

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №50

### ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ВОЗДУШНОМ ТРЕКЕ

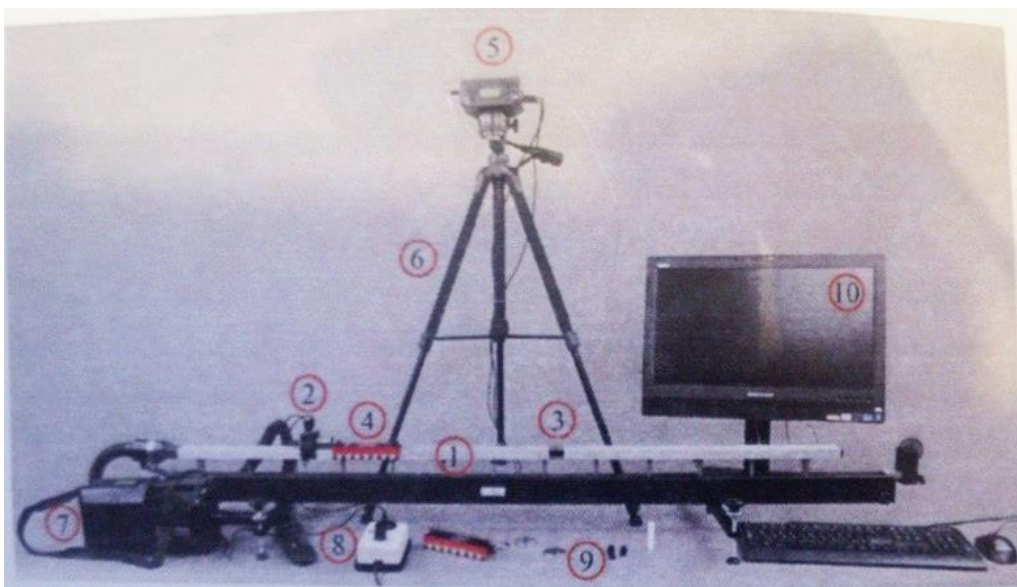
Поляков Даниил, Б07-ФЗ

**Цель работы:** экспериментальное изучение кинематики прямолинейного движения, проверка трёх законов Ньютона.

#### Решаемые задачи:

- Исследование кинематических характеристик движения тела с постоянной скоростью;
- Исследование кинематических характеристик движения тела с постоянным ускорением;
- Исследование зависимости ускорения тела от величины равнодействующей силы;
- Исследование зависимости ускорения тела от его массы при постоянной величине равнодействующей силы.

#### Установка и оборудование:



1 – Воздушный трек, оборудованный удерживающим электромагнитом 2 и стопором 3;

4 – тележка для воздушного трека;

5 – видеорегистратор на треноге 6;

7 – нагнетатель воздуха с регулятором мощности 8;

9 – наборы пластмассовых грузиков (1г) и стальных грузов (100г);

10 – персональный компьютер с установленной программой «VideoCom Motions»;

+ нить для привязывания пластмассовых грузиков к тележке;

+ весы.

## Расчётные формулы:

- Средняя скорость тела при прямолинейном движении:

$$v = \frac{S_0}{t_0}$$

$S_0$  – длина пройденного участка;  
 $t_0$  – время прохождения участка.

- Ускорение тела при прямолинейном движении по наклонной поверхности:

$$a = g \cdot \sin \alpha \approx g \cdot \frac{h}{L}$$

$g$  – ускорение свободного падения;  
 $h$  – суммарная толщина досок, на которые опирается трек;  
 $L$  – расстояние между опорами трека.

- Ускорение тела при прямолинейном движении под действием силы тяжести подвешенных грузов:

$$a = g \cdot \frac{m}{M}$$

$g$  – ускорение свободного падения;  
 $m$  – масса подвешенных грузов;  
 $M$  – суммарная масса тележки и грузов.

- Ускорение тела при прямолинейном движении, измеренное вручную:

$$a_0 = \frac{2S_0}{t_0^2}$$

$S_0$  – длина пройденного участка;  
 $t_0$  – время прохождения участка.

- Приближенная формула для коэффициента сопротивления движению:

$$\mu = \frac{m}{M} - \frac{a}{g}$$

$m$  – масса подвешенных грузов;  
 $M$  – суммарная масса тележки и грузов;  
 $a$  – ускорение тележки;  
 $g$  – ускорение свободного падения.

- Формулы силы тяжести грузов, действующей на тележку:

$$F = mg$$

$m$  – масса подвешенных грузов;  
 $g$  – ускорение свободного падения.

- Формулы для вычисления погрешностей:

- Абсолютная погрешность серии измерений:

$$\Delta x = \sqrt{t^2 \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)} + (\Delta x)_B^2}$$

$n$  – количество измерений;  
 $t$  – коэффициент Стьюдента (равен 1.4 при 3-х измерениях);  
 $\Delta x_B$  – приборная погрешность.

- Абсолютная погрешность косвенных измерений:

$$\Delta f(x_1, x_2, \dots) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \cdot \Delta x_2\right)^2 + \dots}$$

## Метод проведения измерений

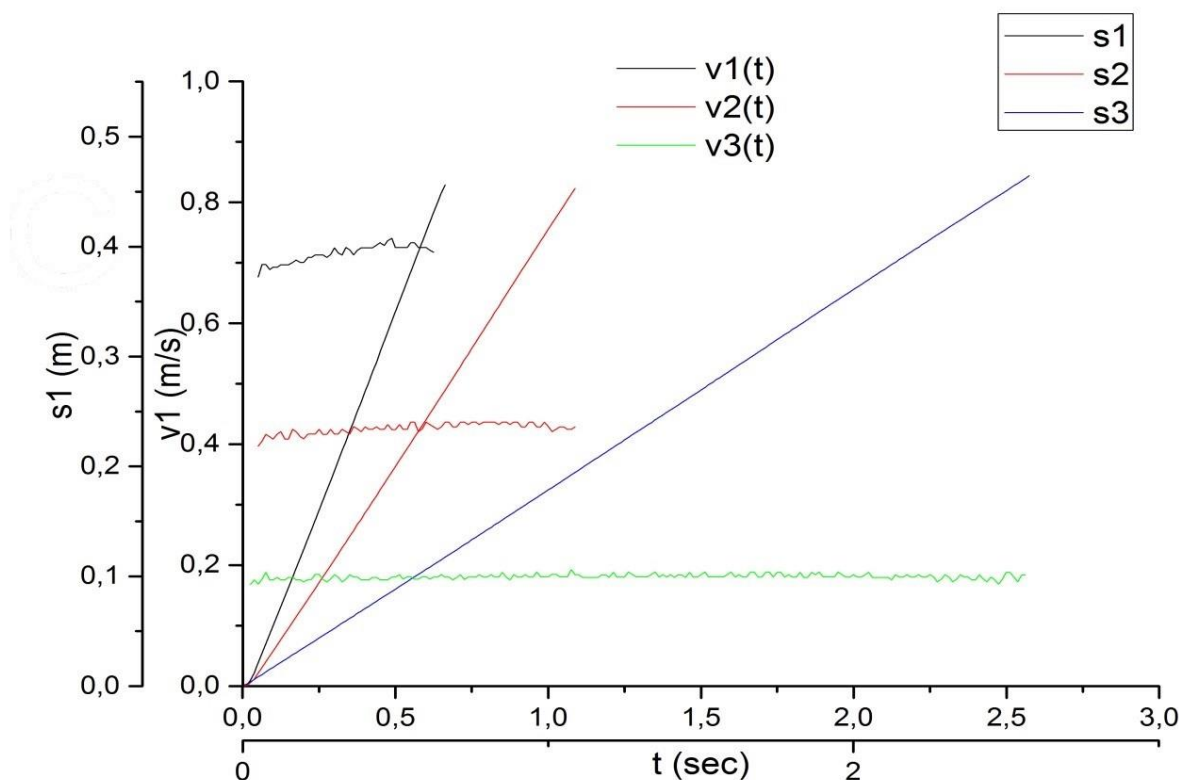
1. Разместим трек горизонтально. В начало трека поставим тележку с дополнительным диском массой 100 г. Толкнём тележку и запустим измерение её координаты от времени. Получим график зависимости  $S(t)$ . Затем повторим измерения ещё два раза, придавая тележке другую начальную скорость. Во время последнего измерения также воспользуемся секундомером телефона для ручного нахождения скорости тела  $t_0$ . Для этого отметим на треке положение, по пересечении которого секундомер будет остановлен, и измерим расстояние  $S_0$  от начального положения тележки до данной метки.
2. Измерим линейкой расстояние  $L$  между опорами трека. Измерим толщину  $d_1$  и  $d_2$  первой и второй дощечки, которые будут подкладываться под трек. Подложим первую дощечку под трек. Разместим в начале (в верхней точке) трека тележку с диском массой 100 г. так, чтобы она удерживалась электромагнитом. Запустим измерения в программе - магнит перестанет удерживать тележку. Получим график движения тележки  $S(t)$ . Повторим ещё два таких же измерения при таком же наклоне трека. Во время последнего измерения, как и в п.1, сделаем метку на расстоянии  $S_0$  от начала трека и измерим время до пересечения этой метки тележкой с помощью секундомера. Затем подложим вторую дощечку под трек, тем самым увеличив его угол наклона и высоту  $h$ . Повторим 3 измерения, включая ручное измерение, при данном положении трека.
3. Разместим на тележке один стальной диск массой 100 г. и 4 пластмассовых грузика массой по 1 г. Измерим массу  $M$  получившейся тележки на весах. Затем снимем с тележки один грузик и привяжем его к концу нити. Установим тележку на трек возле магнита и прикрепим к ней свободный конец нити с грузиком. Второй конец нити перебросим через колёсико, расположенное в конце воздушного трека. Запустим измерение и получим график движения тележки  $S(t)$ . Повторим измерения при тех же условиях ещё два раза, попутно вручную измеряя время движения тележки. Затем снимем с тележки ещё один грузик и прикрепим его к грузику, свисающему на нити с колёсика. Повторим три измерения с новыми грузами. Затем повторим такие же серии измерений при 3-ёх и 4-ёх грузах.
4. Разместим на тележке четыре стальных диска массой по 100 г. и один грузик массой 1 г. Измерим массу  $M$  получившейся тележки на весах. Затем снимем с тележки грузик и привяжем его к концу нити. Установим тележку на трек возле магнита и прикрепим к ней свободный конец нити с грузиком. Второй конец нити перебросим через колёсико, расположенное в конце воздушного трека. Запустим измерение и получим график движения тележки  $S(t)$ . Затем снимем с тележки один стальной груз, повторно взвесим тележку и снова измерим движение тележки. Повторим те же действия и для тележки с двумя и одним стальным грузом.

## Таблицы и обработка данных

Расстояния, которые измерялись вручную, измерены линейкой с ценой деления, равной 1 мм. Погрешность таких измерений вычислялась как сумма цены деления и погрешности отсчитывания, т.е.  $\Delta S = 2$  мм. Время, измеренное вручную, измерялось с помощью секундомера на телефоне. В качестве погрешности взято время реакции человека, т.е.  $\Delta t = 0.2$  с. Погрешность значений, измеренных штангенциркулем, состоит из цены деления и погрешности отсчёта:  $\Delta d = 0.05 + 0.05 = 0.10$  мм. Погрешность измерения массы тележки и грузиков  $\Delta m = \Delta M = 0.01$  г.

### 1. Исследование кинематических характеристик движения тела с постоянной скоростью.

Графики зависимости координаты и скорости от времени:



Во время третьего запуска помимо автоматического измерения проводилось и ручное измерение времени с помощью секундомера. Длина участка трека, на котором замерялось время, равна  $444 \pm 2$  мм, измеренное время равно  $2.7 \pm 0.2$  с. Вычислим скорость и сравним её с полученной автоматически:

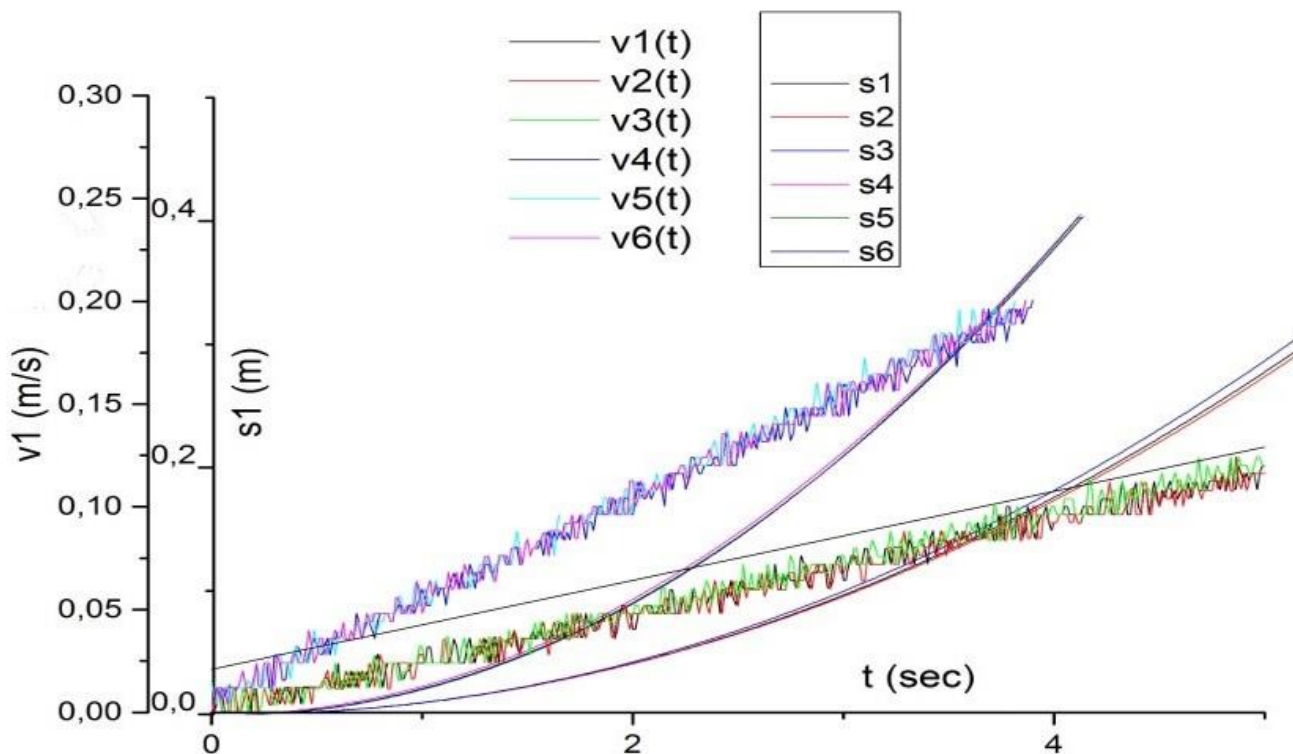
$$v = \frac{S_0}{t_0} = 0.164 \pm 0.012 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Машинное значение средней скорости равно  $0.18 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Полученные значения скоростей близки по значению.

## 2. Исследование кинематических характеристик движения тела с постоянным ускорением.

В таблице указаны измеренные размеры трека и дощечек и теоретические значения ускорений исходя из данных размеров, вычисленные по формуле  $a \approx g \cdot \frac{h}{L}$ .

$L, \text{мм}$	$d_1, \text{мм}$	$d_2, \text{мм}$	$S_0, \text{мм}$	$a_{1T}, \text{м/с}^2$	$a_{2T}, \text{м/с}^2$
$983 \pm 2$	$2.45 \pm 0.10$	$2.45 \pm 0.10$	$410 \pm 2$	$0.024 \pm 0.001$	$0.049 \pm 0.002$



Аппроксимируем кривые скорости и найдём ускорение как тангенс угла наклона.

$h_1 = d_1 = 2.45 \pm 0.10 \text{ мм}$			$h_2 = d_1 + d_2 = 4.90 \pm 0.20 \text{ мм}$		
$a_{11}, \text{м/с}^2$	$a_{12}, \text{м/с}^2$	$a_{13}, \text{м/с}^2$	$a_{21}, \text{м/с}^2$	$a_{22}, \text{м/с}^2$	$a_{23}, \text{м/с}^2$
0.0242	0.0243	0.0245	0.0515	0.0525	0.0519
$a_1 = 0.0243 \pm 0.0001$			$a_2 = 0.0520 \pm 0.0004$		

Для 3 опыта в обоих положениях трека измерение времени также производилось вручную:

$$t_{01} = 6.1 \pm 0.2 \text{ с}; t_{02} = 3.9 \pm 0.2 \text{ с}$$

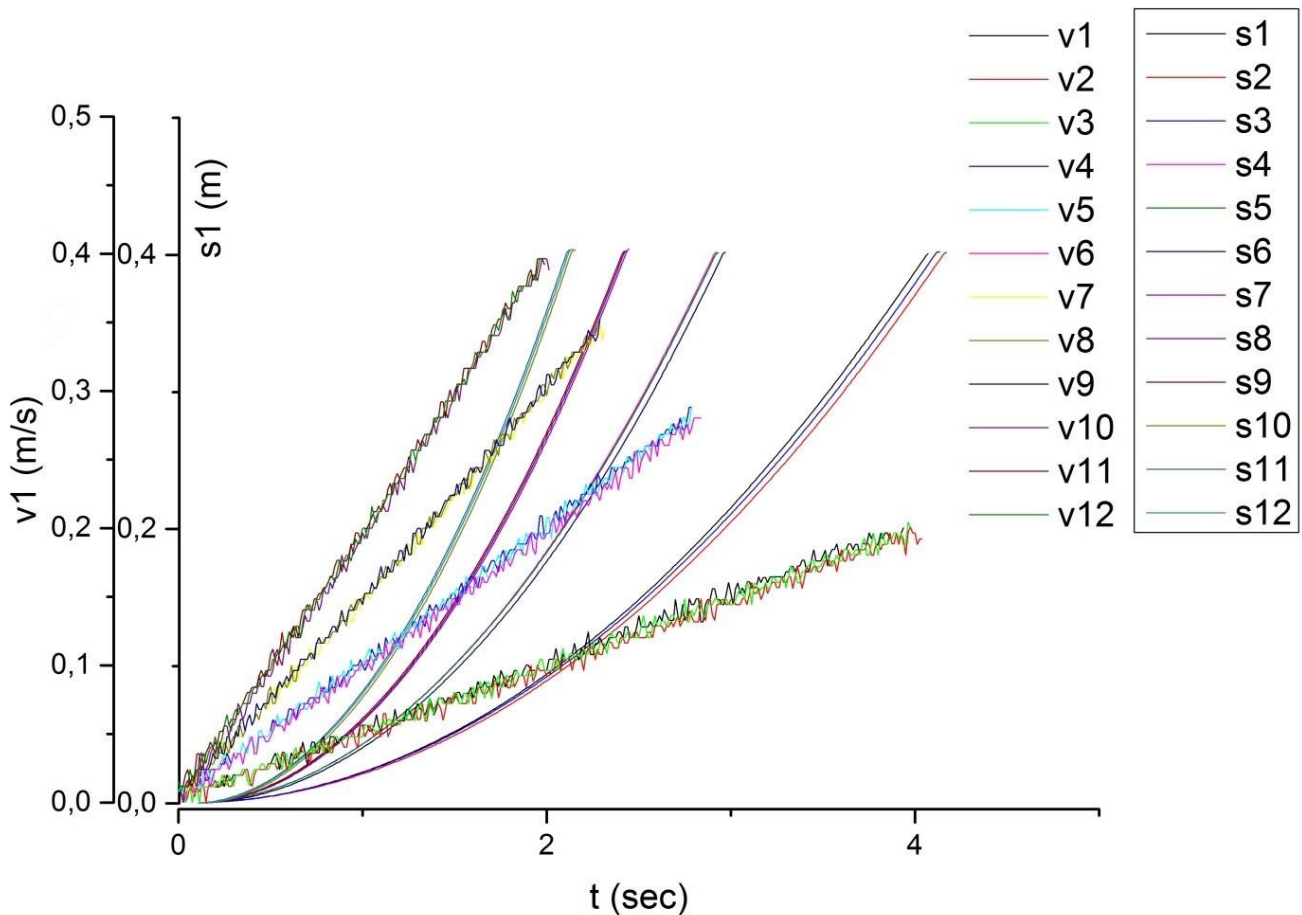
$$a_0 = \frac{2S_0}{t_0^2}$$

$$\Delta a_0 = \sqrt{\left(\frac{\partial a_0}{\partial S_0} \cdot \Delta S_0\right)^2 + \left(\frac{\partial a_0}{\partial t_0} \cdot \Delta t_0\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{2}{t_0^2} \cdot \Delta S_0\right)^2 + \left(\frac{4S_0}{t_0^3} \cdot \Delta t_0\right)^2}$$

$$a_{01} = 0.0220 \pm 0.0014 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}; a_{02} = 0.054 \pm 0.006 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

Теоретическое значение ускорения  $a_{1T}$ , машинное  $a_1$  и полученное ручным измерением  $a_{01}$  достаточно близки друг к другу. Разница между  $a_{2T}$ ,  $a_2$  и  $a_{02}$  более существенная. Это может быть связано с тем, что тележка испытывает небольшое ускоряющее давление потока воздуха, создаваемого на треке.

### 3. Исследование зависимости ускорения тела от величины равнодействующей силы.



Масса укомплектованной тележки:  $M = 195.66 \pm 0.01$  г. Значения машинного ускорения так же, как и в предыдущем номере, найдены аппроксимацией скорости движения тележки.

Теоретическое значение ускорения рассчитаны по формуле  $a_T = g \cdot \frac{m}{M}$ .

Длина промежутка при ручном нахождении ускорения:  $S_0 = 397 \pm 2$  мм.

Коэффициент сопротивления движению находится по формуле  $\mu = \frac{m}{M} - \frac{\langle a \rangle}{g}$ .

$n$ , кол. грузов	$a_T$ , м/с <sup>2</sup>	$a$ , м/с <sup>2</sup>	$\langle a \rangle$ , м/с <sup>2</sup>	$t_{0i}$ , с	$t_0$ , с	$a_0$ , м/с <sup>2</sup>	$\mu$ , 10 <sup>-4</sup>
1	0.0501 ±0.0005	0.0499	0.0490	4.0	4.0±0.2	0.050 ±0.005	1.2
		0.0482		4.0			
		0.0488		3.9			
2	0.1003 ±0.0005	0.1000	0.0992	2.8	2.7±0.2	0.106 ±0.016	1.1
		0.0994		2.7			
		0.0982		2.7			
3	0.1504 ±0.0005	0.1497	0.1501	2.3	2.3±0.2	0.15 ±0.03	0.32
		0.1505		2.2			
		0.1500		2.3			
4	0.2006 ±0.0005	0.1983	0.1981	1.9	1.9±0.2	0.23 ±0.05	2.5
		0.1981		1.9			
		0.1980		1.8			

Формулы, по которым вычислялись погрешности:

$$\Delta a_T = \sqrt{\left(\frac{\partial a_T}{\partial m} \cdot \Delta m\right)^2 + \left(\frac{\partial a_T}{\partial M} \cdot \Delta M\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{g}{M} \cdot \Delta m\right)^2 + \left(g \cdot \frac{m}{M^2} \cdot \Delta M\right)^2}$$

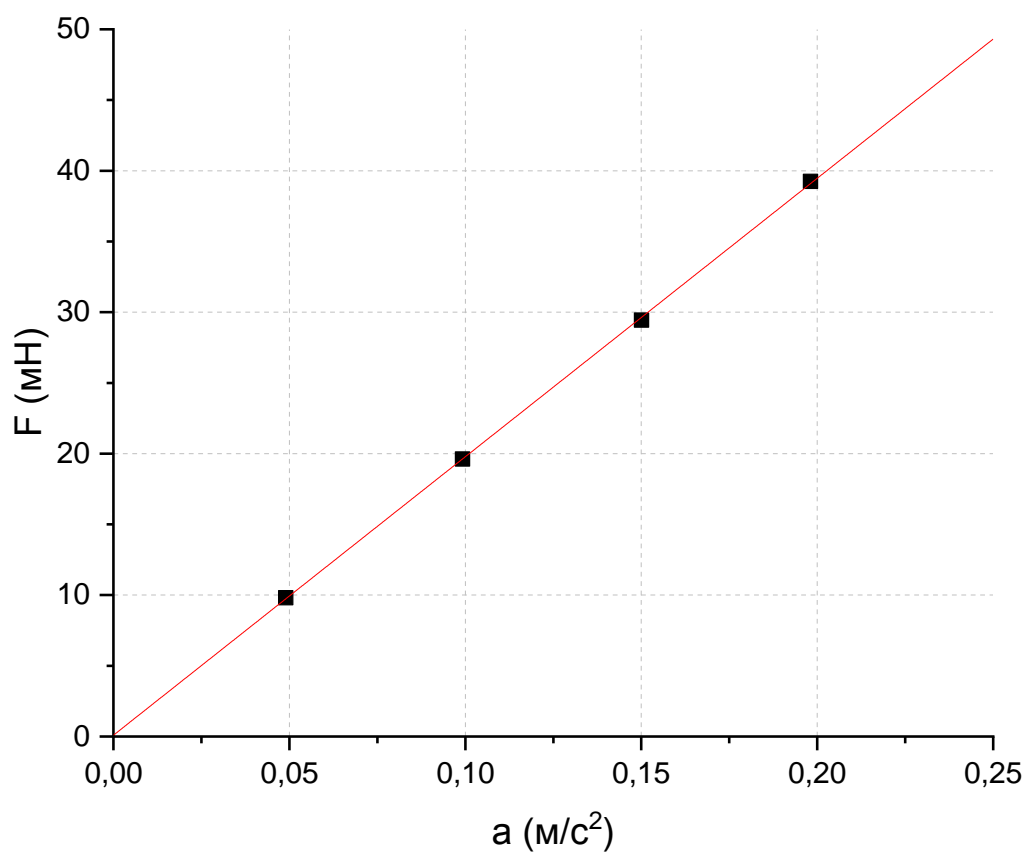
$$\Delta a_0 = \sqrt{\left(\frac{\partial a_0}{\partial S_0} \cdot \Delta S_0\right)^2 + \left(\frac{\partial a_0}{\partial t_0} \cdot \Delta t_0\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{2}{t_0^2} \cdot \Delta S_0\right)^2 + \left(\frac{4S_0}{t_0^3} \cdot \Delta t_0\right)^2}$$

Из полученных значений ускорений видно, что машинно полученные экспериментальные значения меньше теоретических, что объясняется наличием сил трения между блоком и нитью и других сил сопротивления. Сравнить вручную полученные значения ускорений с теоретическими не получится из-за высокой погрешности.

Теперь рассчитаем значения сил, действовавших на тележку в четырёх опытах, и построим график зависимости данных сил от ускорения. Аппроксимируем прямую и найдём коэффициент наклона по методу наименьших квадратов. Сравним его с изначально измеренной массой  $M$ .

Силу находим по формуле  $F = mg$ .

$n$ , кол. грузов	$a$ , м/с <sup>2</sup>	$F$ , мН
1	0.0490	9.81
2	0.0992	19.62
3	0.1501	29.43
4	0.1981	39.24

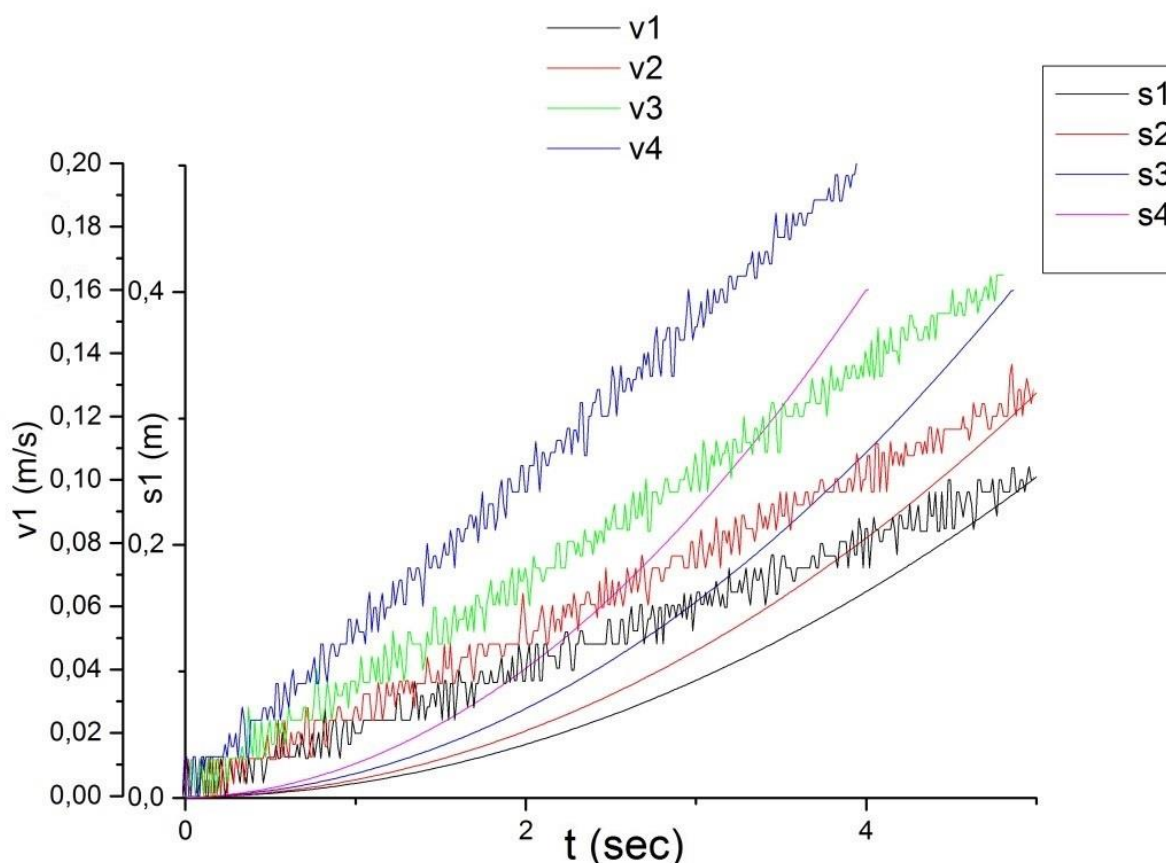


$$\alpha = 196.9 \pm 1.7 \frac{\text{мН}}{\text{м/с}^2}$$

Полученное значение коэффициента наклона совпадает с суммарной массой тележки в пределах погрешности. Можно заключить, что ускорение измерено достаточно точно.



#### 4. Исследование зависимости ускорения тела от его массы при постоянной величине равнодействующей силы.

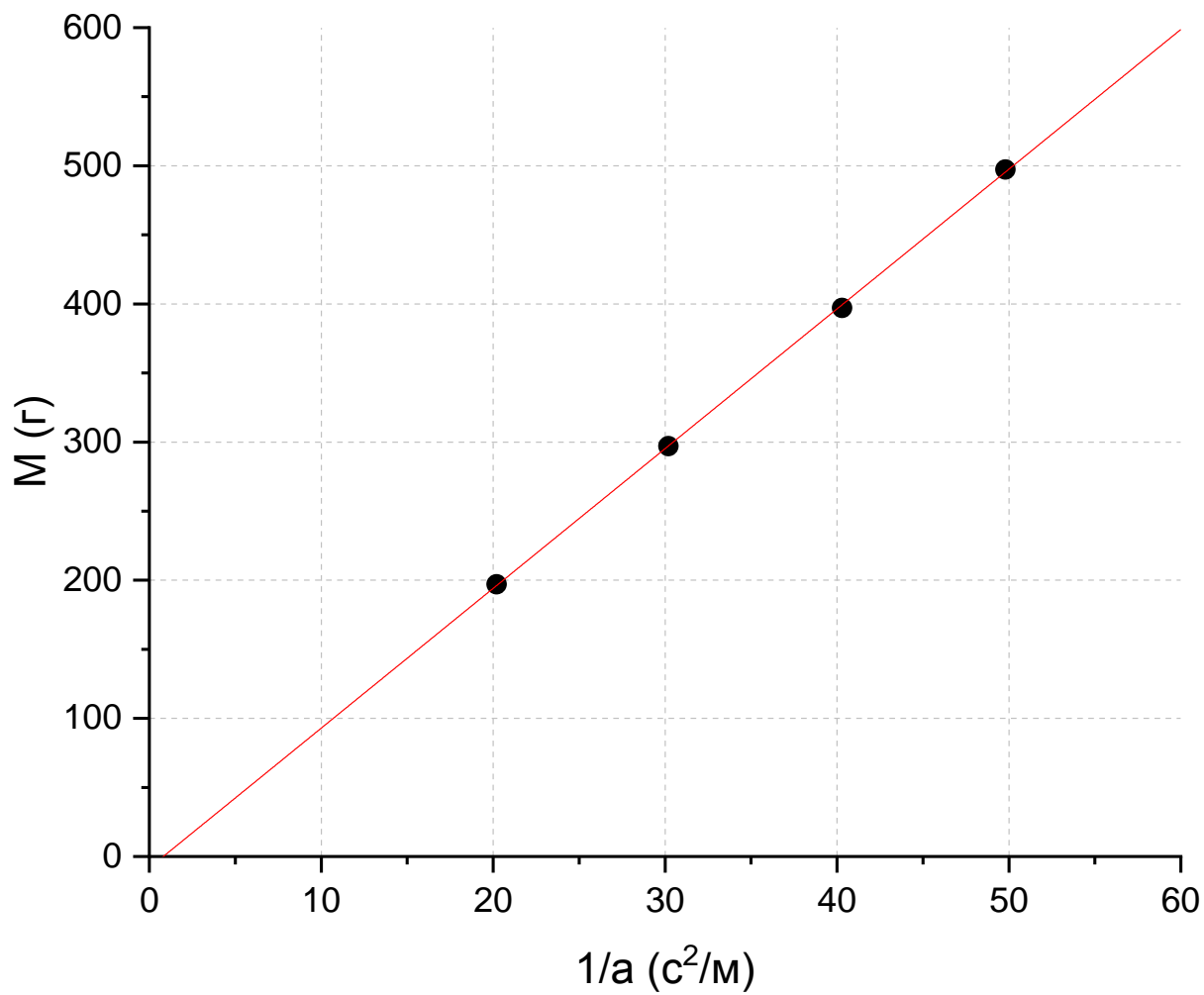


Значения машинного ускорения так же, как и в предыдущем номере, найдены аппроксимацией скорости движения тележки.

$n$ , кол-во ст. дисков	$M$ , г	$a$ , м/с <sup>2</sup>
1	197.04±0.01	0.0494
2	296.97±0.01	0.0331
3	397.12±0.01	0.0248
4	497.19±0.01	0.0201

Теперь построим график зависимости  $M \left( \frac{1}{a} \right)$ . Аппроксимируем прямую и найдём коэффициент наклона по методу наименьших квадратов. Сравним его с силой тяжести грузика, действующей на тележку.

$n$ , кол-во ст. дисков	$\frac{1}{a}$ , с <sup>2</sup> /м	$M$ , г
1	20.2	197.04
2	30.2	296.97
3	40.3	397.12
4	49.8	497.19



$$\alpha = 10.12 \pm 0.10 \frac{\text{г}}{\text{с}^2/\text{м}}$$

Теоретическое значение силы тяжести, действующей на тележку:

$$F = mg = 9.81 \pm 0.10 \text{ мН.}$$

Теоретическое и экспериментальное значения достаточно близки друг к другу.

### Выводы

- Экспериментально подтверждены первый и второй закон второй закон Ньютона;
- При отсутствии действующих на тело сил оно движется с постоянной скоростью, либо покоится;
- Под действием постоянной силы скорость тела изменяется линейно (ускорение постоянно).