

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
Отделение естественных наук ШБИП

---

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ШБИП  
\_\_\_\_\_ Д.В. Чайковский  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

**О.Г. Ревинская, Н.С. Кравченко**

## **УСКОРЕНИЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ**

Учебно-методическое пособие по изучению моделей физических  
процессов и явлений на компьютере  
с помощью лабораторной работы № МодМ–01  
для студентов всех специальностей

Издательство  
Томского политехнического университета  
2022

УДК 53. 076

**Ревинская О.Г.**

Ускорение свободного падения: учебно-методическое пособие по изучению моделей физических процессов и явлений на компьютере с помощью лабораторной работы № МодМ–01 для студентов всех специальностей / О.Г. Ревинская, Н.С. Кравченко; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2022. – 10 с.

**УДК 53.076**

Учебно-методическое пособие рассмотрено и рекомендовано к изданию  
методическим семинаром отделения естественных наук ШБИП

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Зав. ОЕН ШБИП

проф., доктор физ.-мат. наук

В.П. Кривобоков

Председатель учебно-методической комиссии

А.В. Макиенко

*Рецензент*

доктор тех. наук, профессор Томского политехнического университета

*В.А. Москалев*

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2002–2022

© Ревинская О.Г., Кравченко Н.С., 2002–2022

© Оформление. Издательство Томского  
политехнического университета, 2022

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № МодМ–01 ПО ИЗУЧЕНИЮ МОДЕЛЕЙ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ НА КОМПЬЮТЕРЕ

## *Ускорение свободного падения*

**Цель работы:** изучение одномерного равноускоренного движения. Определение ускорения свободного падения на одной из планет Солнечной системы (например, на Земле).

### 1. Теоретическое содержание

#### 1.1. Равнопеременное прямолинейное движение

По виду траектории в кинематике движение может быть прямолинейным и криволинейным. Криволинейным называют движение, траекторией которого является кривая линия. **Прямолинейным** называют движение, траекторией которого является прямая линия.

По характеру изменения скорости движение может быть равномерным и ускоренным. Если тело движется с постоянной скоростью  $\vec{v} = const$ , движение является **равномерным**. При этом ускорение тела равно нулю, а движение является прямолинейным.

Если за любые равные промежутки времени скорость тела изменяется на одинаковую величину  $\Delta\vec{v} = const$ , движение называется **равнопеременным**. При этом ускорение тела отлично от нуля и не изменяется  $\vec{a} = const$ . Траекторией равнопеременного движения может являться как прямая, так и кривая линия.

Если при прямолинейном движении с постоянным ускорением скорость тела с течением времени уменьшается ( $\Delta v < 0$ ), движение называется **равнозамедленным**. Если скорость тела с течением времени увеличивается ( $\Delta v > 0$ ), движение называется **равноускоренным**.

Для описания движения в кинематике используют кинематические уравнения – уравнения зависимости физических величин (ускорения, скорости, радиус-вектора и пр.) от времени.

Равноускоренное прямолинейное движение описывается следующими **векторными кинематическими уравнениями:**

$$\text{уравнение ускорения } \vec{a} = const;$$

$$\text{уравнение скорости } \vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t;$$

$$\text{уравнение радиус-вектора } \vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}_0t + \frac{\vec{a}t^2}{2}$$

(где  $\vec{v}_0$  – скорость, а  $\vec{r}_0$  – радиус-вектор тела в момент времени  $t = 0$ ).

Для скалярного описания равноускоренного прямолинейного движения достаточно одномерной системы координат, направленной вдоль вектора скорости тела  $\vec{v}$  (рис. 1). В этой системе координат движение тела описывается следующими **скалярными кинематическими уравнениями**:

уравнение ускорения  $a = const$ ;

уравнение скорости  $v = v_0 + at$ ;

уравнение координаты  $x = v_0t + \frac{at^2}{2}$ ;

уравнение пути  $S = v_0t + \frac{at^2}{2}$ .

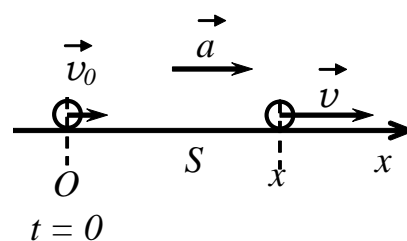


Рис. 1

## 1.2. Свободное падение тел

**Свободное падение** – это равноускоренное прямолинейное движение тел без начальной скорости ( $\vec{v}_0 = 0$ ) в вакууме под действием силы тяжести (под действием притяжения планеты, например, Земли).

Ускорение этого движения называют **ускорением свободного падения**. Вектор ускорения свободного падения  $\vec{g}$  направлен к центру Земли.

Для описания свободного падения выберем систему координат (рис. 2) так, чтобы начало координат совпадало с начальным положением тела  $x_0 = 0$ , а координатная ось  $x$  была направлена вниз (направление скорости  $\vec{v}$  и ускорения  $\vec{g}$  совпадут с направлением оси  $Ox$ ). Тогда скалярные кинематические уравнения имеют вид:

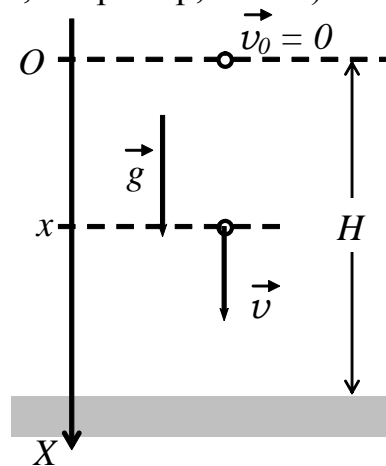


Рис. 2

$$g = const; v = gt; S = x = \frac{gt^2}{2}.$$

В момент падения на Землю с высоты  $H$  путь, пройденный телом, равен высоте, с которой оно упало,  $S = H = \frac{gt_{пад}^2}{2}$ . Тело упадет на Землю

спустя время  $t_{пад} = \sqrt{\frac{2H}{g}}$  после начала движения и будет иметь скорость  $v_{пад} = \sqrt{2gH}$ .

## 1.3. Закон всемирного тяготения

Сила тяжести – одно из проявлений закона всемирного тяготения.

Сила взаимного притяжения тел (гравитационная сила) действует между всеми телами независимо от их состояния и может быть опреде-

лена из **закона всемирного тяготения**. Сила, с которой два тела (материальные точки) притягиваются друг к другу, пропорциональна произведению их масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

где  $m_1, m_2$  – массы взаимодействующих тел,  $r$  – расстояние между центрами масс взаимодействующих тел,  $G$  – коэффициент пропорциональности, который называется **гравитационной постоянной** (постоянной всемирного тяготения).

Гравитационная постоянная численно равна силе притяжения между двумя телами (материальными точками) массой 1 кг каждое, которые расположены на расстоянии 1 м друг от друга: если  $m_1 = m_2 = 1$  кг,  $r = 1$  м, то сила  $F = G$ . Гравитационная постоянная в системе СИ равна  $G = 6,6740831 \cdot 10^{-11}$  Н·м<sup>2</sup>/кг<sup>2</sup> (по данным 2014 г.).

Тела шарообразной формы, имеющие равномерную плотность по всему объему, взаимодействуют как материальные точки с теми же массами, расположенные в центре этих тел.

Считая Землю (планету) шаром с постоянной плотностью, обозначим ее массу через  $M$ , ее радиус  $R$ , массу некоторого тела (материальной точки)  $m$ . Если высота тела над поверхностью Земли много меньше радиуса планеты, тогда высотой можно пренебречь. Сила взаимодействия тела и Земли вблизи ее поверхности равна  $F = G \frac{Mm}{R^2}$ . Эта сила действует как на тело, так и на Землю. Сила, действующая на тело со стороны Земли, называется силой тяжести и равна  $F = mg$ . Эта сила заставляет тело свободно падать на поверхность планеты. Следовательно,

$$G \frac{Mm}{R^2} = mg, \quad g = G \frac{M}{R^2}.$$

Видно, что ускорение свободного падения  $g$ , которое сообщает телу Земля, не зависит от массы тела и, следовательно, оно одинаково для всех тел.

Если учесть высоту тела над поверхностью планеты, то можно показать, что ускорение свободного падения уменьшается при удалении от поверхности планеты. Например, при подъеме на высоту 300 км над поверхностью Земли ускорение свободного падения уменьшится на 1 м/с<sup>2</sup> (на 10,2% ускорения свободного падения у поверхности Земли).

Для любой планеты известна высота над поверхностью, при подъеме на которую ускорение свободного падения можно считать таким же, как на поверхности. При падении с этой высоты ускорение свобод-

ного падения считается постоянным. Изменение ускорения свободного падения с высотой пренебрежимо мало по сравнению с другими параметрами задачи. При падении с высоты, не превышающей 0,012% радиуса планеты, изменение ускорения свободного падения не превышает 0,02% ускорения свободного падения у поверхности планеты.

## 2. Модель экспериментальной установки

В данной работе с помощью средств компьютерной графики моделируется процесс свободного падения тела (материальной точки) вблизи поверхности шарообразной планеты с высоты, не превышающей 0,01% радиуса планеты. Это позволяет считать ускорение свободного падения постоянным. Для определения времени падения используется секундомер, способный измерить время с точностью до 1 миллисекунды. При указанных условиях погрешность определения ускорения свободного падения, полученного из эксперимента, не превышает 0,07% от его значения.

Работа выполняется на IBM-совместимом персональном компьютере в виде самостоятельного Windows-приложения. Для удобства выполнения работы в программе предусмотрены три раздела: краткое описание работы; порядок выполнения работы и эксперимент. Переключение между разделами осуществляется с помощью кнопок «Ход работы» и «Эксперимент». Нажатие этих кнопок в зависимости от контекста работы программы приводят либо к вызову соответствующих разделов, либо к возвращению в раздел описания. Раздел программы «Эксперимент» содержит раскрывающийся список планет, ползунков для регулировки уровня, на который падает тело, и секундомер для измерения времени движения.

### Варианты выполнения работы

| Вариант | Планета  |
|---------|----------|
| 1       | Меркурий |
| 2       | Венера   |
| 3       | Земля    |
| 4       | Луна     |
| 5       | Марс     |

| Вариант | Планета |
|---------|---------|
| 6       | Юпитер  |
| 7       | Сатурн  |
| 8       | Уран    |
| 9       | Нептун  |
| 10      | Плутон  |

### 3. Порядок выполнения работы

#### 3.1. Краткое описание хода работы

1. Выберите планету, на которой будет происходить эксперимент (по указанию преподавателя).
2. Установите максимальное значение высоты.
3. Измерьте время падения тела с заданной высоты.
4. Опыт повторите 10 раз.
5. Определите среднее время падения тела.
6. Зная, что движение тела равноускоренное, по формуле найдите ускорение свободного падения.
7. Уменьшите высоту и снова выполните опыт, начиная с пункта 3.
8. Повторите опыт для трех различных высот.
9. Вычислите среднее ускорение свободного падения.
10. Вычислите абсолютную и относительную погрешность ускорения свободного падения.
11. Из закона всемирного тяготения вычислите теоретическое значение ускорения свободного падения.
12. Сравните теоретическое и экспериментальные значения ускорения свободного падения.
13. Сделайте выводы.

#### 3.2. Подробное описание хода работы

При выполнении работы рекомендуется следующая последовательность действий:

1. Раскрывающийся список **«Планета»** содержит все планеты Солнечной системы и Луну. Выберите небесное тело, на котором будет происходить эксперимент (по указанию преподавателя). Для выбранного небесного тела под списком автоматически указывается радиус и масса, которые необходимы для определения теоретического значения ускорения свободного падения из закона всемирного тяготения в дальнейшем.

2. Тело будет падать с заданной высоты до уровня, установленного с помощью ползунка **«Изменение высоты»**, который расположен справа от области эксперимента. Если ползунок перемещать вверх, уровень, до которого будет падать тело, будет подниматься, а путь, пройденный телом, будет уменьшаться. Точное значение пути в эксперименте указывается на экране в виде **«Высота: \*\*\*\* м»**. Установите ползунок **«Изменение высоты»** в самое нижнее положение – на поверхности планеты.

3. С помощью секундомера измерьте время падения тела. Для этого на секундомере нажмите кнопку **«Пуск»**. Начнется движение тела и одновременно включится секундомер. Во время движения список планет и ползунок изменения высоты

недоступны. После того, как тело опустится до выбранного уровня, секундомер автоматически остановится.

Если в процессе эксперимента Вы вспомнили, что неправильно установили какую-либо величину (выбрали высоту или задали планету), нажмите на кнопку «Стоп». Тело и секундомер остановятся. Список планет и ползунок изменения высоты станут доступными.

4. После нажатия кнопки «Сброс» тело возвратится в первоначальное положение, а показания секундомера будут равны нулю. Не изменяя положения уровня, до которого падает тело, нажмите кнопку «Пуск» и снова измерьте время падения тела. Повторите измерения не менее 10 раз.

Если перед включением секундомера вы не нажали кнопку «Сброс», после нажатия кнопки «Пуск» тело все равно вернется в начальное положение, а отсчет времени начнется заново.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ЗАПИШИТЕ В ТАБЛИЦУ.

5. Определите среднее время падения тела. Для этого сложите значения времени падения  $t_1, t_2 \dots t_n$ , измеренные в каждом опыте. Результат разделите на количество опытов  $n$ :  $t_{cp} = \frac{t_1+t_2+\dots+t_n}{n}$ . Значение  $t_{cp}$  должно содержать на один десятичный знак после запятой больше, чем в исходных значениях  $t_1, t_2 \dots t_n$ .

6. Движение тела равноускоренное. Если тело падает с некоторой высоты без начальной скорости с ускорением  $g$ , то за время  $t_{cp}$  оно пройдет расстояние  $H = \frac{gt_{cp}^2}{2}$ . Из этой формулы получите выражение для ускорения свободного падения. По значениям высоты и среднему времени падения вычислите ускорение свободного падения.

7. С помощью ползунка «Изменение высоты» установите новый уровень, на который будет падать тело. Выбранное значение пути указывается на экране в виде «Высота: \*\*\*\* м». Для того чтобы более точно установить уровень, на который будет падать тело, используйте кнопки клавиатуры  $\uparrow, \downarrow$  или скроллинг мыши.

Путь, пройденный телом, должен быть меньше предыдущего примерно на 10%. Для уменьшения погрешности старайтесь так расположить уровень, до которого будет падать тело, чтобы путь, пройденный телом, был равен целому числу метров.

**ВНИМАНИЕ!** Изменение уровня возможно только, когда секундомер выключен.

Повторите опыт, начиная с пункта 3.

8. Опыт необходимо выполнить для трех различных уровней, на которые падает тело (по 10 измерений для каждого уровня).

РЕКОМЕНДУЕТСЯ выбирать такие значения уровней, чтобы путь, пройденный телом, отличался от первоначального не более чем на 50% и равнялся целому числу метров (для уменьшения погрешности).

9. Вычислите среднее ускорение свободного падения. Для этого сложите значения ускорения свободного падения, полученные для каждой из трех высот. Полученный результат разделите на три (количество высот).

10. Вычислите абсолютную и относительную погрешность экспериментального значения ускорения свободного падения.

11. Из закона всемирного тяготения вычислите теоретическое значение ускорения свободного падения. Для этого используйте значение гравитационной посто-



янной  $G$ , равной в системе СИ  $6,6740831 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$  (по данным 2014 г.). Необходимо, чтобы теоретическое и экспериментальное значения имели одинаковое количество значащих цифр.

12. Сравните теоретическое и экспериментальное значения ускорение свободного падения. Совпадают ли теоретическое и экспериментальное значения? Что больше: разность между теоретическим и экспериментальным значениями или абсолютная погрешность ускорения свободного падения?

13. Сделайте вывод. Можно ли в проведенном эксперименте считать ускорение свободного падения постоянным? Почему?

**Таблица**

| Высота $H$ , м | №   | Время $t$ , с | Среднее время $t_{cp}$ , с | Ускорение свободного падения $g$ , м/с <sup>2</sup> | Среднее ускорение свободного падения $g_{cp}$ , м/с <sup>2</sup> |
|----------------|-----|---------------|----------------------------|---|--|
|                | 1   |               |                            |   |  |
|                | 2   |               |                            |   |  |
|                | 3   |               |                            |   |  |
|                | ... |               |                            |   |  |
|                | 10  |               |                            |   |  |
|                | 1   |               |                            |   |  |
|                | 2   |               |                            |   |  |
|                | ... |               |                            |   |  |
|                | 10  |               |                            |   |  |

#### 4. Контрольные вопросы

1. Какое движение называют равноускоренным?
2. Какими скалярными кинетическими уравнениями описывается равноускоренное прямолинейное движение?
3. Что такое свободное падение? Какими уравнениями оно описывается?
4. Сформулируйте закон всемирного тяготения.
5. Получите формулу для ускорения свободного падения из закона всемирного тяготения.
6. Сформулируйте цель работы.
7. Кратко опишите последовательность выполнения работы.

Учебное издание

РЕВИНСКАЯ Ольга Геннадьевна  
КРАВЧЕНКО Надежда Степановна

## УСКОРЕНИЕ СВОБОДНОГО ПАДАНИЯ

Учебно-методическое пособие по изучению моделей  
физических процессов и явлений на компьютере  
с помощью лабораторной работы № МодМ–01  
для студентов всех специальностей

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии с качеством  
предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати \_\_\_\_\_.2022. Формат 60x84/16. Бумага «Классика».

Печать RISO. Усл.печ.л. \_\_\_\_\_. Уч.-изд.л. \_\_\_\_\_.  
Заказ \_\_\_\_\_ . Тираж 50 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества

Издательства Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.  
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru