

## РАБОЧИЙ ПРОТОКОЛ И ОТЧЁТ

по лабораторной работе №1.04

«Исследование равноускоренного вращательного движения  
(маятник Обербека)»

**Выполнил:**

Хороших Дмитрий - Р3217

**Преподаватель:**

Коробков Максим Петрович

# Содержание

<b>1</b>	<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Результаты измерений и их обработка</b>	<b>4</b>
2.1	Прямые измерения . . . . .	4
2.2	Обработка прямых измерений . . . . .	5
2.3	Косвенные измерения . . . . .	5
2.4	Обработка косвенных измерений . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Вывод</b>	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>Приложение</b>	<b>9</b>

# 1. Введение

## 1. Цель работы:

Проверить основной закон динамики вращения и теорему Гюйгенса-Штейнера (зависимость момента инерции от положения масс относительно оси вращения).

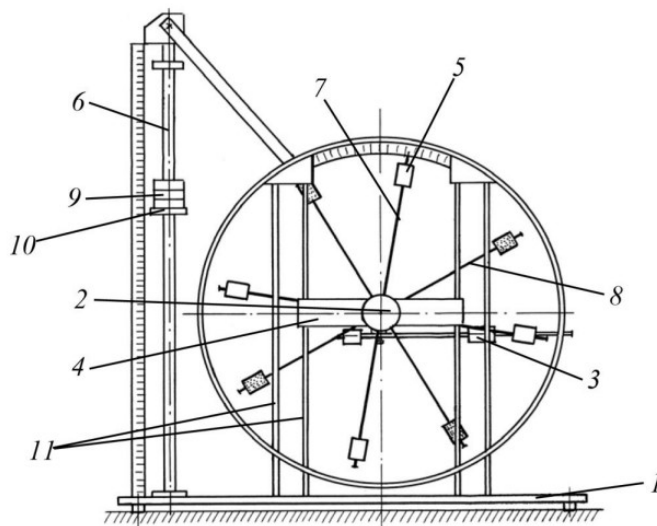
## 2. Задачи:

1. Измерить время падения груза при разной массе груза и разном положении утяжелителей на крестовине.
2. Рассчитать ускорение груза, угловое ускорение крестовины и момент силы натяжения нити.
3. Рассчитать момент инерции крестовины с утяжелителями и момент силы трения
4. Исследовать зависимость момента силы натяжения нити от углового ускорения, проверяя основной закон динамики вращения.
5. Исследовать зависимость момента инерции от положения масс относительно оси вращения, проверяя теорему Штейнера-Гюйгенса.

## 3. Объект исследования:

Маятник Обербека

## 4. Схема установки:



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

## 5. Метод экспериментального исследования:

Многократный прямой замер времени падения каретки с шайбами.

## 6. Рабочие формулы:

Ускорени каретки с шайбами:

$$a = \frac{2 * h}{t^2} \quad (1)$$

Угловое ускорение крестовины:

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

Момент силы натяжения нити:

$$M = \frac{m * d}{2} * (g - a) \quad (3)$$

Основной закон динамики вращения:

$$I\varepsilon = M - M_{тр} \quad (4)$$

Зависимость инерции крестовины от расстояния между центрами грузов и осью вращения (в соответствии с теоремой Штейнера):

$$I = I_0 + 4m_{вт}R^2 \quad (5)$$

## 7. Измерительные приборы:

№ п/п	Наименование	Тип	Используемый диапазон	Погрешность прибора
1	Секундомер смартфона	Электронный	0 - 999.99 сек	0.01 сек

## 2. Результаты измерений и их обработка

### 2.1. Прямые измерения

Для каждого числа шайб (от 1 до 4) на каретке и для каждого положения грузов на крестовине (от 1 до 6 рисок) проведём 3 замера времени падения каретки с высоты  $h = 700\text{мм}$ .

№	Грузов на каретке	$t_1$ риска, с	$t_2$ риска, с	$t_3$ риска, с	$t_4$ риска, с	$t_5$ риска, с	$t_6$ риска, с
1	$1 * m$	4.99	6.10	6.10	6.99	9.12	10.20
2	$1 * m$	4.96	5.56	6.36	7.10	8.93	10.15
3	$1 * m$	4.93	6.06	6.16	7.05	9.15	8.83
4	$2 * m$	3.70	4.18	5.03	5.72	5.93	7.18
5	$2 * m$	3.55	4.40	4.96	5.19	6.40	6.66
6	$2 * m$	3.72	4.53	5.03	5.83	5.92	7.23
7	$3 * m$	3.10	3.63	3.95	4.68	5.16	5.69
8	$3 * m$	3.20	3.35	4.06	4.42	5.00	5.82
9	$3 * m$	3.07	3.59	3.88	4.58	5.33	5.63
10	$4 * m$	2.40	3.06	3.56	4.03	4.40	5.00
11	$4 * m$	2.68	3.05	3.40	3.99	4.51	4.90
12	$4 * m$	2.62	3.03	3.42	3.88	4.37	5.10

Таблица 1: Результаты прямых измерений времени падения

## 2.2. Обработка прямых измерений

Найдём среднее время падения каретки для всех масс шайб и всех положений утяжелителей на крестовине. Также рассчитаем абсолютную погрешность среднего значения времени  $\Delta t$ .

Грузов на каретке		1 риска	2 риски	3 риски	4 риски	5 рисков	6 рисков
$1m$	$t_{\text{ср}}, \text{с}$	4.96	5.91	6.21	7.05	9.07	9.73
	$\Delta t, \text{с}$	0.07	0.75	0.34	0.14	0.30	1.93
$2m$	$t_{\text{ср}}, \text{с}$	3.66	4.37	5.01	5.58	6.08	7.02
	$\Delta t, \text{с}$	0.23	0.44	0.10	0.85	0.68	0.78
$3m$	$t_{\text{ср}}, \text{с}$	3.12	3.52	3.96	4.56	5.16	5.71
	$\Delta t, \text{с}$	0.17	0.38	0.23	0.33	0.41	0.24
$4m$	$t_{\text{ср}}, \text{с}$	2.57	3.05	3.46	3.97	4.43	5.00
	$\Delta t, \text{с}$	0.37	0.04	0.22	0.19	0.18	0.25

Таблица 2: Среднее время падения каретки и его абсолютная погрешность

## 2.3. Косвенные измерения

Используя найденные значения  $t_{\text{ср}}$  рассчитаем ускорение  $a$  груза, угловое ускорение  $\varepsilon$  крестовины, момент  $M$  силы натяжения нити а также их абсолютную погрешность.

Грузов на каретке		1 риска	2 риски	3 риски	4 риски	5 рисок	6 рисок
$1m$	$a, \text{ мм}/c^2$	56.91	40.13	36.34	28.19	17.03	14.80
	$\Delta a, \text{ мм}/c^2$	1.72	10.15	3.96	1.10	1.11	5.87
	$\varepsilon, \text{ рад}/c^2$	2.47	1.74	1.58	1.23	0.74	0.64
	$\Delta\varepsilon, \text{ рад}/c^2$	0.08	0.44	0.17	0.05	0.05	0.26
	$M, \text{ Н}^*_{\text{мм}}$	59.87	59.97	60.00	60.05	60.11	60.13
	$\Delta M, \text{ Н}^*_{\text{мм}}$	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69
$2m$	$a, \text{ мм}/c^2$	104.70	73.31	55.85	44.96	37.83	28.38
	$\Delta a, \text{ мм}/c^2$	13.22	14.74	2.24	13.69	8.47	6.33
	$\varepsilon, \text{ рад}/c^2$	4.55	3.19	2.43	1.95	1.64	1.23
	$\Delta\varepsilon, \text{ рад}/c^2$	0.58	0.64	0.10	0.60	0.37	0.28
	$M, \text{ Н}^*_{\text{мм}}$	108.66	109.02	109.21	109.33	109.41	109.52
	$\Delta M, \text{ Н}^*_{\text{мм}}$	1.24	1.24	1.23	1.24	1.24	1.24
$3m$	$a, \text{ мм}/c^2$	143.51	112.78	89.13	67.33	52.51	42.89
	$\Delta a, \text{ мм}/c^2$	15.54	24.07	10.14	9.62	8.33	3.62
	$\varepsilon, \text{ рад}/c^2$	6.24	4.90	3.88	2.93	2.28	1.86
	$\Delta\varepsilon, \text{ рад}/c^2$	0.68	1.05	0.44	0.42	0.36	0.16
	$M, \text{ Н}^*_{\text{мм}}$	157.12	157.62	158.01	158.36	158.60	158.76
	$\Delta M, \text{ Н}^*_{\text{мм}}$	1.78	1.81	1.78	1.79	1.79	1.78
$4m$	$a, \text{ мм}/c^2$	212.51	150.83	116.94	88.98	71.45	56.00
	$\Delta a, \text{ мм}/c^2$	60.62	3.81	14.64	8.66	5.91	5.56
	$\varepsilon, \text{ рад}/c^2$	9.24	6.56	5.08	3.87	3.11	2.43
	$\Delta\varepsilon, \text{ рад}/c^2$	2.64	0.18	0.64	0.38	0.26	0.24
	$M, \text{ Н}^*_{\text{мм}}$	204.54	205.86	206.58	207.18	207.55	207.88
	$\Delta M, \text{ Н}^*_{\text{мм}}$	2.63	2.31	2.33	2.33	2.33	2.33

Таблица 3: Характеристики движения груза и крестовины

## 2.4. Обработка косвенных измерений

Для каждого положения утяжелителей на крестовине в координатах  $M - \varepsilon$  нанесём точки зависимостей  $M(\varepsilon)$ .

С помощью метода наименьших квадратов (МНК) рассчитаем момент инерции  $I$  и момент силы трения  $M_{\text{тр}}$  а также их абсолютную погрешность. Перенесём полученные значения в таблицу ?? и построим прямые  $M = M_{\text{тр}} + I\varepsilon$  на рисунке 1.

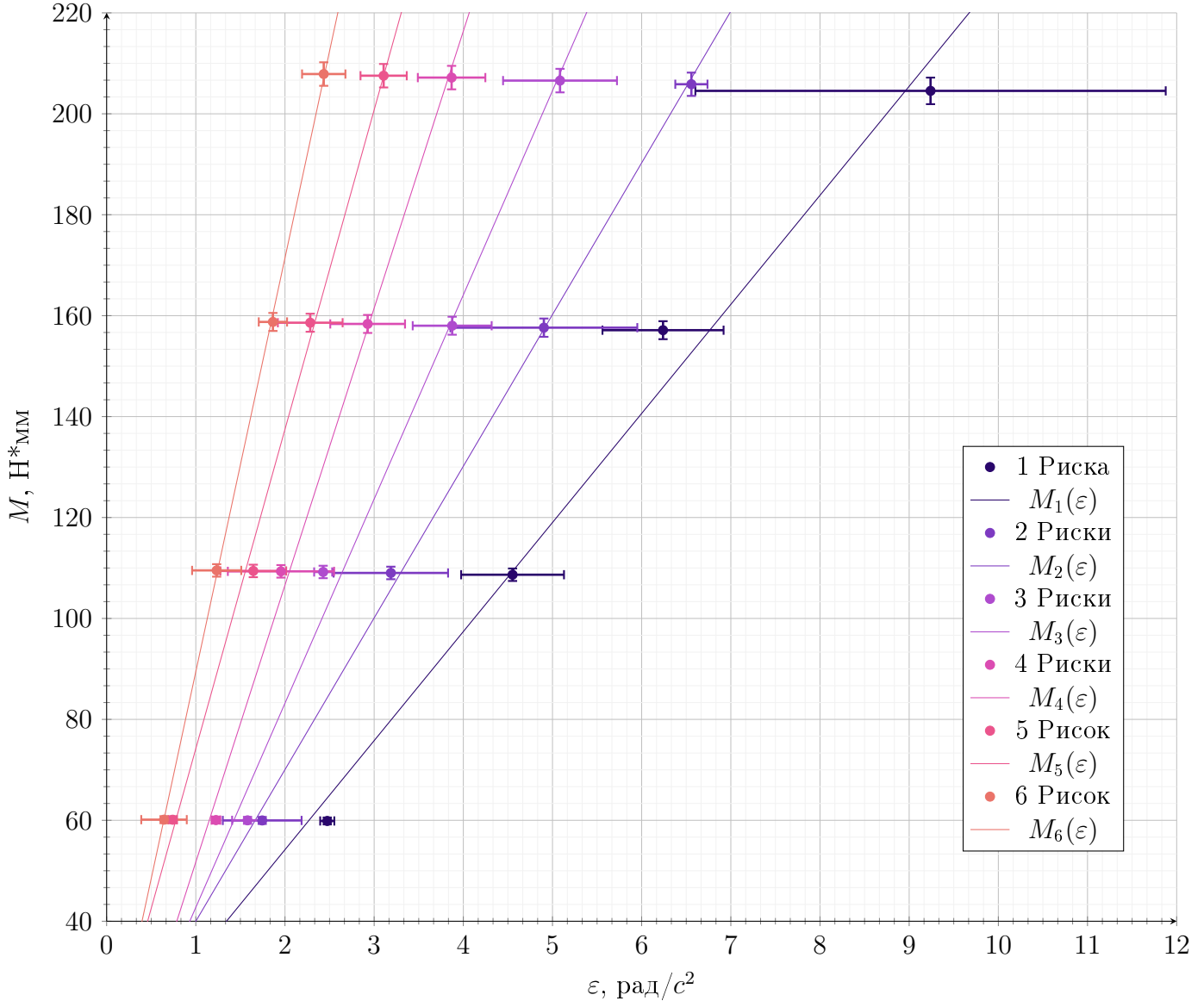


Рис. 1: Графики зависимости  $M$  от  $\varepsilon$  для различных положений утяжелителей на крестовине.

Число рисков	$I$	$\Delta I$	$M_{\text{тр}}$	$\Delta M_{\text{тр}}$
1	21.61	3.90	10.95	23.97
2	30.06	1.66	9.93	7.43
3	40.46	5.70	2.29	19.99
4	54.89	4.93	-3.16	13.24
5	63.29	5.59	10.91	11.90
6	81.99	2.09	7.46	3.53

Таблица 4: Момент инерции и момент силы трения, полученные по МНК.

	1 риска	2 риски	3 риски	4 риски	5 рисков	6 рисков
$I, \text{г} \cdot \text{м}^2$	21.61	30.06	40.46	54.89	63.29	81.99
$R, \text{мм}$	77	102	127	152	177	202
$R^2, \text{мм}^2$	5929	10404	16129	23104	31329	40804

Таблица 5: Момент инерции и расстояние от центра крестовины до утяжелителей.

Рассчитаем расстояния  $R$  от центра крестовины до утяжелителей и внесём в таблицу 2.4 значения  $I, R, R^2$ .

На основании полученных значений в координатах  $I - R^2$  на рисунке 2 отметим экспериментальные точки зависимости  $I(R^2)$ .

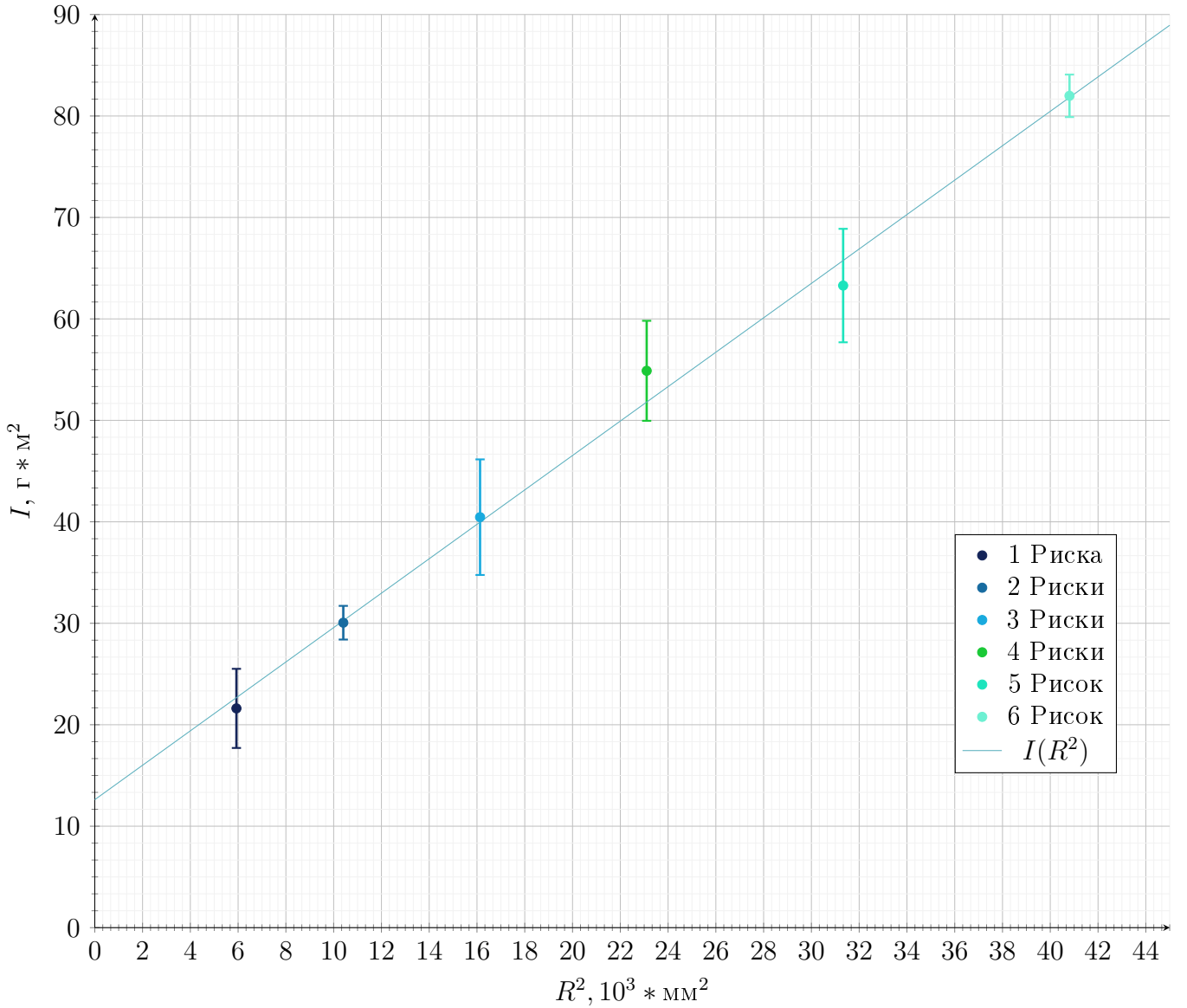


Рис. 2: График зависимости  $I$  от  $R^2$ .

При помощи МНК из формулы (5) определяем значения  $I_0, m_{yT}$  и с учётом погрешности:

$$I_0 = 12.61 \pm 3.4 \text{ г} \cdot \text{м}^2$$

$$m_{yT} = 424.04 \pm 35.05 \text{ г}$$

Заметим, что реальное значение  $m_{yT}$  равно:

$$m_{yT} = 408 \pm 0.5 \text{ г}$$



### 3. Вывод

Таким образом, в ходе выполнения лабораторной работы удалось, измерив время падения каретки, соединённой с маятником Обербека, при различных грузах и положениях утяжелителей, подтвердить:

1. Линейную зависимость момента силы натяжения от углового ускорения (Основной закон динамики вращения).

На рисунке 1 легко видеть, что, несмотря на высокую погрешность, зависимость  $M(\varepsilon)$  линейна, что сходится с теоретическими выводами.

2. Квадратичную зависимость момента инерции от расстояния между массами и осью вращения (Теорема Гюйгенса-Штейнера).

На рисунке 2 график, построенный в осях  $I-R^2$ , представляет из себя прямую. Следовательно, зависимость  $I(R)$  - квадратична.

Правильность заключения подтверждается, помимо теоретических выводов, и фактом получения близкого к реальному значению массы утяжелителя  $m_{\text{ут}}$ .

### 4. Приложение

Проект этой лабораторной работы, содержащий файлы с Python-кодом, использованным для вычислений и исходные TeX-файлы доступен по ссылке: <https://github.com/Dimankarp/Studies/tree/main/Physics/Lab2>.