

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.2¹⁾

ИЗУЧЕНИЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАШИНЫ АТВУДА

Цель работы: экспериментальное изучение прямолинейного движения, определение мгновенной и средней скорости и мгновенного ускорения движущегося тела.

Литература: 1. Гершензон Е.М., Малов Н.Н., Мансуров А.Н. Курс общей физики. Механика» (2001), гл. I, § 1.1 – 1.7, гл. II, § 2.1 – 2.7.

2. Иродов И.Е., Механика. Основные законы (6-е изд., 2003), гл.1, § 1.1, 1.2, гл. 2, § 2.2 – 2.4.

3. Стрелков С.П. Механика (2001), гл.2, §§16-19, 21.

4. Сивухин Д.В. Общий курс физики в 5-ти томах, т. 1, Механика (4-е изд., 2005), гл. I, II, гл. III, §18, 19.

5. Введение в лабораторный практикум.

Приборы и принадлежности: машина Атвуда, набор грузов.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно первому закону Ньютона, в инерциальной системе отсчета материальная точка движется равномерно и прямолинейно, если равнодействующая сил, приложенных к ней, равна нулю, а начальная скорость v_0 отлична от нуля. При изучении прямолинейного движения систему координат удобно выбирать так, чтобы положительное направление одной из осей (например, оси X) совпадало с направлением перемещения (скорости) точки. Скорость такого движения не зависит от времени и равна:

$$v = (x_2 - x_1) / t,$$

где x – координата точки, $x_2 - x_1$ – расстояние, пройденное точкой за время t .

Если равнодействующая всех сил \vec{F}_Σ , приложенных к материальной точке (телу), не равна нулю, то движение точки равнопеременное, то есть с постоянным ускорением \vec{a} (в дальнейшем будет применяться термин «равноускоренное движение», так как в выбранной в работе системе отсчета наблюдается движение с $a > 0$). Уравнение такого движения называется вторым законом Ньютона и имеет вид:

$$\vec{F}_\Sigma = m\vec{a},$$

где m – масса движущейся точки (тела).

Если векторы \vec{F}_Σ и \vec{v}_0 лежат на одной прямой, то движение материальной точки (тела) будет прямолинейным вдоль выбранной ранее оси X .

В этом случае закон движения будет иметь вид: $x = x_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2}$,

мгновенное значение скорости равно: $v = \frac{dx}{dt} = v_0 + at$,

¹⁾ Описание исправлено и дополнено преподавателями КОЭФ Александровым В.Н. и Васильевой И.А.

а мгновенное значение ускорения равно: $a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$.

Если в момент времени $t = 0$ значения $x_0 = v_0 = 0$, то проведя измерения пути, проходимого материальной точкой (x), и промежутков времени (t), в течение которого этот путь пройден можно рассчитать значения скорости и ускорения в конце пути как $v = 2x/t$ и $a = 2x/t^2$, соответственно.

В работе определяются кинематические характеристики (скорость, ускорение) движения пробных тел (грузов) и проверяются динамические соотношения, вытекающие из второго закона Ньютона: зависимость между силой и ускорением при постоянной массе системы. Экспериментальная установка (так называемая машина Атвуда) позволяет получить прямолинейное равномерное и равноускоренное движение грузов.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Движение грузов происходит вдоль вертикальной металлической рейки, на которой крепятся все элементы установки (см. рис. 1.2.1). Рейка снабжена сантиметровыми делениями. На верхнем конце рейки установлен легкий алюминиевый блок, способный вращаться вокруг горизонтальной оси. Через блок перекинута нить, к концам которой подвешены держатели грузов I (далее держатели) одинаковой массы. Грузы 2 и съемная шайба 3 выполнены в виде металлических колец с прорезями для крепления на шейках держателей I .

По всей длине рейки могут передвигаться и фиксироваться на произвольной высоте (с помощью стопорных винтов СВ) две платформы Π_1 и Π_2 . Платформы имеют отверстия, через которые проходит держатель во время движения. Внутри платформ вмонтированы источники света и фоторезисторы для управления секундомерами. Проходя через платформу Π_1 , держатель пересекает световой луч, падающий на фоторезистор, и отключается первый секундомер, измеряющий время t_1 от начала движения, а второй секундомер отключается в момент прохождения держателя через отверстие платформы Π_2 , измеряя время t_2 от начала движения.

После прохождения держателя платформы Π_2 , груз необходимо поймать руками, чтобы предотвратить разрыв нитей при ударе о ловушку L при остановке грузов.

У основания рейки смонтирован электромагнит \mathcal{E} , фиксирующий начальное положение грузов. Успокоитель $У$, расположенный в верхней части рейки, служит для гашения колебаний груза перед началом движения (приводится в действие вручную с помощью шнура).

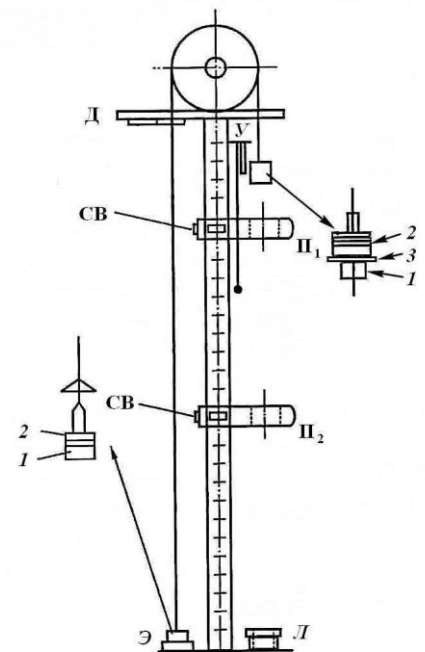


Рис.1.2.1

Движение системы грузов происходит под действием дополнительных грузов 2, которые располагают на съемной шайбе 3, устанавливаемой на шейке правого держателя груза 1. При этом движение будет равноускоренным. Кроме того, платформа Π_1 имеет специальное устройство, освобождающее проходящий через нее держатель от шайбы с грузами. Дальнейшее движение грузов между платформами Π_1 и Π_2 происходит по инерции равномерно.

Включение установки производится тумблером, расположенным на щитке. При этом включается электромагнит Э, загораются источники света в платформах Π_1 и Π_2 , и зеленая сигнальная лампочка на щитке. Нижний держатель груза (левый на рис. 1.2.1) устанавливается на электромагнит для его фиксации; платформы располагают на нужной высоте. На верхний держатель надевают съемную шайбу с дополнительным грузом и при помощи успокоителя гасят колебания. Пуск установки осуществляется кратковременным нажатием на расположенную на щитке красную кнопку, при этом выключается электромагнит, включается первый секундомер, и система грузов (далее система) приходит в движение.

Для удобства описания движения грузов выберем начало системы отсчета в точке, соответствующей начальному положению основания верхнего груза, а ось X системы координат направим из этой точки вертикально вниз.

Конструкция установки позволяет измерять длину первого участка движения x_1 - расстояние между основанием верхнего груза и серединой платформы Π_1 и длину второго участка x_2 - расстояние между серединами платформ Π_1 и Π_2 , а также время t_1 и $(t_2 - t_1)$ прохождения этих участков, соответственно.

Перед выполнением работы выведите и запишите в лабораторной тетради расчетные формулы для вычисления следующих величин:

1) экспериментального значения ускорения a_1 на первом участке движения грузов (начальная скорость движения грузов равна нулю, длина участка x_1 , время движения t_1):

$$a_1 = 2x_1/t_1^2, \quad (1)$$

2) экспериментального значения мгновенной скорости $v_{\text{мгн}}$ движения грузов в конце первого участка (движение равноускоренное без начальной скорости, длина участка x_1 , время движения t_1):

$$v_{\text{мгн}} = 2x_1/t_1, \quad (2)$$

3) экспериментального значения скорости $v_{\text{равн}}$ грузов на участке равномерного движения (длина участка x_2 , время движения на этом участке $t_2 - t_1$):

$$v_{\text{равн}} = x_2/(t_2 - t_1), \quad (3)$$

4) теоретического значения ускорения $a_{\text{теор}}$ грузов на первом участке пути, зная суммарную массу держателей грузов и самих грузов ($M = m_{\text{пр дер}} + m_{\text{лев дер}} + m_{\text{пр}} + m_{\text{лев}}$, где $m_{\text{пр дер}} = m_{\text{лев дер}} = m_{\text{дер}}$, то есть $M = 2m_{\text{дер}} + m_{\text{пр}} + m_{\text{лев}}$) и ускорение свободного падения g :

$$a_{\text{теор}} = \Delta m g/M, \quad (4)$$

где $\Delta m = m_{\text{пр}} - m_{\text{лев}}$.

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Задание 1. Определение ускорения и мгновенной скорости равноускоренного движения.

Измерьте время ускоренного и равномерного движения системы, используя разность масс грузов $(10, 15 \text{ и } 20) \times 10^{-3} \text{ кг}$ (масса съемной шайбы $5 \times 10^{-3} \text{ кг}$). Измерения с каждым грузом производите для двух различных расстояний. Рекомендуется выбрать следующие расстояния: $x_1=0,5 \text{ м}$ и 1 м (участок равноускоренного движения), x_2 во всех случаях можно взять равным $0,5 \text{ м}$ (участок равномерного движения). После каждого измерения не забывайте стрелки секундомеров устанавливать на нуль.

Вычислите из данных эксперимента мгновенную скорость в конце равноускоренного движения $v_{\text{мгн}}$, а также скорость равномерного движения $v_{\text{равн}}$. Для каждой группы измерений (с данным грузом) вычислите среднее ускорение $a_{\text{ср}}$. Найдите абсолютные ошибки измерений и относительные ошибки [5] в определении скорости v и ускорения a для одного выбранного вами измерения (например, для разности масс грузов $15 \times 10^{-3} \text{ кг}$ и $x_1 = 0,5 \text{ м}$).

Значения $x_1, x_2, t_{1i}, (t_{2i}-t_{1i}), v_{\text{мгн } i}, v_{\text{мгн ср}}, a_i, a_{\text{ср}}, v_{\text{равн } i}, v_{\text{равн ср}}$ и ε занесите в таблицу 1.

Таблица 1

Разность масс грузов, $\times 10^{-3} \text{ кг}$	Равноускоренное движение						Равномерное движение			
	$x_1, \text{ м}$	$t_{1i}, \text{ с}$	$a_i, \text{ м/с}^2$	$v_{\text{мгн } i}, \text{ м/с}$	$a_{\text{ср}}, \text{ м/с}^2$	$v_{\text{мгн ср}}, \text{ м/с}$	$x_2, \text{ м}$	$t_{2i}-t_{1i}, \text{ с}$	$v_{\text{равн } i}, \text{ м/с}$	$v_{\text{равн ср}}, \text{ м/с}$
10	0,5						0,5			
	1,0						0,5			
15	0,5						0,5			
	1,0						0,5			
20	0,5						0,5			
	1,0						0,5			
$\varepsilon, \%$							$\varepsilon, \%$			

Убедитесь, что измерения проведены правильно: средняя мгновенная скорость движения грузов в конце первого участка практически совпадает со средней скоростью равномерного движения на соответствующем втором участке и для каждой разности масс грузов ускорения в соответствующих измерениях практически одинаковы, и переходите к выполнению задания 2.

Задание 2. Определение зависимости ускорения системы грузов постоянной массы от разности масс грузов.

Величину действующей силы при неизменной массе системы грузов можно изменить следующим образом. Грузы кладут как на съемную шайбу на правом держателе 1, так и на шейку левого держателя без шайбы. Перекладывая грузы с шейки левого держателя на съемную шайбу правого, можно менять разность масс грузов, то есть действующую силу, оставляя неизменной массу системы M (см. (4), где $m_{пр\ дер} = m_{лев\ дер} = 0,14$ кг.).

Измерьте время t_1 (не менее 3 раз) ускоренного движения системы для нескольких различных распределений грузов по держателям грузов (4–5 измерений). Расстояние x , рекомендуется выбрать равным 1 м. (Платформу Π_2 в этом эксперименте следует расположить на 2–3 см ниже платформы Π_1).

Рекомендация: После прохождения платформы Π_1 , система грузов, освободившись от масс на правом держателе, начинает быстро останавливаться. Поэтому рекомендуется, после прохождения правого держателя платформы Π_2 в момент его остановки, поймать держатель руками и вручную вернуть систему в исходное положение.

Вычислите из данных эксперимента среднее время t_{1cp} и ускорение $a_{экс}$. Постройте график зависимости ускорения $a_{экс}$ от величины $\Delta m/M$, где Δm – разность масс грузов, расположенных на левом и правом держателях, а M – масса системы (см. объяснение обозначений формулы (4)). Вычислите и нанесите на тот же график теоретическую зависимость $a_{теор}$.

Значения x_1 , t_{1cp} , Δm , $a_{экс}$, $a_{теор}$ и M занесите в таблицу 2 и рассчитайте систематическую (приборную) и случайную относительную ошибки (см. [5]) в определении t_{1cp} для 1-й и 5-й разности масс грузов и запишите их в тетради.

Таблица 2

№	Масса правого груза, $\times 10^{-3}$ кг	Масса левого груза, $\times 10^{-3}$ кг	$\Delta m/M$	t_{1cp} , с	$a_{экс}$, м/с ²	$a_{теор}$, м/с ²
1.	45	40				
2.	45+5=50	40-5=35				
3.	50+5=55	35-5=30				
4.	55+5=60	30-5=25				
5.	60+5=65	25-5=20				

1-й: $\varepsilon_{сист}(t_{1cp}) = \underline{\hspace{2cm}} \%$; $\varepsilon_{случ}(t_{1cp}) = \underline{\hspace{2cm}} \%$.

5-й: $\varepsilon_{сист}(t_{1cp}) = \underline{\hspace{2cm}} \%$; $\varepsilon_{случ}(t_{1cp}) = \underline{\hspace{2cm}} \%$.

ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Получите расчетную формулу для $v_{мгн}$ в задании 1.
2. Запишите уравнение движения для движущихся тел системы (см. задачу 4.58 в «Механика. Задачи и решения/ А.Б. Казанцева, М.С. Каменецкая, В.Н.Александров и др. – М. КолосС, 2005).
3. Определите силу натяжения нити, связывающей грузы, и силу давления на ось блока при равномерном и ускоренном движениях системы. Получите расчетные формулы (без учета массы блока).
4. Получите расчетную формулу для определения силы давления груза на держатель груза.
5. Постройте графики зависимости координаты, скорости и ускорения центра масс системы грузов от времени на участках равноускоренного и равномерного движений.
6. Как оценить случайную ошибку в измерении ускорения a (задание 2)? Случайная или систематическая ошибка определяет точность измерения a ?
7. Можно ли говорить о равномерном движении, если величина скорости остается постоянной?
8. Как вычислить с помощью графика зависимости ускорения $a_{эксн}$ от $\Delta m/M$ ускорение свободного падения?
9. Почему величины скорости и ускорения правого и левого грузов машины Атвуда в любой момент времени одинаковы?
10. Как рассчитать натяжение нитей при движении грузов машины Атвуда на участке X_1 и на участке X_2 ?
11. Объясните расхождение зависимостей $a_{эксн}$ и $a_{теор}$ от величин $\Delta m/M$.
12. Как рассчитать ускорение тела, соскальзывающего с наклонной плоскости, если а) трение отсутствует; б) коэффициент трения равен k ?
13. Как изменится сила давления пассажира на пол лифта, если лифт начнет: а) подниматься с ускорением; б) опускаться с ускорением; в) тормозиться после равномерного подъема; г) тормозиться после равномерного спуска?
14. Сравните и объясните результаты вычислений относительных ошибок измерений.