точки подвеса обозначим L.

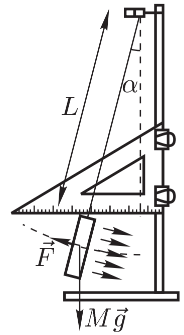


Рис. 7

Включаем вентилятор. Реактивная сила, действующая на него со стороны воздуха, равна $F = \rho S v^2$, где S — реальная площадь вентилятора $S = \pi(R^2 - r^2)$ R — радиус лопастей, r — радиус внутренней части, v — скорость выходящего из вентилятора воздуха.

Запишем второй закон Ньютона в проекции на ось, параллельную потоку воздуха:

$$F = Mg\sin\alpha,$$

где α — угол отклонения нитей от вертикали (вентилятор висит параллельно нитям), $\sin\alpha = x/L$, где x — измеренное по линейке отклонение нити. Отсюда находим скорость воздуха

$$v = \sqrt{\frac{Mg}{\rho S}\frac{x}{L}}.$$

Полезная мощность вентилятора $P = \rho S v^3$. Потребляемая из сети мощность равна $P_0 = UI$. По полученным данным вычисляем КПД вентилятора

$$\eta = \frac{P}{P_0}.$$

Повторяем измерения и вычисления для нескольких напряжений.

Критерии оценивания

Схема измерений 2
Снята зависимость отклонения и тока от напряжения 3
Приведена формула для η 2
Построен график $\eta(U)$ 3

10 класс

Задача 1. «Звёздный ящик»

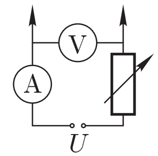


Рис. 8

Для снятия вольт-амперной характеристики соберём схему (рис. 8). Подключая её к выводам «чёрного ящика» и перемещая ползунок реостата, снимем зависимость силы тока от напряжения. Поменяв полярность подключения, повторим опыт. Построим вольт-амперные характеристики. Графики являются прямыми, следовательно, элементы линейны. Видно, что ВАХ $I_{31}(U_{31})$ проходит через ноль, а $I_{12}(U_{12})$ и $I_{23}(U_{23})$ — нет. Таким образом, источник ЭДС входит в состав элемента 2, и его напряжение $\mathscr{E} = 1{,}5$ В.

Из наклонов графиков найдём сопротивления R_{12}, R_{23} и R_{13}. Выразим через них сопротивления R_1, R_2 и R_3:

$$R_1 = (R_{12} + R_{13} - R_{23})/2 = 15 \text{ кОм}.$$

Аналогично найдём $R_2 = -9$ кОм и $R_3 = 24$ кОм.

Таким образом, получим, что сопротивление второго элемента отрицательно. Зная сопротивления элементов, можно построить их вольт-амперные характеристики. У элементов 1 и 3 ВАХ будут проходить через ноль, а у элемента 2 приподнята на $\mathscr{E} = 1{,}5$ В (а также имеет отрицательный наклон).

Критерии оценивания

Сняты ВАХ попарных последовательных элементов 6
Определён номер элемента с источником постоянного тока, найдена $\mathscr{E}$ 3
Построены ВАХ элементов, подсчитаны их сопротивления 6

Задача 2. Ураган в трубе

1. Решение этого пункта приведено во второй задаче 9 класса.

2. Проводим опыт, аналогичный опыту в первом пункте, но теперь подвешиваем на бифилярном подвесе теннисный шарик, а вентилятор ставим на стол. Между вентилятором и шариком располагаем трубу, как это сказано в условии. При тех же значениях напряжения, для которых мы уже знаем скорость воздуха, создаваемую вентилятором, аналогичным способом измеряем угол отклонения α подвешенного шарика от вертикали. Сила, действующая на шарик, $F = mg\,\mathrm{tg}\,\alpha$. Если построить график зависимости этой силы от квадрата скорости, то полученные точки хорошо ложатся на прямую. Значит, действующая на шарик сила пропорциональна квадрату скорости.

Критерии оценивания

Схемы измерений 4
Сняты зависимости силы тока и отклонения вентилятора от напряжения .. 2
Вычислены зависимоти $v(U)$, $\eta(U)$ 4
Снята зависимость отклонения шарика от напряжения на вентиляторе 2
Вычислена и исследована зависимость $F(v)$ 3

11 класс

Задача 1. Формула Герца

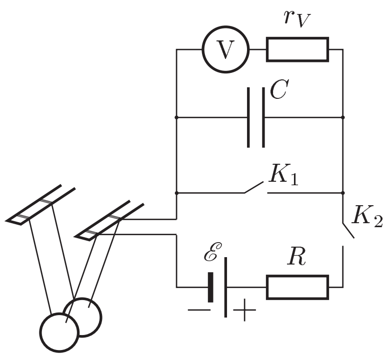


Рис. 9

Подвесим шарики на бифилярном подвесе, сделанном из медной проволоки и линеек, так, что шарики находятся на одинаковой высоте. Соберём схему (рис. 9) и включим в разрыв цепи два шарика, подключившись к медной проволоке с помощью крокодилов. Кнопку K_1 включим параллельно конденсатору C для его быстрой разрядки, а K_2 включим последовательно с батарейкой в цепь так, чтобы цепь можно было замыкать при нажатии кнопки. Отпуская эту кнопку после первого соударения шариков, мы разомкнём цепь, чтобы последующие соударения не влияли на результат. Подключим вольтметр с последовательным резистором r_V параллельно конденсатору. Напряжение на конденсаторе будет равно:

$$U_C = U_V\left(\frac{r_V}{R_V} + 1\right). \qquad (1)$$

Прикрепим бумажный транспортир так, чтобы его центральная точка совпадала с точкой подвеса одного из шариков. «Обнулим» напряжение на конденсаторе, разрядив его с помощью кнопки K_1. Отведём один шарик в сторону и, совмещая изображения двух нитей подвеса шарика, определим угол его отклонения от вертикали. Нажмём на кнопку K_2 и отпустим её после первого соударения. Теперь по формуле (1) мы можем определить напряжение на конденсаторе (которое обусловлено зарядкой конденсатора в течение времени соударения). Повторим измерения для различных значений углов и/или длин подвеса, повторяя измерения для каждого значения параметров столько раз, сколько необходимо для достижения заданной точности.

Выразим напряжение на конденсаторе U_c через время соударения шариков. При соударении шарики замыкают собой цепь. Считая, что сопротивление шариков в течение всего процесса соударения пренебрежимо мало, получаем выражение для зарядки конденсатора через резистор:

$$I_C R + U_C = \mathscr{E}.$$

Считая, что напряжение на конденсаторе всегда мало (смотри примечание в условии), получаем:

$$I_C = \frac{\mathscr{E}}{R} = \frac{q_C}{\tau} = \frac{CU_C}{\tau}, \qquad \text{и окончательно,} \qquad \tau = RC\frac{U_C}{\mathscr{E}}.$$

Относительная скорость шариков:

$$v = \frac{1}{2}\sqrt{2gh} = \frac{1}{2}\sqrt{2gL(1-\cos\varphi)},$$

где L — длина подвеса, φ — угол отклонения шарика от вертикали.

ЭДС батарейки измеряем вольтметром, определяя её по формуле (1). Строим график в координатах $\ln\tau$ от $\ln v$. Убеждаемся, что график ложится на прямую. По угловому коэффициенту наклона данной прямой определяем коэффициент α и погрешность.

$$\ln\tau = \ln RC\frac{U_C}{\mathscr{E}} = \ln\frac{RC}{\mathscr{E}} + \ln U_C = \ln Bv^{\alpha} = \ln B + \alpha\ln v.$$

Таким образом, $\alpha = -0{,}2$. В данном эксперименте погрешность можно уменьшить до 5 %.

Критерии оценивания

Схема измерений 4
Приведена формула для τ и для v 2
Снята зависимость $U_C(\alpha)$ 4
Построен график $\ln(\tau/\tau_0)$ от $\ln(v/v_0)$ 3
Определён коэффициент α 2

Задача 2. Колебания линейки

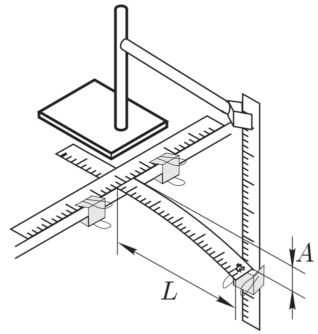


Рис. 10

Для решения задачи необходимо закрепить вертикально деревянную линейку на штативе около колеблющегося конца металлической линейки длиной L. Тогда, отклоняя конец металлической линейки с шариком на расстояние A (которое измеряется деревянной линейкой) и резко его отпуская, мы получим катапульту для запуска шариков вертикально вверх (рис. 10). При этом мы можем заметить высоту взлета шарика h — этих данных нам хватит, чтобы определить частоту колебаний металлической линейки. Клипса служит для фиксации амплитуды отклонения линейки.

Будем считать, что при малых отклонениях $A \ll L$ колебания линейки будут гармоническими, следовательно мы можем записать закон движения конца линейки:

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0.$$

Тогда решение можно записать в виде:

$$x = A\sin\omega t,$$

здесь время отсчитывается от момента прохождения линейкой состояния покоя.

Определим момент отрыва шарика t_0. Отрыв происходит, когда сила взаимодействия шарика и линейки равна нулю:

$$g = |a_{\text{лин}}| = A\omega^2 \sin \omega t_0.$$

В момент отрыва шарика от линейки их скорости равны:

$$v_{\text{отр}} = A\omega \cos \omega t_0 = \sqrt{2g\,(h - x_0)}.$$

Решая полученную систему уравнений, получим:

$$\omega = \sqrt{\frac{gh}{A^2}\left(1 + \sqrt{1 - \frac{h^2}{A^2}}\right)}.$$

Для каждой длины L отклонение линейки A подбирается таким образом, чтобы высота подъема шариков была $h = 10$–20 см — при таких высотах можно измерить высоту подъёма с точностью 0,5 см, и при этом амплитуда A будет малой — порядка 1 см (A мало и стоит в знаменателе в первой степени, поэтому к измерению этой величины надо проявить максимальное внимание). Точность в определении h можно достичь, производя N пусков при постоянных L и A. В наших измерениях разброс h получался порядка 1,5 см, поэтому для получения точности лучше 0,5 см (точность определения высоты подскока шарика h) необходимо произвести $N \geqslant (1{,}5/0{,}5)^2 \approx 9$ бросков.

Критерии оценивания

Описана идея измерений 3
Выражена ω через h и A 2
Снята зависимость $h(L)$ 4
Проведены повторные опыты для статистики 2
Построен график $\omega(L)$ 4