

Ярославский государственный педагогический
университет им. К. Д. Ушинского

Кафедра общей физики
Лаборатория механики

Лабораторная работа № 5.

Изучение законов
равноускоренного
движения
на машине Атвуда

Ярославль
2009

Оглавление

1. Краткая теория	3
2. Описание установки	6
3. Порядок выполнения работы	8
Задание 1.	8
Задание 2.	9
Задание 3.	11
4. Контрольные вопросы	13

Лабораторная работа № 5.

Изучение законов равноускоренного движения на машине Атвуда

Цель работы:

- экспериментальное изучение законов пути и скорости равноускоренного движения,
- проверка II закона Ньютона,
- исследование влияния массы блока на ускорение системы.

Приборы и принадлежности: машина Атвуда с кольцевой и сплошной платформами, набор грузов, электросекундомеры.

1. Краткая теория

Основными кинематическими величинами являются радиус-вектор точки \vec{r} , мгновенные скорость \vec{v} и ускорение \vec{a} , траектория и путь S .

Мгновенная скорость точки $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$ в общем случае движения может меняться. Скорость изменения скорости называется мгновенным ускорением:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}.$$

Интегрирование последнего выражения при условии постоянства ускорения дает закон изменения скорости равнопеременного движения:

$$\vec{v} = \vec{v}_o + \vec{a}t, \quad (1.1)$$

где \vec{v}_o — начальная скорость, \vec{v} — скорость в момент времени t .

При движении из состояния покоя, при $\vec{v}_o = 0$:

$$\vec{v} = \vec{a}t \quad (1.2)$$

В свою очередь, интегрирование выражения для \vec{v} с учетом (1.1) дает закон изменения \vec{r} при равноускоренном движении:

$$\vec{r} = \vec{r}_o + \vec{v}_o t + \frac{\vec{a}t^2}{2}. \quad (1.3)$$

При движении из начала координат без начальной скорости это выражение упрощается:

$$\vec{r} = \frac{\vec{a}t^2}{2}. \quad (1.4)$$

Если точка движется по прямой в одном направлении, вектор перемещения $\Delta\vec{r}$ по модулю равен пройденному пути S . При равноускоренном движении без начальной скорости, которое изучается в этой работе

$$S = \frac{\vec{a}t^2}{2}. \quad (1.5)$$

Другой частный случай движения – равномерное – описывается просто:

$$\vec{a} = const, \quad S = vt. \quad (1.6)$$

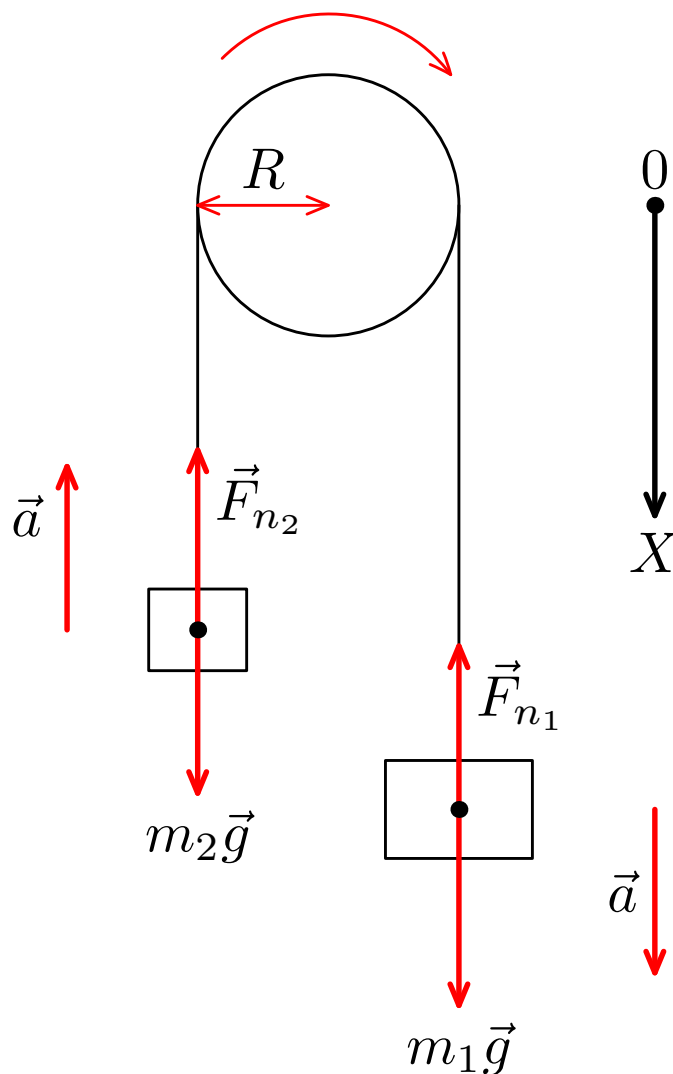


Рис. 1.1

1. Краткая теория

Теперь рассмотрим динамику равноускоренного движения системы тел, состоящей из двух грузов, подвешенных к концам нерастяжимой невесомой нити, перекинутой через блок. Рассчитаем вначале ускорение, пренебрегая массой блока.

На каждый груз будут действовать две силы — сила тяжести $\vec{P} = m\vec{g}$ и сила натяжения нити \vec{F}_H , под действием которых грузы будут перемещаться (силами трения пренебрегаем и считаем нить невесомой). Направление ускорения показано на рис. 1.1 для случая когда $m_1 > m_2$.

Поскольку нить нерастяжима, то ускорения правого и левого грузов равны по величине и противоположны по знаку $\vec{a}_1 = -\vec{a}_2$. Если предположить, что блок невесом, то

$$\vec{F}_{H_1} = \vec{F}_{H_2} = \vec{F}_{H_n}.$$

Запишем уравнения движения каждого груза в векторной форме:

$$\begin{aligned} m_1\vec{g} + \vec{F}_H &= m_1\vec{a}, \\ m_2\vec{g} + \vec{F}_H &= m_2\vec{a}, \end{aligned}$$

затем в проекциях на ось X , положительное направление которой указано на рис. 1.1:

$$\begin{aligned} m_1g - F_H &= m_1a, \\ m_2g - F_H &= -m_2a. \end{aligned}$$

Решая эти уравнения, получим выражение для ускорения системы:

$$a = \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 + m_2)}g. \quad (1.7)$$

Таким образом, система движется ускоренно, если массы грузов различны и покоится или движется равномерно прямо линейно при $m_1 = m_2$.

В действительности силы натяжения, действующие на грузы, не равны друг другу, так как масса блока отлична от нуля. Возникает момент сил натяжения $\vec{F}_{H_1} - \vec{F}_{H_2}$, вызывающий вращение блока. Для динамического описания движения в этом случае нужно дополнить систему уравнений законом движения блока:

$$|\vec{M}| = J|\vec{\beta}|, \quad (1.8)$$

где $|\vec{M}| = (\vec{F}_{H_1} - \vec{F}_{H_2})R$ — результирующий момент сил натяжения, действующих на блок; R — плечо сил, равное радиусу блока; J — момент инерции блока; $\vec{\beta}$ — угловое ускорение точек блока.

Считая блок однородным диском, выразим его момент инерции так:

$$J = \frac{m_{\text{бл}}R^2}{2}. \quad (1.9)$$

Кроме того, если нить не скользит по блоку, линейное ускорение её точек связано с угловым ускорением блока соотношением:

$$|\vec{a}| = |\vec{\beta}|R. \quad (1.10)$$

Решая систему уравнений для движения грузов, а также (1.7) с учетом (1.8) и (1.9), получим более точное выражение для ускорения грузов:

$$a = \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 + m_2 + \frac{m_{\text{бл}}}{2})}g. \quad (1.11)$$

Как видно, условие ускоренного движения сохраняется, но на величину ускорения влияют не только массы грузов, но и масса блока. Количественная оценка этого влияния является одной из целей данной работы.

2. Описание установки

Машина Атвуда (рис. 2.1) состоит из деревянной вертикальной планки A , по всей длине которой нанесена сантиметровую шкала. На верхнем конце планки укреплен легкий блок B , способный вращаться вокруг горизонтальной оси с малым трением. Через блок перекинута нить с двумя одинаковыми подставками массой m_0 , на которые можно помещать дополнительные грузы — перегрузки с различными массами m .

На планке могут крепиться оплошная и кольцевая платформы C и D . Сплошная служит для остановки грузов, а кольцевая — для снятия перегрузка специальной формы. На нижнем конце планки укреплен электромагнит B , фиксирующий начальное положение грузов. Начало движения грузов происходит при переводе выключателя, расположенного рядом с электромагнитом, в рабочее положение.

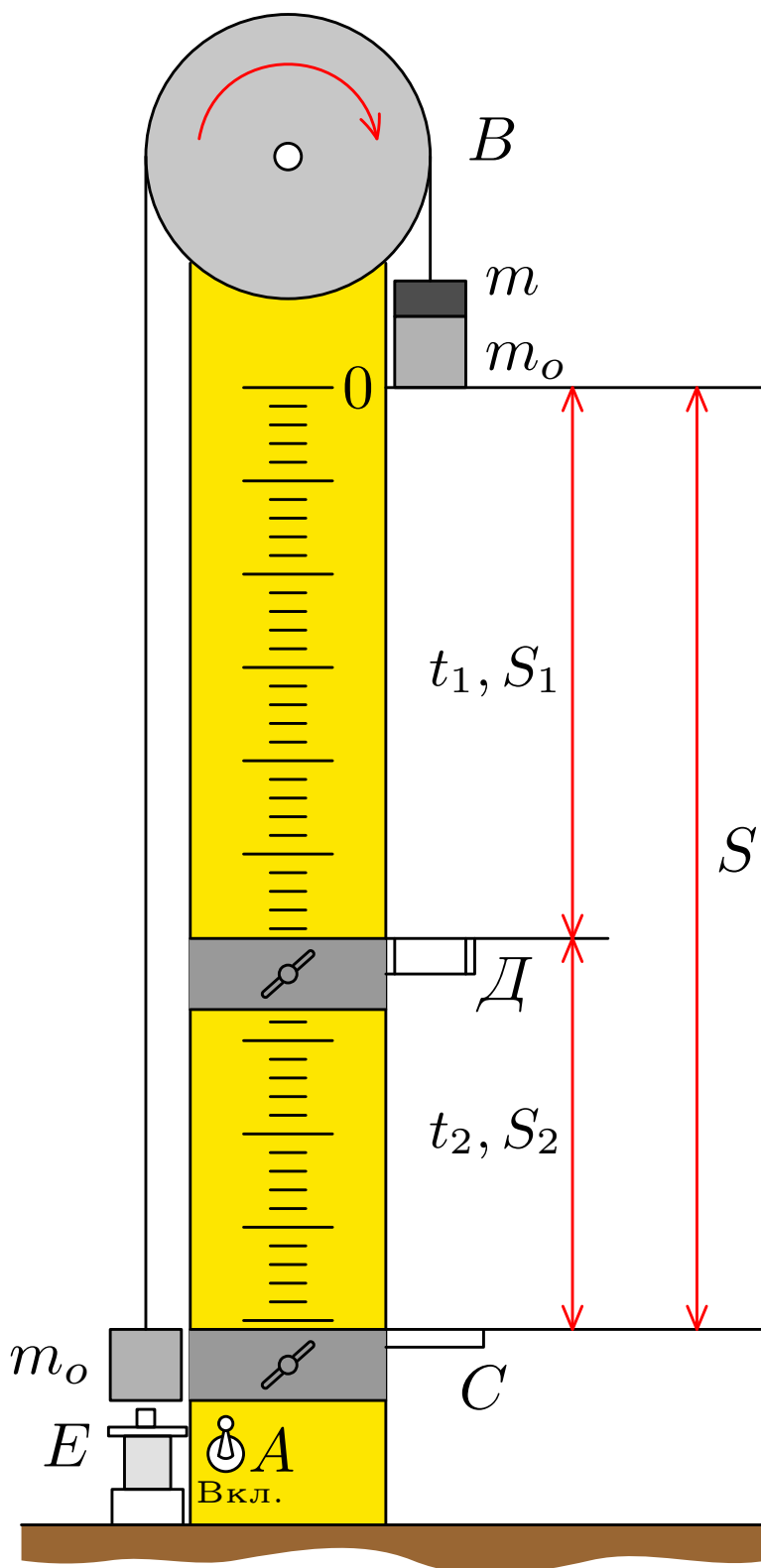


Рис. 2.1

При этом размыкается его электрическая цепь и замыкается цепь включения электрического секундомера, измеряющего все время дви-

жения правого груза от начальной точки до сплошной платформы t .

Этот прибор позволяет изучить и равномерное движение. Если над сплошной платформой укрепить кольцевую, обеспечивающую снятие перегрузка специальной формы, то между платформами груз будет двигаться равномерно со скоростью, равной конечной скорости равноускоренного движения. Второй электрический секундомер включается в момент прохождения грузом кольцевой платформы и выключается при ударе о сплошную, то есть этот секундомер измеряет время равномерного движения t_2 .

3. Порядок выполнения работы

Задание 1. Проверка закона пути равноускоренного движения.

В этом задании кольцевая платформа не используется.

1. На правый груз нужно поместить добавочный перегрузок $m_1 \approx 3$ г, установить систему с помощью электромагнита в начальном положении, чтобы левый груз без перегрузка находился внизу и удерживался электромагнитом.
2. Установить сплошную платформу на некотором расстоянии S от верхнего груза, отключить электромагнит и измерить не менее 5 раз время движения груза. Результаты измерений занести в таблицу 1:

Таблица 1

№	S , м	t , с	$a = \frac{2S}{t^2}$, м/с ²	Δa , м/с ²	$(\Delta a)^2$
1					
2					
3					
4					
5					
Сумма	X	X		X	
Среднее	X	X		X	X

3. Порядок выполнения работы

3. Повторить опыты с другим расстоянием S и тем же перегрузком, результаты занести в такую же таблицу и обработать.
4. Полученные средние значения ускорения сравнить с расчетами по формулам (1.7) и (1.11). При этом нужно учесть, что $m'_1 = m_o + m_1$, $m'_2 = m_o$, и преобразовать соответствующим образом эти формулы. Массы подставок $m_o = 113,3$ г, масса блока $m_{бл} = 26,4$ г.
5. По результатам расчетов сделать выводы о выполнимости закона пути и о целесообразности учета вращения блока в условиях опыта.

Задание 2. Проверка закона скорости равноускоренного движения.

1. На некоторой высоте над сплошной платформой установить кольцевую платформу, подготовить систему к работе, как в предыдущем задании.
2. На правую подставку поместить груз специальной формы, который снимается на кольцевой платформе. Масса его $m \approx 10$ г.
3. Измерить не менее пяти раз все время движения t и время движения t_2 . Время равноускоренного движения t_1 для каждого опыта подсчитать как разность всего времени движения и времени равномерного движения t_2 : $t_1 = t - t_2$.

Таблица 2

$$S = \quad ; \quad S_1 = \quad ; \quad S_2 = \quad .$$

№	t, c	t_2, c	$v_2 = \frac{S_2}{t_2}, m/c$	t_1, c	$v_1 = \frac{2S_1}{t_1}, m/c$	Δv	$(\Delta v)^2$
1							
2							
3							
4							
5							
Сумма	X	X		X			
Среднее	X	X		X			

-
4. Результаты измерения и расчетов занести в таблицу 2, при этом в соответствии с рис. 2.1 использовать обозначения: S_1 — путь равноускоренного движения, S_2 — путь равномерного движения.
5. Для проверки закона скорости равноускоренного движения нужно сравнить её среднее значение, рассчитанное как $\frac{S_2}{t_2}$, с расчетом из выражения: $v = at_1$. Ускорение в этом случае будет равно:

$$a = \frac{m}{2m_o + m + \frac{m_{бл}}{2}} g,$$

а скорость без учета вращения блока:

$$v = \frac{mg}{2m_o + m} t_1, \quad (3.12)$$

с учетом вращения блока:

$$v = \frac{mg}{(2m_o + m + \frac{m_{бл}}{2})} t_1. \quad (3.13)$$

6. Рассчитать скорость из кинематики равноускоренного движения:

$$v = \frac{2S_1}{t_1}.$$

Сделать вывод о выполнимости закона скорости.

Примечание. По указанию преподавателя проводятся аналогичные опыты при других положениях сплошной и кольцевой платформ и исследуется зависимость скорости v от времени t_1 .

Задание 3. Проверка II закона Ньютона.

Согласно II закону Ньютона ускорения материальной точки прямо пропорциональны равнодействующим сил:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{a_1}{a_2}.$$

Это справедливо и для случая поступательного движения системы тел, если масса их остается постоянной.

Изменение действующей силы без изменения массы производится на машине Атвуда переключением перегрузков с одной подставки на другую.

3. Порядок выполнения работы

Пусть в начале опыта на конце нити справа помещены перегрузки общей массой m_1 , а слева – массой m_2 . Тогда ускорение системы выразится следующим образом:

$$a_1 = \frac{(m_1 - m_2)g}{2m_o + m_1 + m_2} = \frac{F_1}{2m_o + m_1 + m_2}.$$

Если после этого все перегрузки собрать на правой подставке, ускорение выразится так:

$$a_2 = \frac{(m_1 + m_2)g}{2m_o + m_1 + m_2} = \frac{F_2}{2m_o + m_1 + m_2}.$$

Отношение сил будет равно:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2}. \quad (3.14)$$

В свою очередь, отношение ускорений можно найти независимо, из кинематики:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{\frac{2S}{t_1^2}}{\frac{2S}{t_2^2}} = \frac{t_2^2}{t_1^2}. \quad (3.15)$$

и сравнить эти отношения. Это один из способов проверки II закона Ньютона на машине Атвуда. В принципе, проверку его можно проводить с разным набором перегрузок и изучать на опыте зависимость $a = f(F)$.

Предлагается следующий **порядок выполнения задания**:

1. Снять кольцевую платформу. На правую подставку поместить один или несколько перегрузков общей массой m_1 , на левую — m_2 . Подготовить прибор к работе. Убедиться, что расположение перегрузков обеспечивает достаточное ускорение, и правый груз после отключения электромагнита доходит до сплошной платформы.
2. Описанным выше способом проделать не менее пяти измерений времени движения t_1 при данном значении S .
3. Переложить с левой на правую подставку перегрузки массой m_2 и провести измерения времени движения t_2 при том же пути S , но под действием силы F_2 .

-
4. Определить массы перегрузков m_1 и m_2 . Все данные и результаты измерений занести в таблицу 3:

Таблица 3

$$S = \quad ; \quad m_1 = \quad ; \quad m_2 = \quad .$$

№	$t_1, \text{с}$	$t_2, \text{с}$	$\frac{a_1}{a_2}$	$\frac{F_1}{F_2}$
1				
2				
3				
4				
5				
Сумма	X	X		X
Среднее	X	X		X

5. По данным таблицы 3 сравнить отношение сил и отношение ускорений (для средних значений) и сделать вывод о выполнении II закона Ньютона в условиях опыта.

4. Контрольные вопросы

1. Основные кинематические величины и их физический смысл.
2. Законы пути и скорости для равномерного и равнопеременного движения.
3. Законы Ньютона.
4. Вывод расчетных формул (1.7, 1.11, 3.12, 3.13, 3.14, 3.15).
5. Графики a , v , x как функции времени для равноускоренного движения без начальной скорости.
6. Выводы о выполнении законов кинематики и динамики в условиях опыта.
7. Каковы причины погрешности измерений?