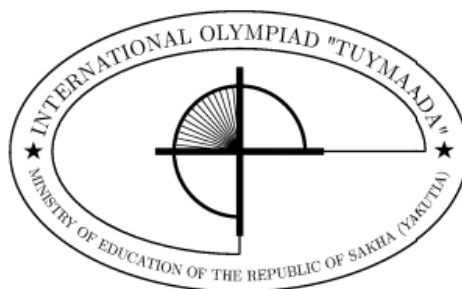


Министерство образования и науки Республики Саха (Якутия)
Малая академия наук Республики Саха (Якутия)
Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова

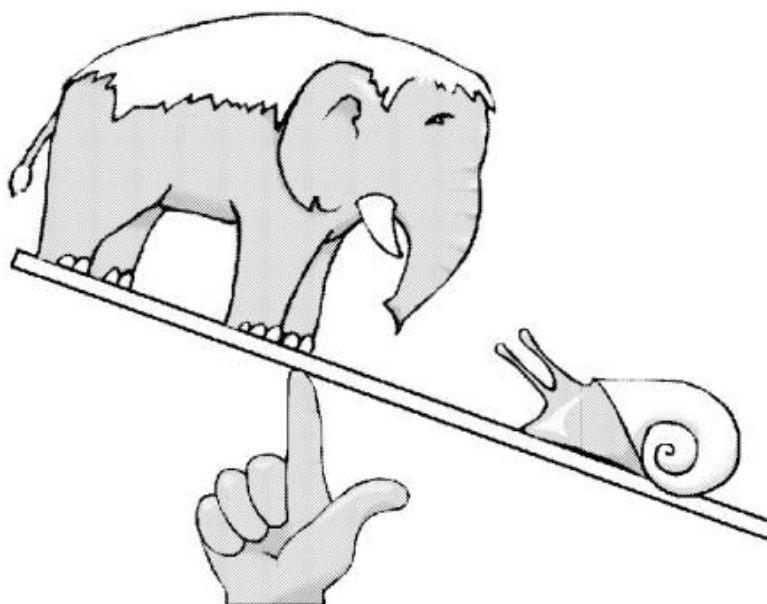
XXX Международная олимпиада «Туймаада»



Физика

Экспериментальный тур

Методическое пособие (электронное издание)



Якутск, 2 июля -10 июля 2023 г.

Комплект задач подготовлен методической комиссией XXX олимпиады «Туайммада» по физике.

Телефон: (4112) 496862.

E-mail: neustr@mail.ru

Авторы задач

Младшая лига

1. Власов А.И.
2. Неустроев Е.П.

Старшая лига

1. Власов А.И.
2. Власов А.И.

Общая редакция — Неустроев Е.П.

Перевод — Алексеев С.Н., Сивцев И.А., Боякинов Е.Ф.

Оформление и вёрстка — Неустроев Е.П.

Коррекция — Боякинов Е.Ф., Неустроев Е.П.

Ответственный за комплект задач — Григорьев Ю. М.

Подготовка экспериментальных установок — Власов А.И., Дьяконов Р.Г., Дьячковский М.А., Неустроев Е.П., Новиков С.К., Слепцов А.А., Санников Г.М. Тарабукин В.М.,

© Авторский коллектив

Подписано в печать 7.07.2023 в 16:50.

677016, г. Якутск, ул. Белинского, д. 58

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова

Младшая лига

Задача 1. "Летучая" жидкость Необходимые сведения

Уравнение состояния идеального газа

Идеальный газ - это модель газа, в котором молекулы практически не взаимодействуют друг с другом. Экспериментально установлена следующая зависимость между параметрами идеального газа:

$PV = \frac{m}{\mu}RT,$	(1)
-------------------------	-----

где P - давление газа, V - объем газа, m - масса газа, μ - молярная масса, R – универсальная газовая постоянная, равная примерно 8,314 Дж/град·моль, T - температура по абсолютной шкале Кельвина, которая отличается от шкалы Цельсия следующим образом:

$$T = t + 273,$$

где t - температура в градусах Цельсия.

Закон Дальтона

Для смеси идеальных газов выполнен закон Дальтона: давление смеси равно сумме парциальных (давление которое имел бы газ, входящий в состав газовой смеси, если бы он один занимал объём, равный объёму смеси при той же температуре) давлений каждого газа.

Цель работы

В данной работе вам предлагается найти молярную массу "летучей" жидкости методом испарения её капель в замкнутый объем.

В ходе работы принять следующие допущения:

- пар "летучей" жидкости является идеальным газом;
- микрокапля жидкости испаряется примерно за 3 - 5 минут;
- система "банка - манометр" герметична.

Оборудование: Стеклянная банка с объемом $V = 1,089$ л, закрытая крышкой с двумя шприцевыми входами, водяной манометр, весы электронные с пределом измерений в 200 г, 2 медицинских шприца (1 см³, 5 см³), "летучая" неизвестная жидкость в маленьком сосуде (15 см³), линейка.

Ход выполнения задания

1. Определите массу капли, получаемой на кончике иглы шприца (1 см³). Вспомните "метод рядов".
2. Подключите манометр к объему банки.
3. Наберите полный шприц (5 см³), исследуемой жидкости.
4. Вставьте шприц с жидкостью без иглы во второе шприцевое отверстие крышки банки.
5. Исследуйте зависимость давление паров "летучей" жидкости от количества капель, добавляемых в объем банки.
6. Постройте график экспериментальных данных $\Delta P(N)$, где N - количество капель, в линейных координатах.
7. Определите молярную массу жидкости по графику.

Погрешности оценивать необязательно

Возможное решение

В соответствии с (1):

$\Delta P = \frac{\Delta m \cdot RT}{\mu \cdot V}$	(2)
--	-----

В нашей задаче "летучей" жидкостью служил этиловый спирт. Перед закапыванием спирта в банке будет атмосферное давление благодаря свободному сообщению с окружающим воздухом. После герметизации системы - соединения шприца и манометра повышение давления происходит только из-за испарения закапанной жидкости. Изменение давления можно найти при помощи водяного манометра:

$$\Delta P = \rho g h.$$

Разность уровней колен манометра можно найти, измерив линейкой расстояние от стола до одного и до другого, а затем вычтя эти значения. Для поиска массы одной капли жидкости требуется сосчитать количество капель в одном см³. Это нужно делать, держа шприц строго вертикально. Мы получили экспериментально следующее количество капель в одном см³: (210 ± 6) капель. Затем взвесим пустой шприц и шприц с одним см³ спирта. Вычтем

их массы и получим следующий результат: $(0,85 \pm 0,07)$ г. Далее разделим массу одного см³ на количество капель и получим массу одной капли $(40,5 \pm 4,5) \cdot 10^{-4}$ г.

Для поиска зависимости изменения давления от количества испарившихся капель будем капать по две капли спирта и ожидать примерно 3-5 минут для полного их испарения. Результаты измерений представлены в таблице №1

КОЛ-ВО	h , см	ΔP , Па
1	1.8	177
2	3.7	363
3	5.4	530
4	7.4	726
5	9.2	902
6	10.9	1069
7	12.7	1246
8	14.5	1422

Таблица 1: Зависимость изменения давления от количества испарившихся капель

Построив график и подсчитав наклон полученной прямой k , найти значение μ :

$$\mu = \frac{RT}{kV}$$

Критерии оценивания

Определение массы капли (коридор на 6 б. $3.8 - 4.2 \cdot 10^{-3}$ г, далее идет снижение на 1 балл при расширении коридора на $0.2 \cdot 10^{-3}$ г)	6 б
Получение массива данных "капля - давление" (таблица: количество капель, давление)	8 б
График $P(M)$	2 б
Аппроксимация линейной функцией	1 б
Определение коэффициента наклона линейного графика	2 б
Вычисление молярной массы с использованием коэффициента наклона ($40-50$ моль/г)	2 б
Всего	21 б

Финальное количество баллов определяется методикой штрафных очков в соответствии с числовым результатом μ : без штрафа - попадание в коридор 44 - 48 моль/г, при расширении коридора на две единицы сумма штрафных баллов увеличивается на единицу.

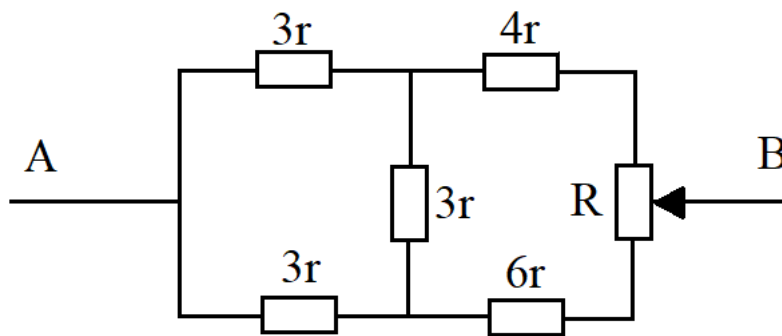
Задача 2. Серый ящик

В «сером» ящике с двумя выводами находится электрическая цепь, схема которой представлена на рис. 1. Цепь состоит из резисторов, кратных r и переменного резистора R (потенциометр) сопротивлением $1 \text{ кОм} \pm 5\%$.

Погрешность мультиметра составляет $\pm 1,2\% \pm 2 \text{ Ом}$ от измеряемой величины.

Задания:

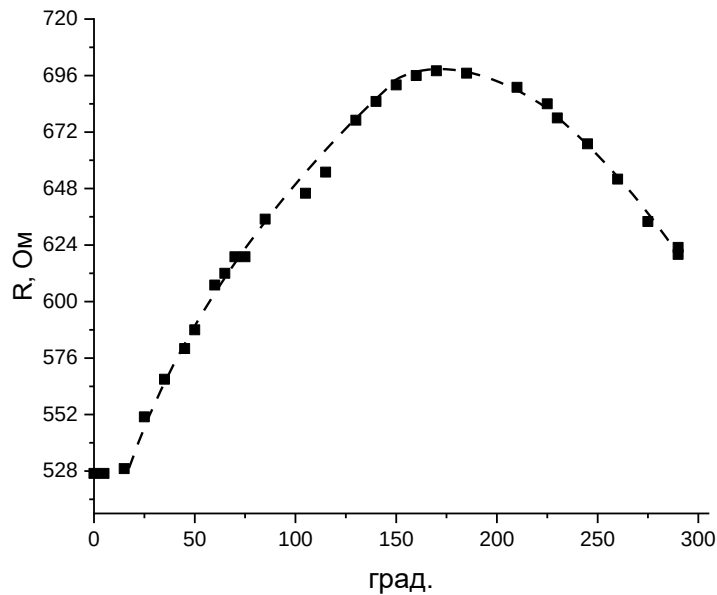
1. Найти зависимость сопротивления цепи от угла поворота ручки потенциометра;
2. Определить сопротивления r .



Оборудование: серый ящик, мультиметр (используется режим омметра)

Возможные решения

Задание 1. Плавно вращая ручку потенциометра, нужно найти зависимость сопротивления от угла поворота ручки потенциометра. Для максимального балла должно быть не менее 10 точек. Зависимость должна содержать точку максимума. Сопротивления цепи в максимуме должно быть найдено с максимальной точностью.



При контрольных измерениях были получены следующие значения:

$$R_{\max} = 698 \text{ Ом.}$$

$$R_1 = 528 \text{ Ом, } R_2 = 623 \text{ Ом.}$$

Задание 2.

Способ 1.

Известно, что ток идет по пути наименьшего сопротивления. Если одно из плеч параллельной ветви на участках СВ или DB (рис.1) будет иметь меньшее сопротивление, то ток преимущественно будет идти через этот участок. Только в случае равенства сопротивлений этих ветвей токи распределятся поровну и это будет соответствовать максимальному сопротивлению между точками А и В, когда ток через перемычку между точками С и D не проходит (рис.2).

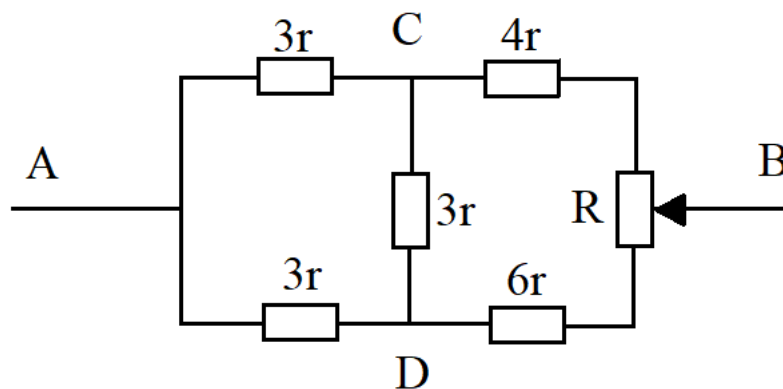


Рис.1

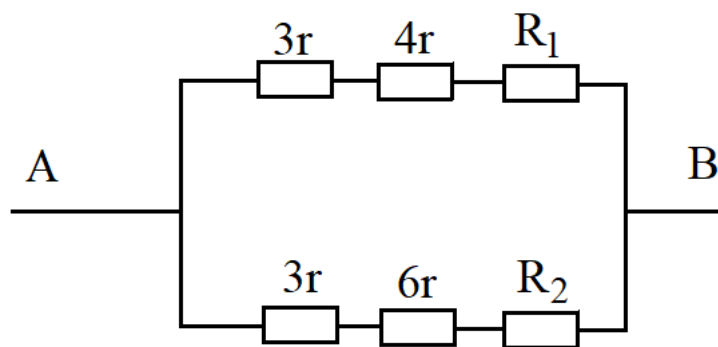


Рис.2 Эквивалентная схема

Из эквивалентной схемы

$$\frac{1}{3r + 4r + R_1} + \frac{1}{3r + 6r + R - R_1} = \frac{1}{R_{max}}$$

$$3r + 4r + R_1 = 3r + 6r + (R - R_1).$$

Решая эту систему, находим искомое значение сопротивления

$$r = 7R_{max}/28 - 7R/112 = 7(R_{max} - R/4)/28$$

$$r = 112 \text{ Ом}$$

Это значение соответствует реальным значениям выбранных резисторов сопротивлением 110 Ом с допуском $\pm 5\%$.

Способ 2.

Используем преобразование треугольник-звезда (рис.2).

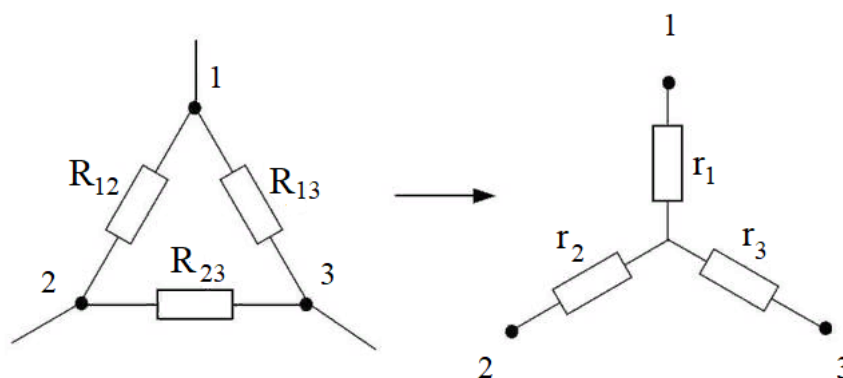


Рис.2

$$r_1 = \frac{R_{12}R_{13}}{R_{12}+R_{13}+R_{23}} \quad (1)$$

$$r_2 = \frac{R_{12}R_{23}}{R_{12}+R_{13}+R_{23}} \quad (2)$$

$$r_3 = \frac{R_{13}R_{23}}{R_{12}+R_{13}+R_{23}} \quad (3)$$

После преобразования, эквивалентная схема будет иметь вид, показанный на рисунке 3, где $r = r_1 = r_2 = r_3$ получается в результате преобразований (1-3).

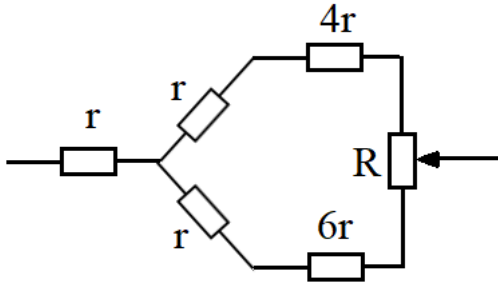


Рис.3

Сопротивления верхних и нижних ветвей будут одинаковы

$$\frac{1}{5r + R_1} = \frac{1}{7r + R_2} \text{ или } R_{||1} = R_{||2}$$

$$R_{max} = r + \frac{R_{||1}R_{||2}}{R_{||1}+R_{||2}} = r + \frac{5r+R_1}{2}$$

Решаем эту систему и находим искомое сопротивление

$$r = 7(R_{max} - R/4)/28$$

Способ 3. Из схемы 3 следует, что сопротивление цепи при двух крайних положениях ручки потенциометра:

$$R_{общ1} = r + \frac{5r(7r+R)}{12r+R}$$

$$R_{общ2} = r + \frac{7r(5r+R)}{12r+R}$$

Решаем эту систему уравнений и находим:

$$R_{общ2} - R_{общ1} = \Delta R = \frac{2rR}{12r + R}$$

Искомый ответ

$$r = R\Delta R / (2R - I2\Delta R)$$

$$r = 116 \text{ Ом}$$

Критерии оценивания

П.1 Проведение измерений сопротивления в зависимости от угла поворота ручки потенциометра. Построена экспериментальная кривая с максимумом.

1.1 За каждую найденную точку кривой 0.5 балла, если число точек ≥ 10 .
..... 5 б

1.2 Если число точек от 7 до 9, то 0,4 балла за каждую точку . . от 2,8 до 3,6 б

1.3 Число точек от 5 до 6, то 0,3 балла за каждую точку. . . от 1,5 до 1,8 б

1.4 Число точек от 3 до 4, то 0,3 балла за каждую точку. . . от 0,9 до 1,2 б

П.2 Приведено описание идеи решения задачи

2.1 Наибольшее сопротивление схемы соответствует отсутствию тока через переключку. Использованы адекватные формулы для расчета схемы . 4 б

2.2 Приведены эквивалентные схемы 2 б

П.3 Составлена система уравнений, которая приводит к решению задачи . . 4 б

П. 4 Решение системы уравнений

4.1 Получен результат с точностью до 5% 4 б

4.2 Получен результат с точностью от 5% до 10% 3 б

4.3 Получен результат с точностью от 10% до 15% 2 б

4.4 Получен результат с точностью от 15% до 20% 1 б

Проведена разумная оценка погрешностей 2 б

Всего 21 б

Старшая лига

Задача 1. «Упругое зеркало»

Упругая зеркальная пластинка изгибается под действием силы так как это показано на рисунке. Вогнутая часть пластины является зеркальной. Известно что зависимость фокусного расстояния от величины деформирующей силы f и расстояния между опорами L выглядит как $F = C \cdot f^\alpha \cdot L^\beta$, где C - некоторая размерная константа, а α и β целые числа или правильные дроби. В задании требуется определить значения показателей α и β .

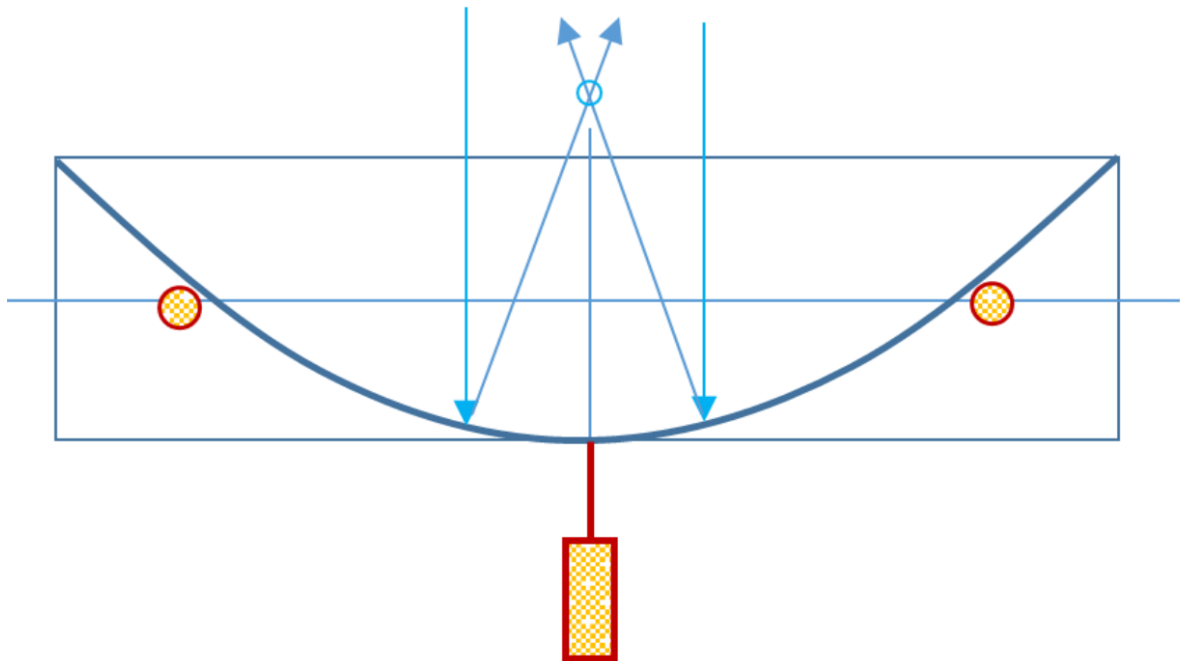


Рис.1

Оборудование. Упругое зеркало (металлическая линейка 30 см), динамометр (5 Н), лазер, ножницы, нить, лист бумаги А3, линейка, двусторонний скотч.

Ход выполнения работы.

- 1) Собрать экспериментальную установку для исследования $F(f)$.
- 2) По полученным экспериментальным данным графическим способом определить параметр α .
- 3) Собрать экспериментальную установку для исследования $F(L)$.
- 4) По полученным экспериментальным данным графическим способом определить параметр β .

Возможное решение

Рассмотрим деформацию лёгкой консоли под действием концевой силы.

Очевидно, что геометрия деформации этого варианта будет совпадать с геометрией деформации зеркала. Для небольшого элемента пластины справедливо

$$F(L - x) = \frac{k_0}{dl} \cdot d\varphi.$$

Далее используем готовую формулу кривизны

$$\frac{d\varphi}{dl} = \frac{y''}{(1 + y'^2)^{3/2}},$$

$$f(L - x) = k_0 \cdot \frac{y''}{(1 + y'^2)^{3/2}}.$$

При небольшой деформации

$$f(L - x) = k_0 \cdot y''.$$

После элементарного интегрирования получаем линию прогиба

$$y(x) = \frac{f}{k_0} \left(L \cdot \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{6} \right).$$

Из полученной формулы видно, что форма центральной части зеркальной пластины описывается параболой

$$y(x) = \frac{f}{k_0} L \cdot \frac{x^2}{2},$$

коэффициент $f \cdot L / k_0 = 1/R$ определяет кривизну центральной части параболы и соответственно положение «оптического» фокуса

$$R = F = \frac{2k_0}{f \cdot L},$$

здесь L – расстояние между опорами при деформации зеркальной пластины. В эксперименте мы должны получить обратно пропорциональную зависимость фокусного расстояния от длины пластины (или расстояния между опорами), так и от величины деформирующей силы (силы тяжести груза).
1. Зависимость $R(f)$. Изменяя величину деформирующей силы, измеряем фокусное расстояние и получаем зависимость $R(f)$ фокусного расстояния от деформирующей силы f . Результаты измерений представлены в таблице №1. Из графика 2 получаем степень f примерно равную -1.

Расстояние между опорами $L = 26.0$ см
--

$f, \text{ Н}$	$1/f, \text{ Н}^{-1}$	$R, \text{ см}$	$\ln R$	$\ln f$
1.0	1.00	17.4	2.86	0
1.5	0.67	12.8	2.55	0.41
2.0	0.50	10.5	2.35	0.69
2.5	0.40	8.5	2.14	0.92
3.0	0.33	7.4	2.00	1.10

Таблица 1: Зависимость фокусного расстояния от массы груза

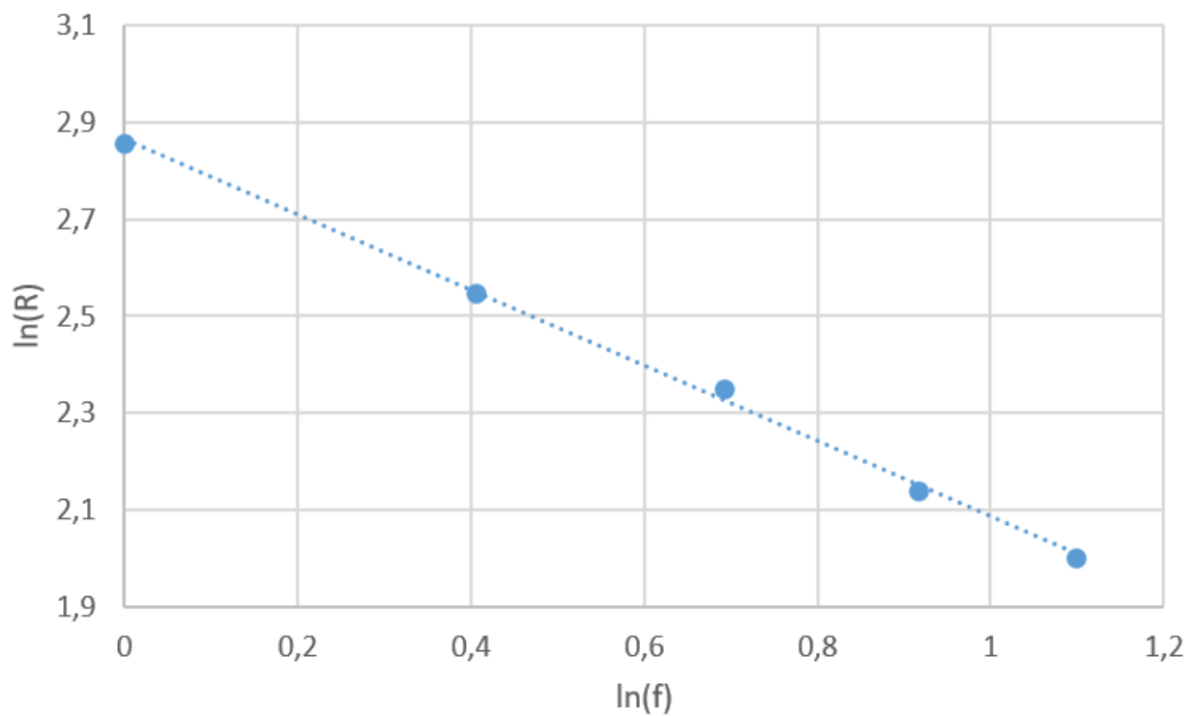


Рис. 2: Зависимость $R(f)$ в логарифмическом масштабе

2. Зависимость $R(L)$. Изменяя расстояние между опорами, измеряем фокусное расстояние и получаем зависимость $R(L)$ фокусного расстояния от расстояния между опорами L . Результаты измерений представлены в таблице №2. Из графика 3 получаем степень L примерно равную -1.

Приложенная сила $f = 2.0 \text{ Н}$				
$L, \text{ см}$	$1/L, 10^{-2} \text{ см}^{-1}$	$R, \text{ см}$	$\ln R$	$\ln L$
30.0	3.3	8.6	2.15	3.40
26.0	3.8	10.7	2.37	3.25
22.0	4.5	14.3	2.66	3.09
18.0	5.5	16.4	2.80	2.89
14.0	7.1	22.1	3.09	2.64

Таблица 2: Зависимость фокусного расстояния от расстояния между опорами

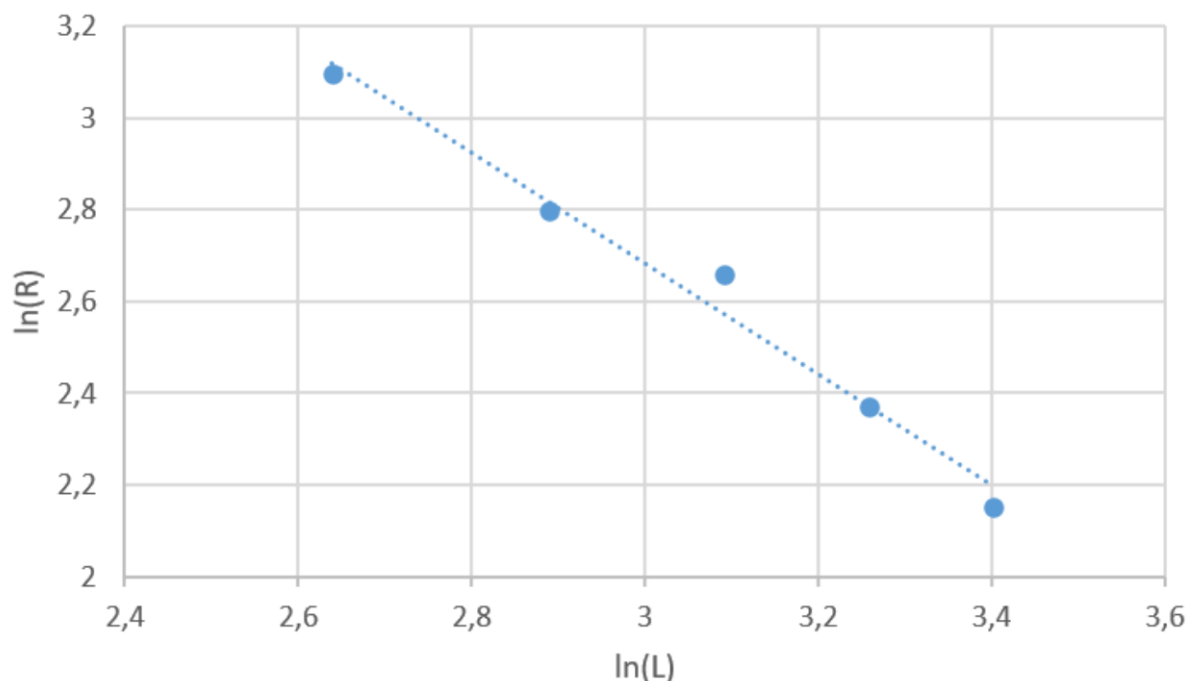


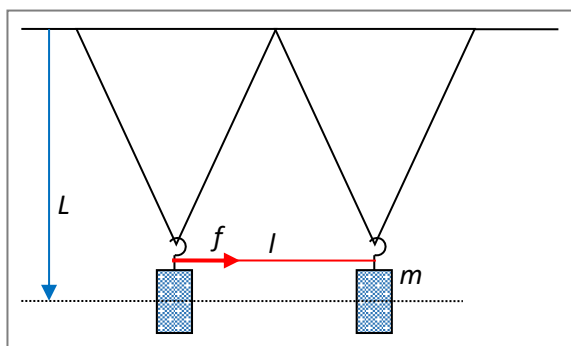
Рис. 3: Зависимость $A(L)$ в логарифмическом масштабе

Критерии

1) Схема экспериментальной установки	3б
2) Получение массива данных (Таблица: сила, фокусное расстояние)	6 б
3) Построение графика зависимости $A(f)$ в логарифмическом масштабе, аппроксимация линейной функцией	2 б
4) Определение параметра α из графика $A(f)$ в логарифмическом масштабе	3 б
5) Получение массива данных (таблица: расстояние между опорами, фокусное расстояние)	6 б
6) Построение графика зависимости $A(L)$ в логарифмическом масштабе, аппроксимация линейной функцией	2 б
7) Определение параметра β по графику $A(L)$ в логарифмическом масштабе	3 б
Всего	23 б

Задача 2. Биения

Если два математических (гравитационных) маятника, подвешенных на



бифилярных подвесах, связать упругой нитью, то мы получим колебательную систему с двумя «модами» колебаний. Произвольное колебание в такой системе является суммой двух «мод» колебаний и будет иметь характер «биений». Энергия колебаний

периодически полностью будет передаваться от одного маятника к другому. Время такой передачи и называется периодом «биений». Зависимость периода биений от параметров системы записывается в виде следующей формулы:

$$T = C \cdot L^{\alpha} \cdot g^{\beta} \cdot m^{\gamma} \cdot l^{\delta} \cdot f^{\varepsilon}$$

Где L - длина маятников, g - напряжённость гравитационного поля Земли, m - масса грузов, l - длина связи, f - сила натяжения связи, C – безразмерная константа.

Задание. Используя предложенное оборудование (приборы и материалы) определите величины показателей $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon$, которые могут быть или целыми числами, или «единичными» простыми дробями ($1/n$).

Оборудование:

Набор парных (одинаковых по массе) грузов с крючками (2 пары). Два штатива с крепёжным оборудованием. Деревянная планка (длина -150 см) для подвешивания маятников нить (длина порядка 3 метра), несколько маленьких гвоздиков, маленькая гайка. 3 отрезка тонкой резиновой нити (45 см) для изготовления упругой «связи» маятников. Линейка 50 см. Коробка (20-30 штук) скрепок для возможной калибровки нитей связей, масса одной скрепки 0,43 грамм. Ножницы, два листа офисной бумаги формата А4, скотч.

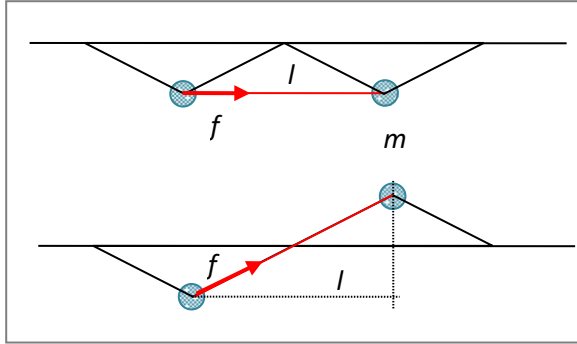
Рекомендуемый ход выполнения задания

1. Выберите возможные варианты исследования зависимости периода от параметров системы (возможны исследования периода биений от четырех параметров).
2. Собрать экспериментальную установку. Провести исследование по выбранному параметру.
3. Повторить пункт 2 для последующих выбранных параметров исследования.
4. По экспериментальным данным исследований определите значения показателей параметров $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon$

Пример возможного решения

Теория

Рассмотрим систему связанных маятников, схема которой представлена на

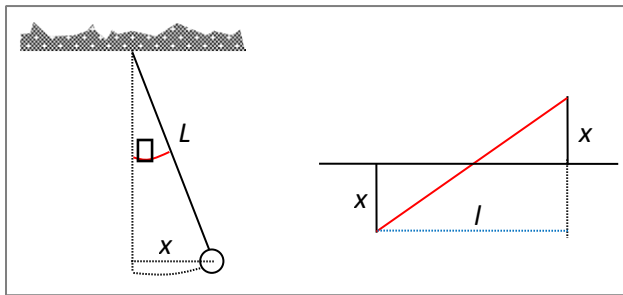


рисунке. Каждый маятник подвешен на бифилярном подвесе. Это исключает горизонтальную моду колебаний и делает возможность «связать» маятники упругой нитью. В системе остаются две моды «собственных» колебаний. Первая «длинная» мода.

Маятники синхронно отклоняются в одну сторону, расстояние между ними не изменяется и связь (упругая нить) не «работает». Период колебаний этой моды равен периоду колебаний одиночного математического маятника

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

Вторая мода («короткая», «поперечная»). При этом «собственном» колебании



маятники синхронно отклоняются в разные стороны. К изменению гравитационной энергии добавляется изменение энергии деформации элемента связи. Малое смещение x определяется

амплитудой отклонения маятника

$$x \approx L \cdot \varphi$$

Изменение длины связи

$$\Delta l = \sqrt{l^2 + (2x)^2} - l \approx 2 \frac{x^2}{l} = 2 \frac{L^2}{l} \varphi^2$$

Энергия деформации связи

$$U = k \frac{(\Delta l_0 + 2 \frac{L^2}{l} \varphi^2)^2}{2} \Rightarrow 4k \cdot \Delta l_0 \frac{L^2}{l} \cdot \frac{\varphi^2}{2} = 4f \frac{L^2}{l} \cdot \frac{\varphi^2}{2}$$

Здесь мы (при раскрытии квадрата) оставили только квадратичное слагаемое, которое определяет изменение периода колебаний. Теперь можно записать полную энергию системы в режиме колебаний короткой моды

$$E = 2mL^2 \cdot \frac{\dot{\varphi}^2}{2} + 2mgL \cdot \frac{\varphi^2}{2} + 4f \frac{L^2}{l} \cdot \frac{\varphi^2}{2} = 2mL^2 \cdot \frac{\dot{\varphi}^2}{2} + 2mgL \left(1 + \frac{2fL}{mgl}\right) \frac{\varphi^2}{2}$$

Из этой формулы получаем коэффициент инерционности $2mL^2$ и упругости

$2mgL \left(1 + \frac{2fL}{mgl}\right)$ колебательной системы. Период колебаний в короткой моде

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{2mL^2}{2mgL \left(1 + \frac{2fL}{mgl}\right)}} = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g \left(1 + \frac{2fL}{mgl}\right)}}$$

Формулу можно записать приближённо, учитывая условие $\frac{fL}{mgl} \ll 1$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \left(1 - \frac{fL}{mgl}\right) = T_0 \left(1 - \frac{fL}{mgl}\right)$$

Разница периодов колебаний $\Delta T = T_0 \frac{fL}{mgl}$ является малой величиной. Эта величина определяет период биений. Действительно, в общем случае колебание системы является суммой собственных колебаний (суммой колебаний двух основных мод). В простейшем варианте равных амплитуд

$$\begin{aligned} x &= A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T_0} t\right) + A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T_0 - \Delta T} t\right) = \\ &= 2A \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{2} \left(\frac{1}{T_0 - \Delta T} - \frac{1}{T_0}\right) t\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{2} \left(\frac{1}{T_0 - \Delta T} + \frac{1}{T_0}\right) t\right) \end{aligned}$$

Результат можно записать приближённо

$$x = 2A \cdot \cos\left(2\pi \frac{\Delta T}{2T_0^2} t\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T_0} t\right)$$

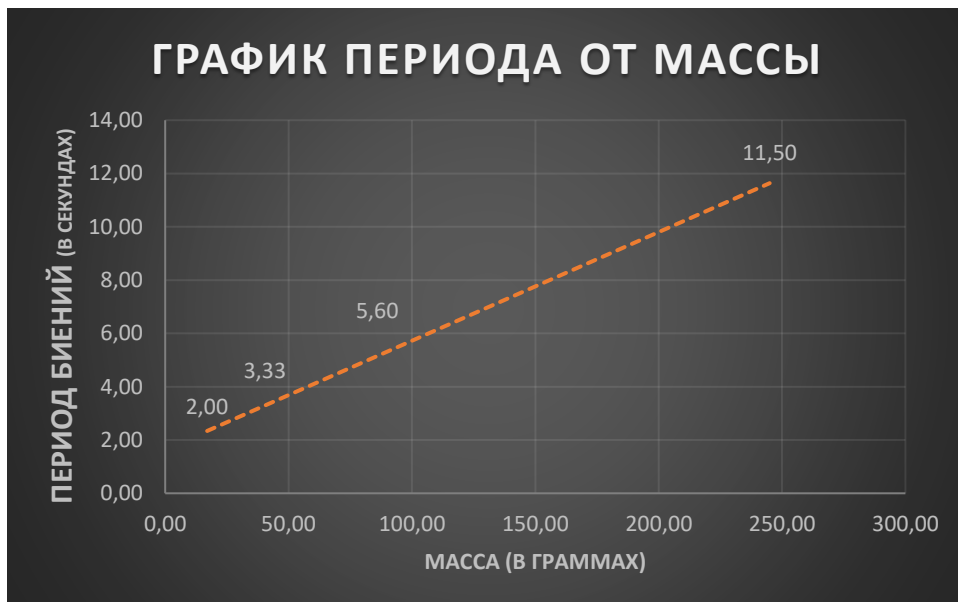
Отсюда находим период биений – период изменения амплитуды

$$\tau = \frac{2T_0^2}{\Delta T} = 4\pi \sqrt{\frac{g}{L}} \cdot \frac{ml}{f}$$

Таким образом, теоретические значения искомых параметров: $\alpha = -1/2$, $\beta = 1/2$, $\gamma = 1$, $\delta = 1$, $\varepsilon = -1$.

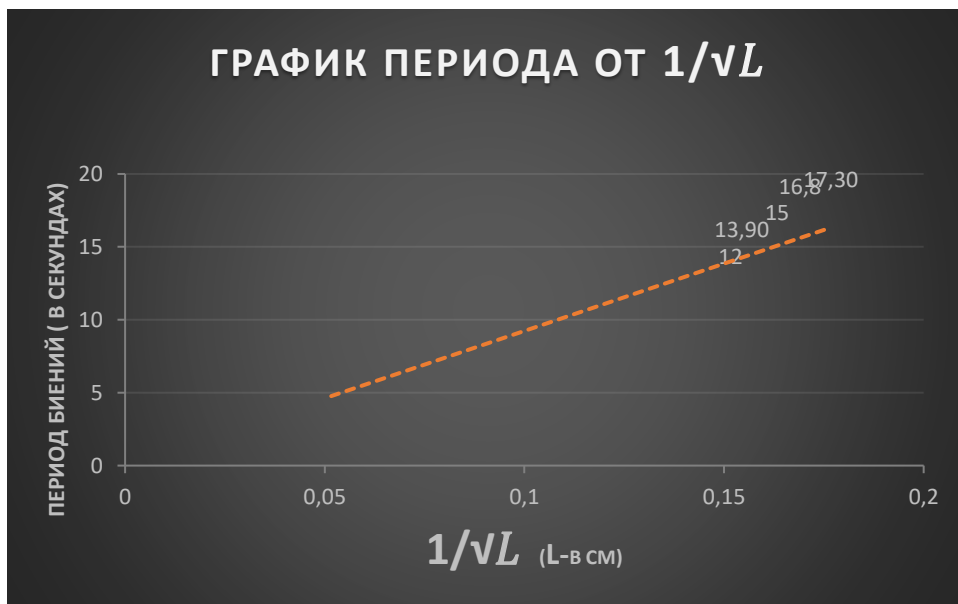
Экспериментальная часть

1) Исследование зависимости периода биения от массы грузов. Пример экспериментальных данных:



Измерения периода биений выполнено только для четырёх масс. График иллюстрирует прямую пропорциональную зависимость периода биений от массы грузов маятников. Параметр $\gamma = 1$.

2) Исследование зависимости периода биения от $1/\sqrt{L}$ (где L -длина маятника). Пример экспериментальных данных:



Эта зависимость линейна в координатах $(T, 1/\sqrt{L})$ и соответственно параметр $\alpha = -1/2$.

3) «Рабочая» область графика. Отклонения точек от прямой в основном определены неточностью установки длины связи (расстояние между маятниками).

4) Определение параметров методом размерности. Пусть параметры α и γ определены экспериментально: $\alpha = -\frac{1}{2}, \gamma = 1$. Тогда

$$T = C \cdot \frac{m}{\sqrt{L}} \cdot g^{\beta} \cdot m^{\gamma} \cdot l^{\delta} \cdot f^{\varepsilon}$$

В соответствии с этой формулой записываем систему трёх уравнений размерности

$$\begin{cases} T \rightarrow 1 = -2\beta - 2\varepsilon \\ m \rightarrow 0 = 1 + \varepsilon \\ L \rightarrow 0 = \beta + \delta + \varepsilon - \frac{1}{2} \end{cases}$$

Решение системы приводит к результату: $\varepsilon = -1, \beta = 1, \delta = 1$.

Критерии

1. Выбор двух параметров исследования 2 б
2. Сборка экспериментальной установки для исследования зависимости периода биений от значения первого выбранного параметра. 2 б
3. Получение экспериментальных данных (таблица: период биений, значение первого параметра) 4 б
4. Построение графика экспериментальных данных в логарифмических координатах. Аппроксимация линейной функцией .. 3 б
5. Определение значение первого параметра по линейной аппроксимации. 1 б
6. Сборка экспериментальной установки для исследования зависимости периода биений от значения второго выбранного параметра 2 б
7. Получение экспериментальных данных (таблица: период биений, значение второго параметра) 2 б
8. Построение графика экспериментальных данных в логарифмических координатах. Аппроксимация линейной функцией .. 4 б
9. Определение значение второго параметра по линейной аппроксимации 2 б
10. Определение последующих трех параметров методом размерности 3 б
11. Всего 25 б