

Федеральное агентство по образованию
Сибирский государственный аэрокосмический университет
имени академика М. Ф. Решетнева

УДК 537.2 (075.5)

Рецензент
доктор физико-математических наук, профессор
Е. В. БАБКИН

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ КИНЕМАТИКИ И ДИНАМИКИ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ НА МАШИНЕ АТВУДА

*Методические указания к выполнению
лабораторной работы 12*

Изучение законов кинематики и динамики поступательного движения на машине Атвуда: Метод. указания к выполнению лабораторной работы 12 / Сост. Т. А. Слинкина, Л. И. Чернышова; СибГАУ. Красноярск, 2005. 11 с.

В методической разработке приведены краткая теория, описание экспериментальной установки и порядок проведения работы. Даны вопросы и список рекомендуемой литературы, необходимые для подготовки, проведения и защиты работы.

© Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева, 2005

Подписано в печать 12.01.2005. Формат 60×84/16. Бумага офисная.
Гарнитура «Таймс». Печать плоская. Уч-изд. л. 0,83. Усл. п. л. 0,69.
Тираж 100 экз. Заказ С

Красноярск 2005

Редакционно-издательский отдел СибГАУ.
Отпечатано в отделе копировально-множительной техники СибГАУ.
660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31.

Лабораторная работа 12

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ КИНЕМАТИКИ И ДИНАМИКИ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ НА МАШИНЕ АТВУДА

Цель работы: Определить ускорение свободного падения тела на машине Атвуда. Изучить законы равномерного и равнопеременного прямолинейного движений.

Приборы и принадлежности: Машина Атвуда, грузы.

1. КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Механика – это часть физики, которая изучает закономерности механического движения и причины, вызывающие или изменяющие это движение.

Механическое движение – это изменение взаимного расположения тел или их частей в пространстве с течением времени. Обычно под механикой понимают **классическую механику**, в которой рассматриваются движения макроскопических тел, совершающиеся со скоростями, во много раз меньшими скорости света в вакууме.

Законы движения тел со скоростями, сравнимыми со скоростью света в вакууме, изучаются **релятивистской механикой**.

Квантовая механика изучает законы движения атомов и элементарных частиц.

Разделы механики:

Кинематика – изучает движения тел, не рассматривая причины, которые это движение обуславливает.

Динамика – изучает законы движения тел и причины, которые вызывают или изменяют это движение.

Статика – изучает законы равновесия системы тел.

Механика для описания движения тел в зависимости от условий конкретных задач использует разные упрощенные **физические модели**:

— **материальная точка** – тело, форма и размеры которого не существенны в условиях данной задачи.

— **абсолютно твердое тело** – тело, деформацией которого в условиях данной задачи можно пренебречь и расстояние между любыми двумя точками этого тела остается постоянным.

— **абсолютно упругое тело** – тело, полностью сохраняющее деформированное состояние после прекращения действия внешних сил.

Любое движение твердого тела можно представить как **комбинацию поступательного и вращательного движений**.

Поступательное движение – это движение, при котором любая прямая, жестко связанная с телом, остается параллельной своему первоначальному положению.

Вращательное движение – это движение, при котором все точки тела движутся по окружности, центры которых лежат на одной и той же прямой, называемой осью вращения.

Движение тел происходит в пространстве и во времени. Поэтому для описания движения материальной точки надо знать, в каких местах пространства эта точка находилась и в какие моменты времени она проходила то или иное положение.

Система отсчета – совокупность систем координат и часов, связанных с телом отсчета.

Наиболее употребительная система координат – **декартова**. Положение произвольной точки M характеризуется **радиусом-вектором** \vec{r} , соединяющим начало координат O с точкой M (рис. 1):

$$\vec{r} = x \cdot \vec{i} + y \cdot \vec{j} + z \cdot \vec{k}, \quad |\vec{r}| = r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2},$$

где \vec{i} , \vec{j} , \vec{k} – единичные векторы (орты) прямоугольной декартовой системы координат.

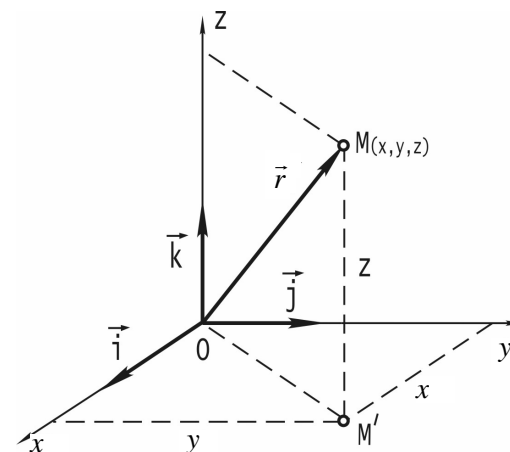


Рис. 1

Движение материальной точки полностью определено, если декартовы координаты материальной точки заданы в зависимости от времени:

$$x = x(t), \quad y = y(t), \quad z = z(t).$$

Эти уравнения называются **кинематическими уравнениями движения точки**. Они эквивалентны одному векторному уравнению движения точки: $\vec{r} = \vec{r}(t)$.

Линия, описываемая движущейся материальной точкой (или телом) относительно выбранной системы отсчета называется **траекторией**. Уравнение траектории можно получить, исключив параметр t из кинематических уравнений.

В зависимости от формы траектории движение может быть **прямолинейным** или **криволинейным**.

Длиной пути точки называется сумма длин всех участков траектории, пройденных этой точкой за рассматриваемый промежуток времени $\Delta S = \Delta S(t)$. Длина пути – **скалярная** функция времени (рис. 2).

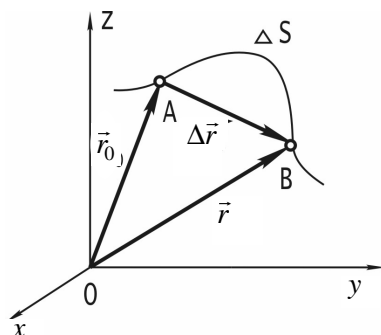


Рис. 2

Вектор перемещения $\Delta \vec{r} = \vec{r} - \vec{r}_0$ – вектор, проведенный из начального положения движущейся точки в положение ее в данный момент времени.

В пределе $\Delta t \rightarrow 0$ длина пути ΔS и длина хорды $\Delta r = |\Delta \vec{r}|$ будут все меньше отличаться: $dS = |d\vec{r}| = dr$.

Скорость есть величина векторная, которая определяет как быструю движения, так и его направление в данный момент времени.

Вектором средней скорости за интервал времени Δt называется отношение приращения $\Delta \vec{r}$ радиуса-вектора точки к промежутку времени Δt :

$$\langle \vec{V} \rangle = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}.$$

Мгновенная скорость векторная величина, равная первой производной по времени от радиуса-вектора \vec{r} рассматриваемой точки:

$$\vec{V} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt}.$$

Модуль мгновенной скорости (скалярная величина) равен первой производной пути по времени:

$$V = |\vec{V}| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta \vec{r}|}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{dS}{dt}.$$

При неравномерном движении модуль мгновенной скорости с течением времени изменяется. Поэтому можно ввести **скалярную величину** $\langle V \rangle$ – **среднюю скорость** неравномерного движения (другое название – средняя путевая скорость):

$$\langle V \rangle = \frac{\Delta S}{\Delta t}.$$

Длина пути S , пройденного точкой за промежуток времени от t_1 до t_2 , задается интегралом:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} V(t) \cdot dt.$$

При прямолинейном движении точки направления вектора скорости сохраняется неизменным. Движение точки называется **равномерным**, если модуль ее скорости не изменяется с течением времени ($V = \text{const}$), для него

$$S = V \cdot \Delta t.$$

Если модуль скорости увеличивается с течением времени, то движение называется **ускоренным**, если же убывает с течением времени, то движение называется **замедленным**.

Ускорение – это векторная величина, характеризующая быстроту изменения скорости по модулю и направлению.

Среднее ускорение в интервале времени Δt – векторная величина, равная отношению изменения скорости $\Delta \vec{V}$ к интервалу времени Δt :

$$\langle \vec{a} \rangle = \frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t}.$$

Мгновенное ускорение материальной точки – векторная величина, равная первой производной по времени скорости рассматриваемой точки:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t} = \frac{d\vec{V}}{dt}, \text{ отсюда } d\vec{V} = \vec{a} \cdot dt.$$

В общем случае плоского криволинейного движения вектор ускорения удобно представить в виде суммы двух проекций:

$$\vec{a} = \vec{a}_n + \vec{a}_\tau.$$

Тангенциальное ускорение \vec{a}_τ характеризует быстроту изменения скорости по модулю, его величина

$$a_\tau = \frac{dV}{dt}.$$

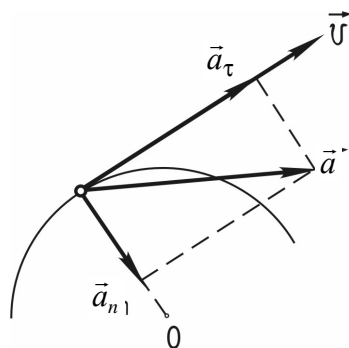


Рис. 3

Нормальное (центростремительное) ускорение \vec{a}_n направлено по нормали к траектории к центру ее кривизны O и характеризует бы-

строту изменения направления вектора скорости точки. Величина нормального ускорения:

$$a_n = \frac{V^2}{R},$$

где R – радиус круга.

Виды движения:

1. $\vec{a}_\tau = 0$, $\vec{a}_n = 0$ – прямолинейное равномерное движение ($\vec{a} = 0$).

2. $\vec{a}_\tau = a = \text{const}$, $\vec{a}_n = 0$ – прямолинейное равнопеременное (равноускоренное) движение. Если $t_0 = 0$, то $a_\tau = a = \frac{\Delta V}{t - t_0} = \frac{V - V_0}{t}$,

откуда $V = V_0 + at$,

$$S = \int_0^t (V_0 + at) dt = V_0 t + \frac{at^2}{2}.$$

3. $a_\tau = 0$, $a_n = \text{const} = \frac{V^2}{R}$ – равномерное движение по окружности.

4. $\vec{a}_\tau \neq 0$, $\vec{a}_n = 0$ – криволинейное равномерное движение.

Второй закон Ньютона – основной закон динамики поступательного движения – отвечает на вопрос, как изменяется механическое движение материальной точки (тела) под действием приложенных к ней сил.

Ускорение, приобретаемое материальной точкой (телом), прямо пропорционально вызывающей его силе (равнодействующей), совпадает с ней по направлению и обратно пропорционально массе материальной точки (тела):

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} \text{ или } \vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{d\vec{p}}{dt}.$$

Более общая формулировка второго закона Ньютона: **скорость изменения импульса материальной точки равна действующей на нее силе.**

Основной закон динамики материальной точки выражает принцип причинности в классической механике – однозначная связь

между изменением с течением времени состояния движения и положения в пространстве материальной точки и действующей на нее силой, что позволяет, зная начальное состояние материальной точки, вычислить ее состояние в любой последующий момент времени.

Масса – физическая величина, одна из основных характеристик материи, определяющая ее инерциальные и гравитационные свойства.

Сила – векторная величина, являющаяся мерой механического действия на тело со стороны других тел или полей, в результате которого тело приобретает ускорение или изменяет форму и размеры.

Механическое взаимодействие может осуществляться как между непосредственно контактирующими телами (например, при ударе, трении, давлении друг на друга и т. п.), так и между удаленными телами.

Особая форма материи, связывающая частицы вещества в единые системы и передающаяся с конечной скоростью действия одних частиц на другие, называется **полем**.

Взаимодействие между удаленными телами осуществляется посредством связанных с ними гравитационных и электромагнитных полей. В системе отсчета связанной с Землей, на всякое тело массой m действует сила

$$\vec{P} = m \cdot \vec{g},$$

которая называется **силой тяжести** – сила, с которой тело притягивается Землей. Под действием силы тяжести к Земле все тела падают с одинаковым ускорением $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, называемым **ускорением свободного падения**.

Весом тела называется сила, с которой тело вследствие тяготения к Земле действует на опору или натягивает нить подвеса.

Сила тяжести действует всегда, а вес проявляется лишь тогда, когда на тело кроме силы тяжести действуют другие силы. Если тело свободно движется в поле силы тяготения, то $\vec{a} = \vec{g}$ и вес равен нулю, то тело будет невесомым.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Машина Атвуда состоит из вертикальной штанги со шкалой, в верхней части которой установлен легкий блок на подшипниках, способный вращаться с незначительным трением. На штанге

крепятся три кронштейна. Через блок перекинута нить с прикрепленными на ее концах одинаковыми грузиками m . Если положить на правый грузик перегрузок m_1 , то система получит возможность под действием силы тяжести перегрузка двигаться с ускорением.

Систему в состоянии покоя удерживает электромагнит после подведения к нему напряжения. Электромагнит установлен на верхнем кронштейне. Верхний и средний кронштейны можно перемещать по штанге и фиксировать в любом положении.

Это дает возможность изменять длину пути равноускоренного и равномерного движений.

На среднем кронштейне закреплено кольцо, предназначенное для снятия перегрузка, и фотоэлектрический датчик, фиксирующий начало равномерного движения и включающий секундомер.

На неподвижном нижнем кронштейне установлены резиновые амортизаторы и еще один фотоэлектрический датчик, фиксирующий окончание движения системы и выключающий секундомер. Используя машину Атвуда можно с помощью законов кинематики и динамики прямолинейного равномерного и равнопеременного движений опытным путем определить ускорение свободного падения g . Через легкий блок перекинута нить с двумя одинаковыми грузами m на концах. Если на правый груз положить перегрузок m_1 , то система, состоящая из двух грузов с массами m и перегрузка m_1 получит ускорение a под действием силы тяжести перегрузка.

На основании второго закона Ньютона можно записать:

$$m_1 g = (2m + m_1) a. \quad (1)$$

До кольца на среднем кронштейне система движется прямолинейно равноускоренно:

$$S_1 = \frac{at_1^2}{2}, \quad V_1 = a \cdot t_1. \quad (2)$$

На кольце перегрузок будет отцеплен и дальше система из двух грузов будет двигаться равномерно со скоростью V_1 и пройдет путь S_2 :

$$S_2 = V_1 \cdot t_2. \quad (3)$$

Решая систему уравнений (1), (2) и (3), получим выражение для определения ускорения свободного падения:

$$g = \frac{(2m + m_1)}{m_1} \cdot \frac{S_2^2}{2S_1 \cdot t_2^2}. \quad (4)$$

3. Ход выполнения работы

1. На правый груз m положить перегрузок m_1 .
2. Совместить нижнюю грань правого груза с чертой, нанесенной на верхнем кронштейне.
3. Измерить и записать в таблицу по шкале на стойке прибора пути равнопеременного и равномерного движений системы (S_1 и S_2).
4. Включить прибор в сеть.
5. Нажать клавишу «СЕТЬ», проверяя все ли индикаторы секундомера высвечивают цифру нуль.
6. Нажать клавишу «ПУСК».
7. Записать время равномерного движения системы t_2 .
8. Нажать клавишу «СБРОС».
9. Повторить измерения времени по пунктам 1, 2, 6, 7, 8 не менее пяти раз.
10. Отжать клавишу «СЕТЬ» и выключить прибор из сети.
11. Определить и записать в таблицу среднее значение времени движения системы на участке S_2 по формуле:

$$\langle t_2 \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_2,$$

где n – количество измерений.

12. При помощи формулы (4), определить значение ускорения свободного падения g , используя среднее значение времени $\langle t_2 \rangle$.
13. Определить относительную погрешность измерения ускорения свободного падения по следующей формуле:

$$\delta = \frac{|g - g_T|}{g_T} \cdot 100 \%,$$

где g – экспериментальное значение ускорения свободного падения;
 g_T – теоретическое значение ускорения свободного падения равное $9,8 \text{ м/с}^2$.

14. Сделать вывод. Результаты занести в таблицу:

№ п/п	m , кг	m_1 , кг	S_1 , м	S_2 , м	t_{2i} , с	$\langle t_2 \rangle$, с	g , м/с ²	g_T , м/с ²	δ , %
1									
2									
3									
4									
5									

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите основные кинематические характеристики движения точки. Какое движение называется поступательным?
2. Какое движение называется равномерным; равномерным прямолинейным?
3. Каков смысл нормального и тангенциального ускорений точки? Как направлены эти ускорения и чему они численно равны?
4. Сформулируйте второй закон Ньютона.
5. Выведите расчетную формулу (4) для определения ускорения свободного падения в этой работе?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трофимова, Т. И. Курс физики / Т. И. Трофимова. М.: Высш. шк., 1998.
2. Савельев, И. В. Курс общей физики: в 5-ти кн. Кн. 1. Механика / М.: Астрель-АСТ, 2001.
3. Детлаф, А. А. и др. Курс физики / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. Т. 1. М.: Высш. шк., 1999.