

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНО ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО  
ITMO University**

**Лабораторная работа №3 по теме «Исследование  
равноускоренного вращательного движения»**

**По дисциплине**  
Физика

**Выполнили:**  
Стафеев И.А. (К3121)  
Голованов Д. И. (К3123)  
Данилов Н. О. (К3121)

**Поток:** ОФ-1 ИКТ 1.2.1

**Проверила**  
Рудель А. Е.

Санкт-Петербург,  
2024

# СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

<b>1</b>	<b>Введение .....</b>	<b>3</b>
1.1	Цели работы .....	3
1.2	Задачи .....	3
1.3	Объект исследования .....	3
1.4	Метод исследования .....	3
1.5	Рабочие формулы и исходные данные .....	4
1.6	Измерительные приборы .....	5
1.7	Схема установки .....	6
<b>2</b>	<b>Выполнение лабораторной работы .....</b>	<b>8</b>
2.1	Результаты прямых и косвенных измерений .....	8
2.2	Окончательные результаты .....	10
2.3	Графики .....	11
<b>3</b>	<b>Выводы и анализ результатов работы .....</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>Ответы на контрольные вопросы .....</b>	<b>14</b>

## **1 Введение**

### **1.1 Цели работы**

1. Проверка основного закона динамики вращения;
2. Проверка зависимости момента инерции от положения масс относительно оси вращения.

### **1.2 Задачи**

1. Измерение времени падения груза при разной массе груза и разном положении утяжелителей на крестовине;
2. Расчёт ускорения груза, углового ускорения крестовины и момента силы натяжения нити;
3. Расчёт момента инерции крестовины с утяжелителями и момента силы трения;
4. Исследование зависимости момента силы натяжения нити от углового ускорения. Проверка основного закона динамики вращения;
5. Исследование зависимости момента инерции от положения масс относительно оси вращения. Проверка теоремы Штейнера.

### **1.3 Объект исследования**

Равноускоренное вращательное движения

### **1.4 Метод исследования**

Косвенные измерения момента инерции крестовины с грузами при помощи маятника Обербека

## 1.5 Рабочие формулы и исходные данные

1. Второй закон Ньютона для груза, подвешенного на нити

$$ma = mg - T \quad (1)$$

2. Ускорение груза, подвешенного на нити

$$a = \frac{2h}{t^2} \quad (2)$$

3. Угловое ускорение

$$\varepsilon = \frac{2a}{d} \quad (3)$$

4. Момент силы натяжения нити

$$M = \frac{md}{2}(g - a) \quad (4)$$

5. Основной закон динамики вращения для крестовины

$$I\varepsilon = M - M_{\text{тр}} \quad (5)$$

6. Теорема Штейнера для крестовины

$$I = I_0 + 4m_{\text{ут}}R^2 \quad (6)$$

7. Расстояние между осью вращения и центром утяжелителя

$$R = l_1 + (n - 1)l_0 + \frac{1}{2}b \quad (7)$$

,

где  $l_1$  - расстояние от оси вращения до первой риски,  $n$  - номер риски,  $l_0$  - расстояние между соседними рисками,  $b$  - размер утяжелителя вдоль спицы

8. Среднеквадратичное отклонение среднего значения

$$\sigma_{\langle t \rangle} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (t_i - \langle t \rangle_N)^2} \quad (8)$$

9. Случайная погрешность

$$\Delta_{\langle t \rangle} = t_{\alpha, N} \cdot \sigma_{\langle t \rangle} \quad (9)$$

10. Абсолютная погрешность

$$\Delta_t = \sqrt{\Delta_{\langle t \rangle}^2 + \left(\frac{2}{3} \Delta_{\text{ит}}\right)^2} \quad (10)$$

11. Погрешность для косвенных измерений

$$\Delta_z = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial a} \Delta_a\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial b} \Delta_b\right)^2 + \dots} \quad (11)$$

Исходные данные:  $h_1 = 700$  мм,  $h_0 = 0$  мм,  $h = h_1 - h_0 = 700$  мм.

## 1.6 Измерительные приборы

Таблица 1 — Измерительные приборы

№ п/п	Наименование	Тип прибора	Используемый диапазон	Погрешность прибора $\Delta_{\text{ит}}$
1	Цифровой секундомер	цифровой	0-3600 с	0.005 с
2	Линейка	аналоговый	0-700 мм	0.5 мм

## 1.7 Схема установки

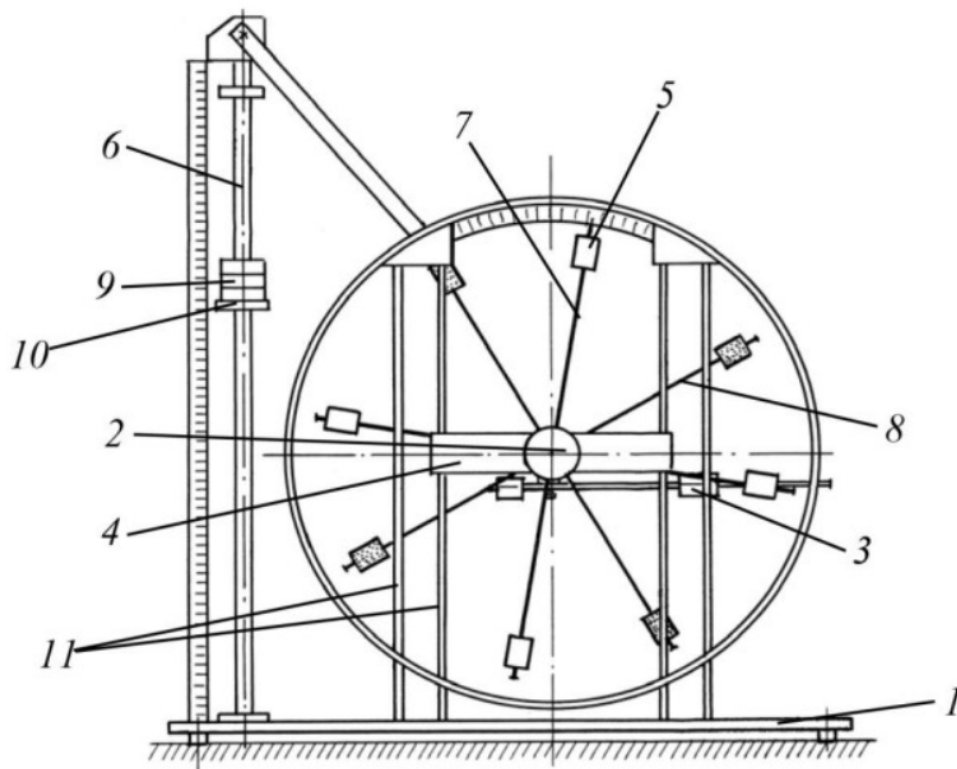


Рисунок 1 — Схема установки для проведения измерений

Числами на схеме обозначены:

1. Основание;
2. Рукоятка сцепления крестовин;
3. Устройства принудительного трения;
4. Поперечина;
5. Груз крестовины;
6. Трубчатая направляющая;
7. Передняя крестовина;
8. Задняя крестовина;
9. Шайбы каретки;
10. Каретка;
11. Система передних стоек.

Параметры установки:

- Масса каретки:  $(47,0 \pm 0,5)$  г
- Масса шайбы:  $(220,0 \pm 0,5)$  г
- Масса грузов на крестовине:  $(408,0 \pm 0,5)$  г
- Расстояние первой риски от оси:  $(57,0 \pm 0,5)$  мм
- Расстояние между рисками:  $(25,0 \pm 0,2)$  мм
- Диаметр ступицы:  $(46,0 \pm 0,5)$  мм
- Диаметр груза на крестовине:  $(40,0 \pm 0,5)$  мм
- Высота груза на крестовине:  $(40,0 \pm 0,5)$  мм

## 2 Выполнение лабораторной работы

### 2.1 Результаты прямых и косвенных измерений

Таблица 2 — Прямые измерения времени падения каретки с грузами, с

Масса груза, г	Положение утяжелителей					
	1 риска	2 риска	3 риска	4 риска	5 риска	6 риска
$m_1 = 267$	$t_1=5.84$	4.97	5.83	6.66	7.98	8.31
	$t_2=4.63$	5.20	6.23	6.82	7.68	8.76
	$t_3=4.38$	4.57	6.31	6.79	7.45	8.78
$m_2 = 487$	3.58	3.70	4.58	4.68	5.56	6.65
	3.35	3.70	4.48	4.85	6.20	6.48
	3.38	3.90	4.36	5.20	5.69	6.28
$m_3 = 707$	3.01	3.52	3.56	4.20	5.33	5.51
	2.75	3.28	3.74	4.18	5.21	5.32
	2.85	3.20	4.19	4.45	5.23	5.55
$m_4 = 927$	2.41	2.76	3.14	3.64	4.28	4.53
	2.48	2.75	3.01	3.63	4.71	5.08
	2.28	2.83	3.26	3.58	4.33	4.94



Таблица 3 — Значения среднего времени, линейного и углового ускорения, момента силы натяжения

Масса груза	№ риски	$t_{\text{ср}}, \text{с}$	$a, \text{м/с}^2$	$\varepsilon, \text{рад} / \text{с}^2$	$M, \text{Н}\cdot\text{м}$
$m_1$	1	4.95	0.057	2.48	0.060
	2	4.91	0.058	2.52	0.060
	3	6.12	0.037	1.61	0.060
	4	6.76	0.031	1.35	0.060
	5	7.70	0.024	1.04	0.060
	6	8.62	0.019	0.83	0.060
$m_2$	1	3.44	0.118	5.13	0.108
	2	3.77	0.099	4.30	0.109
	3	4.47	0.070	3.04	0.109
	4	4.91	0.058	2.52	0.109
	5	5.82	0.041	1.78	0.109
	6	6.47	0.033	1.43	0.109
$m_3$	1	2.87	0.170	7.39	0.157
	2	3.33	0.126	5.48	0.157
	3	3.83	0.095	4.13	0.158
	4	4.28	0.076	3.30	0.158
	5	5.26	0.051	2.22	0.159
	6	5.46	0.047	2.04	0.159
$m_4$	1	2.39	0.245	10.65	0.204
	2	2.78	0.181	7.87	0.205
	3	3.14	0.142	6.17	0.206
	4	3.62	0.107	4.65	0.207
	5	4.44	0.071	3.09	0.207
	6	4.85	0.060	2.61	0.208

Таблица 4 — Значения  $R$ ,  $R^2$ ,  $I$  для каждого положения грузов на крестовине

	1 риска	2 риска	3 риска	4 риска	5 риска	6 риска
$R$ , м	0.077	0.102	0.127	0.152	0.177	0.202
$R^2$ , м <sup>2</sup>	0.005929	0.010404	0.016129	0.023104	0.031329	0.040804
$I$ , Н·м	0.018	0.028	0.032	0.045	0.073	0.083

## 2.2 Окончательные результаты

Все расчеты выполнены для груза  $m_2$  с 1-й рисккой

$$\sigma_{\langle t \rangle} = 0.07 \text{ с}$$

$$\Delta_{\langle t \rangle} = 0.31 \text{ с}$$

$$\Delta_t = 0.30 \text{ с}$$

$$\Delta_a = \sqrt{\left(\frac{-4h}{t^3} \Delta_t\right)^2 + \left(\frac{2}{t^2} \Delta_h\right)^2} = 0.022 \text{ м/с}^2$$

$$\Delta_\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{2}{d} \Delta_a\right)^2 + \left(\frac{-2a}{d^2} \frac{2}{3} \Delta_d\right)^2} = 0.9 \text{ рад/с}^2$$

$$\Delta_M = \sqrt{\left(\frac{m_2 d (g-a)}{2} \frac{2}{3} \Delta_{m_2}\right)^2 + \left(\frac{m_2 (g-a)}{2} \frac{2}{3} \Delta_d\right)^2 + \left(\frac{-m_2 d}{2} \Delta_a\right)^2} = 0.001 \text{ Н·м}$$

$$\text{По МНК } I_0 = 0.00485 \text{ кг·м}^2, \Delta_{I_0} = 2S_{I_0} = 0.00009 \text{ кг·м}^2$$

$$\text{По МНК } m_{\text{YT}} = \frac{1}{4} \cdot 4m_{\text{YT}} = 0.49 \text{ кг}, \Delta_{m_{\text{YT}}} = \frac{S_m}{2} = 0.17 \text{ кг}$$

$$t = (3.44 \pm 0.30) \text{ с}; \varepsilon_t = 8\%; \alpha = 0.95$$

$$a = (0.119 \pm 0.022) \text{ м/с}^2; \varepsilon_a = 18\%; \alpha = 0.95$$

$$\varepsilon = (5.2 \pm 0.9) \text{ рад/с}^2; \varepsilon_\varepsilon = 17\%; \alpha = 0.95$$

$$M = (0.108 \pm 0.001) \text{ Н·м}; \varepsilon_M = 0.9\%; \alpha = 0.95$$

$$I_0 = (0.00485 \pm 0.00009) \text{ кг·м}^2; \varepsilon_{I_0} = 1.9\%; \alpha = 0.95$$

$$m_{\text{YT}} = (0.49 \pm 0.17) \text{ кг}; \varepsilon_{m_{\text{YT}}} = 35\%; \alpha = 0.95$$

## 2.3 Графики

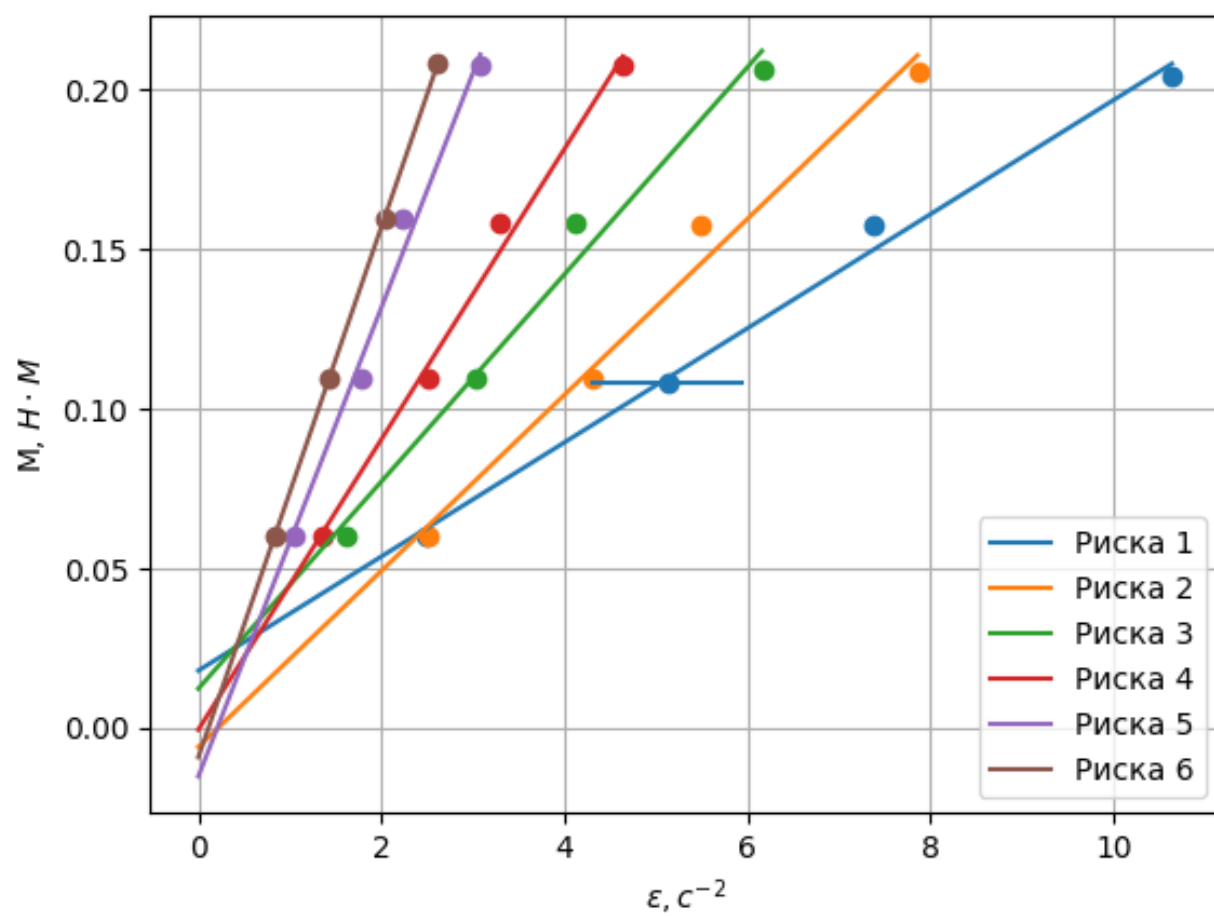


Рисунок 2 — График зависимости  $M$  от  $\varepsilon$

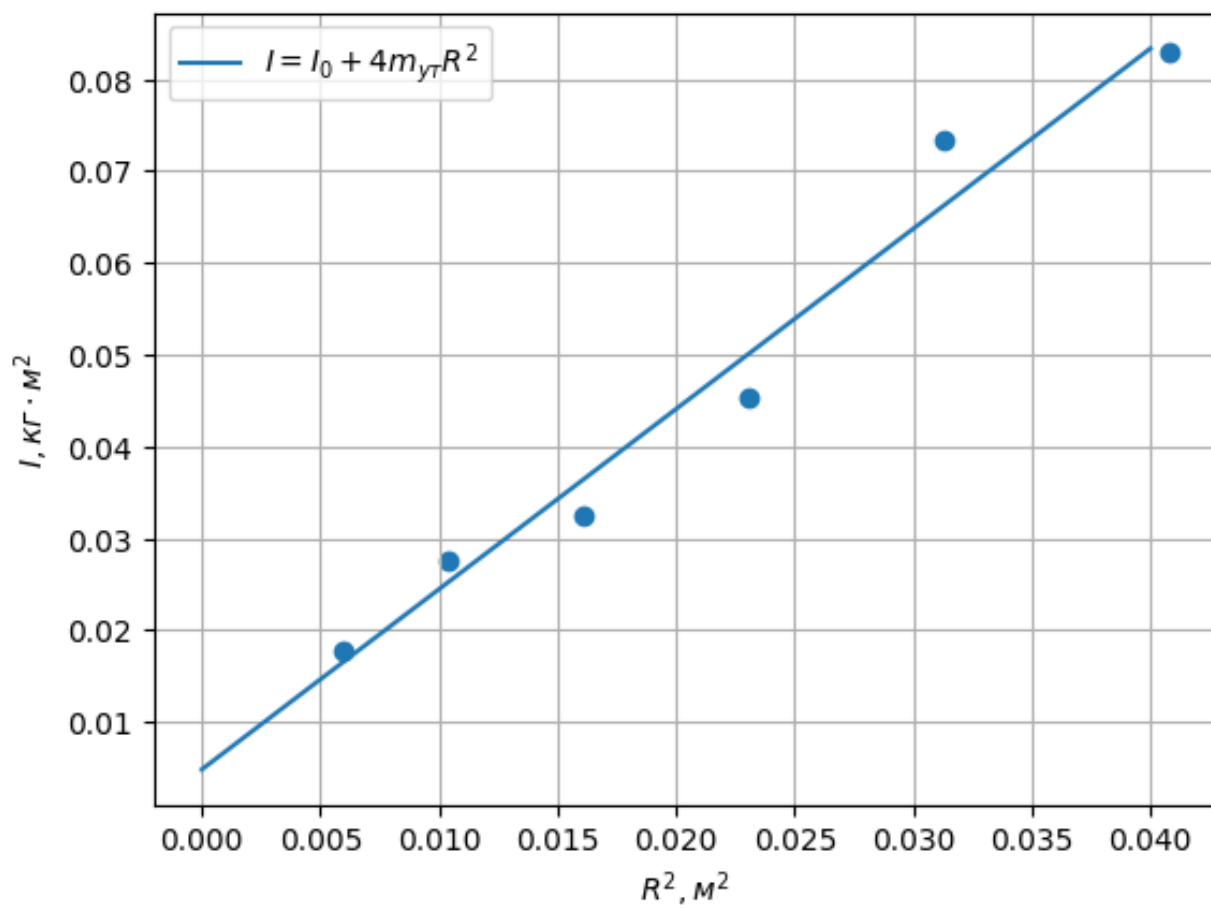


Рисунок 3 — График зависимости  $I$  от  $R^2$

### 3 Выводы и анализ результатов работы

В результате исследования был получен график 2 зависимости  $M = I\varepsilon + M_{\text{тр}}$ , который лежит в пределах погрешностей экспериментально полученных точек, а с увеличением расстояние между грузиками и осью вращения и, соответственно, увеличением момента инерции  $I$  крестовины увеличивается угол наклона графика. Следовательно, проверка основного закона динамики вращения была успешной.

Также мы убедились, что момент инерции крестовины зависит от положения масс относительно оси вращения. На графике 3 можно увидеть, что зависимость похожа на  $I = I_0 + 4m_{\text{ут}}R^2$

Заявленная масса грузов на крестовине 408 г входит в доверительный интервал для  $m_{\text{ут}}$ , что говорит о достоверности проведенных измерений.

## 4 Ответы на контрольные вопросы

### 1. Что такое инерция?

Инерция - это свойство тела сохранять свое состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока на него не будет действовать внешняя сила

2. Как в данной лабораторной работе угловое ускорение зависит от линейного ускорения груза?

В данной лабораторной работе угловое ускорение крестовины зависит от линейного ускорения груза по формуле  $\varepsilon = \frac{a}{R}$ , где  $\varepsilon$  - угловое ускорение,  $a$  - линейное ускорение груза,  $R$  - расстояние от оси вращения до груза

### 3. Как звучит основной закон динамики вращательного движения?

Основной закон динамики вращательного движения звучит как  $M = I\varepsilon$ , где  $M$  - момент силы,  $I$  - момент инерции,  $\varepsilon$  - угловое ускорение

### 4. О чём говорит теорема Штейнера?

Теорема Штейнера говорит о том, что момент инерции относительно оси, параллельной и проходящей через центр масс, равен сумме момента инерции относительно оси, проходящей через центр масс, и произведения массы тела на квадрат расстояния между осями

5. Моменты каких сил участвуют в основном законе динамики вращательного движения для данной работы?

В основном законе динамики вращательного движения для данной работы участвуют моменты силы натяжения нити, момент силы трения и момент инерции крестовины с утяжелителям

6. Как изменятся параметры установки, если увеличить расстояние утяжелителей от оси?

Если увеличить расстояние утяжелителей от оси, то момент инерции крестовины с утяжелителями также увеличится

### 7. Что такое момент инерции? Как его можно найти?

Момент инерции - это физическая величина, характеризующая инертность тела относительно его вращения вокруг определенной оси. Момент инерции можно найти, используя формулу  $I = mR^2$ , где  $m$  - масса тела,  $R$  - расстояние от оси вращения до массы

### 8. Что такое момент силы? Как его можно найти?

Момент силы - это векторная величина, равная произведению силы на плечо силы. Момент силы можно найти по формуле  $M = Fd$ , где  $F$  - сила,  $d$  - плечо силы

9. *В каких единицах измеряется момент инерции? В каких единицах измеряется момент силы?*

Момент инерции измеряется в  $[\text{кг} \cdot \text{м}^2]$ , момент силы -  $[\text{Н} \cdot \text{м}]$

10. *Как изменятся параметры установки, если увеличить массу утяжелителей?*

Если увеличить массу утяжелителей, то момент инерции крестовины с утяжелителями также увеличится, что повлияет на динамику вращательного движения