



СОДЕРЖАНИЕ

Основная школа

- Т. В. Никитина МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ СОБЫТИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ...3

Старшая школа

- Ш. Г. Зиятдинов ИДЕАЛЬНЫЕ И РЕАЛЬНЫЕ АМПЕРМЕТРЫ И ВОЛЬТМЕТРЫ В ЗАДАЧАХ И ОПЫТАХ 16
- С. В. Барышников ЭЛЕКТРОМЕТР НА ОСНОВЕ ДЕМОНСТРАЦИОННОГО ГАЛЬВАНОМЕТРА.....26

Высшая школа

- С. Э. Потоскуев УЧЕБНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАДЕНИЯ СПУТНИКА В ПОЛЕ ТЯЖЕСТИ ЗЕМЛИ.....32
- А. В. Проскуряков

Исследования

- В. Е. Сидоров ИЗУЧЕНИЕ РАЗДЕЛА «ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ» В ШКОЛЬНОМ КУРСЕ ФИЗИКИ..... 44
- А. П. Усольцев
- А. А. Сабирзянов
- Б. А. Русанов
- Б. М. Игошев
- А. С. Медведева ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫЙ УЧЕНИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ФИЗИКЕ В УСЛОВИЯХ ГИБРИДНОГО ОБУЧЕНИЯ В ГОСПИТАЛЬНОЙ ШКОЛЕ 53

Науковедение

- Ю. А. Сауров ЮРИЙ ИВАНОВ: ШАГИ В БУДУЩЕЕ... 61
- АВТОРЫ ЖУРНАЛА 68

*Основатель журнала, главный редактор в 1997–2025 гг. — д.п.н., профессор
Майер Валерий Вильгельмович (Глазов)*

Редакция журнала:

Е. И. Вараксина (главный редактор), Р. В. Акатов, Л. С. Кропачева, Р. В. Майер,
Е. С. Мамаева

Редакционный совет:

С. В. Барышников	д.ф.-м.н., профессор, Благовещенск
И. В. Гребенев	д.п.н., профессор, Нижний Новгород
М. Д. Даммер	д.п.н., профессор, Челябинск
П. В. Зуев	д.п.н., профессор, Екатеринбург
О. В. Лебедева	д.п.н., доцент, Нижний Новгород
Ю. А. Сауров	д.п.н., профессор, член-корр. РАО, Киров
А. П. Усольцев	д.п.н., профессор, Екатеринбург
А. А. Шаповалов	д.п.н., профессор, Барнаул

Оргкомитет конференции:

Н. Я. Молотков	д.п.н., профессор, Тамбов
Ф. А. Сидоренко	д.ф.-м.н., профессор, Екатеринбург
Я. А. Чиговская-Назарова	к.филол.н., доцент, ректор ГИПУ, Глазов
Т. Н. Шамало	д.п.н., профессор, Екатеринбург

Перечень ВАК: Журнал «Учебная физика» включен Высшей аттестационной комиссией (ВАК) Минобрнауки России в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук».

Адрес редакции, издателя и типографии: 427621, Удмуртия, Глазов, Первомайская, 25, ФГБОУ ВО «ГИПУ», Телефон: (341 41) 5–32–29.

E-mail: uch-fiz@mail.ru, kropa@bk.ru

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Глазовский государственный инженерно-педагогический университет имени В. Г. Короленко»

Журнал «Учебная физика» зарегистрирован Комитетом Российской Федерации по печати 4 февраля 1997 года, регистрационный № 015686; внесены изменения в запись о регистрации средства массовой информации Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 2 мая 2017 года, ПИ № ФС77–69506.

Подписной индекс: 79876.

Использование и перепечатка материалов допускаются только по договоренности с редакцией журнала.

Сдано в набор 02.06.26. Подписано в печать 24.06.26.

Дата выхода в свет: 30.06.26.

Формат 60 × 90 1/16. Усл. печ. л. 4,25.

Заказ 176. Тираж 200 экз. Цена свободная.

Первая страница обложки: Электрофор и электрофорный конденсатор, используемые в качестве источников электрического заряда в демонстрационных опытах по обоснованию закона Кулона (Майер В. В., Вараксина Е. И., Корнев Ю. А. Экспериментальное обоснование закона Кулона в 8 классе // Учебная физика. — 2026. — № 1. — С. 15–31).

Научная статья

ББК 74.262.23

УДК 372.853

С. Э. Потоскуев, А. В. Проскуряков
УЧЕБНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАДЕНИЯ
СПУТНИКА В ПОЛЕ ТЯЖЕСТИ ЗЕМЛИ

Сделана теоретическая оценка погрешности применения формулы для времени равноускоренного падения к случаю падения спутника на земную поверхность при отсутствии атмосферы. Проведены оценки погрешности при разных высотах, с которых начинает радиально падать спутник с нулевой начальной скоростью. Для оценки достоверности результатов, полученных сложными для школы и педагогического вуза математическими методами, проведено графическое сопоставление времени равноускоренного падения и падения в условиях, когда ускорение свободного падения зависит от высоты. Для создания наглядного образа изученных теоретически явлений, происходящих в поле тяжести Земли, выполнен и описан натурный модельный эксперимент. Изготовлена двумерная модель искривленного пространства в виде упругой мембраны. Изучена деформация мембраны телами разной массы, по результатам чего создан прибор для исследования скатывания тела (модель спутника) по деформированной мембране. Результаты натурального моделирования на качественном уровне хорошо согласуются с теоретическими положениями работы.

Ключевые слова: время падения, задача Кеплера, методическая погрешность, закон сохранения механической энергии.

S. E. Potoskuev, A. V. Proskuryakov
AN EDUCATIONAL STUDY OF A SATELLITE
FALL IN THE EARTH'S GRAVITY FIELD

A theoretical estimate of the error in applying the formula for the time of uniformly accelerated fall to the case of a satellite falling to the Earth's surface in the absence of an atmosphere was made. Error estimates were made for different altitudes from which the satellite begins its radial fall with zero initial velocity. To assess the reliability of the results obtained using mathematical methods that are difficult for schools and pedagogical universities, a graphical comparison of the time of uniformly accelerated fall was made and the fall under conditions where the acceleration of gravity depends on altitude. To create a visual representation of the theoretically studied phenomena occurring in the Earth's gravitational field, a full-scale model experiment was conducted and described. A two-dimensional model of curved space in the form of an elastic membrane was constructed. The membrane's deformation by bodies of varying masses was studied, leading to the creation of a device for studying the rolling of a body (a satellite model) along a deformed membrane. The results of the full-scale modeling are in good qualitative agreement with the theoretical premises of the study.

Keywords: fall time, Kepler problem, methodological error, law of conservation of mechanical energy.

DOI: 10.62957/2307-5457-2026-2-32-43

1. Введение

Теоретические аспекты представленного ниже исследования опубликованы авторами в сборнике научных трудов [1].

За какое время упадет на земную поверхность спутник, если вдруг прекратит свое движение по орбите? Например, при условии, что атмосфера отсутствует? Если при падении тела с небольшой высоты h вблизи поверхности Земли время падения вычисляется по формуле

$$\tau_0 = \sqrt{\frac{2h}{g}}, \quad (1)$$

то, как вычислить время, если исходная высота равна 100 км? Насколько правильно использовать при этом школьную формулу для движения с постоянным ускорением? Подобные вопросы нередко возникают при изучении тем, связанных с движением в поле тяготения Земли. Чаще всего это происходит при решении задач по физике и астрономии олимпиадного уровня. Подкрепленная количественным расчетом методическая сторона этого познавательного аспекта, на наш взгляд, недостаточно освещена в учебной литературе. Данная статья — попытка преодолеть эту трудность.

Случай радиального движения тела в поле центральной силы рассмотрен в книге [2, с. 333–339]. Там отмечается, что свободное падение или вертикальный подъем имеют большое практическое значение для запуска ракет в исследовательских целях. Рассмотрена задача радиального движения в условиях, когда ускорение свободного падения постоянно, а также с учетом изменения ускорения свободного падения с высотой. В этой книге получено выражение для времени радиального свободного падения в безвоздушной среде. Практическую значимость изучаемого случая радиального движения подтверждает наличие задачи [2, с. 401]. В задаче дана высота над поверхностью Земли, на которой отключается двигатель ракеты, поднимающейся вертикально, и скорость ракеты в момент выключения. Требуется, пренебрегая сопротивлением среды, найти максимальную высоту, на которую поднимается ракета, и ошибку, обусловленную непостоянством ускорения свободного падения в зависимости от высоты.

С точки зрения классической механики падение спутника из состояния покоя на поверхность Земли в инерциальной системе отсчета — частный случай радиального движения в так называемой задаче Кеплера. Для анализа явления на «школьном» уровне будем использовать модель, основные допущения которой следующие: 1) система отсчета — геоцентрическая, для рассматриваемого движения может считаться приближенно инерциальной; 2) Земля — шар радиуса R и массы M , которая распределена сферически симметрично; 3) спутник — материальная точка массы m , в начальный момент времени находящаяся в покое на высоте h от земной поверхности; 4) атмосфера отсутствует.

2. Учебная теория

Приведем общеизвестные этапы решения задачи на основе закона сохранения механической энергии [3, с. 39; 4, с. 228–229.].

Уравнение закона сохранения энергии для начального положения, то есть при $t = 0$, и положения в момент времени t имеет вид:

$$-G \frac{Mm}{r_0} = -G \frac{Mm}{r} + \frac{mv^2}{2}, \quad (2)$$

где r_0 — расстояние от центра Земли до спутника в начальный момент времени, r — расстояние от центра Земли до спутника в момент времени t . На рис. 1 показаны ось системы координат и эти расстояния.

Выражая скорость из формулы (2) и учитывая, что $v_r = dr/dt$, приходим к следующей связи между малыми приращениями времени и координаты

$$dt = \frac{\sqrt{r_0 r} dr}{\sqrt{2GM(r_0 - r)}}. \quad (3)$$

Интегрируя (3), получаем формулу для времени полета с расстояния r_0 до расстояния r :

$$\tau = \sqrt{\frac{r_0}{2GM}} \int_r^{r_0} \frac{\sqrt{r} dr}{\sqrt{r_0 - r}}. \quad (4)$$

Вычисляя интеграл [5, с. 45; 6] в формуле (4) и учитывая, что $r_0 = R + h$ и при достижении земной поверхности $r = R$, приходим к следующему выражению для времени падения с высоты h :

$$\tau = \sqrt{\frac{R+h}{2GM}} \left(\sqrt{Rh} + (R+h) \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{h}{R}} \right). \quad (5)$$

Выражение (5) и есть точная формула в рамках модели для времени падения с высоты h , учитывающая изменение ускорения в процессе движения. Данной формуле можно придать разный вид, выражение (5) — один из возможных вариантов. Удобно, используя стандартное обозначение ускорения свободного падения вблизи земной поверхности как g и учитывая, что $GM = gR^2$, придать формуле вид

$$\tau = \sqrt{\frac{R+h}{2gR^2}} \left(\sqrt{Rh} + (R+h) \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{h}{R}} \right). \quad (6)$$

Приведенные выражения позволяют оценить методическую погрешность «школьной» формулы для времени падения — погреш-

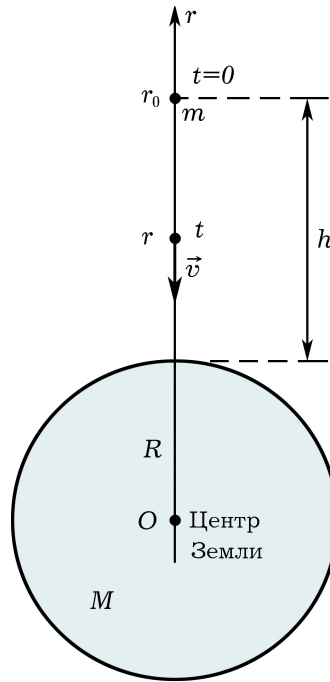


Рис. 1. К теоретическому решению задачи о радиальном свободном падении спутника в поле тяжести Земли

ность, обусловленную принятием допущения о постоянстве ускорения g . Под «школьной» формулой имеется в виду выражение (1): $\tau_0 = \sqrt{2h/g}$. На основании (6) для данной относительной погрешности получаем следующую оценку:

$$\varepsilon = \frac{\tau - \tau_0}{\tau_0} = \sqrt{\frac{R+h}{4R}} \left(1 + \frac{R+h}{\sqrt{Rh}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{h}{R}} \right) - 1. \quad (7)$$

Если выполняется неравенство $h < R$, разложение в ряд по параметру малости, приводит к упрощению формулы (7) до вида

$$\varepsilon = \frac{5h}{6R} - \frac{1}{40} \left(\frac{h}{R} \right)^2 + \dots \quad (8)$$

При грубой оценке погрешности для высот меньших радиуса Земли достаточно ограничиться первым слагаемым в разложении (8):

$$\varepsilon \approx \frac{5h}{6R}. \quad (9)$$

В табл. 1 приведены значения относительной методической погрешности, округленные в сторону увеличения, для разных начальных высот.

Приведенные в табл. 1 результаты получены по формулам (7) и (9), вывод которых непросто как для школьных, так и для вузовских курсов физики и математики. Поэтому на рис. 2 выполнено наглядное сравнение формул (1) и

Таблица 1

h , км	ε , %
100	1,4
200	3
380	5
600	8
1000	14
2000	26
4000	51
6300	83

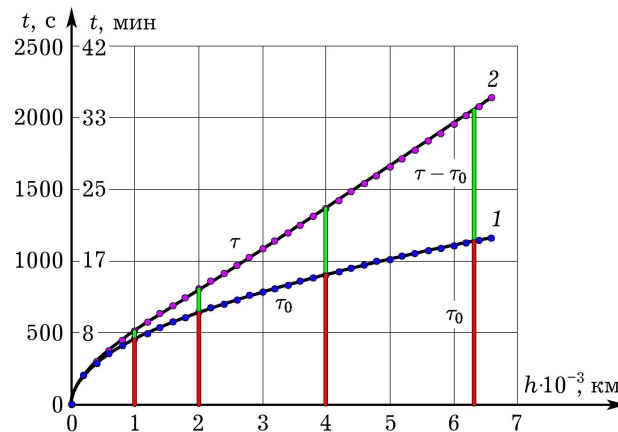


Рис. 2. Графики зависимости времени падения на поверхность Земли от высоты, с которой свободно падает тело: 1 — график построен при условии постоянства ускорения свободного падения по «школьной формуле (1)»; 2 — график построен по формуле (6), учитывающей зависимость ускорения свободного падения тела от высоты. Графики построены по точкам с шагом 200 км в электронных таблицах *Excel*

(6) графическим методом. Из рисунка видно, что при малых высотах до нескольких сотен километров результаты применения формул (1) и (6) практически совпадают, значит допустимо считать ускорение свободного падения постоянным с небольшой погрешностью. С увеличением высоты падения результаты применения формул (1) и (6) отличаются все сильнее. Зелеными отрезками показана разница между этими результатами $\tau - \tau_0$ при некоторых значениях высоты, взятых из табл. 1. Красные отрезки соответствуют времени падения τ_0 , вычисленному по «школьной» формуле (1). Отношение длин этих отрезков, оцененное на глаз, примерно равно погрешности, вычисленной по формуле (8) и приведенной в табл. 1.

Таким образом, «школьная» формула $\tau_0 = \sqrt{2h/g}$ для расчета времени падения спутника с высоты h на земную поверхность при отсутствии атмосферы может быть вполне использована для высот порядка нескольких сотен километров с указанной в таблице относительной погрешностью.

3. Проблема создания натурального учебного эксперимента

Доказательный натуральный эксперимент по проверке полученных теоретических выводов затруднителен. Однако *интересно* провести модельный эксперимент.

Общеизвестна «двумерная аналогия» [7, с. 73] искривленного пространства. Она встречается в научно-популярной литературе (рис. 3), поскольку способствует созданию наглядных образов движения тела и искривления пучка света вблизи массивной звезды или иного космического объекта. В книгах [7, 8, 9], которым принадлежат иллюстрации на рис. 3, мы не обнаружили прямого сравнения двумерной аналогии с деформированной упругой пластинкой. В книге В. С. Бескина [10, с. 60] аналогичная иллюстрация используется для объяснения отклонения траектории тела от прямолинейной вблизи массивного тела и сказано, что массивное тело, искривляя пространство, как будто деформирует «двумерную мембрану».

Моделирование искривленного пространства упругой мембраной, деформируемой массивным телом, подвергается критике. Richard Price в аннотации к своей статье [11] пишет следующее:

«Вера в то, что гравитация в искривленном пространстве-времени не может быть представлена просто и корректно, приводит к таким вводящим в заблуждение представлениям, как упругие двумерные слои, деформирующиеся при удержании тяжелых предметов. В этой статье предпринята попытка показать, что концептуальная основа искривленной пространственно-временной гравитации может быть представлена просто и корректно, и что пространственная кривизна деформированного эластичного листа сильно отличается от пространственно-временной кривизны, лежащей в основе гравитации» [11]. В оригинале: «The belief that curved spacetime gravity cannot be simply and correctly presented results in such misleading presentations as elastic two-dimensional sheets deformed as they support heavy objects. This article attempts to show that the conceptual basis of curved spacetime gravity can be simply and correctly presented, and that the spatial curvature of a deformed elastic sheet is very different from the spacetime curvature underlying gravity. This article introduces the idea of a «splittable» spacetime that has spatial curvature, but is missing most of the manifestations of gravity» [11].

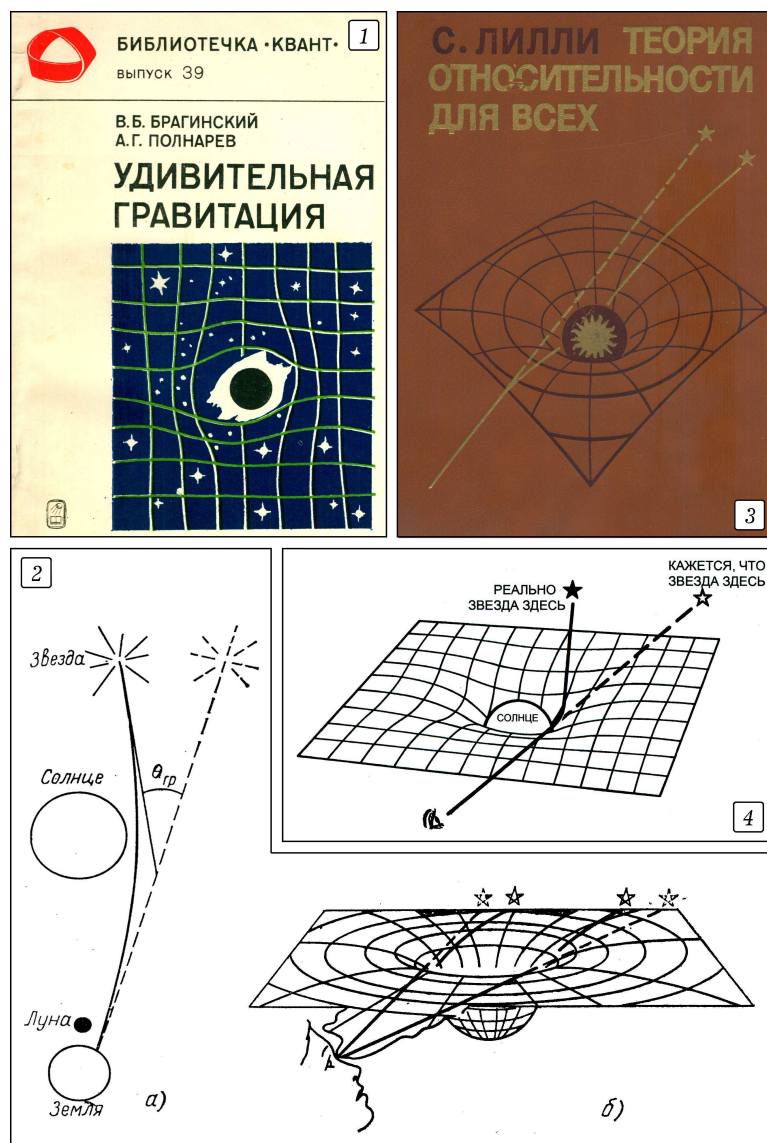


Рис. 3. Иллюстрации из научно-популярной литературы: 1 — обложка книги В.Б.Брагинского и А.Г.Полнарева [7]; 2 — рисунок из той же книги [7, с.73]; 3 — обложка книги С.Лилли [8]; 4 — иллюстрация из книги Л.М.Шлэйна (перевод с английского языка А.В.Рыбкиной и В.Н.Чувильдеева; под редакцией В.Н.Чувильдеева) [9, с.337].

Полный текст статьи оказался недоступен авторам, что не позволило им ознакомиться с заявленным в аннотации простым описанием кривизны пространства. Однако в аннотации не говорится про создание *наглядного образа* протекающих в гравитационном поле явлений посредством *натурного эксперимента*. Согласно исследованиям Т. Н. Шамало [12] наглядные образы изучаемых явлений, созданные в натурных опытах, являются совершенно необходимым условием развития мышления обучающихся, возникает проблема поиска такого эксперимента для изучения падения спутника в поле тяжести Земли. Делал ли кто-нибудь то, что изображено на рис. 3, помещал ли массивное тело на упругую мембрану и наблюдал ли движение тел в полученной модели искривленного пространства? *Гипотеза*: натурное воплощение двумерной аналогии искривленного массивным телом пространства позволит предложить модельные опыты, создающие наглядный образ радиального свободного падения в поле тяжести Земли с учетом изменения ускорения свободного падения с высотой над ее поверхностью.

4. Натурный модельный эксперимент

На рис. 4 показан прибор для воплощения двумерной аналогии: 1 — квадратная рама внутренним размером 250×275 мм, внешним 280×305 мм (ширина плоских сторон рамы 15 мм), изготовленная из гетинакса толщиной 5 мм; 2 — двумерная мембрана — сетка из швейной резиновой нити в тканевой оплетке, имеющая квадратные ячейки со стороной 15 мм; 3 — ножки дюралевые длиной 180 мм, диаметром 12 мм. Сетка изготовлена следующим образом. В рамке через 15 мм просверлены отверстия диаметром 2 мм. В

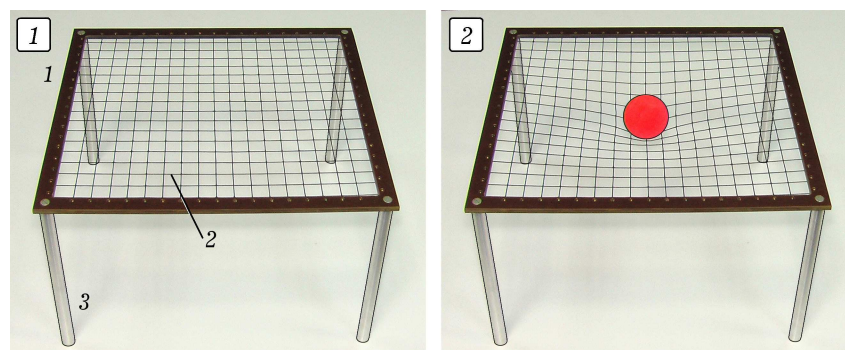


Рис. 4. Экспериментальная установка для моделирования гравитационного поля Земли упругой двумерной мембраной

них продеты концы нити так, чтобы нить не была натянута, но и не провисала. В отверстиях концы нитей заклинены отрезками деревянной зубочистки и проклеены секундным клеем. В местах пересечения перпендикулярно идущие нити точно соединены секундным клеем.

Слева на рис. 4 показан внешний вид прибора, справа — на мембрану помещено массивное тело — силиконовый шарик массой 37,8 г, диаметром 42 мм.

На рис. 5 мембрана деформирована телами разной массы и можно действительно видеть, что профиль деформированной мембраны похож на изображаемый в литературе. Далее нужно исследовать, как небольшие тела скатываются по этой деформированной мембране радиально — это будет моделью свободного радиального падения тела в поле тяжести, например, Земли.

Гипотеза дальнейшего исследования. Очевидно, что если бы профиль был прямолинейным, тело скатывалось бы по деформированной мембране с постоянным ускорением. Поскольку профиль не прямолинейный, то ускорение тела при скатывании должно изменяться, а именно, увеличиваться, поскольку по мере скатывания угол наклона поверхности по отношению к горизонту возрастает. По изготовленной сетке непросто скатить маленькое легкое тело, которое попросту провалится в ее ячейки или застрянет. Придется изготовить еще один прибор. Он должен состоять из двух

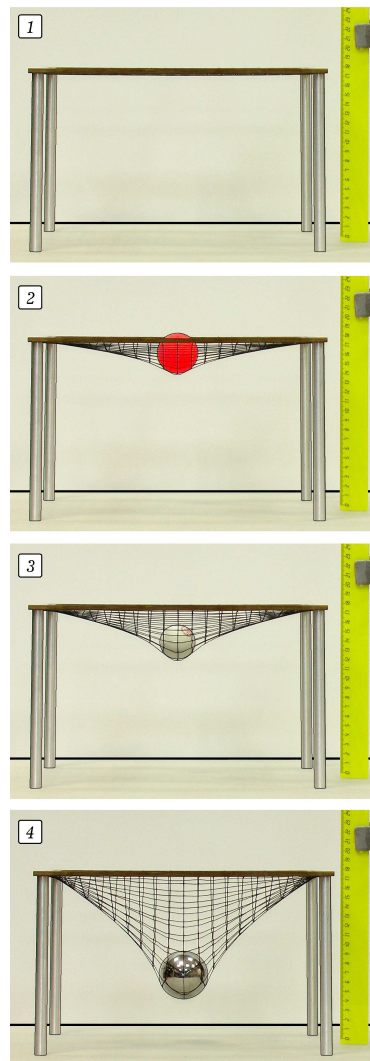


Рис. 5. Деформация мембраны массивным телом: 1 — мембрана не деформирована, тело отсутствует; 2 — масса тела (силиконовый шарик) составляет 37,8 г, радиус 21 мм; 3 — масса тела (шарик от пинг-понга, заполненный гайками) составляет 87,5 г, радиус 18,5 мм; 4 — масса тела (стальной шар) составляет 523,3 г, радиус 25 мм

горок — прямолинейной и искривленной согласно профилю деформированной мембраны. При скатывании по прямолинейной горке моделируется движение в поле тяжести с постоянным ускорением свободного падения, при скатывании по искривленной — с непостоянным ускорением свободного падения. Поскольку массивное тело, в гравитационном поле которого изучается движение, в обоих случаях одно и то же, углы наклона горок должны совпадать в их нижних участках. Следует иметь в виду, что скатывание в поле тяжести происходит быстро, поэтому, чтобы уменьшить «эффективное ускорение», горки располагают наклонно. Этот прием использован В. В. Майером и Р. В. Майером при изучении движения тела по циклоидальной горке в поле тяжести Земли [13]. Для пуска шариков в указанной работе использован электромагнит. На основе идей статьи [13] собран прибор для модельного исследования скатывания тела по деформированной упругой мембране.

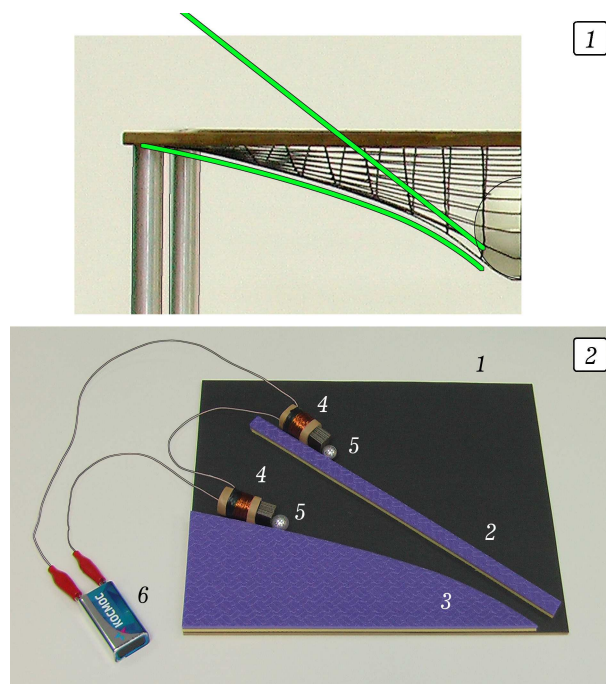


Рис. 6. Изготовление прибора для моделирования радиального падения спутника в поле тяжести Земли: 1 — формы двух горок находят по одной из фотографий деформированной мембраны (рис. 5.3); 2 — прибор, готовый к модельной демонстрации (цифровые обозначения пояснены ниже в тексте)

Этот прибор представлен на рис. 6. Сверху показано, как найти профиль искривленной горки. Снизу дан внешний вид готового

прибора: 1 — пластина ХДФ, обклеенная черной бумагой (с целью дальнейшего стробоскопического фотографирования) 250×210 мм; 2 — прямолинейная горка из изолона; 3 — искривленная горка из изолона; 4 — два электромагнита; 5 — модели спутников, движение которых исследуется, а именно, два стальных шарика диаметром 11 мм. Для изготовления электромагнита взяты 20 пластинок трансформаторного железа 12×32 мм так, что при их плотном сжатии получился сердечник сечением $10,5 \times 12$ мм из магнитомягкой стали. На длине сердечника 25 мм он покрыт двумя слоями изоленды. Поверх изоленды надеты два резиновых колечка шириной 5 мм, внутренним диаметром 11 мм, внешним диаметром 17 мм. Между ними намотаны аккуратно, но не виток к витку 200 витков медного провода диаметром 0,3 мм в лаковой изоляции. Начало и конец обмотки пайкой соединены с многожильными тонкими гибкими проводами. Таким образом изготовлены два одинаковых электромагнита. Они соединены последовательно и питаются от батарейки типа 6LR61 (PP3) 9 В.

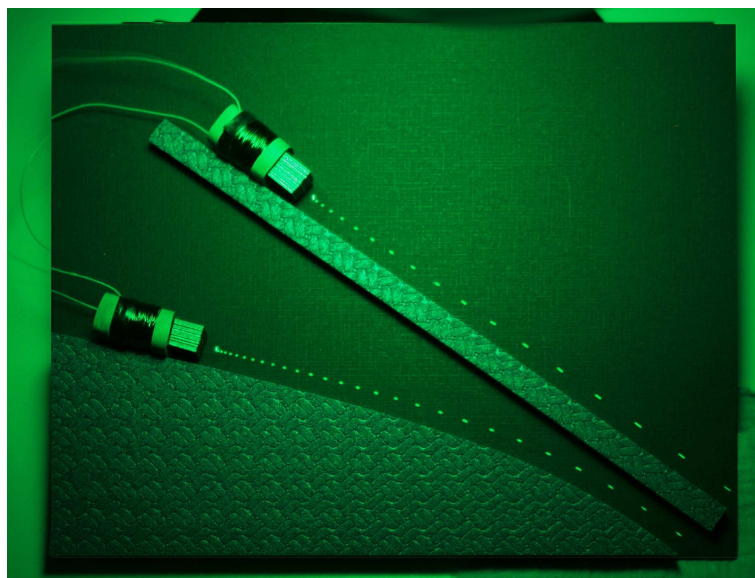


Рис. 7. Стробоскопическое фотографирование скатывания двух шариков. Шарик — модели спутников — отпущены с нулевой начальной скоростью с одной «высоты» («высота» соответствует *длине* пути шарика, скатывающегося по горке). Верхний спутник движется в гравитационном поле с постоянным ускорением свободного падения. Нижний спутник движется в гравитационном поле, в котором по мере приближения к Земле ускорение свободного падения возрастает и становится таким же, как в случае верхнего шарика

На рис. 7 приведены результаты стробоскопического фотографирования. Частота вспышек стробоскопа составляет 25 Гц. Прибор расположен под углом примерно 18° к горизонту, значит «эффективное ускорение свободного падения» [13] $g' = g \sin 18^\circ = 3 \text{ м/с}^2$.

5. Заключение

С. Е. Каменецкий и Н. А. Солодухин в классической книге [14] по применению моделей в обучении физике рассматривают разные виды соответствия между моделью и объектом: «Соответствие между моделью и моделируемым объектом может существовать на разных уровнях: на уровне совпадения отдельных элементов структуры модели и оригинала, на уровне совпадения некоторых их существенных характеристик, на уровне совпадения функциональной связи между характеризующими их величинами, на уровне сходства отношений между элементами модели и элементами объекта изучения» [14, с. 4]. Рассмотренная в статье натурная модель позволяет изучить свободное падение спутника в поле тяжести Земли на последнем из перечисленных уровней.

Натурная новизна выполненного исследования состоит в рассмотрении предела малых высот в изучении свободного радиального падения спутника в поле тяжести Земли; в разработке и описании натурального модельного эксперимента, позволяющего наглядно показать движение тела в поле тяжести Земли при условии изменения ускорения свободного падения с высотой.

Направления дальнейшего исследования могут быть связаны с более убедительным обоснованием применимости предложенной натурной модели к описанию явлений в поле тяжести Земли. Это может быть сделано, например, по стробоскопической фотографии на рис. 7, которая позволяет найти экспериментальную зависимость «ускорения свободного падения» от «высоты» и сравнить ее с теоретической зависимостью. Также интересно проверить, позволяют ли другие учебные модели гравитационного поля, описанные, например, в работе [15], убедительно продемонстрировать методическую погрешность применения школьной формулы для вычисления времени падения спутника.

ЛИТЕРАТУРА

1. Потоскуев С. Э., Проскуряков А. В. О методической погрешности применения школьной формулы для вычисления времени падения спутника // Проблемы учебного физического эксперимента: Сборник научных трудов. Выпуск 44. — М.: ИСПО РАО, 2026. — С. 87–89.
2. Эрике К. Космический полет. Том 1. Окружающие условия и небесная механика. Перевод с английского Г. А. Лебедева. — М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. — 586 с.

3. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: учеб. пособие: для вузов. Т. 1. Механика. — М.: Физматлит, 2001. — 222 с.
4. Мултановский В. В. Курс теоретической физики: Классическая механика. Основы специальной теории относительности. Релятивистская механика: учебное пособие для студентов физ.-мат. фак. пед. ин-тов. — М.: Просвещение, 1988. — 304 с.
5. Двайт Г. Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. — М.: Наука, 1978. — 228 с.
6. Интеграл Кеплера. — URL: <https://lisakov.com/blog/kepler-integral/> (дата обращения 01.08.2025).
7. Брагинский В. Б., Полнарев А. Г. Удивительная гравитация (или как измеряют кривизну мира). — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. — 160 с. — (Библиотечка «Квант». Вып. 39).
8. Лилли С. Теория относительности для всех: пер. с англ. З. А. Штейнграда / Под ред. Л. П. Грищука. — М.: Мир, 1984. — 503 с.
9. Шлэйн Л. М. Искусство и физика. Параллельные образы пространства, времени и света / Л. М. Шлэйн; авториз. пер. с англ. А. В. Рыбкиной, В. Н. Чувильдеева; под ред. проф., доктора физ.-мат. наук В. Н. Чувильдеева. — Н. Новгород: Изд-во ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2015. — 470 с.
10. Бескин В. С. Гравитация и астрофизика. — М.: Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 2008–2025. — 190 с.
11. Price R. Spatial curvature, spacetime curvature, and gravity // *American Journal of Physics*. — 2016. — V. 84. — Pp. 588–592.
12. Шамало Т. Н. Учебный эксперимент в процессе формирования физических понятий: Кн. для учителя. — М.: Просвещение, 1986. — 96 с.
13. Майер В. В., Майер Р. В. Экспериментальное изучение движения по циклоиде в поле тяжести // *Учебная физика*. — 2003. — № 5. — С. 31–53.
14. Каменецкий С. Е., Солодухин Н. А. Модели и аналогии в курсе физики средней школы: Пособие для учителей. — М.: Просвещение, 1982. — 96 с.
15. Мукушев Б. А. Экспериментальная установка, моделирующая силу всемирного тяготения // *Учебная физика*. — 2022. — № 1. — С. 27–32.

Городской дворец детского
и юношеского творчества
(Нижний Тагил)

Поступила в редакцию 08.10.25.