

Лабораторная работа № 1.2¹⁾

Изучение прямолинейного движения с помощью машины Атвуда

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, не равна нулю и постоянная, то движение точки равнопеременное или с постоянным ускорением 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:

$$v = \frac{dx}{dt} = v_0 + at;$$

мгновенное значение ускорения равно:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}.$$

Если в момент времени $t = 0$ значения $x_0 = 0$ и $v_0 = 0$, то проведя измерения пути, проходимого материальной точкой (x), и промежутка 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.

¹⁾ Подготовлено преподавателями КОЭФ Александровым В.Н., Васильевой И.А., Коротаевой Е.А., и Сёмашем В.Д.

Экспериментальные задачи, поставленные в работе:

- экспериментальное изучение законов прямолинейного движения тел;
- определение мгновенной и средней скорости и мгновенного ускорения движущегося тела;
- применение правил вычисления ошибок прямых и косвенных измерений.

Описание экспериментальной установки

Машина Атвуда представляет собой вертикальную металлическую стойку (рис. 2.1), на верхнем конце которой установлен легкий алюминиевый блок. Через блок перекинута нить, к концам которой подвешены основные грузы I одинаковой массы по $m_{\text{осн}} = 140$ г каждый.

По всей длине стойки могут передвигаться и фиксироваться на произвольной высоте (с помощью стопорных винтов СВ) две платформы Π_1 и Π_2 с отверстиями, через которые проходит правый груз во время движения. Положение платформ определяет отрезки пути, проходимые грузом при движении системы. Для их отсчета на передней стенке стойки имеется шкала с сантиметровыми делениями. Исходному положению системы соответствует нулевое деление, расположенное в верхней части стойки. Требуемое значение соответствующей координаты считывается со шкалы рейки по риску в окошке передней грани каждой платформы.

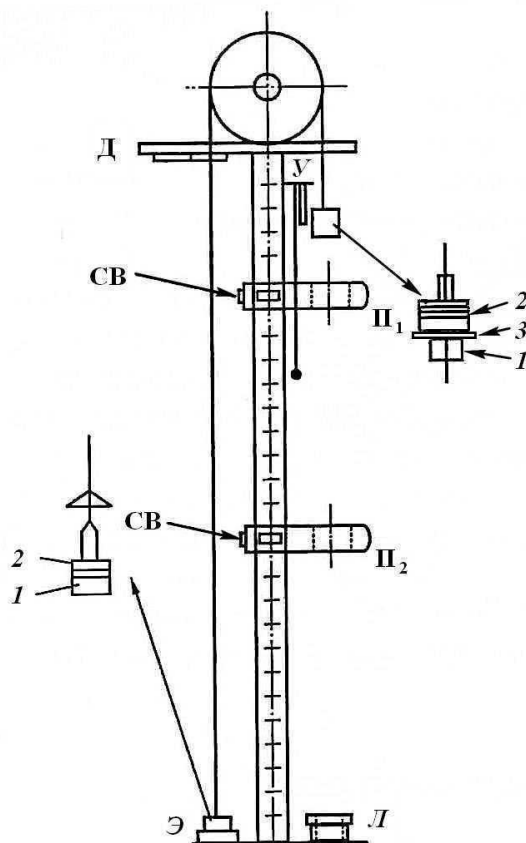


Рис. 2.1.

В комплект установки входит набор добавочных грузов 2 различной массы, которые экспериментатор может устанавливать на шейках основных грузов. Если суммарная масса правых грузов больше, чем суммарная масса левых, то под действием силы тяжести, обусловленной этой разностью масс, система приходит в движение – правые грузы опускаются, а левые поднимаются. Движение грузов при этом является равноускоренным.

В комплект приспособлений также входит фигурная (съёмная) шайба 3 массой 5 г, которая должна быть установлена на правый груз первой, а уже на нее устанавливаются добавочные грузы $m_{\text{др}}$. Диаметр шайбы больше отверстия в платформах. Поэтому при прохождении первой платформы шайба вместе с дополнительными грузами задерживается платформой и дальнейшее движение становится равномерным (так как массы основных грузов справа и слева одинаковы). Шайба и добавочные грузы имеют прорезы для прохождения нити

при их установке на шейках основных грузов I . Масса добавочных грузов в граммах выбита на их поверхности.

В исходном состоянии система удерживается при помощи электромагнита Э, фиксирующего левый груз в нижнем положении. Успокоитель У, расположенный в верхней части стойки, служит для гашения колебаний правого груза перед началом движения (приводится в действие вручную с помощью шнура).

В верхней части стойки расположен демпфер (Д), который амортизирует удар при остановке левого груза, предотвращая обрыв нити. В нижней части установки находится ловушка (Л), которая захватывает правый груз в конце движения. Освобождение груза из ловушки осуществляется нажатием на кольцо, расположенное в верхней части ловушки.

Для отсчета времени прохождения правым грузом отрезков пути от начальной точки движения до середины верхней платформы (x_1) и от неё до середины нижней платформы (x_2) служат два электронных секундомера. Внутри платформ вмонтированы источники света и фоторезисторы для управления секундомерами. В момент начала движения грузов включается первый секундомер. Проходя через платформу Π_1 , груз пересекает световой луч, падающий на фоторезистор, и отключается первый секундомер, измеряющий время t_1 – время прохождения грузом участка x_1 , и включается второй секундомер. Последний отключается в момент прохождения груза через отверстие платформы Π_2 , измеряя время t_2 – время прохождения грузом участка x_2 . Цифровая индикация результатов измерения секундомеров включается после прохождения правым грузом платформы Π_2 .

На стене рядом с установкой располагается щиток управления, на котором находятся: тумблер «вкл» включения электропитания элементов установки (электромагнита, электроники, источников света и т.п.); кнопка «пуск» отключения электромагнита и включения секундомеров; цифровая индикация секундомеров.

Примечание. В лабораторном практикуме имеются две симметричные лабораторные установки: «правая» и «левая». На рис. 2.1 изображена и далее в тексте дано описание работы *правой* установки, в которой платформы, успокоитель и ловушка находятся справа от металлической стойки, а электромагнит и демпфер слева от нее. В случае *левой* установки эти элементы установки перенесены справа налево или слева направо относительно металлической стойки, соответственно.

Подготовка протокола к работе

(Выполняется во внеаудиторное время при подготовке к занятию)

Запишите в лабораторной тетради номер и название работы.

Запишите в тетради заголовок: **«Задание 1. Определение ускорения и мгновенной скорости равноускоренного движения».**

Запишите расчетные формулы с расшифровкой буквенных обозначений для вычисления:

- экспериментального значения ускорения a_1 на первом участке движения грузов;
- экспериментального значения мгновенной скорости v_y ускоренного движения грузов в конце первого участка;
- экспериментального значения скорости v_p грузов на втором участке.

Подготовьте табл. 1.

Табл. 1.

Масса правых дополнительных грузов + шайбы, $\times 10^{-3}$ кг	Равноускоренное движение						Равномерное движение			
	x_1 , м	t_1 , с	a_i , м/с ²	a_{cp} , м/с ²	v_{yi} , м/с	$v_{y\text{cp}}$, м/с	x_2 , м	t_2 , с	v_{Pi} , м/с	$v_{P\text{cp}}$, 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			

Оставьте свободное место в тетради для вспомогательных записей и вычислений.

Запишите в тетради заголовок: **«Задание 2. Определение зависимости ускорения системы грузов постоянной массы от разности масс грузов».**

Запишите расчетные формулы с расшифровкой буквенных обозначений для вычисления:

- теоретического значения ускорения $a_{теор} = g \Delta m / M$, учитывая, что сила, ускоряющая тела, постоянная и пропорциональна разности масс дополнительных грузов $\Delta m = m_{ПР} - m_{ЛЕВ}$;

- суммарной массы всех движущихся грузов $M = 2m_{ОСН} + m_{ПР} + m_{ЛЕВ}$;

- расчета погрешностей в определении ускорения Δa (см. **Приложение** к настоящей работе).

Подготовьте табл. 2.

Табл. 2.

№	Масса левых доб. грузов - $m_{ЛЕВ}, \times 10^{-3}$ кг	Масса правых доб. грузов - $m_{ПР}, \times 10^{-3}$ кг	Δm , г	$\Delta m/M$	t_{1cp} , с	$a_{i,эксн}, м/с^2$	$\Delta a_i, м/с^2$
1.	20	25					
2.	20-5=15	25+5=30					
3.	15-5=10	30+5=35					
4.	10-5=5	35+5=40					
5.	5-5=0	40+5=45					

Рассчитайте и запишите в тетради общую массу системы грузов M .

Ознакомьтесь с расположением элементов установки и щитком управления.

Измерения и обработка результатов

Задание 1

Освободите стопорный винт (СВ на рис. 2.1) верхней платформы Π_1 , установите платформу на высоте на отметке 0,5 м ($x_1 = 0,5$ м) и закрепите стопорным винтом. Аналогичным образом установите нижнюю платформу Π_2 на высоте 1 м ($x_2 = 0,5$ м).

Включите установку тумблером «вкл». Поднимите правый груз над первой платформой и наденьте на него сначала съемную шайбу плоской стороной вниз, а затем на нее добавочный груз массой 5 г. Потяните вниз левую часть нити до тех пор, пока левый груз своим основанием не установится на электромагнит, и система не зафиксируется в этом положении. Пользуясь шнуром (см. рис.2,1), который поднимает флажок успокоителя ($У$), погасите колебания правого груза.

Нажмите кнопку «пуск». При этом отключается электромагнит, система грузов приходит в движение, и включаются секундомеры. После прохождения второй платформы правым грузом, на их дисплеях высвечиваются значения времен t_1 и t_2 , а груз, опускаясь, попадает в ловушку ($Л$).

После записи результатов в табл.1, освободите правый груз из ловушки, нажав на ее верхнее кольцо, поднимите за нить этот груз над верхней платформой и проделайте новые операции по установке на шайбу 3 добавочных грузов 2.

Примечание: По рекомендации и под наблюдением инженера правый груз может быть остановлен другим способом, после прохождения платформы Π_2 до попадания в ловушку $Л$.

Проведите по три измерения для каждого значения дополнительных грузов и положения платформ, которые указаны в левых столбцах табл. 1. Причем, сначала проведите измерения со всеми перегрузками при $x_1 = 0,5$ м, а затем при $x_1 = 1,0$ м, переместив платформу Π_2 на 0,5 м ниже, чтобы сохранить $x_2 = 0,5$ м.

Вычислите для каждого эксперимента мгновенную скорость в конце равноускоренного движения v_y , ускорение a и скорость равномерного движения

v_p . Для каждой группы измерений (с данным грузом) вычислите средние значения этих величин.

Выпишите значения приборных ошибок измерений расстояний x_1 и x_2 , а также измерений времени. Определите случайную ошибку измерения времени для одного из экспериментов (например, для разности масс грузов $15 \cdot 10^{-3}$ кг и $x_1 = 0,5$ м) и сравните ее с приборной.

Убедитесь, что измерения проведены правильно: среднее значение мгновенной скорости движения грузов в конце первого участка практически совпадает со средней скоростью равномерного движения на соответствующем втором участке, для каждого набора добавочных грузов ускорения в соответствующих измерениях практически одинаковы, при увеличении расстояния x_1 скорость при одинаковой массе добавочных грузов в конце ускоренного движения увеличивается, и переходите к выполнению **Задания 2**.

Задание 2

Установите платформу Π_1 при $x_1 = 1$ м, а платформу Π_2 на 2 – 3 см ниже Π_1 .

Установите на правом и левом основных грузах добавочные грузы в соответствии с первой строкой табл. 2 (съёмная шайба 3 (см. рис. 2) в **Задании 2** не используется).

Измерьте время t_1 ускоренного движения системы для данного распределения грузов по аналогии с выполнением **Задания 1**.

Повторите измерения, устанавливая добавочные грузы в соответствии второй, третьей и т.д. строкой табл.2. При этом меняется разность масс грузов, то есть сила, ускоряющая грузы, а масса системы остается неизменной.

Рассчитайте для каждого случая разность масс грузов, отношение $\Delta m/M$, ускорение $a_{i, \text{эксн}}$ (по аналогии с **Заданием 1**) и погрешности Δa_i , используя данные об ошибках прямых измерений расстояний и времени из **Задания 1**.

Построение графика

Постройте график зависимости ускорения $a_{\text{эксн}}$ от $\Delta m/M$, выполняя следующую последовательность действий:

- определите максимальное значение $\Delta m/M$ (например, 0,122);
- округлите его до ближайшего двузначного значения (до 0,13);
- определите удобное число делений на горизонтальной оси (13 из расчета 1 деление = 0,01);
- выберите удобный для построения масштаб по горизонтальной оси так, чтобы примерно на ширине листа, используемого для построения графика, помещалось данное число делений (например, 1 см = 0,01);
- нанесите эти деления на ось и подпишите соответствующие им значения $\Delta m/M$; при этом подписывать нужно не каждое деление, например, 0; 0,01 (цена делений); 0,05; 0,10; 0,15 и т. д.;

- аналогично нанесите деления на вертикальную ось для ускорения a ;
- отложите на горизонтальной оси первое значение $\Delta m/M$ и проведите вверх тонкую вертикальную линию, подписывать численное значение $\Delta m/M$ при этом не следует;
- отложите по вертикальной оси соответствующее значение ускорения, проведите на этом уровне тонкую горизонтальную линию до пересечения с вертикальной;
- отметьте точку пересечения каким-либо значком, например, крестиком;
- повторите построение экспериментальных точек для всех значений $\Delta m/M$;
- отложите вверх и вниз от экспериментальных точек $a_{i,эксп}$ соответствующие им значения Δa_i и соедините их вертикальной линией;
- проведите прямую линию из начала координат и проходящую через области экспериментальных значений ускорения $a_{i,эксп} \pm \Delta a_i$.

Вычислите теоретическое значение ускорения для каждого значения $\Delta m/M$, нанесите на тот же график соответствующую точку, обозначив ее другим значком, например, кружком и постройте теоретическую зависимость a от $\Delta m/M$, проведя прямую линию через эти точки и начало системы координат.

Приложение

Абсолютная ошибка косвенного измерения ускорения $a_{i,эксп}$ равна $\Delta a_i = \varepsilon_a \cdot a_{i,эксп}$, где ε_a – относительная ошибка косвенного измерения a_i (см. раздел **В4** [5]):

$$\varepsilon_a^2 = \varepsilon_x^2 + 4\varepsilon_t^2 . \quad (5)$$

В (5) ε_x и ε_t – относительные ошибки прямых i – ых измерений координаты x и времени t , соответственно.

Рекомендуемая 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 (11-е изд., 2013), гл.1, § 1.1, 1.2, гл. 2, § 2.2 – 2.4.
3. Савельев И.В. Курс общей физики в 5 томах, т. 1, Механика (5-е изд., 2011), гл.1, § 1.1 – 1.4, гл. 2, § 2.1 – 2.5.
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 физический практикум.

Примерные контрольные вопросы

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 правого груза от времени на участках равноускоренного и равномерного движений.
6. Постройте графики зависимости координаты, скорости и ускорения центра масс системы грузов от времени на участках равноускоренного и равномерного движений.
7. Объясните полученные соотношения между средней мгновенной скоростью движения грузов в конце первого участка и средней скоростью равномерного движения на втором участке в **Задании 1**.
8. Объясните, почему для каждого набора добавочных грузов ускорения в соответствующих измерениях в **Задании 1** практически одинаковы.
9. Почему при увеличении расстояния x_1 в **Задании 1** скорость при одинаковой массе добавочных грузов в конце ускоренного движения увеличивается?
10. Как оценить случайную ошибку в измерении ускорения a (**Задание 2**)? Случайная или систематическая ошибка определяет точность измерения a ?
11. Можно ли говорить о равномерном движении, если величина скорости остается постоянной?
12. Как вычислить с помощью графика зависимости ускорения $a_{эксн}$ от $\Delta t/M$ ускорение свободного падения?
13. Почему величины скорости и ускорения правого и левого грузов машины Атвуда в любой момент времени одинаковы?
14. Как рассчитать натяжение нитей при движении грузов машины Атвуда на участке x_1 и на участке x_2 ?
15. Объясните расхождение зависимостей $a_{эксн}$ и $a_{теор}$ от величин $\Delta t/M$.
16. Сравните и объясните результаты вычислений относительных ошибок измерений.
17. Как рассчитать ускорение тела, соскальзывающего с наклонной плоскости, если а) трение отсутствует; б) коэффициент трения равен k ?
18. 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?