

ИЗУЧЕНИЕ РАВНОУСКОРЕННОГО ДВИЖЕНИЯ НА МАШИНЕ АТВУДА

Цель работы. Определение ускорения грузов при равноускоренном движении.

Введение

Применяемый в данной работе прибор (машина Атвуда)

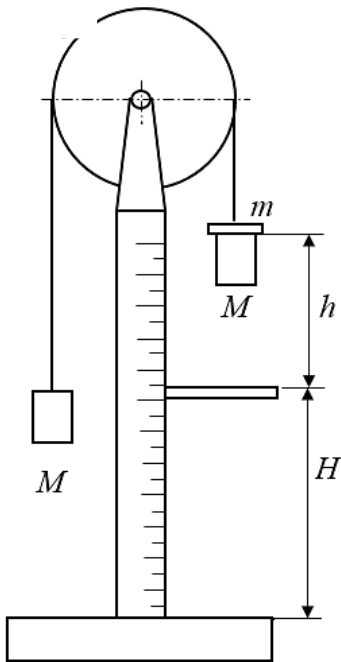


Рис. 1 Схема установки

представляет собой вертикальную стойку (рис. 1). Сверху на стойке укреплен блок массой M_0 , через который перекинута нить. К обоим концам нити подвешены грузы одинаковой массы M . На стойке справа имеется кольцевая платформа, которую можно закреплять в любом месте шкалы зажимными винтами. Если на правый груз положить перегрузок, то, в случае, если силами трения можно пренебречь, система начнет двигаться равноускоренно. При прохождении кольцевой платформы перегрузок снимается, и в дальнейшем вся система будет двигаться равномерно до касания правым грузом о основания конструкции. Для измерения расстояний к стойке прикреплена

измерительная шкала.

Теоретическое значение ускорения определяется исходя из основных законов механики поступательного и вращательного

движения, а также по формуле, полученной с использованием закона сохранения энергии.

В начальный момент времени система находится в равнове-

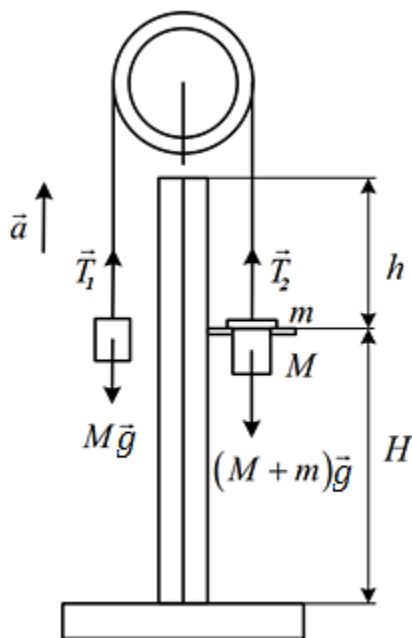


Рис. 2 Действие сил

сии. Если на правый груз поместить перегрузок массы m , то грузы начнут двигаться с ускорением. Правый груз пройдет путь h (рис. 2). На выступе перегрузок m снимается, и движение двух грузов становится равномерным. После этого правый груз пройдет путь H до основания конструкции. Путь равноускоренного движения h и равномерного движения H можно измерить по шкале. Время равноускоренного движения t измеряется секундомером.

Запишем второй закон Ньютона для левого и правого грузов при их равноускоренном движе-

нии на участке h . В проекции на вертикальные оси, направленные по ускорению \vec{a} , для левого груза будем иметь:

$$T_1 = Mg + Ma \quad (1)$$

Аналогично для правого груза с перегрузком получаем:

$$(M + m)a = -T_2 + (M + m)g \quad (2)$$

Здесь T_1 и T_2 – силы натяжения нитей справа и слева от блока, соответственно; M – масса основных грузов; m – масса перегрузка; a – ускорение грузов в системе.

Если силами трения можно пренебречь, то движение блока описывается с помощью основного уравнения динамики вращательного движения относительно неподвижной оси Z в виде:

$$I\varepsilon = (T_2 - T_1)R \quad (3)$$

где I – момент инерции блока относительно неподвижной оси (ось Z перпендикулярна плоскости чертежа); R – радиус блока; ε – угловое ускорение блока ($\varepsilon = a/R$). Величина $(T_2 - T_1)R$ определяет момент силы, раскручивающий блок.

Совместное решение уравнений (1), (2) и (3) позволяет найти теоретическое значение ускорения грузов на участке h :

$$a_T = \frac{mg}{2M + m + \frac{I}{R^2}}.$$

Блок имеет форму цилиндра радиусом R и массой M_0 . Момент инерции блока определяется по формуле:

$$I = M_0 R^2 / 2.$$

С учетом последнего выражения, имеем:

$$a_T = \frac{mg}{2M + m + M_0/2}. \quad (4)$$

С другой стороны, можно определить ускорение грузов на основе рассмотрения закона сохранения энергии. При опускании груза с перегрузком потенциальная энергия системы уменьшается на величину mgh . При движении грузов с равной массой M их суммарная потенциальная энергия не изменяется. Кинетическая энергия W_k системы возрастает и к концу движения на участке h равна

$$W_k = \frac{(2M + m)v^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2},$$

где v – линейная скорость грузов в конце пути h ; ω – угловая скорость вращения блока в этот момент времени; I – момент инерции блока; $(2M + m)v^2/2$ – кинетическая энергия поступа-

тельного движения грузов; $I\omega^2/2$ – кинетическая энергия вращательного движения блока.

Вообще говоря, в системе действуют силы трения, таким образом механическая энергия системы не сохраняется, часть ее рассеивается. Однако если силами трения можно пренебречь, то из закона сохранения энергии, получаем:

$$mgh = \frac{(2M + m)v^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2}. \quad (5)$$

Используя известное соотношение для равноускоренного движения $v^2 = 2ah$, связь между угловой и линейной скоростью точек на внешней поверхности блока $\omega = v/R$ и выражение для момента инерции блока ($I = M_0R^2/2$), получим формулу для определения теоретического значения ускорения на участке h :

$$a_T = \frac{mg}{2M + m + M_0/2}.$$

Как видим, данная формула точно совпадает с формулой (4), полученной из рассмотрения второго закона Ньютона и основного закона динамики вращательного движения.

В работе ускорение определяется с помощью измерения времени прохождения грузами участка h . Измерив это время и используя формулу пути при равноускоренном движении, согласно которой $h = at^2/2$, получим

$$a = \frac{2h}{t^2}, \quad (6)$$

где пройденный грузами путь h и время движения t измеряются непосредственно в эксперименте.

По измеренному значению ускорения движения грузов на участке h можно определить экспериментальное ускорение свободного падения:

$$g_э = \frac{(2M + m + M_0/2)a}{m}.$$

Порядок выполнения работы

1. Закрепить кольцевую платформу на расстоянии h от нулевой точки шкалы (примерно 20 - 30 см).

2. С помощью регулировочных винтов, расположенных на платформе машины Атвуда, выровнять установку таким образом, чтобы правый груз проходил кольцевую платформу без касания.

3. Положить на правый груз перегрузок и установить его таким образом, чтобы перегрузок располагался на нулевой отметке шкалы.

4. Привести систему в движение, отпустив левый груз без толчка, и измерить с помощью секундомера время t движения от момента пуска до снятия перегрузка кольцевой платформой.

5. Результаты измерений h, t записать в таблицу.

6. Повторить измерения, описанные в пунктах 3 и 4 10 раз при одном и том же значении h .

Примечание. Значения M и M_0 указаны на оборотной стороне стойки машины Атвуда; значение m выбито на перегрузке.

Таблица

$$\begin{array}{ll} M = \dots & M_0 = \dots \\ m = \dots & h = \dots \end{array}$$

№ опыта	$t_i, \text{с}$	$a_i, \text{м/с}^2$	$a_{\text{ср}}, \text{м/с}^2$	$\Delta a, \text{м/с}^2$	$a_T, \text{м/с}^2$
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

Обработка результатов измерений

Общая методология определения погрешности измерения физических величин приведена в методических указаниях [4]. В данной работе величина приборной ошибки существенно меньше, чем случайной погрешности измерений времени t , поэтому для расчета погрешности Δa и Δg можно использовать методику Стьюдента.

1. По формуле (6) рассчитать значения ускорения a_i , полученные во время каждого из опытов и занести в таблицу.

2. Рассчитать среднее значение ускорения $a_{\text{ср}}$.

3. Рассчитать погрешность измерения Δa величины a по методу Стьюдента (принять доверительную вероятность равной 0,95):

$$\Delta a = \alpha \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (a_i - a_{\text{ср}})^2}{N(N-1)}}$$

где N – число опытов, α – коэффициент Стьюдента. Для числа опытов $N = 10$ и доверительной вероятности 0,95 коэффициент Стьюдента $\alpha = 2,3$.

4. По формуле (4) рассчитать теоретическое значение ускорения в случае пренебрежения силами трения ($a_{\text{т}}$) и записать в таблицу. Сравнить полученный результат с величиной $a_{\text{ср}}$.

5. Рассчитать полученную величину ускорения свободного падения $g_{\text{ср}}$ и погрешность измерения Δg на основе измеренного значения ускорения движения системы грузов по формулам:

$$g_{\text{ср}} = \frac{\left(2M + m + \frac{M_0}{2}\right) a_{\text{ср}}}{m}$$

$$\Delta g = g_{\text{ср}} \cdot \frac{\Delta a}{a_{\text{ср}}}.$$

6. Записать окончательный результат в виде

$$a = a_{\text{ср}} \pm \Delta a,$$

$$g_{\text{э}} = g_{\text{ср}} \pm \Delta g.$$

Контрольные вопросы

1. Какое движение называется равнопеременным?
2. Дать определение ускорения.
3. Написать формулы пути и скорости при равнопеременном прямолинейном движении.
4. Получить выражение для ускорения грузов из рассмотрения энергии системы.
5. Как связаны линейная и угловая скорости движения точек?
6. Как выражается момент инерции блока?
7. При каком условии силы натяжения нити по разные стороны блока можно считать одинаковыми?
8. Дайте определение вектора момента силы.
9. При каком условии можно пренебречь моментом инерции блока машины Атвуда, не допуская большой ошибки в расчете ускорения тел системы?
10. Как меняется со временем момент импульс грузов при равноускоренном движении?
11. Объясните причины отличия теоретического значения ускорения a_T от величины ускорения, полученной экспериментально $a_{ср}$.

Список литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики в 3-х томах. – Т. 1. Механика. Молекулярная физика. – М.: Лань, 2016. – 432 с.
2. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Курс физики. – М.: Издательский центр «Академия», 2015. – 720 с.
3. Трофимова Т.И. Фирсов А.В. Курс физики в 2-х томах. – Т. 1. Механика. Молекулярная физика. Термодинамика. Электродинамика – М.: Кнорус, 2015. – 584 с.
4. Селезнев В.А., Тимофеев Ю.П. Вводное занятие в лабораториях кафедры физика. / Под редакцией проф. В.А. Никитенко. Методические указания. – М.: МИИТ, 2011, – 38 с.