

ГРАВИТАЦИОННОЕ ПОЛЕ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЯ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Н.А. Сухорукова

Nadya.Suh.24@yandex.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрена история изучения гравитации, представлены основные понятия и определения теории гравитационного поля и его характеристик, а также примеры практического определения значения ускорения свободного падения на поверхности Земли

Ключевые слова

Гравитационное поле, ускорение свободного падения, измерение

Поступила в редакцию 24.11.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

Введение. Физические поля являются особой формой материи, физической системой, обладающей бесконечно большим числом степеней свободы [1]. Физическое поле, через которое осуществляется гравитационное взаимодействие, называют гравитационным полем [2].

Точное знание характеристик гравитационного поля дает возможность проводить расчеты орбит искусственных спутников Земли и межпланетных станций, определять параметры движения планет и других космических тел, в том числе решать такую актуальную и важную задачу, как оценка вероятности столкновения крупных метеоритов с нашей планетой. Примером важности прогнозирования таких столкновений является падение крупного метеорита в озеро Чебаркуль, приведшее к локальной ЧС.

История изучения гравитационного поля. Одним из первых направлений исследований, ассоциирующихся с современной наукой, является теория гравитации. Сначала теория гравитации развивалась благодаря изучению движения небесных тел. На этом этапе большой вклад в становление нового знания внесли всемирно известные ученые Галилео Галилей и Иоганн Кеплер. Результаты их исследований обобщил и установил основные математические соотношения, описывающие «небесную механику», Исаак Ньютон [3, 4].

Главной особенностью гравитационной силы является ее всеобщность. Обусловлено это тем, что любое физическое тело обладает массой, а гравитационная сила зависит от масс взаимодействующих тел (прямо пропорциональна их произведению) и от расстояния между телами (обратно пропорциональна его квадрату) (рис. 1).

Первопричиной взаимного притяжения тел является наличие у них массы. Именно массы тел определяют модуль силы притяжения, при этом вызванное силой притяжения ускорение тел различной массы в одном и том же гравитационном поле является одинаковым.

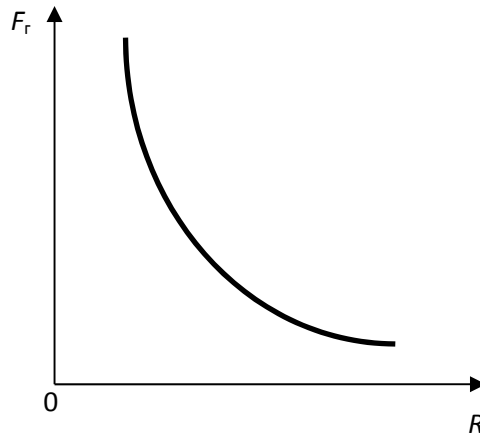


Рис. 1. Зависимость силы притяжения двух тел от расстояния между ними

У поверхности Земли ускорение силы тяжести, равно около $9,8 \text{ м/с}^2$. Вследствие того, что наша планета имеет форму геоида, величина g не везде одинакова: меньше на экваторе и на вершинах гор, больше у полюсов и в низинах. На величину ускорения свободного падения влияет также геологическая структура подповерхностных пластов, на чем основаны геологические методы поисков полезных ископаемых [5].

Ньютон лишь констатировал независимость величины ускорения свободного падения от массы тела, в начале XX столетия Эйнштейн объяснил эту особенность силы всеобщего тяготения с помощью разработанной им теории гравитации.

Гравитационное поле можно описать, задав в каждой точке пространства вектор, направление и величина которого строго соответствуют гравитационному ускорению, приобретаемому любым телом в этой точке. Графически поле тяготения можно описать, изобразив кривые, касательная к которым в каждой точке совпадает с направлением получаемого телом ускорения, при этом плотность кривых (количество на единицу площади) равна интенсивности гравитационного поля [3].

Гравитационное поле, созданное одним телом большой массы, изображено на рис. 2, *а*. Силовые линии в этом случае являются прямыми линиями, на пересечении которых находится это тело. На рис. 2, *б* представлено поле, созданное двумя телами, имеющими массу.

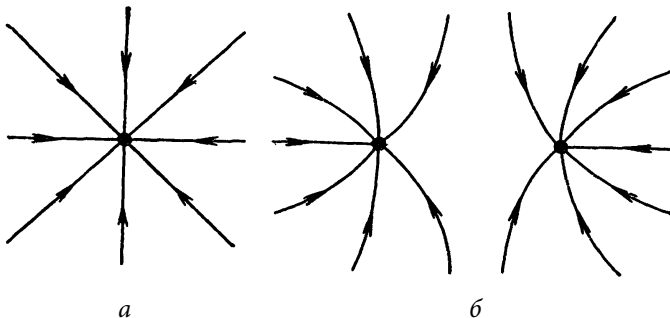


Рис. 2. Гравитационное поле, созданное одним (*а*) и двумя телами (*б*)

Общая теория относительности Эйнштейна включила ньютоновскую механику как частный случай для малых скоростей движения тел [6].

Основные характеристики гравитационного поля. Величина силы притяжения двух тел прямо пропорциональна их массам и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}.$$

Сила, действующая на помещенное в гравитационное поле тело, пропорциональна массе этого тела:

$$F = mg.$$

Силовой характеристикой любого физического поля является напряженность (векторная величина). Напряженность гравитационного поля численно равна отношению гравитационной силы F к массе тела m :

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m}.$$

При перемещении тела из одной точки гравитационного поля в другую работа силы тяжести определяется начальным и конечным положениями тела и не зависит от его траектории:

$$A = mg(h_2 - h_1).$$

Таким образом, гравитационное поле является потенциальным, поэтому работа гравитационной силы по замкнутому контуру равна нулю [5]. Если тело находится в нескольких гравитационных полях, то по принципу суперпозиции результирующая напряженность гравитационного поля системы тел равна векторной сумме напряженностей гравитационных полей, создаваемых каждым телом в отдельности.

Скалярную величину φ , равную отношению потенциальной энергии W_n тела, помещенного в данную точку поля, к его массе, называют потенциалом гравитационного поля:

$$\varphi = \frac{W_n}{m}.$$

Результирующий потенциал гравитационного поля системы тел также равен алгебраической сумме потенциалов гравитационных полей каждого из тел:

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i.$$

Потенциал поля φ определяют как

$$\varphi = -G \frac{M}{r},$$

где r — расстояние от источника поля до точки; M — масса тела, создающего поле; $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$. Знак «минус» показывает, что вектор напряженности g направлен в сторону уменьшения потенциала.

Примеры практического определения значения ускорения свободного падения на поверхности Земли. С помощью маятника. Одним из самых простых способов определения ускорения свободного падения является вычисление его из выражения для определения периода колебаний маятника [6]:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Отсюда ускорение свободного падения

$$g = 4\pi^2 \frac{l}{T^2}.$$

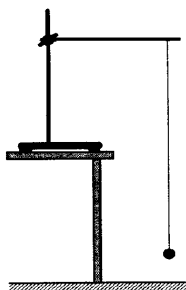


Рис. 3. Лабораторный маятник для определения ускорения свободного падения

Таким образом, практическая часть задачи сводится к измерению периода колебаний маятника и длины подвеса. В качестве средства измерения будем использовать секундомер или часы с секундной стрелкой и измерительную ленту. Также для проведения опыта понадобятся шарик с отверстием, нить, штатив с муфтой и кольцом.

Порядок выполнения действий:

1. Привяжем нить к шарик и измерим ее длину мерной лентой.
2. Закрепим на штативе нить с привязанным к ней шариком — маятник (рис. 3).
3. Отклоним маятник от положения равновесия на 30–40 см и отпустим его.
4. Измерим время Δt 20–30 полных колебаний (N).
5. Повторим измерения Δt (не изменяя условий опыта) и найдем среднее значение $\Delta t_{\text{ср}}$.
6. Вычислим среднее значение периода колебаний $T_{\text{ср}}$ по среднему значению $\Delta t_{\text{ср}}$.
7. Вычислим значение $g_{\text{ср}}$.
8. Полученные результаты занесем в табл. 1.

Данные измерения ускорения свободного падения с помощью маятника

Номер опыта	$l, \text{ м}$	N	$\Delta t, \text{ с}$	$\Delta t_{\text{ср}}, \text{ с}$	$T_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_{\text{ср}}}{N}, \text{ с}$	$g_{\text{ср}}, \text{ м/с}^2$
1	1,454	20	47,56	47,57	2,38	10,15021
2			47,91			
3			47,24			

Сравним полученное среднее значение для $g_{\text{ср}}$ со значением $g = 9,80665 \text{ м/с}^2$ и рассчитаем относительную погрешность измерения по формуле:

$$\varepsilon = \frac{|g_{\text{ср}} - g|}{g} = \frac{|10,15021 - 9,80665|}{9,80665} = 0,035 \text{ или } 3,5 \%$$

С помощью наклонной плоскости. При движении тела по наклонной плоскости на тело действуют три силы: сила тяжести, сила трения и сила нормальной реакции опоры [2]. Ускорение движения тела в этом случае определяется соотношением:

$$a = g (\sin \alpha - \mu \cos \alpha).$$

Подставив в это соотношение $\mu = F_{\text{тр}}/mg$ и $a = 2l/t^2$, выразим ускорение свободного падения:

$$g = \frac{2l}{t^2 \sin \alpha} + \frac{F_{\text{тр}}}{m} \operatorname{ctg} \alpha = \frac{2l^2}{t^2 h} + \frac{F_{\text{тр}} d}{mh},$$

где l — длина наклонной плоскости (путь, пройденный телом); t — время движения тела по наклонной плоскости; m — масса тела; α — угол наклона плоскости к горизонту; h — высота наклонной плоскости; d — длина основания наклонной плоскости; $F_{\text{тр}}$ — сила трения при движении тела по наклонной плоскости (рис. 4).

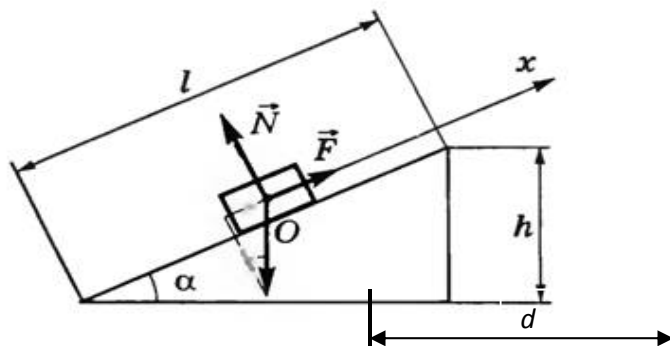


Рис. 4. Наклонная плоскость и определение ускорения свободного падения

Для определения ускорения свободного падения в качестве оборудования будем использовать наклонную плоскость, измерительную ленту, динамометр, весы и секундомер. Полученные результаты занесем в табл. 2.

Таблица 2

Данные измерения ускорения свободного падения с помощью наклонной плоскости

Номер опыта	l , м	d , м	h , м	$F_{тр}$, Н	m , кг	t , с	g , м/с ²	$g_{ср}$, м/с ²
1	1,58	1,30	0,91	1,56	0,253	2,2	9,94218	10,38396
2						2,3	10,25770	
3						2,1	10,95200	

Сравним полученное среднее значение для $g_{ср}$ со значением $g = 9,80665$ м/с² и рассчитаем относительную погрешность измерения по формуле:

$$\varepsilon = \frac{|g_{ср} - g|}{g} = \frac{|10,38396 - 9,80665|}{9,80665} = 0,059 \text{ или } 5,9 \%$$

С помощью свободного падения тела. Тело, падающее с высоты h , движется равноускоренно, поэтому [8]

$$h = \frac{gt^2}{2}.$$

Отсюда можно выразить ускорение свободного падения как:

$$g = \frac{2h}{t^2},$$

где t — время падения тела с высоты h .

Для определения ускорения свободного падения будем использовать измерительную ленту и секундомер. Полученные результаты занесем в табл. 3.

Сравним полученное среднее значение для $g_{ср}$ со значением $g = 9,80665$ м/с² и рассчитаем относительную погрешность измерения:

$$\varepsilon = \frac{|g_{ср} - g|}{g} = \frac{|10,23402 - 9,80665|}{9,80665} = 0,044 \text{ или } 4,4 \%$$

Таблица 3

Данные измерения ускорения свободного падения с помощью свободного падения тела

Номер опыта	h , м	t , с	g , м/с ²	$g_{ср}$, м/с ²
1	2,5	0,72	9,645062	10,23402
2		0,67	11,13834	
3		0,71	9,918667	

С помощью баллистической пушки. При бросании тела под углом к горизонту его движение можно разложить на горизонтальную и вертикальную составляющие (рис. 5) [7].

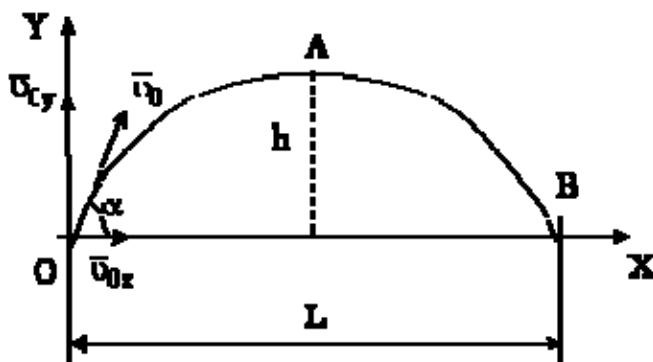


Рис. 5. Движение тела при бросании под углом к горизонту

Исходя из того, движение по горизонтали равномерное, а по вертикали ускоренное, получим

$$x = v_{0x}t = v_0 \cos \alpha t;$$

$$y = v_{0y}t - \frac{gt^2}{2} = v_0 \sin \alpha t - \frac{gt^2}{2}.$$

Дальность полета определим из соотношения

$$L = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}.$$

Теперь выразим ускорение свободного падения:

$$g = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{L}.$$

Значение начальной скорости можно определить из закона сохранения энергии, учитывая, что вся потенциальная энергия сжатой пружины переходит в кинетическую энергию снаряда:

$$\frac{Fl}{2} = \frac{mv_0^2}{2},$$

откуда $v_0^2 = \frac{Fl}{m},$

где m — масса снаряда; F — сила упругости пружины; l — удлинение пружины.

Тогда ускорение свободного падения определим как

$$g = \frac{Fl \sin 2\alpha}{mL}.$$

Для проверки расчетной формулы определения ускорения свободного падения будем использовать следующее оборудование: весы, динамометр, рулетку, линейку, баллистическую пушку с отвесом.

С помощью весов определим массу снаряда, динамометром измерим силу упругости пружины, линейкой — величину сжатия пружины, при помощи отвеса и транспортира баллистической пушки — угол стрельбы, рулеткой — дальность полета снаряда [8, 9].

Полученные результаты занесем в табл. 4.

Таблица 4

**Данные измерения ускорения свободного падения
с помощью баллистической пушки**

Номер опыта	m , кг	F , Н	α , град	l , м	L , м	g , м/с ²	$g_{\text{ср}}$, м/с ²
1	0,043	18	45	0,085	3,72	9,564891	9,51138
2					3,87	9,194159	
3					3,64	9,775109	

Сравним полученное среднее значение для $g_{\text{ср}}$ со значением $g = 9,80665$ м/с² и рассчитаем относительную погрешность измерения по формуле:

$$\varepsilon = \frac{|g_{\text{ср}} - g|}{g} = \frac{|9,51138 - 9,80665|}{9,80665} = 0,030 \text{ или } 3,0 \%$$

Выводы. При выполнении данной исследовательской работы рассмотрена история изучения понятия «гравитационное поле». Приведены основные характеристики гравитационного поля такие, как гравитационная сила, напряженность гравитационного поля, работа силы тяжести при перемещении тела, потенциал гравитационного поля.

Проведены измерения ускорения свободного падения на поверхности Земли с использованием маятника, наклонной плоскости, свободного падения тела и баллистической пушки. Получены результаты $g = 10,15021$ м/с²; $g = 10,38396$ м/с²; $g = 10,23402$ м/с² и $g = 9,51138$ м/с², оценены относительные погрешности измерений, которые составили, соответственно, $\varepsilon = 3,5 \%$; $\varepsilon = 5,9 \%$; $\varepsilon = 4,4 \%$ и $\varepsilon = 3,0 \%$, что является приемлемым для лабораторных измерений.

Литература

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Учеб. пособ. В 5 т. Т. 1. Механика. М.: Физматлит, Изд-во МФТИ, 2005. 560 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. В 4 т. Т. 1. Механика. Молекулярная физика и термодинамика / Под общ. ред. В.И. Савельева. 2-е изд. М.: КНОРУС, 2012. 528 с.

3. Физический практикум. Механика и молекулярная физика / Под ред. В.И. Ивероной. М.: Наука, 1967. 353 с.
4. Кунце Х.-И. Методы физических измерений. М.: Мир, 1989. 213 с.
5. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высш. шк., 2001. 542 с.
6. Бергман П. Загадка гравитации М.: Наука, 1969. 216 с.
7. Определение ускорения свободного падения с помощью универсального маятника // Научная библиотека: веб-сайт. URL: <http://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/1631/%D0%9E%D1%81%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BD%D0%BE%D0%B9%20%D1%82%D0%B5%D0%BA%D1%81%D1%82.pdf?sequence=4> (дата обращения: 20.12.2016).
8. Критика закона всемирного тяготения // Школа альтернативной физики: веб-сайт. URL: http://fizforum.ucoz.net/Forum_files/Graviti/shkola_novoj_fiziki-kritika_zakona_vsemirnogo_tjag.pdf (дата обращения: 02.12.2016).
9. История открытия закона Всемирного тяготения // refdb.ru: веб-сайт. URL: <https://refdb.ru/look/1087913.html> (дата обращения: 04.12.2016).

Сухорукова Надежда Алексеевна — студентка кафедры «Защита информации», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — И.Э. Степанова, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Физика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

GRAVITATIONAL FIELD AND PRACTICAL DETERMINATION OF GRAVITATIONAL ACCELERATION VALUE ON THE EARTH SURFACE

N.A. Sukhorukova

Nadya.Suh.24@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper examines the history of gravitation study, shows the main concepts and definitions of the theory of gravitational field and its characteristics, as well as examples of practical determination of the gravitational acceleration value on the Earth surface

Keywords

Gravitational field, gravitational acceleration, measurement

© Bauman Moscow State Technical University, 2016

References

- [1] Sivukhin D.V. Obshchiy kurs fiziki. T.1 Mekhanika [Physics guideline. Vol.1. Mechanics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005. 560 p. (in Russ.).
- [2] Savel'yev I.V. Kurs obshchey fiziki. T.1. Mekhanika. Molekulyarnaya fizika i termodinamika [Physics guideline. Vol.1. Mechanics. Molecular physics and thermodynamics]. Moscow, KNORUS Publ., 2012. 528 p. (in Russ.).
- [3] Iveronova V.I., ed. Fizicheskiy praktikum. Mekhanika i molekulyarnaya fizika [Practical physics. Mechanics and molecular physics]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 353 p. (in Russ.).
- [4] Kunze H.J. Physikalische messmethoden eine einfurung in prinzipen klassischer und moderner verfahren. Stuttgart, Teubner, 1988. (Russ. ed.: Metody fizicheskikh izmereniy. Moscow, Mir Publ., 1989. 213 p.)
- [5] Trofimova T.I. Kurs fiziki [Physics guideline]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2001. 542 p. (in Russ.).
- [6] Bergmann P.G. The riddle of gravitation. New York, Charles Scribner's Sons. (Russ. ed.: Zagadka gravitatsii. Moscow, Nauka Publ., 1969. 216 p.)
- [7] Opredelenie uskoreniya svobodnogo padeniya s pomoshch'yu universal'nogo mayatnika [Free fall acceleration determination by means of universal pendulum]. Nauchnaya biblioteka: website. URL: <http://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/1631/%D0%9E%D1%81%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BD%D0%BE%D0%B9%20%D1%82%D0%B5%D0%BA%D1%81%D1%82.pdf?sequence=4> (accessed 20.12.2016).
- [8] Kritika zakona vseirnogo tyagoteniya [The law of universal gravitation critics]. School of alternative physics: website. URL: http://fizforum.ucoz.net/Forum_files/Graviti/shkola_novoj_fiziki-kritika_zakona_vseirnogo_tjag.pdf (accessed 02.12.2016).
- [9] Istoriya otkrytiya zakona Vseirnogo tyagoteniya [Discovery history of the law of universal gravitation]. refdb.ru: website. URL: <https://refdb.ru/look/1087913.html> (accessed 04.12.2016).

Sukhorukova N.A. — student of Department of Information Security, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — I.E. Stepanova, Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor of Physics Department, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.