

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования

**Национальный исследовательский Томский политехнический университет**

Школа – ИШИТР

Направление – Информатика и вычислительная техника

## **Изучение равноускоренного движения**

Лабораторная работа № 1-03

По дисциплине «Физика»

Исполнитель

Студент, гр. (укажите свою группу)

(укажите свои инициалы) \_\_\_\_\_  
(подпись) (дата)

Руководитель

Филимонова В. С. \_\_\_\_\_  
(подпись) (дата)

Томск 2024

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1-03

### ИЗУЧЕНИЕ РАВНОУСКОРЕННОГО ДВИЖЕНИЯ

**Цель работы:** изучение равноускоренного движения тел с учетом сил трения и определение ускорения свободного падения.

**Приборы и принадлежности:** лабораторный прибор «машина Атвуда» с электронным секундомером, набор грузов, измерительная линейка.

### ТЕОРИЯ МЕТОДА

Основное уравнение динамики поступательного движения (II закон Ньютона) позволяет довольно просто определить ускорение, с которым движется тело:

$$\mathbf{a} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^N \mathbf{F}_i, \quad (1)$$

где  $m$  – масса тела;  $\mathbf{F}_i$  – силы, приложенные к телу. Все силы учесть сложно. Поэтому проще определить ускорение из кинематических соотношений. Ускорение и пройденный путь (движение без начальной скорости) связаны простым соотношением

$$S = at^2 / 2. \quad (2)$$

Если ускорение, с которым движется тело, велико, например ускорение свободного падения  $g$ , то при малых величинах  $S$  (это значение ограничено размерами лаборатории или размерами лабораторной установки) время  $t$  будет мало. В этом случае его нужно определять с высокой точностью. Элементарный расчет показывает, что при  $S = 1$  м  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup>,  $t = 0,452$  с и, следовательно,  $\Delta t = 0,001$  с. Таким образом, время нельзя измерять ручным секундомером. Обычный электронный секундомер дает точность 0,01 с. Если использовать электромагнит для запуска устройства, то необходимо учитывать явление остаточной намагниченности. Следовательно, устройство, учитывающее эти обстоятельства, должно быть весьма дорогостоящим. Можно использовать другой метод. Например, увеличить высоту  $S$ , с которой падает тело. Тогда время падения увеличится. Но возникает ошибка, связанная с увеличением сил сопротивления и сил трения, которые сложно учитывать [см. формулу (1)], т.к.  $F_{\text{сопр}} \sim r \cdot v^n$ , где  $r$  – коэффициент сопротивления;  $v$  – скорость; степень  $n > 1$ , учитывая особенности движения. Многие из перечисленных трудностей можно исключить, если эксперименты проводить при малых ускорениях. Уменьшают ускорение с помощью несложного устройства, которое называют машиной Атвуда.

## МАШИНА АТВУДА

Данный прибор (рис. 1), позволяющий изучать движения с малыми ускорениями, состоит из блока, через который перекинута нить, соединенная с грузами  $M$  и  $(M + m)$ . Если блок и нити невесомы, а трение пренебрежимо мало (трение о воздух и в оси блока), то уравнения движения обоих грузов имеют вид

$$\begin{aligned} Mg - T &= -Ma \\ (M + m)g - T &= (M + m)a. \end{aligned} \quad (3)$$

Ускорение  $a$  из уравнений (3), равно

$$a = \frac{mg}{m + 2M}; \quad (4)$$

$$t = \sqrt{\frac{2h}{a}}. \quad (5)$$

Следовательно, чем меньше  $m$  и больше  $M$ , тем меньше  $a$ . Время, за которое груз  $(m + M)$  опускается на высоту  $h$ , равно

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} \sqrt{\frac{2M + m}{m}}. \quad (6)$$

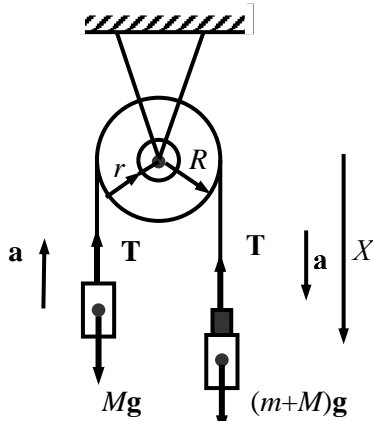


Рис. 1

Легко видеть, что чем меньше  $m$  и больше  $M$ , тем больше  $t$ . Если мы выполним это условие, то получим новую проблему. Тяжелые грузы приведут к увеличению силы трения в блоке, что потребует увеличения перегрузки, и т.д.

Получим соотношение, связывающее  $M$ ,  $m$  и коэффициент трения  $\mu$  в оси блока. Для этого введем понятие перегрузка  $m_0$ , который только-только приводит в движение систему грузов. В условиях равновесия момент сил натяжения нитей  $(T_2 - T_1) \cdot R$  равен моменту сил трения  $M_{тр}$ , где  $T_1 = Mg$ ;  $T_2 = (M + m_0)g$ ;  $R$  – радиус блока, а  $M_{тр} = \mu N r$ , где  $N$  – реакция блока;

$$N = T_1 + T_2 = (2M + m_0)g;$$

$r$  – радиус оси блока. Из этих условий находят следующее соотношение:

$$\frac{m_0}{2M + m_0} \approx \mu \frac{r}{R}. \quad (7)$$

Анализируя (7), приходим к выводу, что  $m$  не может быть сколько угодно малым, чтобы удовлетворить требованию больших значений времени. Окончательно формулу (4) можно применять, если  $m \ll m_0$ . Интуитивно заключают, что трение пренебрежимо мало, если  $m \ll m_0$ .

## Методика определения ускорения движения грузов

Измерения проводят с перегрузками, превышающими в  $3 \div 5$  раз по массе  $m_0$ . Необходимо убедиться, что в этом случае выполняется зависимость  $h = at^2 / 2$ . Для этого переписывают это уравнение в виде

$$t = \sqrt{\frac{2}{a}} \cdot \sqrt{h}. \quad (8)$$

Если положить  $y = t$ ,  $x = \sqrt{h}$ , то получится прямая вида  $y = kx$ , где  $k = \sqrt{2/a}$ , которая проходит через начало координат. Прямая  $y = f(x)$  или  $t = f(\sqrt{h})$  может быть построена по экспериментальным точкам. Для этого выбирают один перегрузок  $m$  и различные высоты  $h$ . Измерение времени для одной и той же высоты проводят несколько раз. На оси ординат откладывают значение  $t$ , на оси абсцисс –  $\sqrt{h}$ . Если полученные экспериментальные точки ложатся на прямую, то движение системы тел можно считать равноускоренным. По наклону прямой находят коэффициент  $k$  в виде соотношения  $k = \Delta t / \Delta(\sqrt{h})$ , где  $\Delta t$  – отрезок по оси  $y$  и  $\Delta(\sqrt{h})$  – соответствующий ему отрезок по оси  $x$ . Получают равенство

$$\frac{\Delta t}{\Delta \sqrt{h}} = \sqrt{\frac{2}{a}}. \quad (9)$$

Из уравнения (9) определяют  $a$ . Убеждаются, что его значение действительно меньше  $g$ .

Экспериментальной проверке легко подвергнуть уравнение (6)

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} \cdot \sqrt{\frac{2M+m}{m}} \approx 2 \sqrt{\frac{h}{g}} \sqrt{\frac{M}{m}}. \quad (10)$$

Если выбрать оси координат  $y = t$  и  $x = \sqrt{M/m}$ , вновь можно получить уравнение прямой  $y = (\sqrt{h/g}) x$ , проходящей через начало координат и

имеющей наклон  $\frac{\Delta y}{\Delta x} = 2 \sqrt{\frac{h}{g}}$ ;

$$\dot{g} = \frac{4h}{(\Delta t / \Delta \sqrt{M/m})^2} \quad (11)$$

## РЕКОМЕНДАЦИИ СТУДЕНТАМ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Определите массу  $m_0$  страгивающего перегрузка. Для этого, постепенно увеличивая массу  $m$  перегрузка, определите значение  $m_0$ , начиная с которого блок приходит в движение. Измерения повторите при четырех положениях блока, каждый раз поворачивая блок примерно на  $90^\circ$  по отношению к

предыдущему положению. В качестве  $m_0$  следует принять наибольшее из найденных значений.

2. Определите экспериментально зависимость времени падения груза от высоты  $h$ . Измерения проведите при определенном выбранном значении массы перегрузка  $m = (2 \div 3)m_0$ . При этом необходимо также, чтобы выполнялось неравенство  $m \leq 2M$ . Определите время падения  $t$  для четырех – пяти высот  $h$ , повторяя измерения для каждого значения  $h$  по четыре раза. Результаты внесите в табл. 1.

Таблица 1

№	$h$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$\bar{t}$	$\Delta t$	$\Delta h$	$m$	$m_0$
1										
2										
3										
4										
5										

Здесь  $t_1 \dots t_4$  – результаты измерения времени падения с установленной высоты  $h$ . По результатам измерений в осях координат  $x = \sqrt{h}$ ;  $y = t$  постройте прямую  $t = t(\sqrt{h})$ . По наклону прямой определите  $a$ .

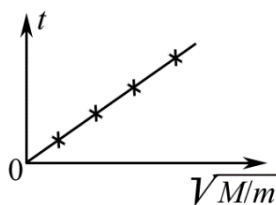
3. Определите опытным путем зависимость времени падения  $t$  от массы  $m$  перегрузка. Измерения проводите при наибольшей возможной высоте падения  $h = h_{\max}$  для пяти значений массы  $m$ . Для каждого значения  $m$  повторите измерения четыре раза, результаты занесите в табл. 2.

Таблица 2

№	$m$	$M/m$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$\bar{t}$	$\Delta t$
							$\Delta t$	
1								
2								
3								
4								
5								

$\Delta m =$

$h_{\max} = h =$



В нашей лабораторной установке точность  $\Delta m$  определения массы по существу совпадает со значением массы  $m_0$  перегрузка. По результатам измерений в осях координат  $x = \sqrt{M/m}$ ;  $y = t$  постройте прямую  $t = f\sqrt{M/m}$ . По наклону прямой с помощью соотношения

(10) определите ускорение свободного падения и погрешность  $\Delta g$ .

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ И ИНДИВИДУАЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Почему измеренное значение ускорения свободного падения меньше, а не больше  $9,8 \text{ м/с}^2$ ?
2. Запишите уравнение равноускоренного движения в общем виде.
3. В каком случае ускорение грузов в машине Атвуда можно считать равными?
4. В каком случае уравнение равноускоренного движения тела при его свободном падении  $h = gt^2/2$  становится неверным?
5. Поясните кратко суть работы машины Атвуда.
6. Если увеличить высоту  $h$  падения груза, то вследствие чего вносится еще одна ошибка в измерение  $g$ ?
7. Запишите второй закон Ньютона в общем случае.
8. Какие силы действуют на грузы и блок в машине Атвуда?
9. К чему сводится основная задача при определении  $g$  в данной работе?
10. Какой способ определения  $g$  реализован в установке машина Атвуда?
11. Чему равна сила трения в общем случае? Как зависит сила трения в оси блока от массы грузов?
12. Какие факторы влияют на точность измерения времени падения грузов в машине Атвуда?
13. Что необходимо сделать в лабораторной работе, чтобы преодолеть силу трения в оси блока?
14. При каком условии момент сил натяжения нитей равен моменту силы трения в оси блока? Запишите равенство и поясните его.
15. Запишите выражение для момента силы трения в оси блока?
16. Объясните, почему для увеличения времени движения грузов величина перегрузка в машине Атвуда не может быть сколь угодно малой?
17. Какое условие необходимо выполнить, чтобы пренебречь трением между осью и блоком?
18. В установке блок не может быть отцентрирован идеально. К чему это может привести?
19. Объясните методику определения ускорения  $a$  грузов машины Атвуда.
20. Определите методику определения ускорения  $g$  в машине Атвуда.
21. Как определяют момент сил трения в данной лабораторной работе.
22. Определите коэффициент трения  $\mu$  в блоке, используя экспериментальные данные, полученные в ходе выполнения работы.
23. Почему очень сложно, в общем случае, учитывать величину сил трения?
24. Опишите методики определения  $g$ , известные в литературе.
25. Как можно учесть величину сил сопротивления груза при его движении в воздухе?

### Таблица 1

	$h, \text{ м}$	$t_1, \text{ с}$	$t_2, \text{ с}$	$t_3, \text{ с}$	$t_4, \text{ с}$	$\langle t \rangle, \text{ с}$	$\Delta t, \text{ с}$	$\Delta h, \text{ м}$	$m, \text{ кг}$	$m_0, \text{ кг}$
1	0,76	3,8	3,72	3,81	3,84	3,7925	0,08165	5	4	4
2	0,71	3,6	3,53	3,56	3,47	3,54	0,08727			
3	0,67	3,45	3,35	3,3	3,25	3,3375	0,13594	5		
4	0,61	3,2	3,27	3,15	3,29	3,2275	0,1027			
5	0,56	3,09	2,99	2,97	3,03	3,02	0,08432			

### Таблица 2

	$m, \text{ кг}$	$M, \text{ кг}$	$M/m$	$t_1, \text{ с}$	$t_2, \text{ с}$	$t_3, \text{ с}$	$t_4, \text{ с}$	$\langle t \rangle, \text{ с}$	$\Delta t, \text{ с}$
1	2,7	105	38,8889	3,54	3,6	3,65	3,6	3,5975	0,07175
2	5,4		19,4444	2,47	2,37	2,51	2,4	2,4375	0,10188
3	8,1		12,963	1,92	1,92	1,96	1,97	1,9425	0,04211
4	10,8		9,72222	1,71	1,7	1,72	1,71	1,71	0,01383
5	13,5		7,77778	1,52	1,5	1,48	1,54	1,51	0,04135



