
Группа Р3210, Р3208 К работе допущен _____

Студенты Караганов Павел, Рябов Георгий, Работа выполнена _____
Кузнецов Андрей

Преподаватель Агабабаев В.А. Отчет принят _____

Рабочий протокол и отчет по лабораторной работе №1.03

Изучение центрального соударения двух тел. Проверка второго Закона Ньютона.

1. Цель работы.

- Исследование упругого и неупругого центрального соударения тел на примере тележек, движущихся с малым трением.
- Исследование зависимости ускорения тележки от приложенной силы и массы тележки.

2. Задачи, решаемые при выполнении работы.

- 1) Измерение скоростей тележек до и после соударения.
- 2) Измерение скорости тележки при ее разгоне под действием постоянной силы.
- 3) Исследование потерь импульса и механической энергии при упругом и неупругом соударении двух тележек.
- 4) Исследование зависимости ускорения тележки от приложенной силы и массы тележки. Проверка второго закона Ньютона.

3. Объект исследования.

- 1) Упругие и неупругие соударения тележек.
- 2) Движение тележки под действием постоянной силы.

4. Метод экспериментального исследования.

- Замер таких величин как: масса тележек, скорость тележек.

5. Рабочие формулы и исходные данные.

- $\delta_p = \frac{\Delta p_x}{p_{10x}} = \frac{(p_{1x} + p_{2x})}{p_{10x}} - 1$ - Значение относительного изменения импульса для абсолютно упругого соударения
- $\delta_W = \frac{\Delta W_K}{W_{k0}} = \frac{m_1 v_{1x}^2 + m_2 v_{2x}^2}{m_1 v_{10x}^2} - 1$ - Значение относительного изменения кинетической энергии для абсолютно упругого соударения
- $\overline{\delta_p} = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_{p_i}}{N}$ – Среднее значение относительного изменения импульса для абсолютно упругого соударения
- $\overline{\delta_W} = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_{W_i}}{N}$ - Среднее значение относительного изменения кинетической энергии для абсолютно упругого соударения
- $\Delta \overline{\delta_p} = t_{\alpha, N} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\delta_{p_i} - \overline{\delta_p})^2}{N(N-1)}}$ – Погрешность среднего значения относительного изменения импульса для а. у. с.
- $\Delta \overline{\delta_W} = t_{\alpha, N} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\delta_{W_i} - \overline{\delta_W})^2}{N(N-1)}}$ – Погрешность среднего значения относительного изменения импульса для а. н. с.
- $t_{\alpha, N} = 2.78$ – коэффициент Стьюдента для доверительной вероятности $\alpha_{\text{доп}} = 0,95$ для 5 измерений
- $\delta_W^{(\text{Э})} = \frac{\Delta W_k}{W_{k0}} = \frac{(m_1 + m_2) v_2^2}{m_1 v_{10}^2} - 1$ - Экспериментальное значение относительного изменения механической энергии
- $\delta_W^{(T)} = -\frac{W_p}{\frac{m_1 v_{10}^2}{2}} = -\frac{m_2}{m_1 + m_2}$ - Теоретическое значение относительного изменения механической энергии
- $a = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2(x_2 - x_1)}$ – Ускорение тележки
- $T = m(g - a)$ – Сила натяжения нити

6. Измерительные приборы.

Наименование средства измерения	Предел измерений	Цена деления	Класс точности	Погрешность
Линейка на рельсе	1.30 м	1 см/дел	-	0.5 см
ПКЦ-3 в режиме измерения скорости	9.99 м/с	0.01 м/с	-	0.01 м/с
Лабораторные весы	250 г	0.01 г	-	0.01 г

7. Схема установки (перечень схем, которые составляют Приложение 1).

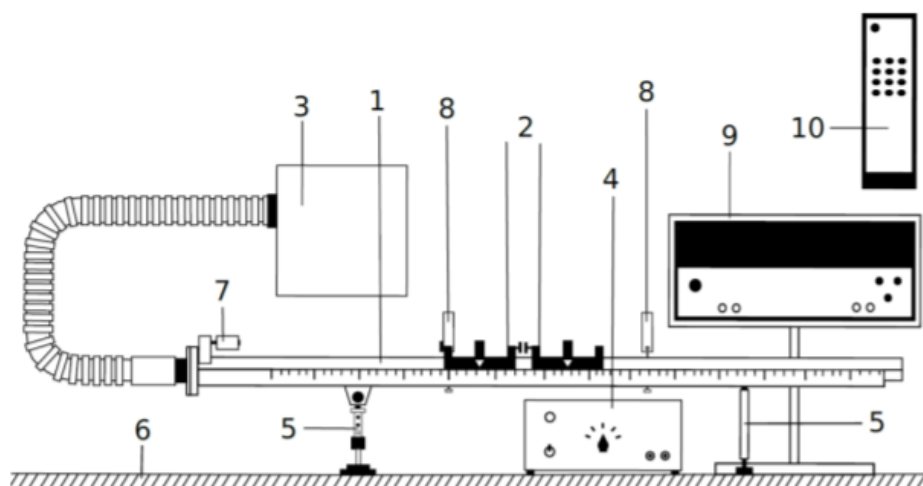


Рис. 1 Общий вид экспериментальной установки

1. Рельс с сантиметровой шкалой на лицевой стороне
2. Сталкивающиеся тележки
3. Воздушный насос
4. Источник питания ВС 4-12
5. Опоры рельса
6. Опорная плоскость (поверхность стола)
7. Фиксирующий электромагнит
8. Оптические ворота
9. Цифровой измерительный прибор ПКЦ-3
10. Пульт дистанционного управления прибором ПКЦ-3

8. Результаты прямых измерений и их обработки (таблицы, примеры расчетов).

Таблица 1. Результаты измерения величин во время центрального упругого соударения

№ опыта	m ₁ , г	m ₂ , г	v _{10x} , м/с	v _{1x} , м/с	v _{2x} , м/с
1	53,4	50,09	0,52	0,07	0,32
2			0,55	0,07	0,33
3			0,53	0,07	0,48
4			0,52	0,07	0,32
5			0,52	0,07	0,48

Исходные данные: $m_1 = 0,0534 \text{ кг}$; $m_2 = 0,05009 \text{ кг}$.

Средние скорости: $v_{10x} = 0,52 \text{ м/с}$; $v_{1x} = 0,07 \text{ м/с}$; $v_{2x} = 0,32 \text{ м/с}$.

Импульсы:

$$p_{10x} = 0,0534 \cdot 0,52 = 0,02776 \text{ кг} \cdot \text{м/с} = 27,77 \text{ мН} \cdot \text{с}$$

$$p_{1x} = 0,0534 \cdot 0,07 = 0,0037 \text{ кг} \cdot \text{м/с} = 3,74 \text{ мН} \cdot \text{с}$$

$$p_{2x} = 0,05009 \cdot 0,32 = 0,01603 \text{ кг} \cdot \text{м/с} = 16,03 \text{ мН} \cdot \text{с}$$

Относительное

изменение

импульса:

$$\delta_p = \left(\frac{3,74 + 16,03}{27,77} \right) - 1 \approx -28,8 \%$$

Относительное

изменение

энергии:

$$W_{\text{нач}} = \frac{0,0534 \cdot 0,52^2}{2} \approx 0,00722 \text{ Дж}$$

$$W_{\text{кон}} = \frac{(0,0534 \cdot 0,07^2) + (0,05009 \cdot 0,32^2)}{2} \approx 0,00270 \text{ Дж}$$

$$\delta_w = \frac{0,00270}{0,00722} - 1 \approx -62,7 \%$$

Таблица 2. Результаты измерения величин во время центрального упругого соударения с утяжелителем

№ опыта	m ₁ , г	m ₂ , г	v _{10x} , м/с	v _{1x} , м/с	v _{2x} , м/с
1	53,4	101,0	0,54	-0,10	0,22
2			0,53	-0,08	0,19
3			0,51	-0,10	0,31
4			0,47	-0,11	0,10
5			0,51	-0,10	0,18

Таблица 3. Результаты измерения величин во время центрального неупругого соударения

№ опыта	m ₁ , г	m ₂ , г	v ₁₀ , м/с	v, м/с
1	54,3	52,4	0,46	0,21
2			0,52	0,25
3			0,51	0,22

4			0,48	0,23
5			0,52	0,25

Таблица 4. Результаты измерения величин во время центрального неупругого соударения с утяжелителем

№ опыта	m ₁ , г	m ₂ , г	v ₁₀ , м/с	v, м/с
1	53,4	103,6	0,51	0,17
2			0,51	0,13
3			0,50	0,13
4			0,49	0,15
5			0,50	0,13

Таблица 5. Результаты измерения величин во время движения тележки с шайбами на подвесе

Масса тележки M₁= 53,4 г

№ опыта	Состав гирьки	m, г	v ₁ , м/с	v ₂ , м/с
1	подвеска	1,8	0,24	0,59
2	подвеска + одна шайба	2,6	0,32	0,68
3	подвеска + две шайбы	3,5	0,36	0,79
4	подвеска + три шайбы	4,3	0,36	0,83
5	подвеска + четыре шайбы	5,2	0,34	0,83
6	подвеска + пять шайб	6,0	0,46	1,08
7	подвеска + шесть шайб	6,9	0,44	1,12

Расчёт ускорения и силы натяжения:

Исходные данные: $m = 1,8 \text{ г} = 0,0018 \text{ кг}$

$v_1 = 0,24 \text{ м/с}$, $v_2 = 0,59 \text{ м/с}$, $s = 0,4 \text{ м}$

Ускорение тележки: $a = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2s} = \frac{0,59^2 - 0,24^2}{2 \cdot 0,4} = 0,363 \text{ м/с}^2$

Сила натяжения нити: $T = m(g - a) = 0,0018 \cdot (9,8 - 0,363) = 0,01699 \text{ Н}$

Таблица 6. Результаты измерения величин во время движения утяжелённой тележки с шайбами на подвесе

Масса тележки M₁= 104,2 г

№ опыта	Состав гирьки	m, г	v ₁ , м/с	v ₂ , м/с
1	подвеска	1,8	0,18	0,44
2	подвеска + одна шайба	2,6	0,23	0,50
3	подвеска + две шайбы	3,5	0,23	0,54
4	подвеска + три шайбы	4,3	0,30	0,70
5	подвеска + четыре шайбы	5,2	0,31	0,73
6	подвеска + пять шайб	6,0	0,35	0,79

7	подвеска + шесть шайб	6,9	0,37	0,87
---	-----------------------	-----	------	------

Расчёт ускорения и силы натяжения:

Исходные данные: $m = 1,8 \text{ г} = 0,0018 \text{ кг}$

$v_1 = 0,18 \text{ м/с}, \quad v_2 = 0,44 \text{ м/с}, \quad s = 0,4 \text{ м}$

Ускорение тележки: $a = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2s} = \frac{0,44^2 - 0,18^2}{2 \cdot 0,4} = 0,206 \text{ м/с}^2$

Сила натяжения нити: $T = m(g - a) = 0,0018 \cdot (9,8 - 0,206) = 0,01727 \text{ Н}$

9. Расчет результатов косвенных измерений (таблицы, примеры расчетов).

. Таблица 7. Измерение импульса и потери энергии в 1 опыте

№ опыта	p_{10x} , мН*с	p_{1x} , мН*с	p_{2x} , мН*с	δ_p	δ_w
1	27,77	3,74	16,03	-0,29	-0,63
2	29,37	3,74	16,53	-0,31	-0,65
3	28,30	3,74	24,04	-0,02	-0,21
4	27,77	3,74	16,03	-0,29	-0,63
5	27,77	3,74	24,04	0,00	-0,18
			Средние значения	-0,18	-0,46
			Доверительные интервалы	$\Delta \bar{\delta}_p = 0,19$	$\Delta \bar{\delta}_w = 0,30$

Относительное

изменение

импульса:

$$\delta_p = \frac{p_{1x} + p_{2x}}{p_{10x}} - 1 = \left(\frac{3,74 + 16,03}{27,77} \right) - 1 \approx -28,8\%$$

Относительное изменение энергии:

$$\delta_w = \frac{m_1 v_{1x}^2 + m_2 v_{2x}^2}{m_1 v_{10x}^2} - 1 = \frac{0,00270}{0,00722} - 1 \approx -62,7\%$$

Среднее значение относительного изменения импульса:

$$\bar{\delta}_p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{p_{1x_i} + p_{2x_i}}{p_{10x_i}} - 1 \right) = \frac{-0,29 - 0,31 - 0,02 - 0,29 + 0,00}{5} = -0,182$$

Среднее значение относительного изменения кинетической энергии:

$$\bar{\delta}_w = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{m_1 v_{1x_i}^2 + m_2 v_{2x_i}^2}{m_1 v_{10x_i}^2} - 1 \right) = \frac{-0,63 - 0,65 - 0,21 - 0,63 - 0,18}{5} = -0,46$$

Таблица 8. Измерение импульса и потери энергии в 2 опыте

№ опыта	$p_{10x}, \text{мН}\cdot\text{с}$	$p_{1x}, \text{мН}\cdot\text{с}$	$p_{2x}, \text{мН}\cdot\text{с}$	δ_p	δ_w
1	28,84	-5,34	22,22	-0,41	-0,65
2	28,30	-4,27	19,19	-0,47	-0,73
3	27,23	-5,34	31,31	-0,05	-0,26
4	25,10	-5,87	10,10	-0,83	-0,86
5	27,23	-5,34	18,18	-0,53	-0,73
			Средние значения	-0,46	-0,65
			Доверительные интервалы	$\Delta\bar{\delta}_p = 0,35$	$\Delta\bar{\delta}_w = 0,28$

Таблица 9. Измерение импульса и потери энергии в 3 опыте

№ опыта	$p_{10}, \text{мН}\cdot\text{с}$	$p, \text{мН}\cdot\text{с}$	δ_p	$\delta_w^{(\text{э})}$	$\delta_w^{(T)}$
1	24,98	22,35	-0,11	-0,59	-0,49
2	28,24	26,61	-0,06	-0,55	
3	27,69	23,42	-0,15	-0,64	
4	26,06	24,48	-0,06	-0,55	
5	28,24	26,61	-0,06	-0,55	
		Средние значения	-0,09	-0,58	
		Доверительные интервалы	$\Delta\bar{\delta}_p = 0,05$	$\Delta\bar{\delta}_w^{(\text{э})} = 0,05$	

Среднее значение относительного изменения импульса:

$$\bar{\delta}_p = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_{p_i}}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{p_{1i}}{p_{10i}} - 1 \right) = \frac{-0,41 - 0,47 - 0,05 - 0,83 - 0,53}{5} = -0,46 \text{ кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Среднее значение относительного изменения кинетической энергии:

$$\bar{\delta}_w^{(\text{э})} = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_{w_i}^{(\text{э})}}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{(m_1 + m_2)v_{2i}^2}{m_1 v_{10i}^2} - 1 \right) = \frac{-0,59 - 0,55 - 0,64 - 0,55 - 0,55}{5} = -0,58 \text{ Дж}$$

Экспериментальное значение относительного изменения механической энергии:

$$\delta_w^{(T)} = -\frac{m_2}{m_1 + m_2} = -\frac{52,14}{54,3 + 52,14} = -0,49 \text{ Дж}$$

Таблица 10. Измерение импульса и потери энергии в 4 опыте

№ опыта	$p_{10}, \text{мН}\cdot\text{с}$	$p, \text{мН}\cdot\text{с}$	δ_p	$\delta_w^{(\text{э})}$	$\delta_w^{(T)}$
1	27,23	26,69	-0,02	-0,67	-0,66
2	27,23	20,41	-0,25	-0,81	
3	26,70	20,41	-0,24	-0,80	
4	26,17	23,55	-0,10	-0,72	
5	26,70	20,41	-0,24	-0,80	
		Средние значения	-0,17	-0,76	
		Доверительные интервалы	$\Delta\bar{\delta}_p = 0,13$	$\Delta\bar{\delta}_w^{(\text{э})} = 0,08$	

Таблица 11. Измерения значения ускорения тележки под действием силы натяжения нити

№ опыта	m, г	a, м/с ²	T, мН
1	1,8	0,22	17,3
2	2,6	0,28	24,8
3	3,5	0,38	33,0
4	4,3	0,43	40,4
5	5,2	0,44	48,8
6	6,0	0,73	54,5
7	6,9	0,82	62,1

Для массы подвеса равной 1,8 г получено:

$$a = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2(x_2 - x_1)} \approx 0.223 \frac{м}{с^2}$$

$$T = m(g - a) \approx 17,27 мН$$

Таблица 12. Измерения значения ускорения утяжеленной тележки под действием силы натяжения нити

№ опыта	m, г	a, м/с ²	T, мН
1	1,8	0,12	17,5
2	2,6	0,15	25,1
3	3,5	0,18	33,7
4	4,3	0,31	40,9
5	5,2	0,34	49,3
6	6,0	0,39	56,6
7	6,9	0,48	64,4

Таблицы 13 и 14. Расчёты линейной зависимости между силой натяжения нити и ускорением тележки, полученные с помощью МНК, для 5-ого и 6-ого опытов

M_1	68,2 г	F_{mp1}	8,0 мН
$\sigma(M_1)^2$	119,3	$\sigma(F_{mp1})^2$	31,6
$\sigma(M_1)$	7,7	$\sigma(F_{mp1})$	5,6
ΔM_1	28,1	ΔF_{mp1}	14,5

M_2	114,1 г	F_{tp2}	9,0 мН
$\sigma(M_2)^2$	137,2	$\sigma(F_{tp2})^2$	12,9
$\sigma(M_2)$	11,7	$\sigma(F_{tp2})$	3,6
ΔM_2	30,1	ΔF_{tp2}	9,2

$$\bar{a} = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^{n=7} a_i \text{ — среднее значение ускорения}$$

$$\bar{T} = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^{n=7} T_i \text{ — среднее значение силы натяжения нити}$$

$$b = \frac{\sum(a_i - \bar{a})(T_i - \bar{T})}{\sum(a_i - \bar{a})^2} - \text{угловой коэффициент прямой}$$

$$k = \bar{T} - b\bar{a} - \text{свободный коэффициент прямой}$$

$$d_i = T_i - (k + ba_i) - \text{параметр}$$

$$D = \sum(a_i - \bar{a})^2 - \text{параметр}$$

$$\sigma_b^2 = \frac{1}{D} \frac{\sum d_i^2}{7-2} - \text{среднеквадратичное отклонение углового коэффициента}$$

$$\sigma_k^2 = \left(\frac{1}{7} + \frac{\bar{a}^2}{D}\right) \frac{\sum d_i^2}{7-2} - \text{среднеквадратичное отклонение свободного коэффициента}$$

$$\Delta_b = t_{\alpha, N} \cdot \sigma_b - \text{границы доверительного интервала углового коэффициента}$$

$$\Delta_k = t_{\alpha, N} \cdot \sigma_k - \text{границы доверительного интервала свободного коэффициента}$$

Расчёты для опыта 5:

$$\bar{a} = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 a_i = \frac{3,30}{7} \approx 0,47, \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

$$\bar{T} = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 T_i = \frac{280,9}{7} \approx 40,13, \text{мН}$$

$$M_1 = b = \frac{\sum(a_i - \bar{a})(T_i - \bar{T})}{\sum(a_i - \bar{a})^2} = \frac{20,45}{0,30} \approx 68,2, \text{г}$$

$$F_{\text{тп1}} = k = \bar{T} - b\bar{a} = 40,13 - 68,2 \cdot 0,47 \approx 8,0, \text{мН}$$

$$\sum d_i^2 = \sum (T_{i\text{измеренное}} - T_{i\text{расчётное}})^2 \approx 179 \text{ (сумма квадратов отклонений точек от прямой)}$$

$$D = \sum(a_i - \bar{a})^2 = 0,30, \frac{\text{м}^2}{\text{с}^4}$$

$$\sigma_b^2 = \frac{1}{D} \frac{\sum d_i^2}{7-2} = \frac{1}{0,30} \cdot \frac{179}{5} \approx 119,3$$

$$\sigma_k^2 = \left(\frac{1}{7} + \frac{\bar{a}^2}{D}\right) \frac{\sum d_i^2}{7-2} = \left(0,14 + \frac{0,47^2}{0,30}\right) \cdot 35,8 \approx 31,6$$

$$\Delta_b = 2,57 \cdot \sqrt{\sigma_b^2} = 2,57 \cdot 10,9 \approx 28,1$$

$$\Delta_k = 2,57 \cdot \sqrt{\sigma_k^2} = 2,57 \cdot 5,6 \approx 14,5$$

10. Расчет погрешностей измерений (для прямых и косвенных измерений).

Погрешности средних значений относительного изменения импульса и кинетической энергии для первого опыта (погрешности для 2, 3 и 4 опытов находятся по тем же формулам):

$$\begin{aligned}\Delta \bar{\delta}_p &= t_{\alpha, N} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\delta_{p_i} - \bar{\delta}_p)^2}{N(N-1)}} \\ &= 2,78 \cdot \sqrt{\frac{(-0,29 + 0,18)^2 + (-0,31 + 0,18)^2 + (-0,02 + 0,18)^2 + (-0,29 + 0,18)^2 + (0,00 + 0,18)^2}{20}} \\ &= 2,78 \cdot \sqrt{\frac{0,0121 + 0,0169 + 0,0256 + 0,0121 + 0,0324}{20}} = 2,78 \cdot \sqrt{0,004955} \approx 0,195\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta \bar{\delta}_W &= t_{\alpha, N} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\delta_{W_i} - \bar{\delta}_W)^2}{N(N-1)}} \\ &= 2,78 \cdot \sqrt{\frac{(-0,63 + 0,46)^2 + (-0,65 + 0,46)^2 + (-0,21 + 0,46)^2 + (-0,63 + 0,46)^2 + (-0,18 + 0,46)^2}{20}} \\ &= 2,78 \cdot \sqrt{\frac{0,0289 + 0,0361 + 0,0625 + 0,0289 + 0,0784}{20}} = 2,78 \cdot \sqrt{0,01174} \approx 0,30\end{aligned}$$

11. Графики.

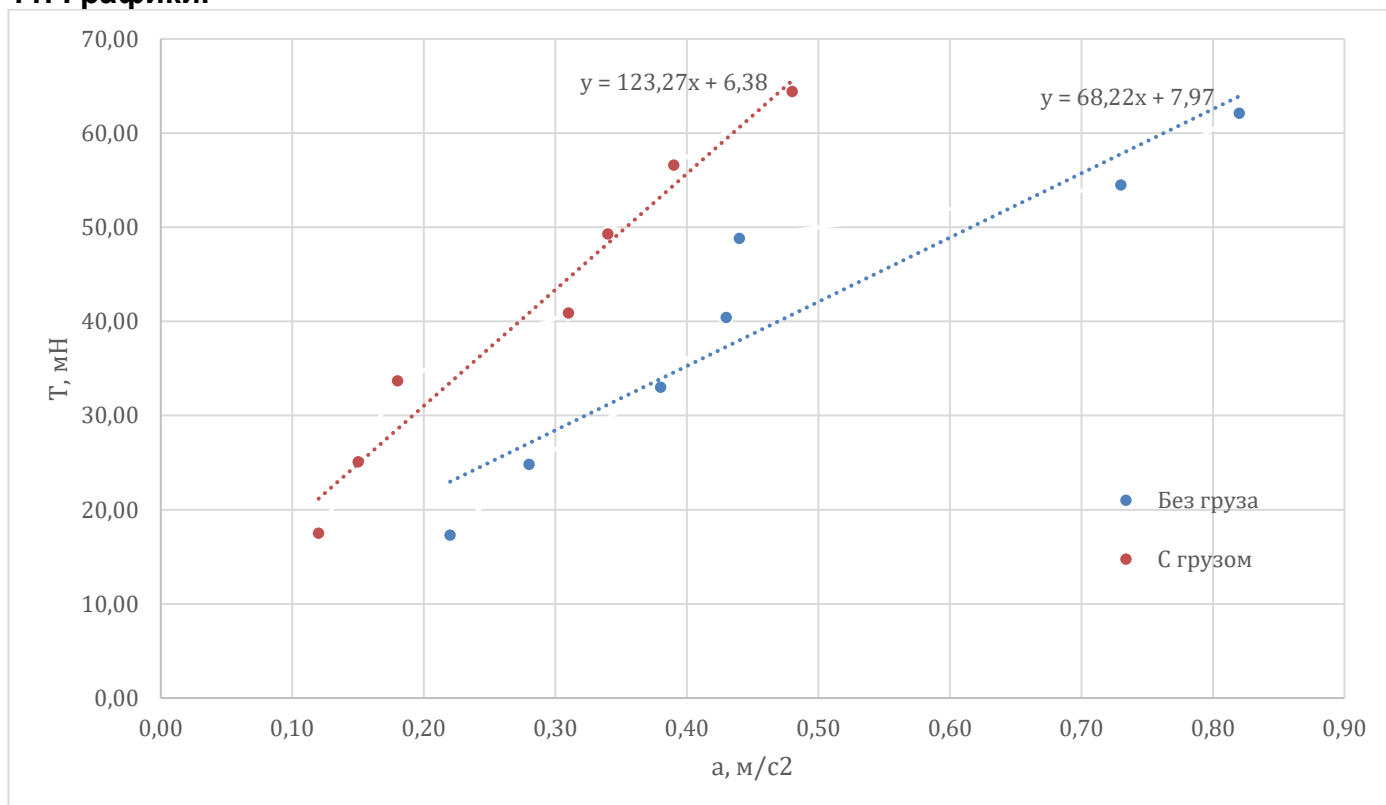


График 1. Линейная зависимость между силой натяжения нити и ускорением для тележки без утяжелителя и с ним

12. Окончательные результаты.

Все погрешности представлены для доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ при коэффициенте Стьюдента $t_{0,95,5} = 2,78$

Доверительные интервалы для относительных изменений импульса и энергии при упругом соударении двух легких тележек и соударении легкой тележки с утяжеленной

$\overline{\delta_p}, \overline{\delta_W}$

1) $\overline{\delta_p} = -0,18 \pm 0,19; \quad \varepsilon = 106\%$

$$\overline{\delta_W} = -0,46 \pm 0,30; \quad \varepsilon = 65\%$$

2) $\overline{\delta_p} = -0,46 \pm 0,35; \quad \varepsilon = 76\%$

$$\overline{\delta_W} = -0,65 \pm 0,28; \quad \varepsilon = 43\%$$

Доверительные интервалы для относительных изменений импульса и энергии при неупругом соударении двух легких тележек и соударении легкой тележки с утяжеленной

$\delta_p, \delta_W^{(\varepsilon)}$

1) $\delta_p = -0,09 \pm 0,05; \quad \varepsilon = 56\%$

$$\delta_W^{(\varepsilon)} = -0,58 \pm 0,05; \quad \varepsilon = 9\%$$

2) $\delta_p = -0,17 \pm 0,13; \quad \varepsilon = 76\%$

$$\delta_W^{(\varepsilon)} = -0,76 \pm 0,08; \quad \varepsilon = 11\%$$

Теоретическое значение относительного изменения механической энергии

$$\delta_W^{(T)}(3) = -0,49$$

$$\delta_W^{(T)}(4) = -0,66$$

Масса M_1 неутяжеленной тележки и доверительный интервал этой величины

$$M_1 = 68,2 \pm 28,1 \text{ г}; \quad \varepsilon \approx 41\%$$

Масса M_1 утяжеленной тележки и доверительный интервал этой величины

$$M_2 = 114,1 \pm 30,1 \text{ г}; \quad \varepsilon \approx 26\%$$

13. Выводы и анализ результатов работы.

1) Закон сохранения импульса и энергии (Упругое соударение):

- Для двух легких тележек (Опыт 1):

- Импульс: $\delta_p = -0,18 \pm 0,19$

- Доверительный интервал (от -0,37 до +0,01) включает ноль, что формально подтверждает закон сохранения импульса в пределах погрешности измерений. Однако средняя потеря составляет около 18%.

- Энергия: $\delta_W = -0,46 \pm 0,30$

- Потери энергии составили 46%, что очень много для "упругого" удара. Это указывает на то, что в реальности соударение было далеко от

идеально упругого (наличие остаточной деформации или значительное трение).

- **Для легкой и утяжеленной тележки (Опыт 2):**

- **Импульс:** $\delta_p = -0,46 \pm 0,35$

Наблюдается значительная потеря импульса (46%). Даже с учетом большой погрешности закон выполняется плохо.

- **Энергия:** $\delta_W = -0,65 \pm 0,28$

- Потери энергии достигли 65%. Это подтверждает вывод о том, что реальный процесс столкновения в данной установке сопровождается большими трение и остаточную деформацию.

2) Неупругое соударение (Сравнение с теорией):

- **Для двух легких тележек (Опыт 3):**

- **Эксперимент:** $\delta_W^{(э)} = -0,58 \pm 0,05$ (потеря 58%)

- **Теория:** $\delta_W^{(т)} = -0,49$ (потеря 49%)

- Теоретическое значение не попадает в доверительный интервал экспериментального. Экспериментальные потери энергии оказались выше теоретических на ~9%, что объясняется работой сил трения скольжения во время сцепки тележек.

- **Для легкой и утяжеленной тележки (Опыт 4):**

- **Эксперимент:** $\delta_W^{(э)} = -0,76 \pm 0,08$ (потеря 76%)

- **Теория:** $\delta_W^{(т)} = -0,66$ (потеря 66%)

- Здесь также экспериментальные потери превышают теоретические на ~10%, что вновь указывает на влияние неучтенных сил сопротивления.

3) Проверка второго закона Ньютона (Метод МНК):

- **Масса лёгкой тележки (M_1):**

- Рассчитано по графику: $M_1 = 68,2 \pm 28,1$ г.

- Реальное значение (взвешивание): $53,4 \pm 0,01$ г.

- Реальное значение (53,4) попадает в доверительный интервал (40,1 ... 96,3). Второй закон Ньютона выполняется. Завышенное среднее значение массы может объясняться влиянием момента инерции вращающихся колес ("динамическая добавка" к массе).

- **Масса утяжеленной тележки (M_2):**

- Рассчитано по графику: $M_2 = 114,1 \pm 30,1$ г.

- Реальное значение (взвешивание): $103,6 \pm 0,01$ г.

- Реальное значение попадает в доверительный интервал. Второй закон Ньютона подтвержден.

- **Сила трения:**

- Методом наименьших квадратов была оценена сила трения в системе, которая составила порядка 8 – 9 мН

4) Основные причины расхождений:

- **Неидеальность упругого удара:** Очень высокие потери энергии в опытах 1 и 2 свидетельствуют о том, что пружинящие буферы тележек поглощают часть энергии.

- **Сила трения:** В обоих случаях неупругого удара потери энергии оказались выше теоретических, что объясняется работой против сил трения (которые мы оценили в ~9 мН).

- **Погрешности измерений:** В опытах с упругим ударом наблюдается очень большой разброс данных (широкие доверительные интервалы), что связано с

чувствительностью метода к малым изменениям скоростей и сложностью фиксации точных значений на коротких промежутках времени.

14. Дополнительные задания.

15. Выполнение дополнительных заданий.

16. Замечания преподавателя (*исправления, вызванные замечаниями преподавателя, также помещают в этот пункт*).

- Примечание:**
1. Пункты 1-6,8-13 Протокола-отчета **обязательны** для заполнения.
 2. Необходимые исправления выполняют непосредственно в протоколе-отчете.
 3. При ручном построении графиков рекомендуется использовать миллиметровую бумагу.
 4. Приложения 1 и 2 вкладывают в бланк протокола-отчета.