

Отчет по лабораторной работе №118. Маятник Обербека.

Цель работы: изучить кинематическое движение маятника, найти его момент инерции, оценить влияние трения на движение, изучить законы вращательного движения на примере маятника.

Оборудование: установка ФМ-14, грузы.
 $\Delta h = 2 \text{ мм}$; $\Delta r = 0,5 \text{ мм}$; $\Delta R = 1 \text{ мм}$; $\Delta t = 1 \text{ мс}$; $\Delta m = 0,5 \text{ г}$.

Теоретическая часть.

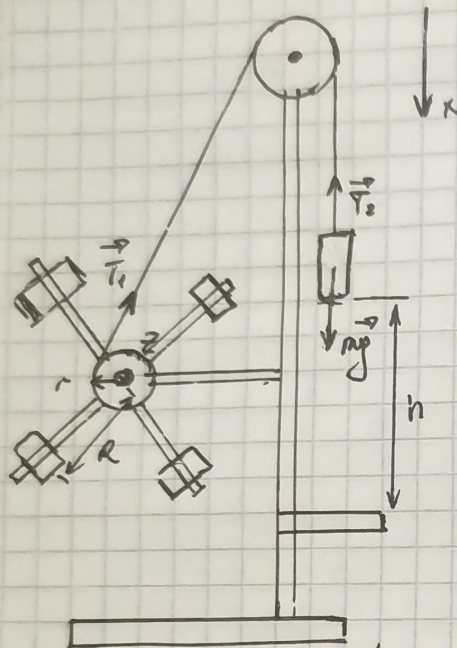


Рис. 1. Маятник Обербека

Маятник Обербека представляет собой свободно вращающуюся на горизонтальной оси втулку, в которой преобразовано закрепление стержней с симметрично расположенными грузами (рис. 1). С втулкой соединен шкив, на который наматывают нить с подвешенным разгонным грузом. Под действием силы тяжести разгонный груз начинает опускаться, при этом сила натяжения нити раскручивает маятник.

Для описания движения маятника выберем ось z , совпадающую с его осью вращения и направленную так, как показано на рис. 1. Запишем уравнение вращательного движения твердого тела относительно оси z в виде:

$$I \chi_z = r T_1 - M_{\text{тр}} \quad (1)$$

где I - момент инерции маятника,
 χ_z - угловое ускорение,
 r - радиус шкива,
 T_1 - сила со стороны нити,
 $M_{\text{тр}}$ - суммарный момент сил трения, действующий на маятник со стороны оси вращения и воздуха.

Запишем далее II закон Ньютона для разгонного груза в проекции на вертикальную ось x (рис. 1):

$$m a_x = m g - T_2 \quad (2)$$

где a_x - ускорение груза, g - ускорение свободного падения, T_2 - сила со стороны нити.

Считая идеальным (невесомым и без трения оси) блок, через который переброшена нить (рис. 1), получим

$$T_1 = T_2 \quad (3)$$

Учтем также, что движения маятника и разгонного груза связаны кинематическим соотношением:

$$a_x = \chi_z r \quad (4)$$

вытекающим из предположений о постоянности m и отсутствии проскальзывания магнита по шпильке маятника.

Из системы уравнений (1) - (4) выразим угловое ускорение маятника:

$$\delta_z = \frac{mgr - M_{тр}}{I + mr^2} \quad (5)$$

Из формулы (5) следует, что при $M_{тр} = \text{const}$ угловое ускорение δ_z постоянно в ходе движения, то есть маятник движется равноускоренно. Условие $M_{тр} = \text{const}$ выполняется в случае, когда сухое трение в оси маятника преобладает над зависящим от угловой скорости возмущением трением маятника о воздух.

При выполнении типичного для маятника условия $mr^2 \ll I$ формула (5) сводится к приближенному виду:

$$\delta_z \approx \frac{mgr - M_{тр}}{I} \quad (6)$$

откуда следует, что угловое ускорение δ_z линейно зависит от массы разгонного груза m (при $M_{тр} = \text{const}$). Формула (6) лежит в основе экспериментального определения момента сил трения $M_{тр}$ и момента инерции I в данной работе. Для этого измеряется угловое ускорение δ_z при различных массах m и строится график зависимости $\delta_z = \delta_z(m)$. По точке пересечения линейного (в области, где $mr^2 \ll I$) участка графика с горизонтальной осью находится $M_{тр}$, а по какому-либо участку находится I .

Заметим, что, используя найденное значение $M_{тр}$, момент инерции I можно найти из более точной, чем (6), формулы (5) как

$$I = \frac{mgr - M_{тр}}{\delta_z} - mr^2 \quad (7)$$

Угловое ускорение маятника в эксперименте измеряется косвенно - через измерение линейного ускорения разгонного груза. Для этого измеряется время t спуска груза с высоты h . Ускорение груза определяется формулой $a_x = \frac{2h}{t^2}$, а угловое ускорение маятника находится, с учетом (4), как

$$\delta_z = \frac{a_x}{r} \quad (8)$$

Экспериментальная установка.

В экспериментальной установке маятник размещен на платформе, закрепленной на вертикальной стойке с массивным основанием. На стержнях маятника с интервалом в 1 см. нанесены риски для измерения расстояний. Грузы маятника имеют цилиндрическую форму, их можно перемещать вдоль стержней, фиксируя положение винтами, что дает возможность изменять момент инерции маятника. Масса каждого груза равна 114 г, радиус основания цилиндра 1,5 см, длина образующей 2 см.

В верхней части вертикальной стойки закреплён маятниковый блок, через который пропущена нить с подвешенным разгонным грузом. Массу разгонного груза можно менять, подбирая его из разнотипного набора металлических шайб.

В нижней части стойки на фронтальной закреплён фотоэлемент, который срабатывает при достижении разгонным грузом уровня красной метки на фронтальной (от этого уровня следует отсчитывать начальную высоту груза).

Маятник снабжён электромагнитным тормозом, предназначенным для поддержания маятника в неподвижном состоянии в начале эксперимента и торможения маятника после прохождения разгонного груза фотоэлемента. Электромагнитный тормоз и фотоэлемент подключены к электрическому блоку управления, содержащему электромагнитный тормоз фиксирует маятник при нажатии кнопки "старт" на блоке управления. При нажатии кнопки "старт" электромагнитный тормоз освобождает маятник, а секундомер начинает отсчёт времени движения. Отсчёт завершается автоматически по сигналу от фотоэлемента (или при нажатии кнопки "стоп").

Порядок проведения эксперимента.

Зафиксировать грузы-цилиндры на стержнях маятника на одинаковых расстояниях от оси вращения, к концу нити подвесить разгонный груз. Начесть нить на шкив маятника до подъёма разгонного груза на максимально возможную высоту и включить электромагнитный тормоз. Провести измерение времени спуска разгонного груза до уровня фотоэлемента, повторяя его не менее трёх раз для нахождения среднего значения.

Практическая часть

1. Определение типа движения (дополнительное задание).

N° (N)	1			2			3			4			5		
h, м	0,12			0,15			0,20			0,25			0,30		
t, с	1,950	1,964	1,963	2,200	2,197	2,188	2,532	2,526	2,501	2,808	2,830	2,834	3,082	3,044	3,105
t _{ср} , с	1,960			2,195			2,520			2,824			3,090		
t _{ср} ² , с ²	3,8416			4,8180			6,3504			7,9749			9,5481		

$$\Delta T = \frac{\left(\frac{u_m}{u_n} - 0,255\right) (1 + 0,0041 \cdot 30)}{\dots} \rightarrow 1044,13 \left(\frac{u_m}{u_n} - 0,255\right) = \Delta T ?$$

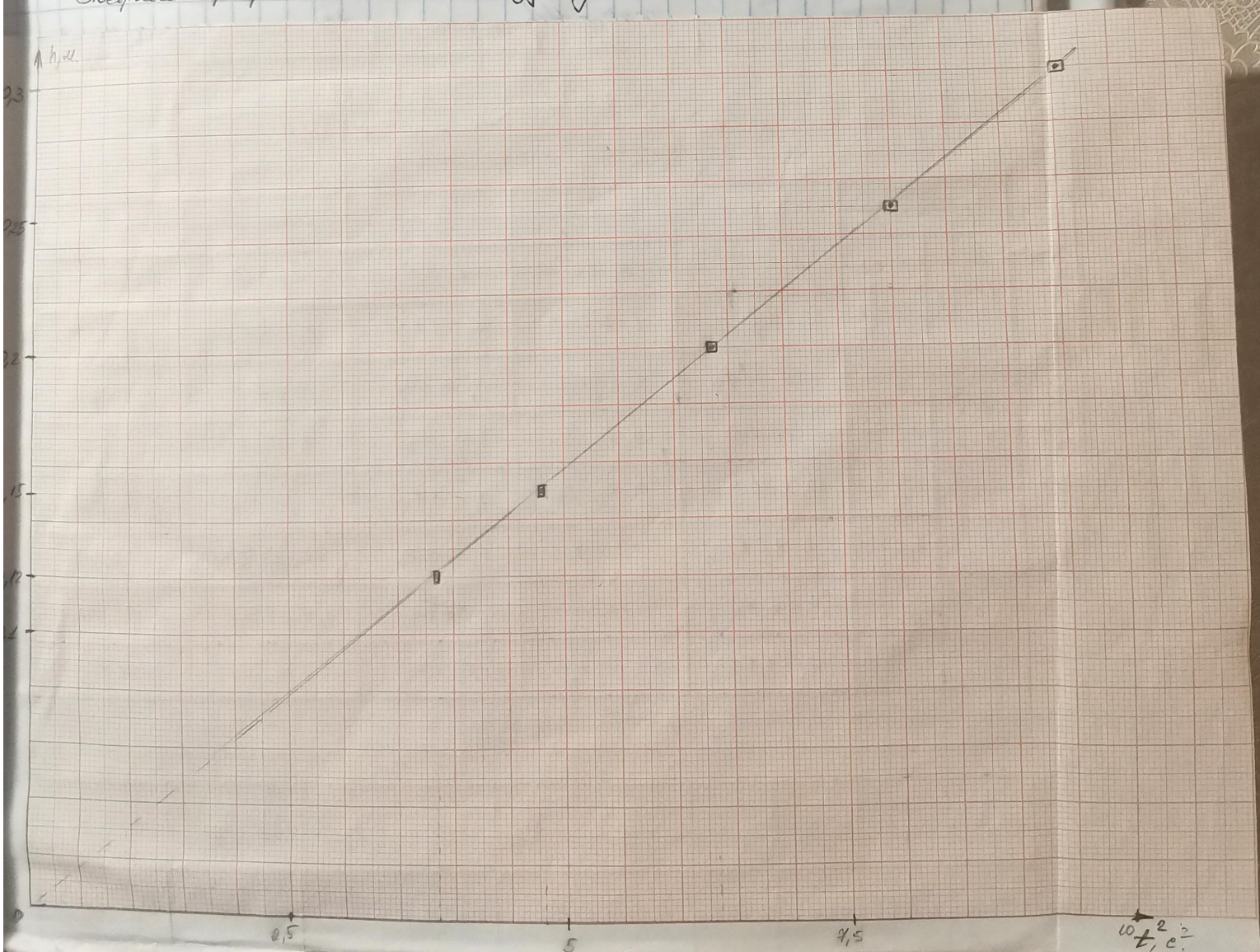
Таблица погрешностей

$N^{\circ} (N)$	1	2	3	4	5
$\Delta h, \text{ м}$	0,002				
$\Delta t, \text{ с}$	0,01				
$\delta t = \frac{\Delta t}{t}, \%$	0,51	0,48	0,40	0,35	0,32
$\delta(t^2) = 2\delta t = \frac{2\Delta t}{t}, \%$	1,02	0,92	0,80	0,70	0,64
$\Delta(t^2) = (t^2) \cdot \delta(t^2), \text{ с}^2$	0,0392	0,0443	0,0508	0,0558	0,0611

Из формулы кинематики для равноускоренного движения:

$$a = \frac{2h}{t^2} \rightarrow h = \frac{at^2}{2}$$

Построим график $h(t^2)$, используя данные таблицы:



Видно, что графиком является прямая, следовательно, движение равноускоренное.

2. Определение момента сил трения и момента инерции маятника.

R, см	m, кг	0,05			0,10			0,15			0,17			0,20		
14	t, с	3,266	3,241	3,242	2,250	2,248	2,236	1,815	1,845	1,831	1,727	1,415	1,738	1,602	1,613	1,602
	t _{ср} , с	3,260			2,245			1,830			1,726			1,605		
10	t, с	2,349	2,319	2,318	1,658	1,658	1,653	1,358	1,356	1,353	1,297	1,303	1,308	1,208	1,207	1,208
	t _{ср} , с	2,329			1,656			1,356			1,302			1,209		
6	t, с	1,571	1,554	1,589	1,121	1,118	1,122	0,931	0,932	0,930	0,906	0,940	0,916	0,853	0,848	0,843
	t _{ср} , с	1,565			1,120			0,932			0,911			0,847		

$$\delta_2 \approx \frac{mgr - \mathcal{M} \ddot{\varphi}}{I} \quad \text{или} \quad \delta_2 = \frac{2h}{r t_{ср}^2} \quad (h = 0,3 \text{ м})$$

N° (N)		1	2	3	4	5
R, см	m, кг	0,05	0,10	0,15	0,17	0,20
	(mgr), Н·м	0,0172	0,0343	0,0515	0,0584	0,0684
14	t _{ср} , с	10,6276	5,0400	3,3489	2,9781	2,5760
	δ_2 , $\frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$	1,613	3,401	5,119	5,454	6,655
10	t _{ср} , с	5,4242	2,4423	1,8387	1,6952	1,4617
	δ_2 , $\frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$	3,160	6,251	9,323	10,113	11,728
6	t _{ср} , с	2,4432	1,2544	0,8686	0,8299	0,7144
	δ_2 , $\frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$	7,000	13,686	19,736	20,656	23,898
Таблица погрешностей N1.						
		$\Delta m, \text{ кг}$				
		0,0005				
		$\Delta R, \text{ см}$				
		0,01				
		$\Delta r, \text{ см}$				
		0,0005				
		$\Delta t, \text{ с}$				
		0,001				
		$\delta(mgr) = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta r}{r}, \%$				
		2,4				
		$\Delta(mgr) = (mgr) \cdot \delta(mgr), \text{ Н·м}$				
		0,0004128				

Таблица погрешностей N2.

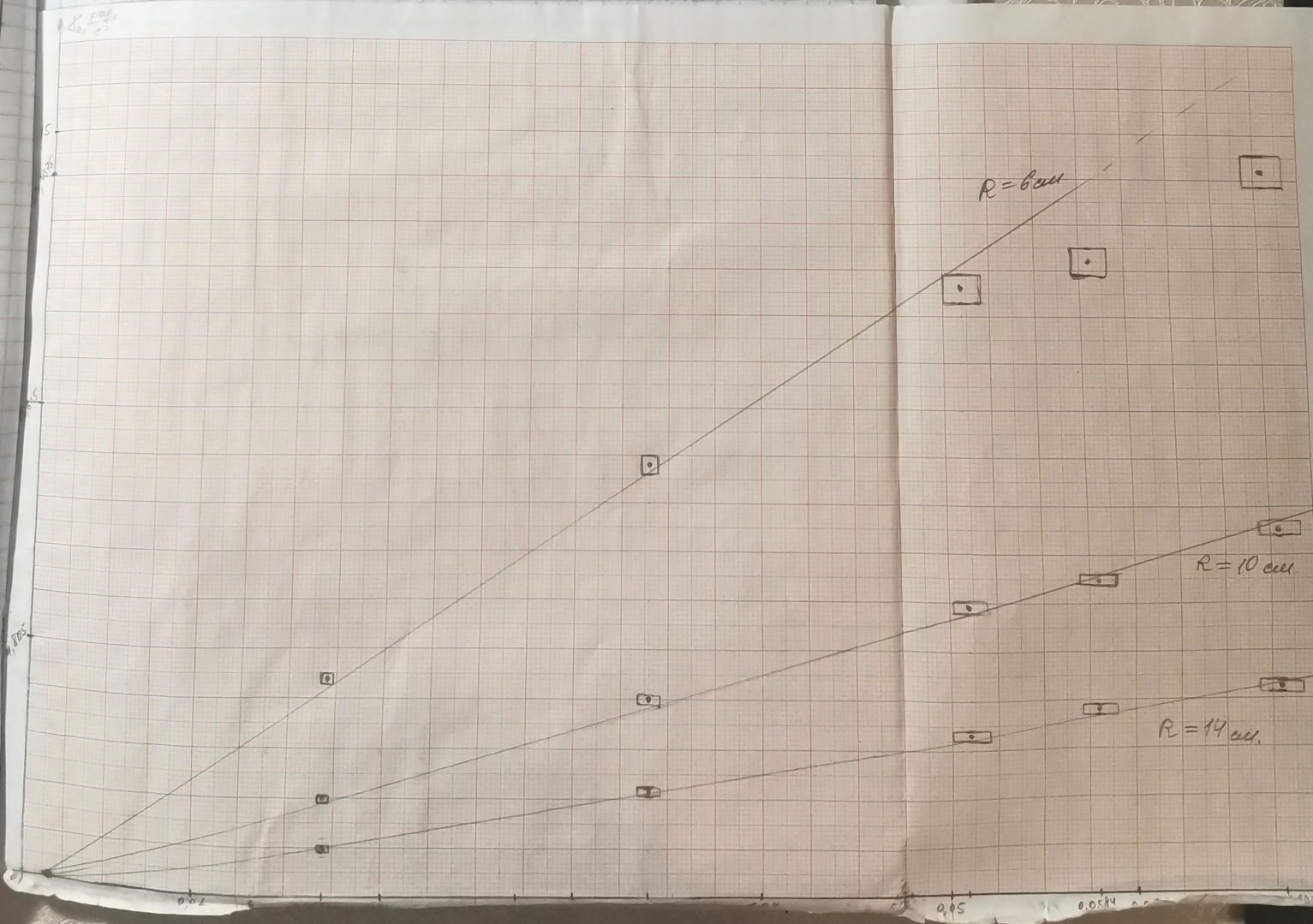
Lenovo

Получим
 $(n_{12}, \vec{D}_2)$
 $\vec{D} = \vec{E} \vec{F} =$
 $\vec{D}_2 = \vec{E} \vec{F}_2 =$

$$\Delta T = \left(\frac{u_n}{u_R} - 0,255 \right) (1 + 0,0041 \cdot 30) \rightarrow 1044,13 \left(\frac{u_n}{u_R} - 0,255 \right) = \Delta T ?$$

R, см	$N^0(N)$	1	2	3	4	5
14	$\delta \chi_z = \frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta r}{r} + \frac{2\Delta t}{t}, \%$	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
	$\Delta \chi_z = \chi_z \cdot \delta \chi_z, \frac{\text{погр}}{\text{с.г}}$	0,0355	0,0748	0,1126	0,1266	0,1464
10	$\delta \chi_z = \frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta r}{r} + \frac{2\Delta t}{t}, \%$	2,2	2,2	2,2	2,2	2,3
	$\Delta \chi_z = \chi_z \cdot \delta \chi_z, \frac{\text{погр}}{\text{с.г}}$	0,0695	0,1375	0,2051	0,2224	0,2697
6	$\delta \chi_z = \frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta r}{r} + \frac{2\Delta t}{t}, \%$	2,2	2,3	2,3	2,3	2,3
	$\Delta \chi_z = \chi_z \cdot \delta \chi_z, \frac{\text{погр}}{\text{с.г}}$	0,1540	0,3143	0,4539	0,4451	0,5496

Получим фазовый $\chi_z(\text{мгс})$ и определим $\Delta \chi_z$ и I :



Из графика: $M_{\text{сп}} \approx (0,00175 \pm 0,00083) \text{ Н} \cdot \text{м}$

$$\Delta(mgr)_{\text{ср.}} = \frac{\Delta(mgr)_1 + \Delta(mgr)_2 + \Delta(mgr)_3 + \Delta(mgr)_4 + \Delta(mgr)_5}{5} = \Delta M_{\text{сп.}}$$

$$I = \frac{mgr - M_{\text{сп.}}}{\chi_z} - mr^2$$

$$\chi_z \approx \frac{mgr - M_{\text{сп.}}}{I} \rightarrow I \approx \frac{mgr - M_{\text{сп.}}}{\chi_z}$$

Как убедиться
в $M_{\text{сп.}}$? Чтобы не
впасть в погрешность

Построим таблицу значений при $m = 0,05 \text{ кг}$, $r = 0,035 \text{ м}$:

$N^{\circ}(N)$	1	2	3
$R, \text{ см}$	14	10	6
$I \approx \frac{mgr - M_{\text{сп.}}}{\chi_z}, \text{ кг} \cdot \text{м}^2$	0,00958	0,00489	0,00221
$I = \frac{mgr - M_{\text{сп.}}}{\chi_z} - mr^2, \text{ кг} \cdot \text{м}^2$	0,00952	0,00483	0,00215

Значения отличаются незначительно, поэтому в дальнейшем будем учитывать приближенные значения момента инерции:

$$I \approx \frac{mgr - M_{\text{сп.}}}{\chi_z}$$

$$\Delta I = \Delta(mgr - M_{\text{сп.}}) + \Delta \chi_z$$

$$\Delta I_1 = \frac{\Delta(mgr)_1 + \Delta M_{\text{сп.}}}{|mgr - M_{\text{сп.}}|} + \Delta \chi_{z1} \approx 0,102 \quad (= 10,2\%)$$

$$\Delta I_2 = \frac{\Delta(mgr)_2 + \Delta M_{\text{сп.}}}{|mgr - M_{\text{сп.}}|} + \Delta \chi_{z2} \approx 0,102 \quad (= 10,2\%)$$

$$\Delta I_3 = \frac{\Delta(mgr)_3 + \Delta M_{\text{сп.}}}{|mgr - M_{\text{сп.}}|} + \Delta \chi_{z3} \approx 0,102 \quad (= 10,2\%)$$

$\rightarrow \Delta I = 10,2\%$

$$\Delta I_1 = \Delta I \cdot I_1 \approx 0,00098 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$\Delta I_2 = \Delta I \cdot I_2 \approx 0,00050 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$\Delta I_3 = \Delta I \cdot I_3 \approx 0,00023 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$\Delta T = \left(\frac{U_R}{U_0} - 0,255 \right) \left(\frac{1}{U_0} - 0,255 \right) = \Delta \delta$$

8. Построение зависимости I от $m_1 R^2$ и нахождение погрешности измерения магнитика без грузов (I_0)

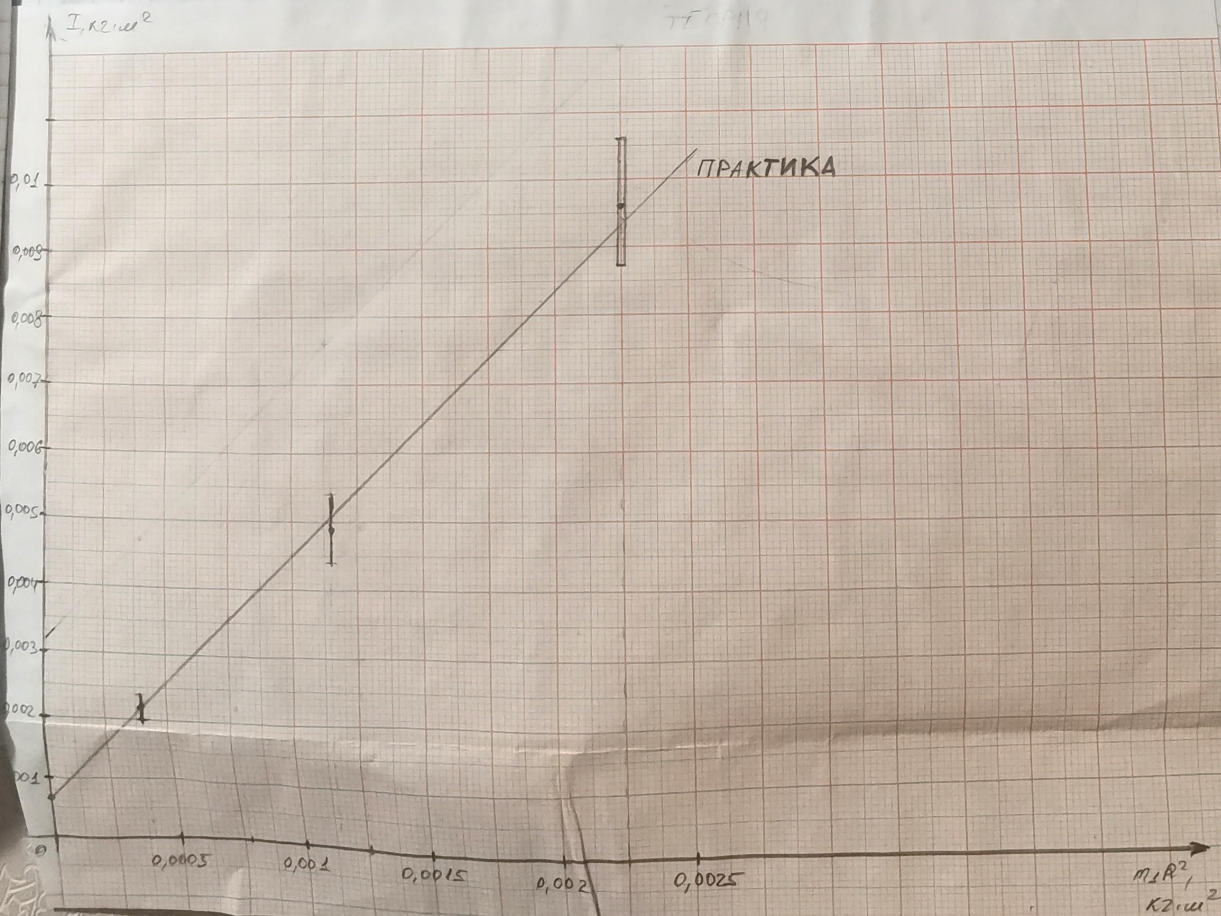
из пункта 2:

$N^{\circ}(N)$	1	2	3	$m, \text{кг}$	$r, \text{м}$	$m_1, \text{кг}$
$R, \text{см}$	14	10	6			
$I \approx \frac{mgR - \Delta I \cdot r}{\delta z}, \text{кг} \cdot \text{м}^2$	0,00958	0,00489	0,00221	0,05	0,035	0,114
$(m_1 R^2), \text{кг} \cdot \text{м}^2$	0,00223	0,00114	0,00045			

Таблица погрешностей

$N^{\circ}(N)$	1	2	3	$\Delta m, \text{кг}$	$\Delta r, \text{м}$	$\Delta g, \text{м/с}^2$	$\Delta t, \text{с}$
$\delta I = \frac{\Delta(mgR) + \Delta \delta I \cdot r}{I(mgR - \Delta I \cdot r)} \cdot 100, \%$	10,2	10,2	10,2				
$\Delta I = I \cdot \delta I, \text{кг} \cdot \text{м}^2$	0,00098	0,00050	0,00023	5,000	5,000	5,000	5,000
$\delta(m_1 R^2) = \frac{\Delta m}{m_1} + \frac{2\Delta R}{R}, \%$	0,6	0,6	0,8				
$\Delta(m_1 R^2) = (m_1 R^2) \cdot \delta(m_1 R^2), \text{кг} \cdot \text{м}^2$	0,0001338	0,0000684	0,0000328				
$\Delta(mgR), \text{Н} \cdot \text{м}$	0,0004128						

Построение график зависимости I от $(m_1 R^2)$

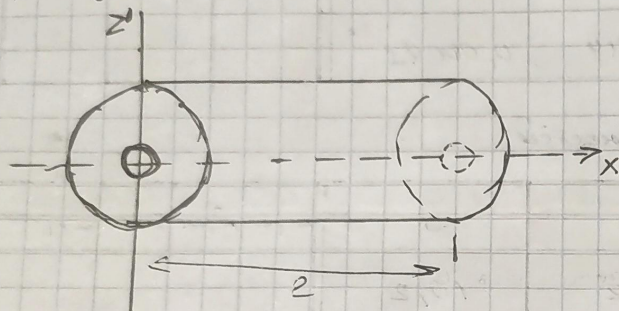


Из графика видно: $I_0 \approx (0,0007 \pm 0,00057) \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

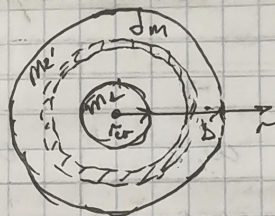
$$\Delta I_{\text{ср}} = \frac{\Delta I_1 + \Delta I_2 + \Delta I_3}{3} = \Delta I_0$$

4. Выбор теоретической формулы для момента инерции шасси

1) Найдем момент инерции для грузов-цилиндров (m_1 - масса груза-цилиндра)



Найдем момент инерции для диска с отверстием, относительно перпендикуляра к нему оси.



Для кольца: $dI = dm \cdot r^2$

$$dm = \rho dV = \rho \cdot h \cdot 2\pi r dr \quad (r \in [r_0; b])$$

$$\Rightarrow I = \int_{r_0}^b \rho h \cdot 2\pi r^3 dr = \frac{1}{2} (m_2 b^2 - m_1 r_0^2)$$

где m_2 - масса диска с радиусом b
 m_1 - масса диска с радиусом r_0

Пусть m - масса такого диска (с отверстием), тогда $m = m_2 - m_1$, и

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{\pi b^2}{\pi r_0^2} \quad \text{— поразивши в момент инерции}$$

$$\Rightarrow I_x = \frac{m}{2} (b^2 + r_0^2) \quad \text{— момент инерции груза-цилиндра относительно оси x.}$$

Если разбивать груз-цилиндр на малые диски с отверстием, то

$$dI_{z1} = \frac{dm}{4} (b^2 + r_0^2) + dm x^2$$

— по теореме Гюйгенса-Штейнера для диска с отверстием, относительно оси, совпадающей с диаметром

$$\Rightarrow I_{z1} = \frac{m_1}{4} (b^2 + r_0^2) + \frac{m_1 l^2}{3}$$

Относительно оси, проходящей через центр масс: $I_0 = I_c + m l^2$

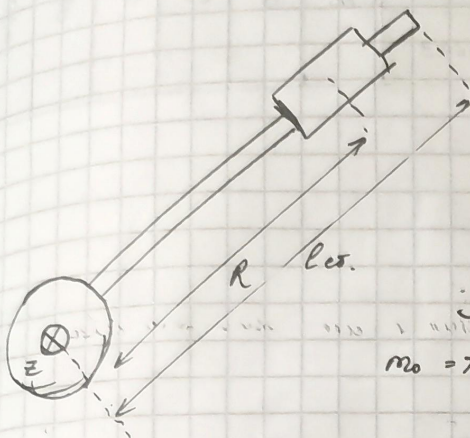
$$I_c = \frac{m_1}{4} (b^2 + r_0^2) + \frac{m_2 l^2}{3} - \frac{m_1 l^2}{4}$$

ΔT -

$$\Rightarrow I_c = \frac{m_1}{4} (b^2 + r_{cs}^2) + \frac{m_1 l^2}{12}$$

Аналогично, по теореме Штейнера - Штейнера относительно оси z:

$$I_z = \frac{m_1}{4} (b^2 + r_{cs}^2) + \frac{m_1 l^2}{12} + m_1 R^2$$



Линия $l_0 = 93 \text{ м}$ - длина стержня (или двух относительно центра $l_0 = 2l_{cs}$)

$r_{сст} = 2,5 \text{ мм} = 0,0025 \text{ м}$ $\equiv r_{cs}$
 $\rho_{сст} = 7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \equiv \rho_{cs}$

$m_0 = \pi r_{cs}^2 \cdot \rho \cdot l_0 \approx 0,046 \text{ кг}$ - масса одного стержня (или двух относительно центра)

$\Rightarrow$ Т.к. грузы - цилиндры 4 относительно оси:

$$I_z' = \frac{m_1}{3} (3(b^2 + r_{cs}^2) + l^2) + 4mR^2$$

Момент инерции для стержней относительно оси z:

$$I_z^2 = 2 \cdot \frac{m_0 l^2}{12} = \frac{m_0 l^2}{6}$$

Тогда

$$I = I_z' + I_z^2 = \frac{m_1}{3} (3(b^2 + r_{cs}^2) + l^2) + \frac{m_0 l^2}{6} + 4m_1 R^2, \text{ где}$$

R - расстояние от оси вращения до центра груза - цилиндра;

l_0 - длина стержня (или двух относительно оси вращения $l_0 = l_{cs} \cdot 2$);

m_1 - масса груза - цилиндра;

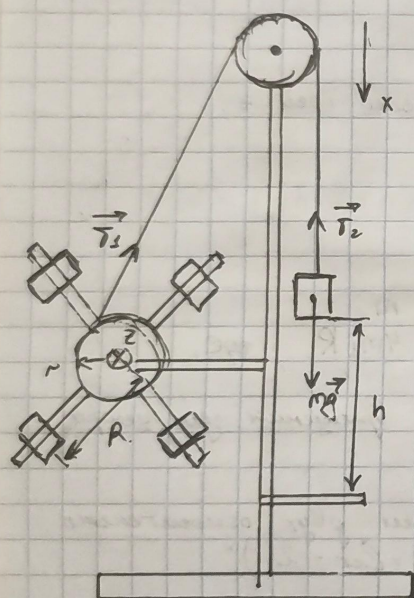
r_{cs} - радиус стержня;

b - радиус основания груза - цилиндра;

l - длина образующей груза - цилиндра;

m_0 - масса одного стержня (или двух относительно оси вращения).

Построим таблицу значений, вытекающих из теретической формулы момента инерции для цилиндра относительно его оси вращения (см. пункт 3 - график.)



Энергии системы.
 $(m_2 = 0,05 \text{ кг} ; h = 0,8 \text{ м})$

Дано $m_2 = 0,05 \text{ кг}$ - масса разогнанного груза (в 1 случае).

По теореме об изменении кинетической энергии:

$$\Delta W_k = A^{\text{всех}}$$

$W_{k1} = 0$ - так как сначала система покоилась.

$$W_k = m_2 g h - A^{\text{тр}}$$

$A^{\text{тр}} = F_{\text{тр}} \cdot h$ - то есть, пока движется груз.

$$I \chi = r T_1 - M_{\text{тр}}$$

$$M_{\text{тр}} = [\vec{r} \times \vec{F}_{\text{тр}}]$$

Будем считать нить и блок идеальными, тогда:

$$T_1 = T_2 = T$$

Запишем второй закон Ньютона для разогнанного груза:

$$m_2 \vec{a} = m_2 \vec{g} - \vec{T}_2 \rightarrow \vec{T}_2 = m_2 \vec{g} - m_2 \vec{a}$$

$$\text{от: } I \chi = r(m_2 g - m_2 a) - r F_{\text{тр}}$$

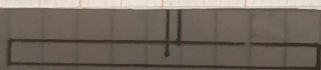
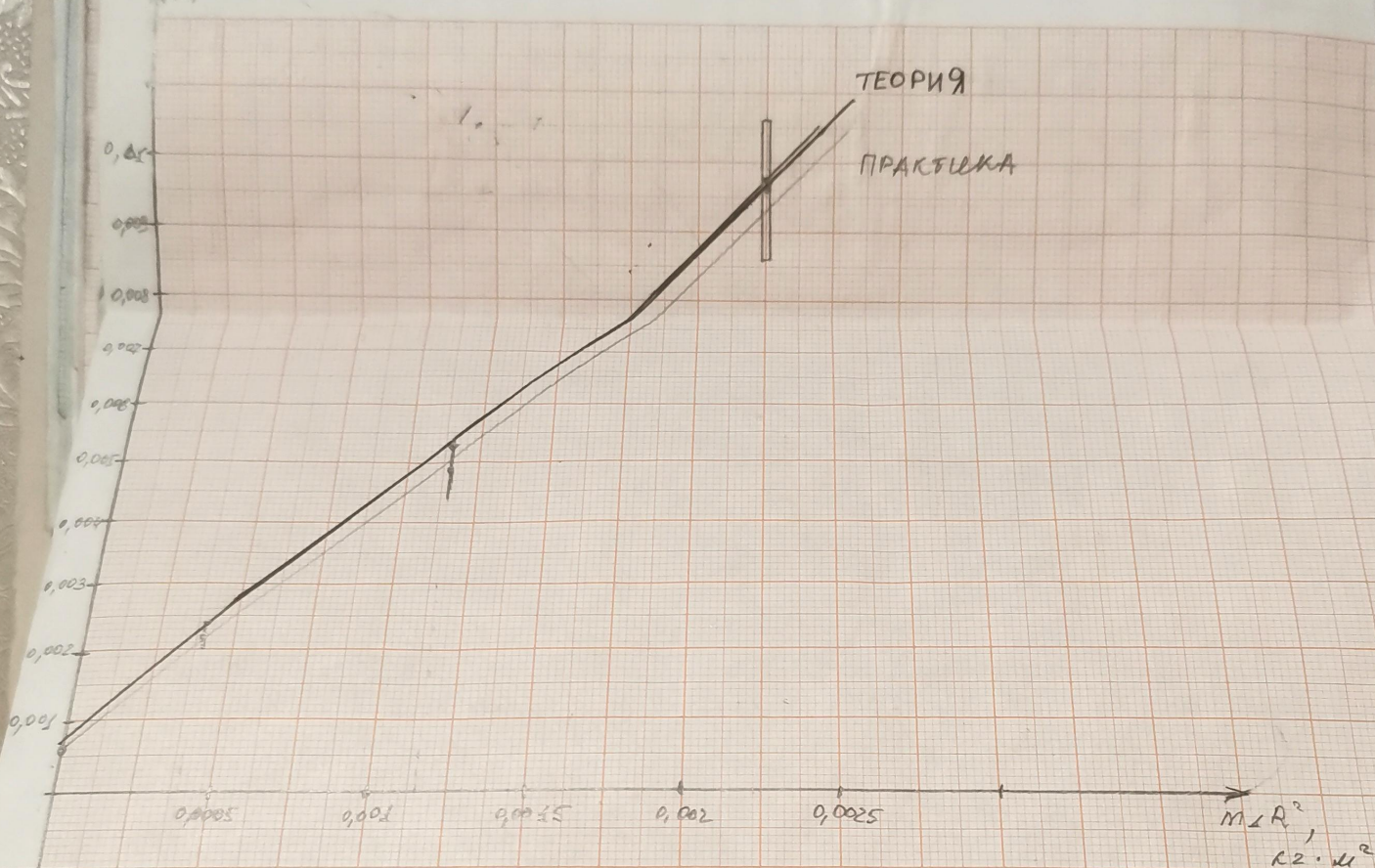
По формулам кинематики: $a = \chi r$

$$\rightarrow A^{\text{тр}} = \left((m_2 g - m_2 a) - \frac{I \chi}{r} \right) \cdot h$$

Для первого случая:

$N^2 (cm)$	1	2	3	$m_{1,2}$	$m_{1,2}$	$r_{1,2}$	b, m	ζ, m	l, m
R, cm	6	10	14	0,012	0,01400	0,0025	0,0150	0,0200	0,2000
$\bar{I} = \frac{m_1}{3}(3(b^2 + r_1^2) + l^2) + \frac{m_2 b^2}{6} + 4m_2 R^2, kg \cdot m^2$	0,00237	0,00529	0,00985						
$(m_2 R^2), kg \cdot m^2$	0,00041	0,00114	0,00223						

$\bar{I}, kg \cdot m^2$



$$\bar{I} \ddot{\varphi} = r \bar{T}_1 - M_{\text{rod}}$$

$$M_{\text{rod}} = [\vec{r} \times \vec{F}_{\text{rod}}]$$

Будем считать нить и блок идеальными, тогда:

$$T_1 = T_2 = \bar{T}$$

Запишем второй закон Ньютона для разогнанного груза:

$$m_2 \vec{a} = m_2 \vec{g} - \vec{T}_2 \rightarrow \vec{T}_2 = m_2 \vec{g} - m_2 \vec{a}$$

$$\text{от: } \bar{I} \ddot{\varphi} = r(m_2 g - m_2 a) - r F_{\text{rod}}$$

По формулам кинематики: $a = \ddot{\varphi} r$

$$\rightarrow \bar{I} \ddot{\varphi} = (m_2 g - m_2 a) r - \frac{\bar{I} \ddot{\varphi}}{r} \cdot h$$

Для первого случая:

$$(111 - \dots) / (1 + 0,0041 \cdot 30)$$

$$\rightarrow 1044,13 \left(\frac{111}{111} - 0,255 \right) = \Delta \delta$$

$$A^* \approx 0,0139 \text{ Дале}; m_{gh} \approx 0,1415 \text{ Дале}$$

$$\rightarrow W_k \approx 0,13825 \text{ Дале}$$

Вывод: 1) С помощью маятника Обербека изучили законы вращательного движения.

Провели измерения при различных расстояниях грузов-цилиндров от оси вращения. При построении графика (пункт 2) $I_z(mpr)$ можно заметить, что при $R = 6 \text{ см}$ и массе разгонного груза $m = 0,14 \text{ кг}$ (и $m = 0,20 \text{ кг}$) точки на графике сдвигаются вниз. И прямая не проходит через начало координат.

При проведении повторных замеров было замечено, что время движения разгонного груза колеблется от $\sim 0,810 \text{ с}$ до $\sim 0,920 \text{ с}$. Следовательно, установка не позволяет точно измерить время движения при данных условиях.

Поэтому, при том эти два значения можно не учитывать.

Возможно, это связано с задержкой включения секундомера и выключения электро тормоза. В.к. груз разгоняется "мгновенно", то это может играть значительную роль.

2) По графику из пункта 2, определим по сдвигу момент силы времени:

$$M_r \approx (0,00175 \pm 0,00083) \text{ Н.м}$$

И момент инерции маятника при различных расстояниях грузов от оси вращения:

$$I_1 \approx (0,00958 \pm 0,00098) \text{ кг.м}^2$$

$$I_2 \approx (0,00489 \pm 0,00050) \text{ кг.м}^2$$

$$I_3 \approx (0,00221 \pm 0,00023) \text{ кг.м}^2$$

3) Построив график $I(mR^2)$, сможем определить момент инерции маятника в отсутствие грузов-цилиндров:

$$I_0 \approx (0,0007 \pm 0,00057) \text{ кг.м}^2$$

4) Используя теоретическую формулу для момента инерции маятника можно, написав уравнения для момента инерции центра масс груза-цилиндра и применив теорему Штейнера получим:

В силу симметрии относительно оси вращения, и так как груза 4, все уравнение можно просто домножить на 4.

Полученное уравнение нужно учесть и решить. Уравнение можно

рассматривать как относительно оси вращения, так и относительно центра масс, и применяется теорема Штейнера - Штейнера. (также учитываем, что тело симметрично и движется по 4)

Сложив оба уравнения моментов и энергии стержней и фюз-цилиндров, получим теоретическую формулу:

$$I = \frac{m_1}{3} (3(b^2 + r_0^2) + l^2) + \frac{m_0 b^2}{6} + 4m_1 R^2, \text{ где}$$

R - расстояние от оси вращения до центра фюз-цилиндра;

b - длина стержня (или рычага относительно оси вращения $b = 2l$ ст);

m_1 - масса фюз-цилиндра;

r_0 - радиус стержня;

b - радиус основания фюз-цилиндра;

l - длина образующей фюз-цилиндра;

m_0 - масса прямого стержня (или рычага относительно оси вращения)

График (по теоретической формуле Бугея) кинематического, но также попадает в пределы погрешностей.

5) Определим кинетическую энергию системы при массе разогнанного фюза (m_1) = 0,05 кг и высоте (h) = 0,3 м.

$$W_k \approx 0,13325 \text{ Дж.}$$

3.03.21