

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ТУРА****Магнитные взаимодействия****Часть 1. Взаимодействие с магнитным полем катушки.**

1.1. Для измерения периода колебаний необходимо несколько раз измерить времена не менее 10 колебаний. Получены следующие значения времен 10 колебаний:

$$t_1 = 25,02c$$

$$t_2 = 25,06c .$$

$$t_3 = 24,92c$$

Расчет периода по этим данным дает

$$T = \frac{\langle t \rangle}{10} = 2,50c$$

Погрешность может быть рассчитана по формуле

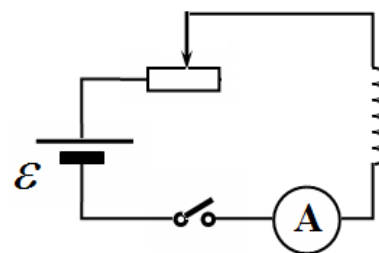
$$\Delta t = 2\sqrt{\frac{\sum_k (t_k - \langle t \rangle)^2}{n(n-1)}} = 0,08c ,$$

следовательно, погрешность определения периода равна  $\Delta T = \Delta t / 10 = 0,008c$  .

Окончательно можно записать

$$T = (2,50 \pm 0,01)c . \tag{1}$$

1.2. Для измерений использована схема (также допустимо подключение реостата по схеме потенциометра)



1.3. Результаты измерений зависимости периода колебаний маятника от силы тока в катушке приведены в таблице 1. Ниже показан график полученной зависимости.

Таблица 1

$I, A$	$T, c$	$\nu^2, c^{-2}$	$(\nu^2 - \nu_0^2), c^{-2}$
0,00	2,655	0,142	0,000
0,80	2,062	0,235	0,093
0,37	2,350	0,181	0,039
-0,37	3,083	0,105	-0,037
-0,72	3,724	0,072	-0,070

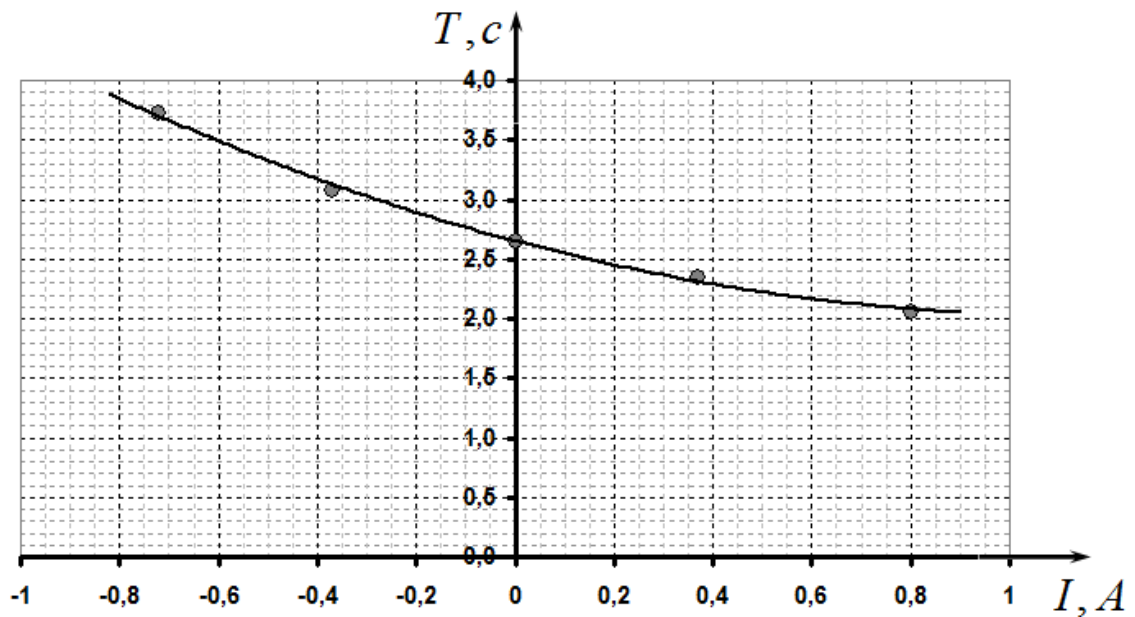


График 1. Зависимость периода колебаний маятника от силы тока в катушке.

1.4. Для описания движения маятника следует использовать уравнение

$$J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = -mga \cdot \varphi - \mu I \varphi, \tag{2}$$

где  $\varphi$  – угол отклонения маятника от вертикали,  $J$  – момент инерции маятника относительно оси вращения,  $m$  – масса маятника,  $a$  – расстояние от оси вращения до центра масс маятника,  $\mu I \varphi$  – момент силы, действующей на намагниченный шарик со стороны магнитного поля катушки. Из уравнения (2) следует, что квадрат частоты колебаний линейно зависит от силы тока:

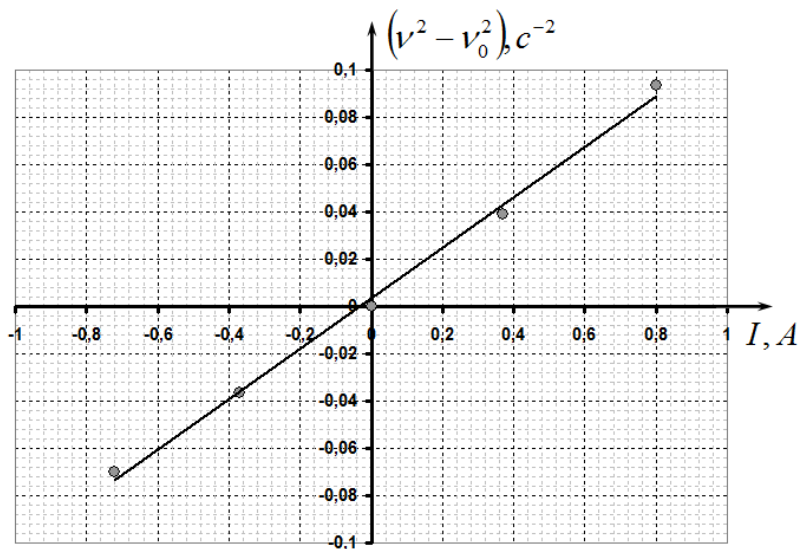
$$\nu^2 = \frac{1}{T^2} = \frac{mga + \mu I}{J}$$

Еще более наглядно представить зависимость изменения квадрата частоты колебаний от силы тока

$$\nu^2 - \nu_0^2 = \frac{\mu I}{J}, \text{ где } \nu_0^2 = \frac{mga}{J} -$$

квадрат частоты колебаний при отсутствии тока в катушке.

Таким образом, линейность зависимости величины  $(\nu^2 - \nu_0^2)$  от силы тока доказывает, высказанное утверждение о прямой пропорциональности зависимости силы магнитного взаимодействия от силы тока в катушке. На рисунке показан график этой зависимости – ее линейность подтверждает высказанное предположение.



**Часть 2. «Точечные взаимодействия»**

2.1

Для записи уравнения движения необходимо корректно рассчитать момент силы взаимодействия между намагниченными шариками. Так как сила является центральной, то ее плечо есть отрезок  $OD$ , а его длина равна

$$d = |OD| = (l + x) \cdot \alpha$$

где  $l$  – расстояние от оси вращения до шарика на маятнике,  $x$  – расстояние между шариками в положении равновесия. Здесь и далее углы считаем малыми. Угол  $\alpha$  необходимо выразить через угол отклонения маятника  $\varphi$ . Для этого можно использовать соотношение

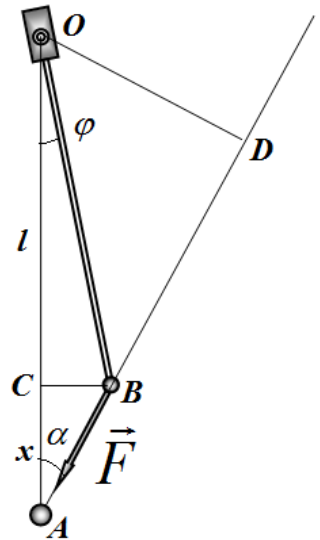
$$|CB| = l\varphi = x\alpha,$$

из которого следует

$$\alpha = \frac{l}{x}\varphi$$

Таким образом, движение маятника в этом случае описывается уравнением

$$J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = -mga\varphi - F \frac{l(l+x)}{x} \varphi. \quad (3)$$



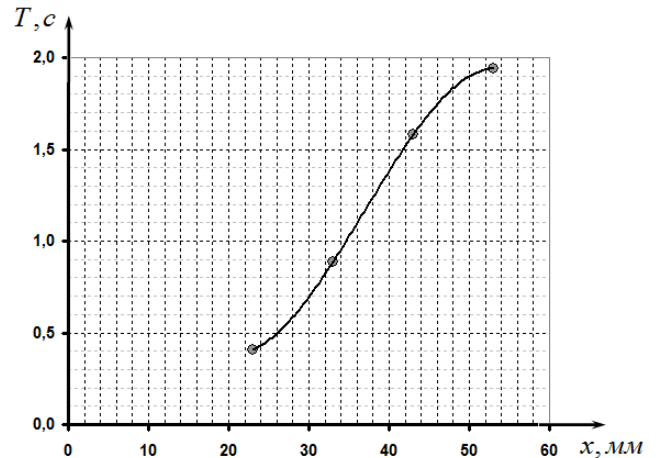
Из этого уравнения следует, что формула для периода колебаний имеет вид

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mga + F \frac{l(l+x)}{x}}}. \quad (4)$$

2.2. Результаты измерения времени 10 колебаний при различных расстояниях между центрами шариков приведены в таблице 2 и на графике.

Таблица 2.

$x$ , мм	$t_1$ , с	$t_2$ , с	$t_3$ , с	$T$ , с
23	4,27	4,09	3,90	0,409
33	8,72	9,03	8,83	0,886
43	15,96	15,73	15,68	1,579
53	19,20	19,64	19,36	1,940



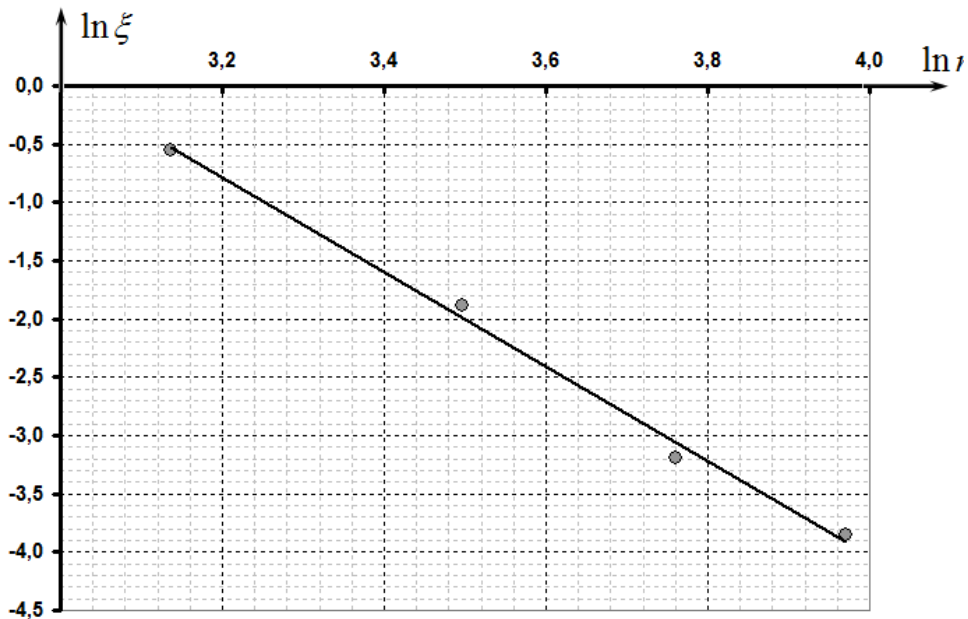
2.3 Для определения показателя степени необходимо выразить силу взаимодействия через измеряемые характеристики. Из формулы для периода колебаний следует, что величина изменения квадрата частоты равна

$$v^2 - v_0^2 = F \frac{l(l+x)}{x} \frac{1}{J},$$

Откуда следует, что величина

$$\xi = (v^2 - v_0^2) \frac{x}{l+x}$$

пропорциональна силе магнитного взаимодействия  $F = \frac{C}{r^\gamma}$ . Для определения показателя степени необходимо построить график зависимости величины  $\xi$  от расстояния  $x$  в логарифмическом масштабе. Коэффициент наклона этого графика и даст искомую степень.



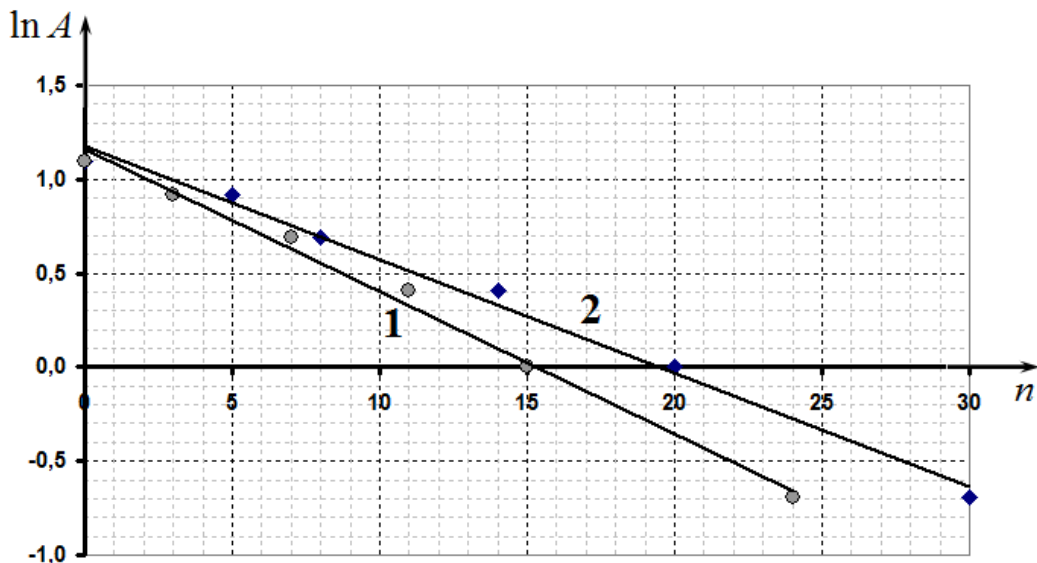
На рисунке показан график указанной зависимости. Из графика следует, что показатель степени равен  $\gamma = 4$ .

**Часть 3. Магнитная шоколадка.**

3.1. Шоколадка не влияет на период колебаний, но заметно увеличивает затухание колебаний. Это происходит вследствие возникновения токов Фуко в фольге.

3.2. Для доказательства этого утверждения можно измерить зависимость амплитуды колебаний  $A$  от времени (или, что равносильно, но проще, от числа колебаний  $n$ ) в полулогарифмическом масштабе.

На графике приведены данные зависимости с шоколадкой (1) и без нее (2). Графики показывают увеличение затухания колебаний при наличии шоколадки.



## Схема оценивания

№	Пункт задачи	Всего за пункт	Баллы
1.1	Измерение периода: - период больше 2 с; - проведено не менее 3 измерений; - в каждом измерении не менее 10 периодов; - найдено среднее значение; - оценена случайная погрешность;	0,5	0,1 0,1 0,1 0,1 0,1
1.2	Схема измерений (все элементы соединены последовательно): - источник; - катушка; - реостат (два варианта); - ключ; - амперметр;	0,5	0,1 0,1 0,1 0,1 0,1
1.3	Измерения (оценивается если период лежит в диапазоне 1-5 с) - измерено при 7 (5, 3, меньше) значениях силы тока; - ток в двух направлениях; - изменение периода не менее 50% (20%, меньше); - измерено время не менее 5 колебаний; Построение графика: - оси подписаны и оцифрованы; - нанесены все точки в соответствии с таблицей; - проведена сглаживающая линия;	2,0	1(0,5; 0,3; 0) 0,4 0,2 (0,1; 0) 0,1 0,1 0,1 0,1
1.4	Линеаризация: - зависимость квадрата частоты от силы тока линейна; - проведен расчет для всех точек; Построение графика: - оси подписаны и оцифрованы; - нанесены все точки в соответствии с таблицей; - проведена сглаживающая прямая; Вывод о правильности	1,0	0,4 0,2 0,1 0,1 0,1 0,1
2.1	Уравнение движения: - общий вид (динамика вращательного движения); - момент силы тяжести; - момент силы магнитного взаимодействия; Формула для периода колебаний	1,0	0,3 0,2 0,3 0,2
2.2	Измерение периода колебаний: (оценивается, если период лежит в диапазоне 0,3-5 с) - измерено при 7 (5,3, меньше) расстояниях; - изменение периода не менее чем в 4 раза (2 раза, меньше); Построение графика: - оси подписаны и оцифрованы; - нанесены все точки в соответствии с таблицей; - проведена сглаживающая линия;	4,0	2,5(1,5; 1,0; 0) 1,2(0,5; 0) 0,1 0,1 0,1

2.3	<p>Определение показателя степени  Найдена правильная линеаризация;  Рассчитаны параметры линеаризованной зависимости;  Построение графика:  - оси подписаны и оцифрованы;  - нанесены все точки в соответствии с таблицей;  - проведена сглаживающая прямая;  <i>Найден коэффициент наклона в пределах от 2 до 6;</i>  Показатель степени 4;</p>	4,0	<p>2,0  0,5  0,1  0,1  0,1  (0,6)  1,2</p>
3.1	<p>Период постоянен;  Увеличивается затухание;  Причина – токи Фуко в шоколадке.</p>	0,5	<p>0,2  0,2  0,1</p>
3.2	<p>Измерена зависимость амплитуды от числа колебаний (равносильно – число колебаний для уменьшения амплитуды в указанных пределах)  Построение графика:  - оси подписаны и оцифрованы;  - нанесены все точки в соответствии с таблицей;  - проведена сглаживающая линия;</p>	1,5	<p>1,2  0,1  0,1  0,1</p>
	ВСЕГО	15	