

А. В. Сорокин Н. Г. Торгашина
Е. А. Ходос А. С. Чиганов

Э Л Е К Т Р О Н Н Ы Й К У Р С

ФИЗИКА

НАБЛЮДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Учебное пособие



БИНОМ

Э Л Е К Т И В Н Ы Й К У Р С

Ф И З И К А

**А. В. Сорокин Н. Г. Торгашина
Е. А. Ходос А. С. Чиганов**

ФИЗИКА

НАБЛЮДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Учебное пособие

Под общей редакцией
к. ф.-м. н. А. В. Сорокина

Издание подготовлено при содействии
НФПК – Национального фонда подготовки кадров



Москва
БИНОМ. Лаборатория знаний
2006

УДК 075.3
ББК 22.3я721
С65

Сорокин А. В.

С65 Физика: наблюдение, эксперимент, моделирование. Элективный курс: Учебное пособие / А. В. Сорокин, Н. Г. Торгашина, Е. А. Ходос, А. С. Чиганов. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. — 199 с.: ил.

ISBN 5-94774-133-4

Данный элективный курс входит в образовательную область «Естественнознание», имеет модульную структуру (натурные наблюдения, демонстрационные эксперименты, лабораторные исследования, компьютерное моделирование).

Содержание курса и его организационно-методическое обеспечение является естественным объединением трех видов познавательной деятельности — наблюдения, эксперимента и моделирования. Особо важным в учебной практике такого рода является ее направленность на развитие универсальных способностей и формирование ряда ключевых компетентностей. В пособии имеется библиография учебно-методической литературы.

Учебное пособие может быть использовано в основной школе для предпрофильной подготовки, сопровождения базового профиля и расширения программы углубленного изучения физики в старших классах школы.

УДК 075.3
ББК 22.3я721

По вопросам приобретения обращаться:
(495) 157-19-02, e-mail: Lbz@aha.ru
<http://www.Lbz.ru>

ISBN 5-94774-133-4

© Сорокин А. В., Торгашина Н. Г.,
Ходос Е. А., Чиганов А. С., 2006
© БИНОМ. Лаборатория знаний,
2006

Оглавление

Предисловие	6
Глава 1. Практическая учебная физика	11
1.1. Физика в школе — зачем это надо?	11
1.2. Наблюдение в физике	12
1.3. Физический эксперимент	16
1.3.1. Измерение в физике	16
1.3.2. Погрешности измерений	17
1.3.3. Случайные и систематические погрешности измерений	19
1.3.4. Пример вычисления погрешностей	21
1.4. Моделирование в физике	23
1.5. Пример реальных исследований в учебной физике: условия плавания тел в ограниченных резервуарах	25
Глава 2. Наблюдения физических явлений окружающего мира	29
2.1. Алгоритм наблюдений	29
2.2. Наблюдение физических явлений неживой природы	30
2.2.1. Механическое движение	31
2.2.2. Тепловые и молекулярные явления	36
2.2.3. Электрические явления	37
2.2.4. Оптические явления	38
2.3. Наблюдение физических явлений живой природы	40
2.3.1. Механическое движение живого	41
2.3.2. Тепловые и молекулярные явления живого	43
2.3.3. Электричество в живой природе	46
2.3.4. Оптические явления в живой природе	46
2.4. Физика в технике	49
2.4.1. Механическое движение в технике	49
2.4.2. Тепловые и молекулярные процессы и явления в технике	50

2.4.3. Электрические и электромагнитные процессы и явления в технике	50
2.4.4. Оптика в технике	51

Глава 3. Физическое моделирование и мысленные эксперименты	52
3.1. Введение	52
3.2. Основные модели механики	55
3.2.1. Модель материальной точки	57
3.2.2. Модели абсолютно упругого и неупругого тела	59
3.2.3. Модель маятника. Гармонические колебания	61
3.2.4. Модель замкнутой системы	62
3.2.5. Модель движения в однородном потенциальном поле	63
3.3. Модели вещества	66
3.3.1. Модель идеального газа	66
3.3.2. Модель кристаллической решетки	67
3.4. Модели электричества	69
3.4.1. Модель проводимости	69
3.4.2. Модель эквипотенциальных поверхностей и силовых линий электрического поля	71
3.4.3. Модель колебательного контура	72
3.5. Модели оптики	73
3.5.1. Модель светового луча и тонкой линзы	73
3.5.2. Волновая модель света: явления интерференции, дифракции	75
3.6. Атомная физика	77
3.6.1. Модель атома Резерфорда	77
3.6.2. Модель атома Бора	78
3.6.3. Модель магнетизма	79
3.6.4. Модель взаимодействия излучения с веществом	81
Глава 4. Физический практикум	83
4.1. Механика	83
4.1.1. Модуль 1. Трение скольжения	83
4.1.2. Модуль 2. Равноускоренное движение	91
4.1.3. Модуль 3. Момент силы	99
4.1.4. Модуль 4. Исследование баллистического движения тел	107
4.2. Молекулярная физика	114
4.2.1. Модуль 5. Распределение Максвелла	114
4.2.2. Модуль 6. Броуновское движение	120
4.2.3. Модуль 7. Диффузия	125
4.2.4. Модуль 8. Изопроцессы в идеальном газе	131
4.3. Электричество	139
4.3.1. Модуль 9. Закон Кулона	139

4.3.2. Модуль 10. Движение заряженных частиц в электрическом поле	144
4.3.3. Модуль 11. Конструирование электрических цепей ..	150
4.3.4. Модуль 12. Резонанс в RLC-контуре	156
4.4. Оптика	164
4.4.1. Модуль 13. Дифракция. Измерение длины световой волны	164
4.5. Кванты и атомы	172
4.5.1. Модуль 14. Фотоэффект	172
4.5.2. Модуль 15. Атом водорода	180
 Приложение 1. Краткий справочник физических величин	187
 Приложение 2. Образовательные сайты естественных наук	194
 Приложение 3. Рекомендации к подготовке отчета и доклада по лабораторным исследованиям	195
 Заключение	197
 Литература	198

Предисловие

Лиха беда — начало! Действительно, в этой простой и мудрой поговорке отражена вся сложность возникновения нового. Открывая диалог с читателем, хотелось бы договориться о серьезной совместной работе. Это необходимое условие нашего плодотворного общения, которое должно принести и радость творчества, и что-то полезное.

Наша книга задумана как интересный и чуткий собеседник, коллега и друг по бесконечно увлекательному делу — познанию неизведанного. В каждом из нас, учителях или школьнике, навсегда остается живое любопытство раннего детства.

Сначала мы смотрим на яркие игрушки, подвешенные к нашей детской кроватке, потом пытаемся их потрогать, схватить и попробовать на вкус, потрясти или постучать по стене, чтобы услышать новые звуки. Встав на ноги, начинаем активно осваивать пространство, творить художественные шедевры надкушенным яблоком на стене. В этом калейдоскопе событий будут и первое падение, заноза, сломанная игрушка, сложенный из кубиков домик и много других интересных и поучительных опытов.

Конечно, столь трогательные родительские и детские воспоминания можно продолжить и далее. Все происходящее в детстве у каждого из нас очень разнообразно, и в то же время похоже. Именно на сходство хотелось бы обратить особое внимание.

Человек познает мир разными методами, однако в любом из них есть три взаимосвязанных этапа: **наблюдение**, **эксперимент** и **моделирование**. Эта универсальная связка настолько устойчива и необходима в нашей деятельности, что подобна воздуху, которым мы дышим и не замечаем его присутствия, пока он есть.

Чрезвычайно важным является то, что наша триада является основным инструментом образования и развития личности. В школе много разных предметов, все по-своему интересно и,

конечно же, необходимы. Физика среди них занимает особое место. Об этом много рассуждали, спорили, в разные времена внимание общества к этой науке то усиливалось, то ослабевало, однако суть проблемы остается неизменной — физика есть фундаментальная наука, во многом определяющая развитие нашей цивилизации.

Мы живем в двойственном мире, естественном и созданном человеком. Язык окружающего мира не всегда понятен и однозначен. Последствия наших действий в значительной степени зависят от знаний о мире, возможности понимать его законы. Физика за более чем 2000-летнюю историю развития накопила много полезных сведений и эффективных методов узнавания нового. Наблюдение, эксперимент и моделирование использовались во всех физических исследованиях, проведенных ранее, и будут использоваться впредь. И не только в физике, но и в других науках. Поэтому физические методики изучения мира, отшлифованные веками, имеют универсальную ценность.

Физика в современной российской школе все еще остается одной из важнейших учебных дисциплин. Конечно, проблем с ее изучением много: надо показывать опыты, выполнять лабораторные работы, создавать и приобретать лабораторное оборудование, учебные фильмы. Современные компьютеры, Интернет привнесли много нового и интересного в физику. Обучающие программы с «живыми» (анимационными) физическими моделями, компьютерные видеофильмы, автоматизированные лабораторные установки могли бы превратить физику в фантастическую компьютерную игру, где возможны любые чудеса. Однако физика настолько разнообразна и вездесуща, что любые, самые современные обучающие программы и учебники не могут охватить всего разнообразия физических явлений и эффектов. Настоящая физика — наука живая, она всегда вокруг нас, ее лабиринты таинственны, загадки разнообразны. И здесь каждому нужны универсальные способности: умение наблюдать и видеть главное, размышлять и строить гипотезы, изобретать способы и методы их опытной проверки, уметь анализировать происходящее и делать выводы.

Основная задача нашей книги состоит в том, чтобы помочь ученику и учителю в совершенстве овладеть языком физики, понять суть, основные законы и принципы этой науки, освоить универсальные методы исследований окружающего мира. Начальное физическое образование необходимо не только будущему физику-профессионалу, но и любому культурному человеку,

который может думать, эффективно и правильно действовать, достоверно прогнозировать свое будущее.

Учебное пособие состоит из четырех глав. Первая посвящена характеристике практической учебной физики в школе. Традиционные представления о сложности физики вполне обоснованны и подтверждаются реальной учебной практикой. Однако физику можно рассматривать как предметную универсальную область с множеством интересных явлений и эффектов, которые можно многократно наблюдать, задумываться над происходящим. Наблюдение в физике — это изучение, исследование, а не просто созерцание. Подготовленный и внимательный наблюдатель увидит, почувствует очень много, зафиксирует существенные детали явления и даже может провести количественную оценку некоторых параметров наблюдаемого явления.

Удивительной особенностью физики является возможность провести физический эксперимент. Что это такое, почему он необходим при изучении физики, что дает и какие способности развивает — все это мы стараемся подробно разъяснить. Здесь же представлены краткое изложение методов измерений физических величин и обработки результатов измерений, а также значимость количественного определения погрешностей измеренных величин.

На основе наблюдений и физических экспериментов можно строить различные догадки, гипотезы, придумывать объяснения — модели, использовать доступную математику и компьютерное моделирование для описания изучаемых явлений. Достоверность любой физической теории подтверждается опять же физическими экспериментами и наблюдениями, причем самыми разнообразными, которые можно придумать и реализовать. Получается спираль познания: наблюдение — эксперимент — моделирование — эксперимент — ...

В конце главы приведен простой пример реального исследования в учебной физике: изучение условий плавления тел в ограниченных объемах жидкости, механическое движение тел в поле тяжести Земли.

Во второй главе детально рассматриваются методы наблюдения природных явлений живой и неживой природы, физико-технических устройств и систем. Особое место в учебном процессе занимает наблюдение демонстрационного эксперимента. Суть любой физической демонстрации сводится к фокусировке внимания наблюдателя на специально выделенной стороне

физического явления. Демонстрационный эксперимент — это азбука для наблюдения. Далее следует переход от простых физических демонстраций к более сложным, а затем к практике наблюдений реальных процессов. Это позволяет учащимся постепенно формировать универсальную способность работать с разнообразными информационными потоками, извлекать из них достоверные данные.

Третья глава посвящена описанию основных моделей физики. Физические законы, уравнения, описывающие разнообразные процессы, формулируются на основе рассмотрения идеальных объектов, их взаимодействий друг с другом. Воссозданный в нашем сознании идеальный мир отражает основные, главные черты реального мира и позволяет проводить разнообразные мысленные эксперименты. В таких экспериментах можно семь раз мысленно отрезать, а не отмерить, опробовать разные измерения и только после этого приступить к реальному действию, соблюдая неукоснительное правило «Семь раз отмерь и раз отрежь!»

В четвертой главе представлено описание работ физического практикума. Лабораторные исследования разделены на пять тематических блоков: механика, строение вещества и молекулярная физика, электричество, оптика, квантовая физика. В каждом из блоков имеется несколько модулей, представляющих собой комплексные исследования физических процессов и явлений. В модуль входят три содержательные взаимосогласованные части: демонстрация явления или процесса, компьютерное моделирование и экспериментальное исследование. В каждом модуле представлен перечень лабораторного оборудования и материалов. Учебные экспериментальные задания сформулированы в виде открытых исследовательских задач, с возможностью выбора различных вариантов реализации.

Выполнение таких учебных исследований, даже с использованием простых опытов и измерений, предполагает предварительное планирование эксперимента, рассмотрение нескольких вариантов и выбор оптимального. Эта часть практикума является наиболее сложной для учащихся и должна сопровождаться консультациями с учителями или экспертами.

Взаимодействие экспериментатора с лабораторным оборудованием, отладка экспериментальной установки по сути своей являются непрерывной цепочкой физических экспериментов. В этом процессе активно работают все три формы: наблюдение, эксперимент, моделирование.

В заключении кратко подводятся итоги возможной деятельности читателя в сфере, охваченной содержанием данного учебного пособия. Независимо от количества и глубины проведенных исследований любой заинтересованный читатель становится нашим коллегой и получает возможность разделить радость познания неизведанного. Каждый может отчасти ощутить себя Исааком Ньютоном, Петром Лебедевым, Альбертом Майкельсоном и многими другими великими учеными. Исследование в физике развивает универсальные способности человека, которые остаются востребованными всю жизнь.

В учебном пособии имеются список учебной и научно-популярной литературы, приложения, содержащие краткие справочные таблицы физических величин, перечень физических образовательных сайтов и рекомендации к подготовке отчета и доклада по выполненной работе.

При выполнении физического практикума используются программные продукты «Живая физика», «Открытая физика», «Физика в картинках». Разработчиком и поставщиком дисков с этими программами является ООО «ФИЗИКОН»:

РФ, Московская область, 141700, г. Долгопрудный-1,
а/я 59, тел./факс (495) 408-6154, soft@physicon.ru,
<http://www.physicon.ru>, <http://college.ru>.

Практическая учебная физика

1.1. Физика в школе — зачем это надо?

Окружающий нас мир безграничен в своих проявлениях, многообразен, и поэтому его изучение идет по разным направлениям. В не столь далеком прошлом все естественные науки — физика, астрономия, биология, география и химия — были единым целым и назывались натурфилософией или знанием о природе. Среди них особо выделяется физика как «наука, изучающая простейшие и вместе с тем наиболее общие закономерности явлений природы, свойства и строение материи, и законы ее движения. Понятия физики и законов ее движения лежат в основе всего естествознания. Физика относится к точным наукам и изучает количественные закономерности явлений» [1].

Физика формировалась более 2000 лет и в наше время представляет собой особый род деятельности, позволяющий получать количественные знания о природе. Изучает физика самые разнообразные явления и объекты — от галактик до элементарных частиц.

В физике свой язык, разработанная система понятий, законы, принципы и досконально разработанные теоретические и экспериментальные методы исследований. Учеными многих поколений накоплены богатейшие сведения о свойствах и характеристиках многочисленных веществ и процессов.

А зачем физика в школе? Мне и так хорошо! Нажимаю кнопку, и компьютер включается. Хочешь — играй, хочешь — пиши письма друзьям из Австралии. Можно и музыку послушать, и фильм посмотреть. Где же тут физика?

А физика, дорогой читатель, везде! Книга у вас уже открыта. А в книге черным по белому четко пропечатаны буквы. Есть цветные картинки. Приятно смотреть и даже можно почитать и попытаться вникнуть в смысл текста. А можно

просто бросить книгу в костер или печку и посмотреть, сколько выделится калорий при полном ее сгорании. Можно ли на этом огне вскипятить кружку воды, чтобы угостить вас, читатель, душистым чаем?

Чтобы ответить на все эти вопросы правильно, необходимо знать две простые вещи: сколько энергии выделится при сгорании данной книги и хватит ли ее для нагревания кружки воды до точки кипения. И это еще не все! Возможно, что ваша вода так и не закипит, если она взята из-под крана и очень холодная.

Конечно, можно заглянуть в холодильник и достать стеклянную баночку домашнего варенья. Будьте осторожны! Банка может запотеть (на холодной поверхности сконденсируется пар и образуются капельки росы) и выскользнуть (трение между кожей пальцев и мокрой поверхностью стекла мало, вода служит смазкой!) из рук. А если вы забудете прикрыть дверцу холодильника, то в скором времени в комнате станет теплее, а холодильник перегреется и отключится.

Физика позволяет нам не тратить время на безнадёжные пробы, а с помощью ее законов прогнозировать конечные результаты. В школьной физике изучаются интересные и полезные в нашей жизни законы и эффекты. Загадки физики не дадут вам скучать и позволят узнать много нового, научиться изучать и понимать окружающий мир.

Физика — наука наглядная, но не простая. В учебной физике вы сумеете развить в себе внимательность, изобретательность, способность логически мыслить и прогнозировать результаты своих действий, что во всем другом обеспечит гарантии достижения успеха.

В процессе серьезной учебной работы можно научиться многому, обнаружить в себе скрытые ранее способности и четко зафиксировать свои профессиональные наклонности. Кроме того, в физике просто много интересных и загадочных явлений, эффектов, и работать с ними очень увлекательно.

1.2. Наблюдение в физике

Мир вокруг нас мы воспринимаем по-своему, индивидуально. Наши органы чувств хорошо приспособлены к многообразным явлениям природы, помогают человеку, как и другим живым организмам, правильно ориентироваться, действовать,

сохранять себя. Пять чувств (зрение, слух, осязание, обоняние, вкус), отпущенных нам природой, позволяют создавать свои представления о мире. У каждого из нас они различны, мы все видим субъективно, по-своему. В то же время единство природы общепризнанно и подтверждается многолетней практикой нашей цивилизации. Именно по этой причине науки о природе тесно взаимосвязаны.

История развития естествознания — это процесс установления однородных свойств окружающих нас объектов и определение качественных и количественных соотношений между этими свойствами.

Измерение количественных соотношений самых разнообразных величин с применением чувствительных приборов и хитроумных методов появилось не сразу. Основой современных экспериментальных методов были простые наблюдения природных явлений и сопоставления их характеристик с помощью органов чувств.

В физике и других естественных науках наблюдение очень значимо. Действительно, наши органы чувств позволяют воспринимать разнообразную информацию об окружающем мире. По отношению к предмету нашего обсуждения под наблюдением будем понимать любые взаимодействия человека, как живого мыслящего существа, с окружающим миром. Наблюдать — это не только видеть, но и слышать, осязать кожей, ощущать запахи и вкус. В человеческом организме заложена природой также возможность фиксации ориентации в пространстве и наличия силы тяжести или ускорения с помощью вестибулярного аппарата. Даже наличие электрических зарядов в воздухе или на каком-нибудь предмете мы можем обнаружить по поведению волосяного покрова (волосы встают дыбом). При более внимательном рассмотрении можно обнаружить много удивительных, еще не раскрытых в полной мере способностей человека при регистрации разнообразной информации, поступающей из окружающего мира.

В наблюдении могут быть задействованы все органы чувств в разнообразных комбинациях. Полученная информация анализируется как на сознательном, так и на бессознательном уровнях. В основном, это качественное сравнение в шкале «больше-меньше» или «одинаково». Количественная оценка возможна, но в сравнении с каким-либо аналогом, образцом или эталоном. Наше сознание играет очень большую роль в процедуре наблюдения. Иллюзии зрения, эхо и многое другое

корректируется, соотносится с историей явления, полученными ранее знаниями. В то же время возможны тупиковые ситуации, когда наши ощущения не воспринимаются сознанием.

Например, сравнение температуры воды в простом и доступном всем опыте. Наполните три небольших тазика водой: один — холодной, непосредственно из водопровода, второй — теплой, с температурой чуть выше комнатной, и третий — максимально горячей, в которой можно держать руку. Опустите одну руку в холодную воду, а другую — в горячую. Некоторое время подержите и одновременно переместите руки в тазик с теплой водой. Ощущения, особенно в первый момент, удивительные. Если вас спросить, в какой воде сейчас находятся ваши руки, ответа не последует. Наш мозг не может разобраться в ощущениях правой и левой рук!

Конечно, дальнейшее углубление в эту тему уведет нас от физики, но все же учет психофизиологических особенностей нашего организма и функций сознания совершенно необходим.

В физике наблюдение позволяет делать не только качественные оценки, но и устанавливать грубые количественные соотношения. Оценки по порядку величины доступны нашим органам чувств, а при сравнении с эталоном точность определения некоторой характеристики может быть достаточно высокой.

Рассмотрим процедуру оценки «на глаз», издали, высоты дерева в чистом поле. Если рядом не будет каких-либо масштабных объектов, определение высоты будет очень неточным. При наличии вблизи дерева масштабных объектов, например, стоящего рядом автомобиля или человека, высоту дерева, при наличии некоторого опыта, можно определить с точностью до 1 метра.

Наблюдения позволяют определять и ряд динамических характеристик, например скорость, ускорение. Примеры в неограниченном количестве можно найти в спорте, и многие из нас это делали много раз, играя в баскетбол, хоккей, футбол, катаясь на лыжах, велосипедах, совершая прыжки в воду.

Итак, исследователь-наблюдатель обладает универсальным комплектом информационных датчиков — органами чувств. Рассмотрим возможности наших естественных инструментов познания с точки зрения физика-экспериментатора.

Зрение. Дистанционный информационный канал, дальнедействующий, с широким диапазоном регистрируемых энергий оптических сигналов в видимом диапазоне электромагнитных

волн. Адаптированный к темноте человеческий глаз способен воспринять плотность потока энергии в десятки фотонов в секунду на квадратный сантиметр, что составляет около 5×10^{-18} Вт/см², и выдержать засветку прямым солнечным излучением с мощностью 5×10^{-4} Вт/см². Нормальный человеческий глаз одинаково четко фиксирует изображение звезды и фасеточную структуру глаза стрекозы, различает тысячи оттенков цветов.

Слух. Дистанционный информационный канал, дальнедействующий, воспринимающий звуковые колебания воздуха в диапазоне частот от 16 Гц до 20 кГц. Нижняя и верхняя границы плотностей потока энергии звуковых волн, отчетливо воспринимаемых человеческим ухом, составляют от 10^{-16} Вт/см² до 10^4 Вт/см². Дальность обнаружения акустического сигнала составляет десятки километров.

Обоняние. Дистанционный информационный канал, близкодействующий, воспринимающий запахи, то есть анализирующий малые примеси вещества в газовой фазе. Относительно высокая чувствительность, с широким диапазоном концентраций, дальность обнаружения источника примесей составляет десятки и сотни метров и зависит от их концентрации и атмосферных условий.

Осязание. Дистанционно-контактный информационный канал. Кожа на расстоянии воспринимает инфракрасное излучение через нагрев поверхности, потоки тепловой энергии при контакте с холодными или нагретыми телами, стационарное и переменное давление потоков газов и жидкостей, твердых тел. Частично осязание может дублировать слух.

Вкус. Контактный информационный канал. Анализирует вкусовыми рецепторами растворы и твердые вещества после растворения их слюной. Достаточно высокая чувствительность.

Краткий обзор «чувственных» датчиков убеждает нас в том, что получаемая информация о внешнем мире и состоянии самого человеческого организма разнообразна и дублируется несколькими каналами. На техническом языке наши органы чувств можно назвать универсальным контрольно-диагностическим комплексом с параллельными информационными каналами. Поэтому наблюдение можно рассматривать как физико-химический эксперимент с помощью всех органов чувств. Очевидно, что в этом эксперименте важны ограничения, связанные с безопасностью самого экспериментатора.

1.3. Физический эксперимент

«Эксперимент никогда
не обманывает, обманчивы
наши суждения».

Леонардо да Винчи

1.3.1. Измерение в физике

Его Величество Физический Эксперимент представляет собой интереснейшее изобретение человечества. Во всей своей красе и значимости он может предстать перед вами и на лабораторном столе, и на космических орбитах. Скатывание деревянного брусочка по наклонной плоскости в кабинете физики и первый запуск атомного реактора — физические эксперименты.

Физический эксперимент — воспроизведение природных или создание новых физических явлений и процессов в определенных условиях с целью исследования, испытания.

Законы природы устанавливаются на основании экспериментальных данных, многократно проверенных учеными в самых разных ситуациях. Физик с помощью эксперимента задает четкий вопрос природе и получает, как правило, однозначный ответ: да или нет!

Искусство экспериментатора заключается в том, чтобы правильно сформулировать вопрос — только тогда можно понять ответ матушки-природы.

В учебной физике нет необходимости использовать дорогостоящие экспериментальные установки и материалы. Наглядное и яркое проявление основных физических законов можно найти в простых физических явлениях и процессах, которые могут быть исследованы в любой школе.

Экспериментальные данные — это в основном численные значения физических величин, полученные в результате измерений. Измерить какую-либо физическую величину — значит сравнить ее с другой, однородной ей величиной, принятой условно за единицу.

Измерение — определение значения физической величины опытным путем при помощи технических средств и измерительных приборов. Так, измеряя массу любого тела, мы должны сравнивать ее с массой гири, хранящейся в Париже и которая по международному соглашению считается эталоном массы 1 кг.

1.3.2. Погрешности измерений

Получение надежных результатов является непростой задачей из-за погрешностей, возникающих при измерениях и вычислениях. Все измерительные приборы прямо или косвенно сверяются с приборами, проверенными на эталонах. Реально ни один физический прибор не удастся сделать абсолютно точным, сам процесс измерений подвержен разнообразным воздействиям. Погрешности измерений принципиально неустранимы и поэтому результаты измерений всегда отличаются друг от друга.

В задачу измерений входит не только получение численного значения физической величины и точности ее измерения, но и вероятности попадания полученного значения в заданные пределы. Цель измерений состоит в определении неизвестного заранее значения физической величины с минимальным интервалом погрешности и высокой вероятностью попадания в этот интервал.

В учебниках физики процедуре измерения всегда уделяется внимание. Однако на практике глубокого понимания сути и важности проблемы измерений традиционно не достигается. Эта ситуация иногда переходит и в высшие учебные заведения. Поэтому нам хотелось бы привлечь внимание читателя к этому вопросу следующим примером.

В XIX веке студенты под руководством К. Гаусса, великого немецкого математика, производили астрономические измерения. Однако результаты измерений одних и тех же величин никогда в точности не совпадали друг с другом. Такая ситуация повторялась неоднократно. Гаусс выразил недовольство работой студентов и заявил, что сам проведет все измерения и покажет, как нужно правильно измерять. Однако его измерения также имели разброс значений. Обвинения студентов в нерадивости были сняты, а Гаусс задумался над природой погрешностей измерений и способах их уменьшения и учета.

Отличие результатов единичных измерений от некоторого среднего, «истинного» значения, полученного во многих опытах, может быть обусловлено различными причинами. Это несовершенство приборов, ошибки экспериментатора при считывании показаний прибора, влияние случайных внешних факторов на процесс измерения (например, колебание влажности, температуры или давления воздуха), изменения самого объекта в результате процедуры и многие другие причины.

Практика выполнения лабораторных работ в школе так или иначе связана с получением уже измеренных ранее величин, например, значений коэффициентов трения различных материалов. После вычислений искомого коэффициента учащийся заглядывает в справочник и с удивлением обнаруживает, что там нет точного «истинного» значения, а указан некоторый интервал, например, 0,25–0,5 для скольжения дерева по дереву.

Разброс значений коэффициента трения обусловлен характером обработки поверхности испытуемых деталей, породой дерева и даже относительной ориентацией волокон трущихся образцов.

Поэтому любой, самый точный эксперимент дает среднее значение измеряемой в конкретных условиях физической величины. После занесения в справочные таблицы это среднее значение, полученное с определенной точностью, таковым и остается.

Измерения, при которых измерительный прибор дает непосредственно информацию о значении измеряемой физической величины, называют **прямыми измерениями**. Так, длину можно измерить линейкой, время — секундомером, силу — динамометром.

Измерения, при которых значение измеряемой величины получается путем вычислений на основе использования результатов измерений других величин, называют **косвенными измерениями**. Измерения плотности тел по их массе и объему, определение скорости машины по пройденному пути за известное время — все это примеры косвенных измерений.

При прямых измерениях погрешность устанавливается из анализа точности выбранного метода и точности приборов, а также из повторяемости результатов.

При косвенных измерениях отклонение от значений, полученных в прямых измерениях, может быть связано с идеализацией условий (например: не учитывается сопротивление воздуха при движении), неполным соответствием исследуемого объекта используемой упрощенной физической модели (например: измеряемый брусок может быть не идеальным параллелепипедом).

Абсолютной погрешностью физической величины X будем называть ΔX , которая находится как разница между измеренным $X_{\text{изм}}$ и средним $X_{\text{ср}}$ значением физической величины:

$$\Delta X = X_{\text{изм}} - X_{\text{ср}}, \quad (1.3.1)$$

а результат измерений записывается следующим образом:

$$X = X_{\text{изм}} \pm \Delta X. \quad (1.3.2)$$

Например, если известно, что расстояние измерено с абсолютной погрешностью 20 см, то нельзя сказать, хорошего качества это измерение или нет. Если с такой погрешностью измерена ширина реки Енисей, то это достаточно хороший результат, но если такая погрешность возникнет при измерении длины плаща или при расчете ширины парты, то это может привести к определенным проблемам. Следовательно, качество измерений определяется не только абсолютной погрешностью измерений, но и самим значением измеряемой величины. Характеристикой качества измерений, учитывающей и абсолютную погрешность, и значение физической величины, является **относительная погрешность измерений** δX , которая находится как отношение абсолютной погрешности измерения ΔX к среднему значению величины $X_{\text{ср}}$:

$$\delta X = (\Delta X / X_{\text{ср}}) \cdot 100\%. \quad (1.3.3)$$

Точность измерений физических величин сравнивают по их относительным погрешностям. Чем меньше относительная погрешность, тем выше точность измерения.

При расчете погрешностей необходимо учитывать причину их возникновения. Так, прежде всего, следует упомянуть о грубых погрешностях или промахах, которые возникают вследствие недосмотра экспериментатора или неисправности прибора. Например: экспериментатор неправильно снял с прибора данные, в электрической цепи были плохие контакты. На практике измерения-промахи необходимо отбрасывать.

1.3.3. Случайные и систематические погрешности измерений

Погрешности, не связанные с грубыми ошибками опыта, могут быть случайными или систематическими.

Случайные погрешности меняют величину и знак от опыта к опыту и вызываются рядом факторов, которые невозможно учесть. Они могут быть связаны с температурными деформациями в механических приспособлениях, несовершенством объекта измерения (например, при измерении диаметра проволоки, которая имеет не вполне круглое сечение). Случайные погрешности эксперимента исследуются путем сравнения результатов, полученных при одинаковых условиях эксперимен-

та. В учебной практике два-три измерения необходимо производить всегда. Если результаты совпали, то следует на этом остановиться. В качестве среднего значения для измеренной величины обычно принимают среднее арифметическое $X_{\text{ср}}$ из всех полученных результатов:

$$X_{\text{ср}} = \frac{(X_1 + X_2 + \dots + X_n)}{n}, \quad (1.3.4)$$

где n — число опытов. Мерой случайной погрешности может служить среднеквадратичное отклонение σ_x единичного результата при n измерениях, которое определяется формулой:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{(X_1 - X_{\text{ср}})^2 + (X_2 - X_{\text{ср}})^2 + \dots + (X_n - X_{\text{ср}})^2}{n}}. \quad (1.3.5)$$

В теории вероятностей, подробное изложение которой выходит за рамки нашего пособия, установлен смысл этой величины. Во многих физических измерениях разброс значений измеренных величин хорошо описывается нормальным законом, названным в честь великого немецкого математика распределением Гаусса [9]. Если мы проведем достаточно много, например, 100 измерений и вычислим $X_{\text{ср}}$ и σ_x , то из величин $X_1, X_2, \dots, X_{100}$ 68 значений попадут в интервал от $X_{\text{ср}} - \sigma_x$ до $X_{\text{ср}} + \sigma_x$, а 96 из 100 — в интервал от $X_{\text{ср}} - 2\sigma_x$ до $X_{\text{ср}} + 2\sigma_x$.

Систематические погрешности обусловлены свойствами исследуемого объекта, несовершенством измерительных приборов или применяемых методик, вносятся самим экспериментатором в процессе измерений. Если известна причина возникновения систематической погрешности, ее можно учесть путем введения поправок. Например, измеряя глубину непрозрачного кувшина обычной школьной линейкой, у которой нулевое деление находится на некотором расстоянии от ее начала, к значению отсчета у верхнего края кувшина добавляют это расстояние.

Очень сложно учитывать систематические погрешности неизвестной экспериментатору природы. Такие погрешности встречаются в лучших, тщательно подготовленных экспериментах. Иногда даже употребляется понятие межлабораторной погрешности, связанной с расхождением значений одной и той же физической величины, измеренной в разных лабораториях. В данной ситуации необходим анализ причин расхождения и их устранение. Иногда устранение неизвестной систематической погрешности возможно путем перевода ее в случайную.

Неизвестный систематический фактор становится случайным и учитывается соответствующими методами.

В экспериментальной практике наиболее часто встречаются систематические погрешности, связанные с точностью измерительных систем и приборов. Приступая к измерениям, необходимо помнить, что ошибку измерений нельзя сделать меньше той, которая определяется приборной погрешностью. Например: амперметр класса 0,2 имеет абсолютную погрешность, не превышающую 0,2% от тока соответствующей полной шкалы прибора. Относительная погрешность сильно зависит от того, где по шкале снимают показания. Необходимо выбирать прибор со шкалой так, чтобы стрелка при измерениях заходила за середину шкалы. Луч зрения всегда должен быть перпендикулярен шкале. Во многих приборах используют в шкалах зеркала. Для точного снятия показаний необходимо, чтобы стрелка прибора закрывала свое зеркальное отображение.

Результирующая абсолютная погрешность физической величины ΔX находится как сумма случайной σ_x и приборной погрешностей $\Delta X_{\text{пр}}$:

$$\Delta X = \Delta X_{\text{пр}} + \sigma_x. \quad (1.3.6)$$

Результат опыта записывают в виде:

$$X = X_{\text{ср}} \pm \Delta X. \quad (1.3.7)$$

Относительная погрешность при прямых измерениях — безразмерная величина, равная отношению абсолютной погрешности к среднему арифметическому значению измеряемой величины:

$$\delta X = \frac{\Delta X}{X_{\text{ср}}} \cdot 100\%. \quad (1.3.8)$$

1.3.4. Пример вычисления погрешностей

Рассмотрим процедуру определения времени реакции человека. Для данного эксперимента вам потребуется линейка, помощник и знания о движении тела под действием силы тяжести. Помощник держит линейку в вертикальном положении, а испытуемый устанавливает большой и указательный палец таким образом, чтобы нулевая отметка на линейке находилась между ними. Помощник без предупреждения отпускает линейку, испытуемый ловит ее пальцами и записывает значение, на котором пальцы зажали линейку.

Таблица 1

Последовательность действий	Выполняемое действие	Номер измерения									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	h_k , см	15	16	7	12	14	16	17	20	13,5	10,5
2	t_k , с	0,175	0,181	—	0,156	0,169	0,181	0,186	0,202	0,166	0,146
3	t_{cp} , с	0,174									
4	$ t_k - t_{cp} $, с	0,001	0,007	—	0,018	0,005	0,007	0,012	0,028	0,008	0,028
	$(t_k - t_{cp})^2 \cdot 10^{-6}$, с ²	1	49	—	324	25	49	144	784	64	784
	σ_t , с	$16 \cdot 10^{-3}$									

Движение под действием силы тяжести в случае падения тела всегда направлено по прямой вертикальной линии. Перемещение h выражается следующей закономерностью:

$$h = v_0 \cdot t + \frac{g \cdot t^2}{2}. \quad (1.3.9)$$

В нашем случае начальная скорость v_0 равна нулю. Если не учитывать сопротивление воздуха, то время реакции будет вычисляться следующим образом:

$$h = \frac{g \cdot t^2}{2}, \quad \text{откуда находим} \quad t = \sqrt{\frac{2 \cdot h}{g}}. \quad (1.3.10)$$

Измерения проводим в следующей последовательности.

1. Делаем серию из 10 опытов. Полученные значения h фиксируем в таблице.
2. По формуле 1.3.10 определим время для каждого измерения. Результат третьего измерения сильно отличается от остальных, его можно принять за промах и не учитывать при дальнейших расчетах.
3. Рассчитаем среднее арифметическое по формуле 1.3.4.
4. Рассчитаем среднеквадратичную погрешность по формуле 1.3.5. Для упрощения работы разобьем ход вычислений на несколько шагов. Вначале найдем модуль отклонения от среднего значения $|t_k - t_{cp}|$ для каждого измерения, далее определим квадрат данного числа, и последним шагом проведем суммирование и расчет среднеквадратичной погрешности. В данном примере среднеквадратичная погрешность равна $\sigma_t = 0,016$, а с учетом правил приближенного вычисления $\sigma_t = 0,02$. Поскольку отсчет положения пальцев на линейке проводился с точностью до 0,5 см, а приборная по-

грешность составляет $\pm 0,5$ мм, то в данном случае приборная погрешность существенно меньше точности измерения и, следовательно, ее можно не учитывать. Окончательный результат записывается в виде: $t = 0,17 \pm 0,02$ с.

В опыте с линейкой наглядно проявляются случайные и систематические погрешности измерений. Разброс расстояний, на которых пальцы поймали линейку, определяется случайными факторами — вдохом или выдохом ловца, отвлечением его внимания, разным расстоянием между линейкой и пальцами, другими причинами. Систематическая ошибка проявляется в способе снятия показаний с линейки, зажатой пальцами. Это можно делать по верхней стороне пальцев или по нижней, а также по центру. В результате получаем разное перемещение линейки и, следовательно, разное время реакции, сдвинутое в ту или другую сторону.

1.4. Моделирование в физике

Моделирование в физике является основой понимания сути явлений и процессов окружающего мира. Простейший пример: довольно трудно описать словами траекторию полета чайки, ловко выхватившей рыбу из воды. Но это очень легко показать, сделав соответствующее движение рукой. Представить физику без разнообразных моделей просто невозможно, более того, такой физики не было и никогда не будет!

В физике, как и в других науках, любое исследование тесно связано с моделированием. Иногда это работа с уменьшенной копией реального предмета, например, моделью самолета в аэродинамической трубе. В других ситуациях физические процессы различной природы имеют много общих закономерностей и одинаковое математическое описание. Это позволяет моделировать одно явление с помощью другого. Наглядные модели электромагнитных волн, их периодичность в пространстве, поперечность и другие свойства прекрасно демонстрируются с помощью механических волн в упругом шнуре.

Сложные процессы и явления трудно реализовать в виде реального физического явления в лаборатории, и в этом случае используют математические модели. Любой физический процесс характеризуется физическими величинами, связанными друг с другом по определенным законам. Эти законы описываются математическими формулами и уравнениями.

Физики-теоретики сначала досконально изучают полученные ранее результаты наблюдений и экспериментов и конструируют теоретическую модель. Обычно это удачно подобранные или выведенные математические уравнения, описывающие исследуемый процесс. Дополнительно уравнения сопровождаются некоторыми условиями для физических величин. Условия могут быть в виде постулатов, ограничений на численные значения и требований к характеру изменений рассматриваемых величин. Далее теоретики находят решения уравнений, анализируют их, проводят численные оценки, сравнивают их с известными экспериментальными данными и убеждаются в правильности или неправильности своей модели.

Решение математических уравнений иногда получается в виде известных функций, простых формул и наглядно демонстрирует поведение физических величин. Иногда такие решения трудно найти, и тогда прибегают к помощи компьютеров. Современные быстродействующие компьютеры производят огромное количество вычислительных операций и легко решают самые громоздкие уравнения. Математические пакеты программ позволяют представлять полученные решения в виде графиков, диаграмм, схем и рисунков. Это очень удобно для анализа поведения исследуемых физических величин, выяснения правильности полученных решений.

Математическое или компьютерное моделирование представляет собой мощный исследовательский инструмент. Физики могут досконально исследовать хорошую компьютерную модель какого-либо явления или процесса, найти новые особенности. По результатам теоретических расчетов выбирается из возможных многочисленных вариантов самый подходящий эксперимент. Современная экспериментальная физика использует очень сложную и дорогостоящую аппаратуру и поэтому качественные теоретические исследования и моделирование позволяют избежать пустых затрат времени и ресурсов на неудачные эксперименты. Конечно, экспериментальная физика не застрахована от этого, но физики оптимистичны даже и в таких ситуациях: «Отрицательный результат — тоже результат».

В учебной физике компьютер открывает много новых возможностей. Физические законы, понятия, явления и эффекты предстают на экране монитора в красочной и наглядной форме, сочетая в себе демонстрационные опыты и математическое описание.

Практическое знакомство с возможностями компьютерного моделирования будет реализовано в комплексных исследовательских работах физического практикума, описание которых представлено в третьей главе.

1.5. Пример реальных исследований в учебной физике: условия плавания тел в ограниченных резервуарах

Физика замечательна одной отличительной особенностью — возможностью самому проверить экспериментально то или иное утверждение, внимательно присмотреться к тому, каким образом физический закон проявляется в конкретных условиях, насколько точны его формулировки. В качестве иллюстрации данного тезиса рассмотрим учебное исследование условий плавания тел в ограниченных объемах жидкости.

В физическом энциклопедическом словаре [1] приведена следующая формулировка: *«... на всякое тело, погруженное в жидкость (или газ), действует со стороны этой жидкости (газа) выталкивающая сила, равная весу вытесненной телом жидкости (газа), направленная по вертикали вверх и приложенная к центру тяжести вытесненного объема»*. В различных учебниках и справочниках, как правило, воспроизводится приведенный выше вариант. Закон простой, смысл почти очевиден, однако есть некоторые детали, которые следовало бы учесть и обсудить.

Обратимся к эксперименту. Варианты комплектов материалов и оборудования могут быть различными, в зависимости от изобретательности экспериментатора и возможностей физического кабинета. Необходимы два сосуда, входящих один в другой с небольшим зазором между стенками, вода, мерный стакан и ванночка, в которой можно все разместить для проведения опытов без разливания воды на пол. Внешний сосуд в дальнейшем будем называть резервуаром, внутренний — плавающим телом. Доступные комплекты, например, можно собрать из мензурок, химических стаканов, стеклянных банок и бутылок. Мерный стакан легко изготовить из любого прозрачного сосуда, приклеив на наружной стенке скотчем шкалу. В дальнейшем детальное описание эксперимента проводится на примере использования пластиковых бутылок.

Эксперимент и наблюдение 1

Возьмем две прозрачные пластиковые бутылки емкостью 2 и 1,5 литра, которые имеют разные диаметры и вкладываются друг в друга, если отрезать верхнюю коническую часть. Зазор между стенками невелик, около 1 см. Наполним большую бутылку, резервуар, до краев, а малую, плавающее тело — наполовину. При погружении тела в резервуар вытесненная вода выльется, и тело будет плавать. Все происходит в точном соответствии букве закона Архимеда.

Следует отметить, что масса пластиковой бутылки невелика в сравнении с массой налитой воды. Уровни воды в зазоре между стенками и в малой бутылке практически совпадают. Разница в уровнях равна массе пустой бутылки, поделенной на плотность воды и площадь поперечного сечения малой бутылки. Для 1,5-литровой бутылки эта величина составляет около 1 мм.

Эксперимент и наблюдение 2

Продолжим эксперимент. Выльем из большой бутылки всю воду и опустим в нее малую бутылку с прежним количеством воды. Аккуратно нальем между стенками бутылок минимально необходимый для всплытия объем воды. Уровни воды между стенками и в малой бутылке по-прежнему почти одинаковы.

Поднимем малую бутылку и отметим уровень оставшейся воды H_0 . С помощью мерного стакана можно измерить объемы воды в большой и малой бутылках и убедиться, что большее количество воды находится в меньшей бутылке! Еще более удивительным является то, что вес вытесненной жидкости не равен весу плавающего тела, если под вытесненной жидкостью понимать вес той жидкости, что вытесняется частью малой бутылки, погруженной ниже уровня H_0 . Именно этот объем жидкости вытесняется погруженным телом относительно невозмущенного уровня и переходит в пространство между стенками.

Моделирование

Обратимся к «мысленному» эксперименту и представим, что зазор между стенками достаточно мал. Именно в предельном случае объем жидкости, в которой будет плавать тело с меньшей плотностью, оказывается достаточно малым, что и решает проблему плавания тела в малом объеме воды, которая

заливается в сосуд, повторяющий формы подводной части плавающего тела с небольшим зазором. Поверхностное натяжение и смачивание в данных рассуждениях не рассматривается.

Рассмотрим теоретическую модель описанного выше опыта. Оба сосуда, резервуар и плавающее тело, представим в виде тонкостенного, жесткого цилиндра с плоским дном высотой $2H$ и $2h$, диаметрами D и d соответственно, причем $D = d + 2x$. Для упрощения расчетов будем считать, что всплывший малый цилиндр имеет пренебрежимо малую массу и поднимется над дном большего цилиндра на высоту $2x$, при этом уровень воды в малом цилиндре h , в резервуаре с плавающим цилиндром будет $H = h + 2x$. Подъем малого цилиндра из воды приводит к понижению ее уровня в резервуаре до величины H_0 .

Несложные расчеты условия плавания малого цилиндра в резервуаре дают следующее. Соотношение объемов воды в резервуаре V_1 и в плавающем цилиндре V_2 , при условии, что $h = d$, дается уравнением

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{(d + 2x)^3}{d^3} - 1. \quad (1.5.1)$$

Из уравнения (1.5.1) определяется граничное значение величины зазора $x = 0,13d$, при котором объемы жидкости в резервуаре и плавающем цилиндре одинаковы. Уменьшение коэффициента при d приводит к уменьшению отношения V_1/V_2 , что соответствует наличию большего количества жидкости в плавающем цилиндре, чем имеется в резервуаре.

Найдем отношение объема V_3 — вытесненной относительно исходного уровня H_0 жидкости, и V_2 — объема жидкости в плавающем цилиндре:

$$\frac{V_3}{V_2} = \frac{4x(x + d)}{4x^2 + 4xd + d^2}. \quad (1.5.2)$$

Предел этого отношения при $x \gg d$ (вариант — авианосец в море) равен 1, и это соответствует традиционной формулировке закона Архимеда. Если же $d \gg x$, то отношение объемов стремится к нулю, что соответствует плаванию авианосца в резервуаре, заполненном стаканом воды. Парадоксальность данного вывода и наглядная реальность увиденного эксперимента с пластиковыми бутылками однозначно приводят к размышлению о физическом пределе уменьшения зазора между стенками резервуара и плавающего в нем сосуда. Для идеально сопряженных поверхностей и малого зазора между стенками

вступают в силу ограничения в применении закона Паскаля, связанные с эффектами смачивания.

Ограничение размеров резервуара приводит к необходимости уточнения понятия «вытесненная телом жидкость». Традиционная редакция закона Архимеда описывает плавание тел в резервуаре с жидкостью, объем которой значительно превышает объем плавающего тела. Объяснение условий плавания тел в резервуарах, сопоставимых по размерам с плавающим телом, более корректно на основе закона Паскаля. В этом случае никаких кажущихся противоречий не возникает.

Наблюдения физических явлений окружающего мира

2.1. Алгоритм наблюдений

Наблюдать в нашем понимании — видеть, слышать, осязать, ощущать запахи и вкус. Набор взаимосвязанных ощущений, упорядоченный в систему, в совокупности с ранее полученными сведениями о законах и явлениях окружающего мира позволяет дополнить наши представления о природе, получить неповторимый собственный опыт познания.

Наши органы чувств позволяют получать богатейшую информацию, однако эти сведения должны быть осознаны и систематизированы. Каждый человек ощущает мир индивидуально, по-своему. Однако существует многолетний опыт встреч человека с новым, неизвестным, и этот опыт может быть полезным каждому из нас.

Итак, обсудим некоторые приемы и методы наблюдений явлений неживой природы. Объединим их в одну систему и будем в дальнейшем называть **алгоритмом наблюдений**. Это нам кажется существенным и важным для получения достоверной информации о мире.

При наблюдениях необходимо произвести следующие действия:

- фиксировать момент начала наблюдения и длительность происходящего явления, используя положение Солнца, звезд, показания часов, какие-либо ритмично повторяющиеся события;
- фиксировать местоположение объектов наблюдаемого явления, соотносить их координаты с собственными относительно некоторой естественной системы отсчета, например, неровностей рельефа, деревьев, водоемов и других заметных объектов окружающего ландшафта;
- фиксировать характеристики перемещения объекта наблюдения (скорость, ускорение или замедление, направление) в течение всего времени наблюдения;

- визуально оценивать оптические характеристики объектов наблюдения (цвет, яркость и интенсивность свечения, изменения этих характеристик во времени);
- производить слуховую оценку акустических характеристик (тон, громкость, характер изменения звука во времени) наблюдаемых явлений;
- фиксировать характеристики низкочастотных, непериодических колебаний почвы и воздуха (частота вибраций, амплитуда колебаний, скорость и направление порывов ветра), их поведение во время наблюдения;
- фиксировать запахи, их изменения, направления распространения;
- исследовать с помощью осязания, при соблюдении мер безопасности, характеристики поверхностей объектов наблюдения (шероховатость, липкость, гладкость, теплопроводность, температура, твердость, острота неровностей и ребер, сухость и влажность);
- исследовать, с соблюдением мер безопасности, вкус малых образцов жидких и твердых веществ, включенных в наблюдаемые процессы (попробовать на вкус!).

Последние три метода наблюдения — контактные, связанные с взаимодействием кожи и слизистой оболочки носа с исследуемым веществом. В ряде случаев эти методы ничем не могут быть заменены. Например, узнать, сладок ли чай, можно только языком. Однако это не означает, что все надо пробовать на вкус и на зуб, хотя в раннем детстве это очень эффективный способ познания мира!

Предложенный выше алгоритм наблюдений надо рассматривать как гибкий набор рекомендаций, который в различных применениях может быть настроен под конкретного наблюдателя, с его индивидуальными возможностями.

2.2. Наблюдение физических явлений неживой природы

Данный раздел мы намерены посвятить наблюдательному исследованию явлений неживой природы. Будут рассмотрены достаточно простые, многократно наблюдаемые явления или процессы, которые либо совсем не связаны с растениями, животными и микроорганизмами, либо возмущение со стороны живого минимально.

2.2.1. Механическое движение

В неживой природе нашей планеты в постоянном движении, которое непосредственно фиксируется органами чувств человека, находятся воздух и вода.

В атмосфере, под воздействием потоков воздуха, перемещаются жидкости и твердые вещества в виде тумана, облаков, пыли, песка, разнообразных физических образований.

Потоки в водных средах, реках, морях и океанах также переносят разнообразные твердые включения, начиная с мелкодисперсной «мути» до гигантских осколков антарктических ледников.

Как можно установить факт движения воздуха? Конечно же, наблюдая движение взвешенных в воздухе хорошо видимых объектов-индикаторов — тумана, облаков, дыма, легких твердых тел, например, сухих листьев. По характеру движения этих индикаторов движения легко различить прямолинейное или вихревое движение, определить скорость и ускорение перемещающихся воздушных масс.

Очень похожа ситуация с потоками воды. Вспомните прозрачную лесную речушку в период листопада, движение попавших в воду листьев, часть из которых плывет по поверхности, часть кувыркается в глубине, замедляет свое движение у берегов и убыстряет его на стремнине.

Увлекательные наблюдения движения отдельных тел можно провести в дождливую погоду в лесу, либо стоя под зонтиком на дожде. Обратите внимание на падающие капли с веток или зонта. Капли движутся неравномерно, постоянно убыстряя свое движение.

Массу интересных наблюдений можно сделать у водопада, даже на небольшом ручейке. Струи воды, срываясь с уступа, падают вниз, подобно каплям дождя, и в то же время движутся вперед. Траектория движения потока — «красивая горка» с пологим началом и крутым, близким к вертикали, завершением.

Примеров движения сплошных сред (воздух, вода) и отдельных тел (капли дождя, метеорит, камень, сорвавшийся в пропасть с уступа скалы) любой человек может привести великое множество.

Созерцание одного и того же явления разными наблюдателями не всегда дает одинаковую картину. Представьте, что два очень внимательных наблюдателя, школьники Дан и Дина, абсолютно правдивые в своих высказываниях, впервые любу-

ются водопадом на горной реке. Дан смотрит на водопад сбоку, а Дина с середины подвесного мостика, расположенного ниже водопада. После наблюдений они обсуждают увиденное. Дина, со свойственной ей эмоциональностью, говорит: «Водяные струи такие ровные, словно вертикально натянутые струны». Дан удивлен: «Не может быть, они красиво изогнуты вверх и немного распрямляются вниз».

Друзья меняются местами, внимательно наблюдают водопад еще раз и, встретившись снова, задумываются над увиденным. Если Дан смотрит на струю водопада сбоку, ему видно движение воды строго вниз и одновременно по направлению течения. Для Дины, наблюдающей водопад, находясь ниже по течению реки, возможна фиксация движения только вниз.

В механике удобно начать изучение различных типов движения с одномерного, вдоль некоторого выделенного одного направления. Пример: поезд на прямолинейном участке железной дороги, плывущие льдина по течению реки или облако в небе на небольших расстояниях прекрасно демонстрируют одномерное движение.

Любое сложное движение представляют в виде трех независимых одномерных и затем детально исследуют их. Результат учета движения по всем трем координатам приводит к полному описанию перемещения объекта в пространстве.

Оптимальный выбор точки наблюдения дает возможность наиболее точно определить движение одновременно по двум координатам. В нашем примере, вместе с Диной наблюдая водопад вдоль течения реки, мы видим движение воды вниз и по горизонтали, перпендикулярной к направлению наблюдения. В этом случае трудно оценить скорость течения реки до момента срыва в падение. Изменим точку наблюдения, присоединившись к Дану. С его точки мы, как и в предыдущем варианте, видим движение воды вниз, и также получаем возможность оценить скорость течения в момент отрыва — пока вода летит вниз, она продолжает двигаться в направлении течения.

В сейсмоактивных районах Земли, например, на Камчатке, имеются гейзеры. Это своеобразный водопад наоборот. Из глубины Земли под давлением вырывается струя воды, летит вверх, достигает некоторой высоты и падает вниз. Наблюдать это явление чрезвычайно любопытно и можно найти много общего между гейзером и водопадом. В дальнейшем мы продолжим серию наблюдений рукотворных аналогов таких явлений — фонтанов.

В кинематике движение рассматривается как состоявшийся факт, без детального выяснения причин его возникновения. Любые движения в поле тяжести Земли происходят с почти одинаковым ускорением, равном $9,807 \text{ м/с}^2$.

К сожалению, природных явлений, непосредственно демонстрирующих одинаковость ускорения свободного падения, выявить не удалось. В наблюдениях природных явлений можно лишь косвенным образом зафиксировать это обстоятельство, например, анализируя падение дождевых капель разных размеров.

Вращательное движение в природных условиях наблюдается в виде вихрей, как в воздухе, так и в воде. Конечно, возможность созерцания смерча или торнадо представляется не часто, однако есть натурные съемки этих явлений, известно много характерных их свойств.

Вихри на воде легко наблюдать на ручьях и небольших реках. Потоки воды при обтекании препятствий на краях образуют небольшие водовороты самых разных размеров, которые плывут вниз по течению, постепенно затухая.

Интересны и разнообразны волновые процессы на поверхности воды. Спокойно-величавая океанская зыбь, бойко бегущие, короткие, с белыми барашками волны от свежего ветра и грозный водяной вал цунами — все эти движения на границе раздела воды и воздуха являются волновыми [12]. Закономерности движения волн с учетом глубины водоема можно наблюдать на речных отмелях, на пологом пляжном берегу, в полосе океанского прибоя.

Удивительное сходство результатов работы ветра и потоков воды наблюдается на песке. На речном дне и в пустыне застывшие на песке волны похожи. Возникает волнообразный рельеф и после снежных буранов.

Любое движение начинается и затухает под действием сил различной природы: тяготения, трения, давления. Каждое мгновение любые физические тела, от метеорита, влетевшего в атмосферу, до нас с вами, испытывают действие этих сил, при этом может совершаться механическая работа. Кинетическая энергия движущихся тел, потоков воздуха и воды изменяется в широких пределах, превращаясь в тепло, разрушая препятствия на своем пути. Обкатанная неутомимым прибоем галька на морском берегу, промытые бурными горными потоками каньоны в скалах, округлые валуны и многое другое несут следы воздействия разнообразных сил.

В некоторых ситуациях силы скомпенсированы, и тогда тела находятся в относительном покое, в статическом состоянии. Статика как раздел механики посвящена изучению равновесных состояний материальных тел. Интересны наблюдения установления равновесия сыпучих пород, в том числе и снега. В пустынях, на снежных просторах северных широт, на подмытых реками песчаных берегах, каменистых осыпях в горах можно наблюдать склоны с характерным углом наклона. Сыпучие материалы устойчиво образуют определенные углы наклона, определяемые сцеплением между отдельными частицами, которое, в свою очередь, зависит от формы частиц, коэффициента трения их поверхностей, способности слипаться.

Пример практических наблюдений

Рассмотрим внимательно процесс образования водяных вихрей или воронок при обтекании потоком воды препятствия. Объектом для наблюдения может быть небольшой спокойный ручей, река с лежащим в его русле недалеко от берега камнем или каким-либо другим препятствием. Разнообразие реальных вариантов велико и всегда можно выбрать что-либо по вкусу. Пусть это будет камень с острым ребром, одна из граней которого перпендикулярна вектору скорости потока (рис. 2.1). Мысленно определим направление осей координат: ось X направлена вдоль вектора скорости потока, ось Y — перпендикулярно, и ось Z — вверх из плоскости чертежа (положительные направления осей X , Y , Z образуют правовинтовую тройку векторов). Все плоскости граней преграды параллельны оси Z .

Вблизи плоскости препятствия со стороны набегающего потока образуется небольшое возвышение над невозмущенной поверхностью, в приграничной области имеется избыток

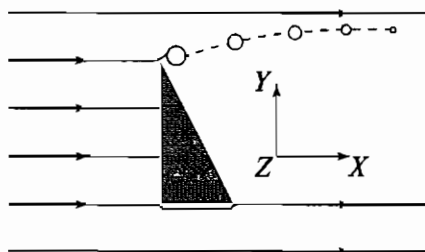


Рис. 2.1

гидростатического давления, и уровень жидкости поднимается относительно исходного. Хорошо заметно движение воды вдоль стенки, и при отрыве струи от преграды она закручивается невозмущенной частью потока по часовой стрелке в плоскости чертежа. В какой-то момент вихрь отрывается и через некоторое время образуется новый. Цепочка из чередующихся вихрей, вихревая дорожка, начинаясь с кромки преграды, сносится течением потока вниз. Линия цепочки, постепенно выпрямляясь, становится параллельной оси X . По мере движения вихри уменьшаются и через некоторое время исчезают. Время затухания, или «время жизни» вихря, можно оценить, равномерно произнося цифры от 21 и выше, или с помощью секундомера наручных часов (но это уже будет физический эксперимент с использованием измерительного прибора!). Если есть возможность наблюдать этот процесс на течениях с разной скоростью, можно установить зависимость времени затухания вихря и его размера от скорости. Интересно пронаблюдать образование вихрей на преградах различной формы и выявить закономерности изменений наблюдаемой картины в зависимости от формы преграды.

По итогам наблюдений составляется отчет-сообщение: описание явления с использованием иллюстраций (рисунков, схем, фотографий), условия наблюдения, собственный вариант физической модели явления, предсказание на основе созданной модели развития явления в область ненаблюдаемых возможностей.

Практикум наблюдений

1. Описать движение падающих снежинок, осенних листьев, тополиного пуха.
2. Описать движение воды в водопаде.
3. Описать след падающей капли дождя, оставленный на окне вагона неподвижного и движущегося поезда. Сделать анализ различий падения крупных и мелких капель.

Самостоятельные наблюдения-исследования

1. Разработать методы наблюдения движения Солнца, Луны, звезд в реальном времени. Описать характер движения этих объектов на небосводе.
2. Описать поведение волн прибоя на пологом и обрывистом берегах.

2.2.2. Тепловые и молекулярные явления

Ощущения тепла и холода человек испытывает с момента рождения. Ощущая лучистое тепло от костра или Солнца, человек интуитивно регулирует потоки тепла, приближаясь или отдаляясь от нагретых тел, скрываясь в тени или за каким-либо экраном. Тепловые явления неразрывно связаны с молекулярными процессами в газах, жидкостях и твердых телах. В средних широтах смена времен года дает возможность наблюдать множество разнообразных явлений, связанных с изменением агрегатных состояний воды.

Первоисточником энергии для живых существ на Земле является Солнце. На один квадратный метр поверхности, расположенной вне атмосферы Земли перпендикулярно падающему излучению, приходится 1367 Вт [11]. Часть потока солнечной энергии поглощается, отражается и рассеивается земной атмосферой в космос. Оставшаяся часть солнечной радиации (в среднем 1000–1100 Вт/м²) достигает поверхности Земли, нагревает воду и почву. В зависимости от времени года, соотношение между поглощенной и рассеянной (отраженной) энергией меняется. Это обстоятельство приводит к периодическим сменам агрегатного состояния воды: испарению, таянию и замерзанию. В течение суток происходит относительно быстрая смена температуры воздуха, меняется его влажность и выпадает роса.

Перечень интересных тепловых явлений, происходящих с водой, достаточно обширен. Это испарение и конденсация, замерзание и таяние, конвекция, диффузия. Простые вопросы, связанные с объяснением причин появления и рассасывания тумана, замерзания рек и озер, при внимательном рассмотрении превращаются в интересные физические исследования.

В холодное время года каждый из нас имеет возможность полюбоваться красивыми снежинками, имеющими симметричное строение. Переходы воды из газообразного состояния в жидкое и далее в твердое превосходно организованы природой, доступны для наблюдения. Первые шаги в изучении строения кристаллов были сделаны на основе наблюдений форм естественных кристаллических минералов, легких снежинок и ледяных пластинок изморози на ветках зимнего леса.

К молекулярным явлениям, непосредственно воспринимаемым слухом и осязанием, относятся звуковые волны. Введем понятие «акустическое наблюдение», фактически — слушание

природы. Акустика как раздел физики, изучающий возникновение, распространение и взаимодействие упругих колебаний в газах, жидкостях и твердых телах, — одна из самых древних областей знания. Человеческое ухо — чрезвычайно чувствительный орган, позволяющий четко различать высоту слышимого тона и силу звука. Многообразны звуки неживой природы: гром и шелест листьев, свист ветра и звонкое журчание ручья, грохот камнепада в горах и хрустальный звон весенней капли. Перечисление разнообразных акустических явлений можно продолжать бесконечно — любое явление «говорит» о себе, и мы это можем услышать.

Практикум наблюдений

1. Описать характер движения конвективных потоков воздуха, дыма.
2. Как замерзают лужа или небольшое озеро осенью?
3. Описать характер таяния льда в стоячих водоемах.
4. Ранний снег в лесу, в поле, на дороге. Описать особенности снежного покрова.
5. Описать процесс образования росы, его особенности.
6. Описать процессы остывания и нагрева почвы.
7. Описать условия возникновения эха.
8. Звуки леса, условия возникновения, классификация.
9. Звуки ручьев и водопадов, условия возникновения, классификация.
10. Голоса ветра, прибоя и шторма.
11. Голоса грома.
12. Запахи неживой природы: дождя, снега, моря, грозы.

Самостоятельные наблюдения-исследования

1. Фазовые превращения воды в атмосфере: пар, туман, облака, тучи.
2. Перемещение твердых частиц в атмосфере: пыль, снег.

2.2.3. Электрические явления

Окружающий нас мир очень неохотно раскрывает тайны электрических явлений. В неживой природе доступны для наблюдений электрические разряды в атмосфере и шаровая молния. Опыт наблюдений обычных гроз с линейными разрядами имеет практически каждый человек, проживающий в средних широтах. Шаровая молния — явление более редкое и,

согласно статистическим данным [13], за всю свою жизнь лишь один человек из 1000 имеет шанс увидеть ее. До сих пор нет научных публикаций о воспроизводстве устойчивой шаровой молнии в лаборатории. Появляется она всегда неожиданно, и до сих пор является физическим явлением, которое исследуется только методом «внезапных» наблюдений.

Поэтому начало наблюдений явлений, связанных с атмосферным электричеством, начнем с воспоминаний и анализа прошлого опыта. Итак, надо вспомнить грозу, величественное зрелище которой не оставляет никого равнодушным. Первая молния, как правило, всегда неожиданна, и трудно что-либо осознанно зафиксировать. Ко второму и последующим разрядам можно подготовиться и заметить существенные детали.

Первые эксперименты по атмосферному электричеству, проведенные более 250 лет назад Томасом Франсуа Далибаром (1703–1779), Бенджамином Франклином (1706–1790), Михаилом Васильевичем Ломоносовым (1711–1765) и Георгом Вильгельмом Рихманом (1711–1753), строились на многочисленных наблюдениях, сделанных ранее. Эксперименты с молнией были и остаются опасным занятием. Г. В. Рихман стал, по-видимому, первой жертвой в экспериментальной работе с электричеством — его убила шаровая молния, возникшая после удара обычной, линейной молнии в «громовую машину» [14].

Практикум наблюдений

1. Описать условия в атмосфере, предшествующие грозе.
2. Описать световые и звуковые эффекты во время грозы, сделать их классификацию.

Самостоятельные наблюдения-исследования

Провести анализ результатов наблюдений гроз независимыми исследователями (школьными товарищами), использовать описания грозы в литературе.

2.2.4. Оптические явления

Оптические явления неживой природы многообразны и красочны. Самые заметные из них — это явления с участием Солнца. Его лучи, проходя сквозь атмосферу, рассеиваясь в чистом воздухе и на облаках, отражаясь от водных поверхностей, снега и льда, демонстрируют бесконечное разнообразие красок.

В малооблачную, ясную погоду мы можем наблюдать красочные восходы и закаты, игру солнечных лучей на каплях росы или снежных сугробах, разнообразные варианты подсветки облаков. Многократно наблюдаемое явление каждым из нас — радуга. Несколько реже можно видеть гало вокруг Луны, просвечивающей сквозь «волнистые туманы» или облака прозрачной изморози. Разнообразие цвета облаков и туч вызывает удивление и восхищение фантазией природы, создающей величественные картины атмосферных оптических явлений.

Гроза. Атмосферное электричество проявляет себя иногда в виде молнии. Яркая сине-голубая вспышка, ветвящийся рисунок разряда в зажмуренных глазах или отдаленный красноватый отблеск зарницы легко воскрешаются в памяти. Электрические разряды в атмосфере сопровождаются громом, но слышим мы его не всегда. Зарницы не пугают нас трескучим грохотом, а мягко ворча, в отдалении перекачивают тяжелые звуки по небосводу.

Много любопытного можно увидеть в воде, пронизанной солнечными лучами. Прозрачные спокойные воды горного озера, отражающие в себе бездонное небо и скалы, лунные дорожки на водной глади и яркие блики Солнца на гребнях волн, живая игра цвета в струях водопадов не оставляют нас равнодушными к изменяющимся ликам нашего мира.

Эмоциональное восприятие мира не мешает нам задуматься над скрытыми причинами оптических явлений, попытаться найти ответы на удивительные загадки природы. Рассуждая об оптических явлениях, в частности, о молниях, мы не можем опустить очень важный момент. Молния неразрывно связана с громом. Более того, свежий, влажный запах грозы всегда отличается от запаха тихого дождя. Разделение явлений на молекулярные, электрические и оптические — это наш произвол, один из способов понять хотя бы крупницы истины. Природа едина! Это всегда надо иметь в виду, утверждая себе и миру: «Я понимаю, что это такое!»

Практикум наблюдений

1. Описать веер солнечных лучей, прошедших сквозь небольшие пробелы в облачности. Время для наблюдений — утро или вечер, угловая высота Солнца над горизонтом не более 20° .
2. Описать варианты отражения света (солнечного, лунного и другого) на поверхности воды.

3. Преломление света в водоемах. Описать варианты освещения дна водоема при штиле и ветре.
4. Описать границы света и тени от Солнца и Луны.
5. Особенности отражения и рассеяния света снежными и гладкими поверхностями.
6. Описать прохождение света сквозь земную атмосферу, цветовую палитру зорь.
7. Дождь и радуга. Разновидности радуги, условия наблюдения, чередование цветов.
8. Роса и солнечный свет. Описать оптические эффекты на капельках росы.
9. Грозы. Сверкание молнии и грохот грома. Распространение света и звука.
10. Зарницы. Распространение света и звука.
11. Гало вокруг Луны и Солнца. Условия для наблюдения, распределение цветов.
12. Наблюдение мерцания звезд.
13. Наблюдение формы Солнца и Луны на восходе и закате.
14. Наблюдение суточного вращения Земли.
15. Лунные и солнечные дорожки на поверхности воды.

Самостоятельные наблюдения-исследования

1. Солнечное излучение в атмосфере: прохождение, поглощение и нагревание, рассеяние.
2. Рассеяние солнечного излучения поверхностью Луны.

2.3. Наблюдение физических явлений живой природы

В предыдущем разделе, рассматривая явления природы без участия растений, микроорганизмов, животных и человека, мы подбирали явления, которые могли бы произойти на некоторой необитаемой планете, но в остальном похожей на Землю. Это фантастическое предположение во многом затруднило бы наблюдение некоторых явлений. Например, обычная роса. Солнечным ранним утром росу обычно наблюдают на траве, листьях, раскинутой за ночь между ветками деревьев паутине. Границы света и тени можно изучать в горах, где экранами служат скалы, но можно любоваться бесконечным разнообразием света и тени под кронами деревьев.

Доступные человеческим органам чувств естественные физические процессы с участием живых организмов бесконечно разнообразны, поэтому есть возможность выбрать самые яркие и доступные. Жизненный опыт старшего школьника содержит массу «архивных» наблюдений, которые уже состоялись, отложились в памяти и могут предоставить необходимую информацию для размышлений. Это обстоятельство важно при любых наблюдениях, но по сути своей физические явления мы анализируем всегда с участием живого, поскольку сам наблюдатель принципиально в этом процессе неустраним! Отличия в наблюдениях живого и неживого состоят лишь в характере и масштабе возмущения, оказываемого наблюдателем на исследуемый объект. Для наглядности сравните два варианта: наблюдение суточного движения Солнца и полет мотылька на яркий, включенный вами свет.

В наблюдениях явлений живой природы прямое восприятие квантовых явлений, физических характеристик отдельных атомов практически недоступно органам чувств. Человек является «макроскопическим детектором», воспринимает совокупное, усредненное действие многих микрочастиц. Давление воздуха, например, есть суммарный импульс большого числа молекул всех газов, входящих в состав воздуха.

В период становления квантовой механики физики активно искали явления, в которых можно было бы непосредственно наблюдать квантовые объекты и их свойства. К сожалению, поиски до сих пор не завершены. Достаточно близко к «квантовому» наблюдению относится опыт С.И. Вавилова по наблюдению квантовых флуктуаций слабых световых потоков, однако это все же полновесный физический эксперимент, с оптическим оборудованием. В этом опыте человеческий глаз, адаптированный к темноте, используется как сверхчувствительный фотоприемник, регистрирующий изменения энергии светового потока в десятки квантов [14]. Поэтому в дальнейшем изложении непосредственные физические наблюдения в живой природе ограничиваются оптикой.

2.3.1. Механическое движение живого

В живой природе все движется: птицы, рыбы, растения, насекомые, животные, человек. Перемещения в пространстве в реальном времени могут быть медленными, например, рост дерева, или же быстрыми — бросок сокола на добычу. Посмотри-

те на летящую за кораблем чайку, парящего коршуна, стремительную ласточку. Место в голубом небе, где находилась птица каждое мгновение, нарисует в вашем воображении траекторию движения. Скорость полета птиц определить непросто, птица не спринтер на дорожке стадиона, и это действительно творческая задача. Попробуйте ее решить, выбрав любую птицу — от журавля в небе до городского голубя или домашнего попугая.

Ориентация птиц в пространстве удивительно совершенна! Мы надеемся, что многие наблюдали полеты стай молодых скворцов, стрижей, воробьев. Резкое изменение направления движения всей стаи никогда не приводит к столкновению, хотя скорости немалые! Навигация наших летучих собратьев совершенна во всех отношениях.

Много интересного можно обнаружить при внимательном наблюдении полетов насекомых. Способ перемещения и тех и других имеет общую основу — опору на воздух, однако разнообразие механики движений очень велико. Беззвучно летящая бабочка и трубно жужжащий шмель, тонко звенящий комар и чуть слышно шелестящая стрекоза, зависшая над цветком пчела — все это разнообразие доступно для наблюдения.

Водная среда гораздо плотнее воздуха и движение обитателей подводного мира имеет свои особенности. Киты и дельфины, акулы, кальмары, крабы и медузы — все используют самые разнообразные способы передвижения. В настоящее время по телевидению демонстрируется достаточно много фильмов о подводном мире, имеется хорошо организованный подводный туризм. У многих имеется личный опыт плавания под водой с аквалангом или с обычной маской. Поэтому наблюдения, прямые или косвенные, через видеосъемку, вполне доступны и могут быть использованы для анализа физических особенностей перемещения живых существ под водой. Даже обычный аквариум с его обитателями может быть интереснейшим объектом наблюдений.

На поверхности спокойной воды, образующей идеально горизонтальную плоскость, любопытно наблюдать движение водомерок. Тонкие, несмачиваемые лапки водомерок опираются на поверхностную пленку воды и она является для них реальной опорой. Движения ног водомерок похожи на движения конькобежца.

Движение животных в естественной среде обитания принципиально доступны для наблюдений в реальном времени, непосредственно. Однако реально наблюдать, например, стре-

мительный бег льва или гепарда возможно только в варианте видеосъемок. Хорошим дополнением к натурным наблюдениям являются хорошо иллюстрированные детские энциклопедии с описанием живой природы.

Много разнообразия в движении человека, особенно в спорте — легкая атлетика, гимнастика, акробатика, спортивные игры, плавание, фигурное катание, прыжки с трамплина, горнолыжные виды спорта [19]. Это идеальные объекты для наблюдений в естественных условиях и видеозаписи. Не исключено, что кто-то из читателей увлечен каким-то видом спорта и может наблюдать даже сам себя! Понимание физики движения позволяет не только восхищаться красотой физических законов, но и существенно улучшать свои спортивные достижения.

Практикум наблюдений

1. Полет птиц. Характер движения крыльев, особенности траектории, скорость, ускорение, взлет и посадка.
2. Полет насекомых. Характер движения крыльев, особенности траектории, скорость, ускорение, взлет и посадка.
3. Движение гусениц, дождевых червей. Виды движений, скорость.
4. Движение водомерок по поверхности воды.
5. Движение рыб. Особенности движения, связь формы и скорости.
6. Бег четвероногих животных. Взаимосвязь строения ног и характеристик перемещения.
7. Движение человека на суше: ходьба, спортивная ходьба, бег.
8. Плавание человека и животных. Механика движения, скорость, поддержание плавучести.
9. Движение птиц на поверхности Земли (от страуса до воробья).

Самостоятельные наблюдения-исследования

1. Движение и силы трения.
2. Движение в спорте (от прыгуна с лыжного трамплина до фигурного катания).

2.3.2. Тепловые и молекулярные явления живого

Разнообразие молекулярных и тепловых явлений флоры и фауны, доступных непосредственному наблюдению, чрезвычайно велико. Остановимся на терморегуляции теплокровных

животных. Охлаждение и нагревание живых организмов происходит в соответствии с законами физики. Поток энергии извне, внешний нагрев приводит к повышению температуры организма. При отдаче энергии в окружающее пространство необходима компенсация тепловых потерь путем активизации внутренних процессов.

Температура тела млекопитающих составляет $36-38^{\circ}\text{C}$. В широком диапазоне внешних условий температура тела остается постоянной, следовательно, в организме должны быть сбалансированы все потоки энергии. В холодное время года птицы, животные стараются минимизировать потери тепла в окружающее пространство, повышая эффективность теплоизоляции. Воробьи распушают свои перышки и становятся похожими на круглые мячики, у собак и других шерстистых животных к зиме отрастает густой подшерсток и их мех становится густым и пушистым. Потоки тепла наружу через такие теплоизолирующие преграды уменьшаются.

В знойные летние дни ситуация становится прямо противоположной. Организм постоянно вырабатывает энергию, из окружающей среды дополнительно также идет поток энергии. Однако перегрева не наступает, поскольку включаются защитные механизмы, позволяющие сбросить излишки энергии через испарение воды кожей или легкими.

Интересно сравнить процесс испарения воды организмом человека в летнее и зимнее время. При перегреве интенсивное испарение происходит в легких, на поверхности кожи, и на этот процесс затрачивается достаточное для охлаждения организма количество энергии. В холодное время года испарение воды кожей прекращается, дыхание становится поверхностным и количество испаренной легкими воды резко уменьшается.

Потоки энергии через кожу фиксируются осязанием. Поток энергии при непосредственном контакте кожи с нагретым телом пропорционален его теплопроводности и разности температур. На ощупь легко различаются разности температур в $2-3$ градуса, однако абсолютные значения температуры определить с такой точностью затруднительно.

Осязание фиксирует потоки невидимого, инфракрасного излучения на расстоянии. Любопытные результаты дает определение с помощью осязания распределения поля излучения от нагретых тел. В данном случае объектом наблюдения является

сам экспериментатор, его действия и ощущения как детектора излучения.

Осязание одновременно является и детектором давления. Механическое воздействие твердых тел на кожу связано с локальным сжатием тканей. Чувствительность кожи как носительного датчика давления достаточно высокая и позволяет различать не только колющие, острые предметы от тупых, округлых, но и шероховатые поверхности от гладких. Известно, что насекомые очень чувствительны к колебаниям среды. Упомянутые выше водомерки воспринимают колебания поверхности от упавшей капли дождя на расстоянии и быстро прячутся в прибрежных зарослях [6].

Воздействие малых количеств веществ на обоняние животных хорошо известно. Чувствительный детектор под названием «собачий нос» до сих пор не создан. Ваша собственная собака на прогулке является идеальным объектом для наблюдений взаимодействия малых количеств «интересного» для собаки вещества и ее носа. Обратите внимание на ее «сканирующие» движения по площадям, пока она не взяла след, попытки поймать направление ветра с искомым запахом и тщательное обнюхивание неоднозначно пахнущих мест. Влажный нос вашего друга ловит малейшие изменения интенсивности запаха и ведет его обладателя в направлении усиления. Иногда собаке приходится вставать на задние лапы для расширения коридора поисков.

Наш собственный нос не составит конкуренции собачьему, однако, многие процессы переноса веществ (диффузия, конвекция, испарение) в воздухе мы можем зафиксировать и рассматривать себя как детектор в изучении процессов переноса в атмосфере.

Эффекты смачивания в живой природе играют жизненно важную роль. Водоплавающие птицы, живущие в холодной воде, сохраняют тепло благодаря несмачиваемым перьям и пуху. Силы поверхностного натяжения поднимают воду по капиллярам в кроны деревьев, удерживают насекомых на гладкой поверхности стекла.

Практикум наблюдений

1. Энергосберегающее поведение животных и птиц: каким образом животные и птицы экономят тепло в холодное время года?

2. Способы охлаждения организма животных и птиц в жаркое время года.
3. Детектирование невидимого инфракрасного излучения от животных и человека.
4. Обоняние и парфюмерия. Возможности определения расположения источников запаха.
5. Особенности поисков следов собаками. Как «держат» собаки след?
6. Терморегуляция земноводных и насекомых.
7. Терморегуляция морских животных.

Самостоятельные наблюдения-исследования

1. Источники звука насекомых, птиц и животных.
2. Особенности движения животных по сыпучим материалам (песок, снег).

2.3.3. Электричество в живой природе

Электрические явления в живой природе человеку были известны давно. Рыболовство — одно из древнейших занятий человека, и встречи с морским скатом или угрем были нередки. Однако систематические научные исследования «живого» электричества были начаты Луиджи Гальвани только с 1780 года. Возможностей наблюдения электрических явлений в живой природе не много. Простой и доступный вариант наблюдения электризации и электрических разрядов — поглаживание любимой кошки в темной комнате. Электричество проявляет себя не только в синеватых искорках и потрескивании, но и воспринимается осязанием. Конечно, это обычная электризация трением и в этом отношении кошка мало чем отличается от кусочка стекла или классического материала электрических опытов — янтаря.

Прямые наблюдения охоты электрического ската или угря затруднительны, но имеются описания и видеосъемки, которые можно изучать и анализировать. Этот вид работы можно отнести к самостоятельным исследованиям, включая информационный поиск в литературе и Интернете. Доклад по данному вопросу вызовет безусловный интерес у слушателей.

2.3.4. Оптические явления в живой природе

Свечение живых организмов разнообразно и доступно для наблюдений. Первый опыт общения с природой в лесу, в

теплых южных морях дает возможность человеку увидеть «холодный» свет гнилушек от старого пня, увидеть полет светляков, восхититься живым светом теплого ночного моря — миллионы ночесветок, простейшие существа окутывают пловца светящейся мантией. В морях способностью светиться, наряду с микроорганизмами и одноклеточными, обладают моллюски, черви, рачки, некоторые виды рыб. Причиной появления света являются процессы окисления в живых организмах. В бактериях, простейших организмах, клетках грибов, насекомых, животных идут химические реакции окисления кислородом специфических веществ — люциферинов в присутствии ферментов — люцифераз. Это приводит к возбуждению молекул и последующему выделению излишней энергии в виде света — явлению люминесценции. Молекулярные механизмы, лежащие в основе этих процессов, достаточно сложны и являются предметом исследования биофизики, в частности ее раздела — биолюминесценции.

Много интересных оптических явлений может увидеть внимательный наблюдатель в лесу и поле, разглядывая цветы, любуясь радужными переливами красок на крыльях стрекоз, отражением света от покрытой утренней росой паутины. Порой оптические явления загадочны и кажутся необъяснимыми. Однако пристальное наблюдение и размышления с использованием физических законов приводят к разгадке тайны явления.

Пример наблюдений

Рассмотрим известный эффект свечения глаз млекопитающих. Практически всеми наблюдалось зеленоватое свечение кошачьих глаз ночью. Достаточно ярко светятся глаза собак, волков, лошадей, овец, кроликов. В последнее время легко увидеть и свечение глаз человека, сфотографированных фотокамерой со вспышкой. Многие, разглядывая цветные фотографии себя и своих друзей и родных, обнаруживают на портретах яркие красные зрачки.

Проведем наблюдения своей любимой кошки или собаки в различных условиях. Сначала попробуйте увидеть свечение днем, где-нибудь в затененном помещении. Действительно, глаза кошки (собаки) «сверкают», особенно если самому остаться у окна, повернувшись к нему спиной, кошку (собаку) оставить в дальнем от окна углу и обратить ее внимание на себя. Подобный опыт можно повторить в сумерках или лунной ночью

с незашторенным окном. Глаза по-прежнему «горят» зеленым огнем, причем при малейшем повороте головы или глаз в сторону от вас свечение пропадает.

Наблюдение свечения глаз в абсолютно темной комнате дает отрицательный результат — свечение глаз пропадает. Этот факт свидетельствует о том, что кажущееся свечение является результатом отражения от внутренней светочувствительной поверхности глаза — сетчатки — освещающего светового потока. В данной ситуации глаз выступает как отражатель, подобный автомобильным. Вспомните, как ярко начинают они светиться при освещении фарами сзади идущего автомобиля, отражая свет в направлении, обратном засветке.

При фотографировании лица человека со вспышкой, расположенной рядом с объективом фотоаппарата, интенсивный световой поток за очень короткий промежуток времени освещает сетчатку глаза через широко открытый зрачок. Реакция зрачка на сужение гораздо медленнее, чем время, затрачиваемое импульсом на прохождение от вспышки до глаза и обратно, на фотопленку. Поэтому освещенная сетчатка, как селективное сферическое зеркало, отражает импульс света обратно, причем отраженный пучок коллимируется хрусталиком, его интенсивность в красной области спектра, по сравнению с участками кожи, достаточно велика, и зрачок глаза становится красным.

В современных фотоаппаратах используется простое техническое решение для устранения красных зрачков. В фотоаппарате перед включением лампы-вспышки для фотографирования автоматически включается предварительная вспышка, которая запускает механизм сужения зрачка заранее, и к моменту прихода основного светового потока зрачок успевает сузиться, глазного дна достигает меньший более чем в десять раз световой поток. Дополнительно при малом зрачке увеличивается дифракционная расходимость отраженного пучка, что еще более снижает световой поток, формирующий изображение красного зрачка. Наблюдения, описанные выше, доступны, более того, они уже неоднократно проведены. Для полного представления о деталях, возможности провести оценочные расчеты, достаточно более пристально посмотреть на фотографии и процедуру съемки разными фотоаппаратами, исследовать реакцию зрачка на предварительную засветку и время восстановления его исходного состояния. Эти дополнительные «прицельные» наблюдения позволят сделать оценочные расчеты и представить ясную картину явления.

Практикум наблюдений

1. Условия наблюдения радужной окраски насекомых: глаз, крыльев, ног, поверхности тела.
2. Внешнее строение глаз стрекозы.
3. Оптические свойства поверхностей глаз рыб, земноводных, млекопитающих.
4. Оптические свойства шерсти животных. Связь с состоянием здоровья.
5. Особенности зрения морских животных в воде и на воздухе.
6. Особенности зрения орлов и сов.
7. Формы зрачков земноводных, рыб, млекопитающих.

Самостоятельные наблюдения-исследования

1. Углы обзора земноводных, рыб и млекопитающих.
2. Восприятие человеком прерывистого (импульсного) излучения.

2.4. Физика в технике

Физика в технике используется в разнообразных вариантах. С древнейших времен идеи новых технических систем и устройств возникают в практической физике. Конечно, физика времен Архимеда и то, что открыто и освоено к сегодняшнему дню, несопоставимы. Однако простые механизмы (рычаг, наклонная плоскость, блоки) внесли в то время столь же значимый вклад в развитие цивилизации, как, например, ядерный реактор и ракета в 50-е годы прошлого столетия.

Доступные наблюдения технических устройств и систем многообразны. В дальнейшем изложении мы предлагаем сделать самостоятельный выбор объектов для наблюдательного изучения конкретного физического явления или процесса. Перечень рекомендованных процессов или объектов подобран из соображений максимальной доступности для многократного наблюдения.

2.4.1. Механическое движение в технике

Практикум наблюдений

1. Равномерное движение воздушного, наземного и водного транспорта. Скорость, траектория, перемещение. Относительность движения.

2. Силы трения в транспортных механизмах.
3. Ускоренные и замедленные виды движения транспортных средств.
4. Вращательные движения в механизмах и устройствах (транспорт, строительная техника, судовые движители).
5. Законы сохранения энергии, импульса на транспорте.
6. Упругость и прочность материалов. Проявление закона Гука, деформации.
7. Водный транспорт. Надводные и подводные суда.
8. Движение парусных судов.
9. Механические колебания механизмов. Резонанс и гашение колебаний колесных транспортных средств (велосипед, мотоцикл, автомобиль).

2.4.2. Тепловые и молекулярные процессы и явления в технике

Практикум наблюдений

1. Системы обогрева жилых помещений.
2. Теплообмен двигателей внутреннего сгорания с окружающей средой.
3. Энергетические потоки в холодильных установках.
4. Теплоизолирующие материалы в строительстве.
5. Сжатые газы на транспорте.
6. Физика слипания и склеивания.
7. Акустические явления на транспорте.

2.4.3. Электрические и электромагнитные процессы и явления в технике

Практикум наблюдений

1. Электронагревательные приборы: типы, особенности конструкций, эффективность преобразования электрической энергии в тепловую.
2. Воздушные линии электропередач: ресурсосберегающие особенности конструкций.
3. Городской электротранспорт. Электровозы на железной дороге.

2.4.4. Оптика в технике

Практикум наблюдений

1. Искусственное освещение. Оптика светильников.
2. Естественное освещение помещений. Оптика прозрачных окон.
3. Оптика полупрозрачных зеркальных окон.
4. Зеркальные изображения. Калейдоскоп.
5. Зеркала обзора на транспорте.
6. Театральная светотехника.
7. Сигнальные огни маяков, бакенов, самолетов.
8. Особенности световых потоков ближнего и дальнего света автомобилей.
9. Динамические оптические картины эстрады.
10. Фильтрация излучения светозащитными очками.
11. Светомаскирующие и контрастирующие краски.

Физическое моделирование и мысленные эксперименты

3.1. Введение

Физическая модель понимается как идеальный образ в нашем сознании объекта, явления или процесса окружающего мира, созданный для их изучения. Процесс познания заключается в движении от чувственных образов к совокупности моделей разной степени сложности и соответствия реальности. Необходимость использования моделей обусловлена сложностью и многообразием окружающего мира, ограниченностью чувственных возможностей человека. Физическая модель может быть представлена как совокупность целостной системы физических понятий, подчиняющейся физическим законам. В ряде случаев эта модель может быть воссоздана в виде натурной, уменьшенной или увеличенной копии реального объекта. Это будет натурная модель. Если определенные характеристики объекта или процесса описываются математически, и ряд физических моделей правильно описывается одним и тем же математическим аппаратом, возникает понятие «математической» модели.

Физические модели заменяют нам реальные объекты и процессы, позволяют рассматривать разнообразные предельные ситуации — высокие температуры, давления, скорости, ускорения.

Отличие реальных объектов, явлений, процессов от их моделей огромно. Примером может служить модель молекулы воды, состоящая из трех шариков и соединительных металлических спиц. Эта модель во много раз больше, чем реальная молекула. Она демонстрирует только структурную особенность этой молекулы: взаимное расположение атомов кислорода и водорода, их пространственную конфигурацию. Никаких физических и химических свойств в данной модели не заложено.

В физике существует такое понятие, как натурное моделирование процесса или ситуации. Например, уменьшенная копия самолета (сделанного пропорционально настоящему) изучается в аэродинамической трубе. При этом фиксируется поведение самолета при разных условиях эксплуатации и нагрузках. Моделируемые условия подобны тем, в которые самолет может попасть в реальной ситуации. Мы здесь использовали термин «подобный». Существует теория подобия, разработанная для случаев, когда очень сложно сконструировать материальную модель в масштабе 1 : 1. Иногда легче изучать физические тела, явления в малом масштабе, чтобы понять суть изучаемого явления или оптимизировать конструкцию будущего самолета.

Так, действие эффекта «крыла» или закона Бернулли не сильно отличается для игрушечного самолета и гигантского воздушного судна. А попробуйте связать полет самолета и движение теннисного шарика в вертикальном потоке воздуха. И вы поймете, что это не так-то просто, хотя закон Бернулли работает в обоих случаях.

На рис. 3.1 в левой части изображено сечение крыла в горизонтальном потоке воздуха, причем крыло значительно меньше размеров потока. Указаны направление движения однородного потока воздуха относительно крыла, направление подъемной силы и силы тяжести, а также уравновешенные силы тяги и лобового сопротивления.

В правой части изображен теннисный шарик в вертикальной струе воздуха, сравнимой по размерам сечения с шариком. Поток воздуха имеет радиально неоднородное поле скоростей. Центр висящего в нем шарика находится на оси потока, указа-

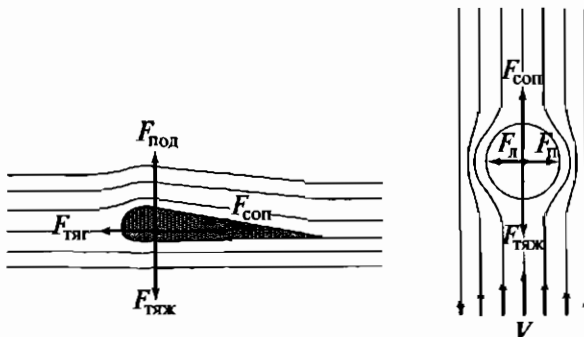


Рис. 3.1

ны действующие на шарик сила лобового сопротивления, компенсирующая силу тяжести, и одинаковые по величине силы давления воздуха, действующие на шарик в горизонтальном направлении.

Казалось бы, что общего между этими явлениями? Но для физики эти ситуации имеют общую модель. Это позволяет увидеть существенные характеристики явления, обнаружить закономерности процесса обтекания разными потоками воздуха тел различной формы.

Главное положение нашей модели — неразрывность потока воздуха. Воздух здесь выступает как сплошная среда. Существенным в обтекании модели крыла и шарика является распределение скорости в пограничных к поверхности тел областях потока. Для левого рисунка скорость воздуха над крылом больше чем под крылом, и это возникает в связи с особой формой крыла, которая формирует разные пути, пройденные верхним и нижним воздушными потоками, а время их прохождения одинаково. Симметричное расположение шарика относительно оси потока обеспечивает равенство горизонтальных аэродинамических сил и стационарное равновесие шарика.

Рассмотрим рисунки, которые покажут нам на модели сходство этих двух явлений.

В левой части рис. 3.2 повторяет рис. 3.1. В правой части центр шарика смещен относительно оси потока, указаны действующая на шарик сила лобового сопротивления, компенсирующая силу тяжести и разные по величине аэродинамические силы, действующие на шарик в горизонтальном направлении.

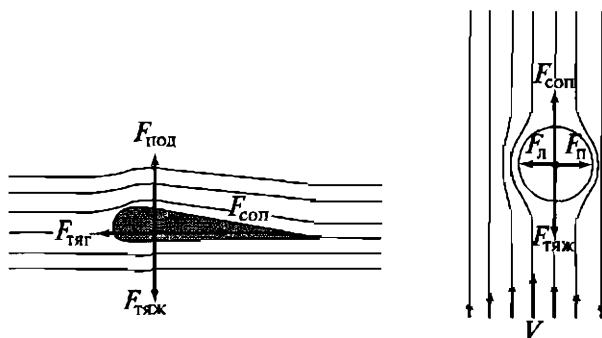


Рис. 3.2

Легко заметить, что разница в рисунках практически отсутствует, если один из них повернуть на 90 градусов.

Согласно закону Бернулли известно, что с той стороны, где скорость потока воздуха или жидкости вдоль объекта выше, возникает пониженное давление. Разность давлений приводит к возникновению подъемной силы для крыла и силы, смещающей относительно центра потока теннисный шарик.

В данной главе представлено описание ряда важных физических моделей, использование которых поможет вам в изучении и понимании физики.

3.2. Основные модели механики

Модель появляется тогда, когда в физических явлениях выделяется и отбрасывается то несущественное, что мешает их пониманию и применению. Нам необходимо с вами для этого освоить такие процедуры, как абстрагирование, обобщение и идеализация. Покажем на примере, как это реализуется на практике.

Технология проста: после фиксации своих наблюдений за явлением мы должны выделить главное и существенное. Частности и разные несущественные детали просто отбрасываются. Правильность наших действий в «очищении» проявится, когда начнется использование модели и она будет давать сбои. Это является критерием необходимости дальнейшего совершенствования модели.

Для описанных во введении ситуаций были несущественными, например, температура воздуха, его влажность, цвет шарика и модели крыла. Попробуйте к этому списку добавить еще какие-либо характеристики объектов и самого процесса.

Построение моделей предполагает не только упрощение ситуаций. В задачах аэродинамики воздушные потоки рассматриваются как сплошная и непрерывная среда. Движение отдельных молекул в потоке воздуха не учитывается. Обоснованием такого приближения являются малые величины импульса и, соответственно, кинетической энергии каждой из молекул по сравнению с аналогичными величинами, характеризующими поток воздуха в целом.

Действительно, число соударяющихся с телом молекул по порядку величины близко к числу Авогадро — $6,022 \cdot 10^{23}$, импульс отдельной молекулы, например, азота при нормальной

(293 К) температуре имеет порядок 10^{-20} . Произведение этих двух величин дает импульс макроскопической величины, который передается телу и, в конечном итоге, создается давление газа на его поверхность.

Практикум моделирования

Приведите пример ситуаций, в которых можно использовать модель сплошной среды, и дополните приведенную ниже таблицу. Кратко сформулируйте пояснения. Выберите из списка явления для обсуждения. Напишите эссе или реферат со своими собственными рассуждениями о явлении, с использованием описанной выше модели. Сформулируйте ограничения использования модели сплошной среды в этих явлениях. Отдельно сформулируйте вопросы, не объяснимые с помощью используемой модели.

Таблица 1

Явление	Пояснения
Броуновское движение	
Полет вертолета	
Полет бабочки, пчелы	
Растворение сахара	
Водопад, фонтан	
Падение снега	
Течение реки	
Полет пылинки	

Очень важным вопросом в обсуждении моделей всегда является вопрос об области применимости модели.

Определенной идеализацией является непрерывность (ламинарность) течения газа при встрече с разнообразными препятствиями. Фактически мы работаем с некоторым идеальным объектом — сплошной средой, обладающей такими свойствами, что в некоторых ситуациях эта идеальная среда имитирует реальную при рассмотрении и анализе явления. Это справедливо для потоков, движущихся с небольшими (порядка 10–100 м/с) скоростями. В обтекающем препятствие газе с большими скоростями (более 100 м/с) образуются вихри, которые формируют турбулентные области потока, и для учета этих эффектов нужна другая физическая модель.

Важным моментом в выборе и применении модели является масштабный фактор. Размеры предмета, который находится в потоке, скорость потока и вязкость среды определяют условия, которые должны быть выполнены для подобия физических явлений, происходящих с моделью и реальным объектом. Физическое подобие является обобщением хорошо известного и понятного геометрического подобия. Например, для любых двух подобных прямоугольных треугольников с острым углом в 30° отношение длин малого катета и гипотенузы равно 2. В физике все или только некоторые комбинации размерных физических параметров могут так же, как и отношения катетов, давать безразмерные комбинации. Такие комбинации называются критериями подобия и определяют границы применимости физической модели. Пример: в гидроаэромеханике есть безразмерный параметр $Re = \rho v l / \eta$, называемый числом Рейнольдса, где ρ — плотность жидкости, v — скорость течения, l — характерный линейный размер, η — коэффициент вязкого трения жидкости или газа. Число Рейнольдса характеризует соотношение между силами инерции и силами трения в потоке жидкости или газа. Для тел разных размеров, например, самолета и его уменьшенной в 10 раз копии-модели условия обтекания воздухом будут одинаковы, если скорости обтекания модели будут в 10 раз больше. Число Рейнольдса характеризует и переход от ламинарного течения к турбулентному. Критическое значение Re для потока воды в гладких трубах 1100–1200, однако оно сильно зависит от условий втекания и состояния внутренней поверхности трубы. Пример из практики: водопроводные трубы начинают «петь» в случае возникновения турбулентности в потоке воды, которая вызывается сильной деформацией прокладки крана.

3.2.1. Модель материальной точки

Вопрос о моделях в физике можно начать детально обсуждать (и выяснять все принципиальные моменты) на примере материальной точки. Этот наипростейший идеальный объект в то же время обладает глубочайшей фундаментальностью, эффективен и широко распространен. В описании движения материального тела как целого, нахождения его скорости, ускорения, координат достаточно рассмотреть идеальный эквивалент — безразмерно малую точку с массой, равной массе тела. Движение материальной точки обычно соответствует дви-

жению центра тяжести тела. При этом размерами и другими видами движения в ряде случаев можно пренебречь.

На рисунке 3.3 изображено движение брошенного вверх с вращением, под некоторым углом к горизонту, школьного треугольника. В левой части рисунка изображен треугольник в разные моменты времени его полета. В правой части изображена баллистическая траектория движения центра тяжести треугольника.

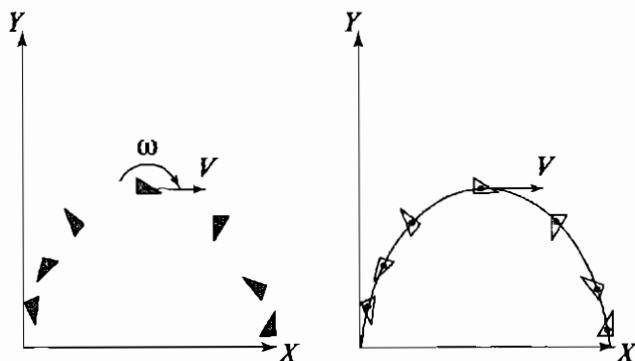


Рис. 3.3

На рисунках видно, как отличаются по сложности эти два движения. Нахождение траектории движения тела как цельного объекта, превращенного в материальную точку, сильно упрощается. В принципе, любую механическую задачу можно свести к движению системы материальных точек. Условия применения: тело можно считать материальной точкой, если пройденный этим телом путь намного больше его размеров.

Практикум моделирования

Отберите из списка случаи, когда движение тела можно рассматривать как движение материальной точки. Дополните список своими примерами.

1. Движение автомобиля по шоссе.
2. Движение автобуса в момент остановки для посадки пассажиров.
3. Движение самолета высоко в воздухе.
4. Движение самолета при посадке в момент касания взлетной полосы.

5. Движение поезда.
6. Бег спринтера.
7. Полет воздушного шара.

3.2.2. Модели абсолютно упругого и неупругого тела

Механическое взаимодействие двух тел, происходящих с полным переходом кинетической и потенциальной энергий друг в друга, соответствует абсолютно упругому взаимодействию. Данная модель применяется для описания взаимодействия двух тел, в котором изменением внутренней энергии тел при столкновении можно пренебречь. Это возможно в ситуациях, когда значение кинетической или потенциальной энергий значительно больше изменений внутренней энергии.

Пример: шарик, брошенный с некоторой высоты на твердую упругую плиту, в идеальной ситуации будет скакать бесконечно долго с одинаковой амплитудой, каждый раз возвращаясь точно в точку, из которой он начал свое движение. Такое движение называют периодическим и незатухающим. В реальной практике такой ситуации быть не может, к ней можно только приблизиться. В процессе деформации часть энергии преобразуется в тепло. Это есть своеобразный «насос», который отсасывает энергию в реальной ситуации и не работает в модели.

На рис. 3.4 изображены положения падающего с высоты h шарика. В левой части шарик после каждого удара под-

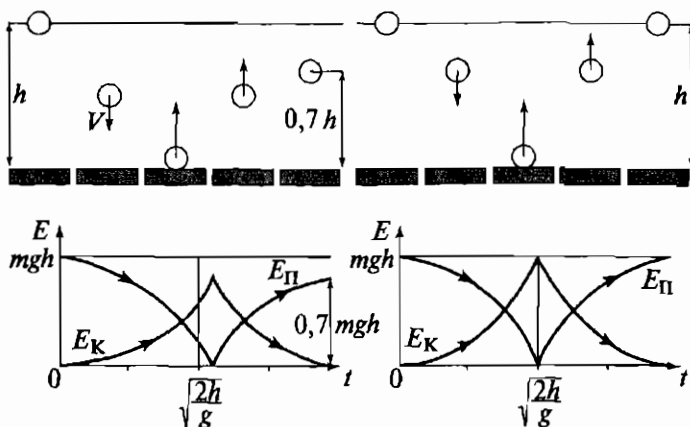


Рис. 3.4

скакивает на высоту 70% от предыдущей. В правой части рисунка изображено упругое соударение шарика. В нижней части рисунка приведены графики изменений кинетической и потенциальной энергий в зависимости от времени.

Границы применимости такой модели связаны со свойствами вещества, из которого сделан шарик, и поверхности. Если мы говорим о стальном шарике с большим коэффициентом упругости, то для 1–2 ударов можно использовать модель абсолютно упругого взаимодействия. Для большого количества ударов модель необходимо корректировать, вводя коэффициент потерь и отказываясь от модели абсолютно упругого тела.

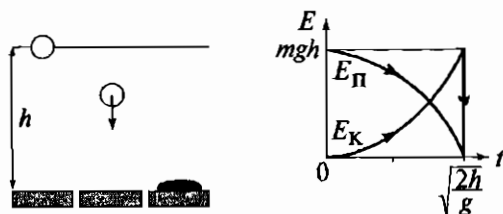


Рис. 3.5

Противоположностью к такой модели является модель абсолютно неупругого тела. На твердую упругую плиту с некоторой высоты падает шарик из мягкого пластилина (рис. 3.5). Шарик из пластилина падает с высоты h и прилипает к плите. В правой части рисунка приведен график изменений кинетической и потенциальной энергий. Это полностью неупругое соударение, для которого во время удара кинетическая энергия шарика полностью переходит во внутреннюю. Совершается такое преобразование в одном направлении, обратное невозможно.

В приведенных примерах принципиально разных идеальных процессов есть общая особенность — оба процесса являются предельными, происходит полный переход одного вида энергии в другой.

Практикум моделирования

В каком виде спорта можно использовать описанные здесь модели для понимания и предсказания последствий взаимодействия двух тел? Бильярд, хоккей, теннис, футбол. Дайте аргументированные пояснения.

3.2.3. Модель маятника. Гармонические колебания

Математический маятник конструируется из двух идеальных объектов: материальной точки и тонкой нерастяжимой и невесомой нити длиной l . Предполагается, что в процессе колебания отсутствуют силы трения и любые деформации у всех движущихся частей маятника: точки подвеса, нити и самой материальной точки. Это популярная и удобная модель для изучения и понимания колебательных процессов. Реальный лабораторный маятник приближается к математическому, если длина нерастяжимой нити значительно (в 10 и более раз) превосходит размеры подвешенного груза и максимальную амплитуду колебаний. В таких условиях колебания маятника являются гармоническими, период колебаний определяется формулой Гюйгенса: $T = 2\pi\sqrt{l/g}$, где l — длина маятника, g — ускорение свободного падения.

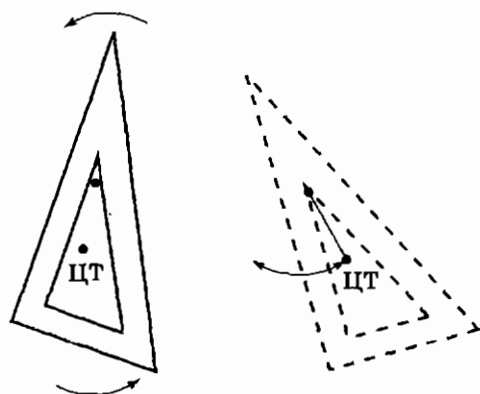


Рис. 3.6

В левой части рис. 3.6 изображено колебание реального физического тела — школьного треугольника. В правой части показано колебательное движение центра тяжести треугольника.

Практикум моделирования

На основе модели провести анализ степени приближения к математическому маятнику традиционных школьных колебательных систем «грузик на нитке».

3.2.4. Модель замкнутой системы

Совокупность физических объектов, полностью изолированная от воздействия других тел, является замкнутой системой. В таких системах должны выполняться законы сохранения энергии, импульса и момента импульса. Примеры: солнечная система, маятник в поле тяжести Земли, упругий шарик, отскакивающий от массивной плиты, два сталкивающихся бильярдных шара, и другие. Наглядной геометрической моделью замкнутой системы может служить окружность, шар или тор (бублик). Перемещение материальной точки по окружности, поверхности шара или тора в любом направлении завершается ее возвращением в исходную точку.

В перечисленных случаях изолированность систем различна. Опыты с падающим с высоты стальным шариком, упруго отскакивающим от твердой и массивной плиты, можно проводить в воздухе или вакууме. Результаты наблюдений будут различны, число отскоков в воздухе будет меньше, чем в вакууме. В обоих случаях часть механической энергии переходит в тепло в результате деформации, при падении в воздухе энергия расходуется на работу против сил трения.

Таким образом, полной изоляции любой системы от окружения достичь невозможно. Однако при малых сторонних возмущениях систему считают приближенно изолированной.

Это, как правило, значительно упрощает решение физических задач, связанных с эволюцией системы. Таким образом, мы избегаем неоправданного роста сложности решаемых задач. Проблема выбора приближения состоит в определении той границы, в пределах которой воздействия можно считать несущественными, малыми.

Вероятно, полностью соответствует таким требованиям только одна система — это наша Вселенная, взятая целиком. А простое приближение к замкнутой системе демонстрирует хороший походный термос, который может сохранять тепло до двух суток. В масштабе одного часа этот термос есть замкнутая система.

На рис. 3.7 изображены примеры геометрических (слева) и физических (справа) замкнутых систем. Геометрические: одномерная — окружность; двумерные — сфера и тор. Движение точки в каждой из систем с указанным вектором скорости через некоторое время приводит к ее возврату в исходное положение. В физических системах, энергетически замкнутых,

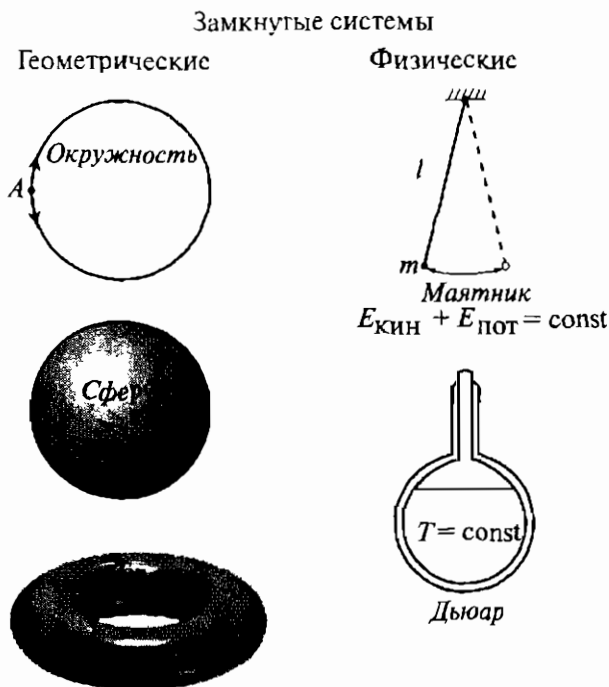


Рис. 3.7

в которых нет входа и выхода для энергии, полная энергия системы сохраняется постоянной. Примерами служат идеальный математический маятник, а также идеальный сосуд Дьюара для сжиженных газов — азота, кислорода.

Практикум моделирования

Провести поиск систем, максимально приближенных к замкнутым, в природе, в технике, быту.

3.2.5. Модель движения в однородном потенциальном поле

Данная модель подходит для работы с ситуациями, когда тяжелое тело брошено под углом к горизонту вблизи Земли, или заряженная частица влетает в поле плоского конденсатора. В этих случаях мы имеем одну и ту же зависимость коор-

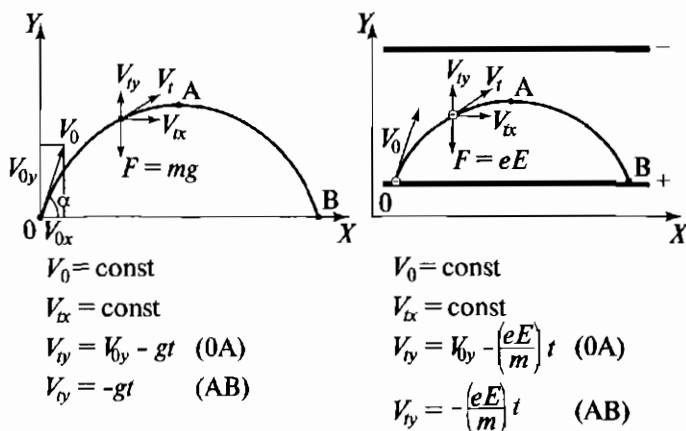


Рис. 3.8

динаты тела от начальной точки движения, вектора скорости и величины ускорения. Для падения вблизи Земли ускорение свободного падения всегда примерно постоянно $g = 9,8 \text{ м/с}^2$, и влиянием воздуха на движение тела мы пренебрегаем (тело достаточно массивно, чтобы сопротивление было существенным). Для заряженной частицы нужно учитывать тип заряда, его величину и напряженность поля. Главное, что надо знать про эту модель — то, что тела в однородном поле двигаются по параболе.

На рис. 3.8 представлено сравнение двух механически подобных процессов: движение тела, брошенного под углом к горизонту, в поле тяжести, и движение заряженной частицы, влетевшей в однородное электрическое поле с вектором скорости, направленным под углом к вектору напряженности электрического поля. В нижней части приведены формулы, демонстрирующие сходство рассматриваемых процессов.

Как видно на рисунках, эти траектории описываются одной закономерностью.

Граница применимости данной модели определяется по-разному для гравитационного и электрического полей. В первом случае важным является соотношение массы и линейного размера тела, а также скорость движения тела. Проиллюстрируем это на примере одинаковых листов, сделанных из разных материалов: один бумажный, а другой стальной. Если их сбросить с высоты 2-х метров, то стальной будет падать почти

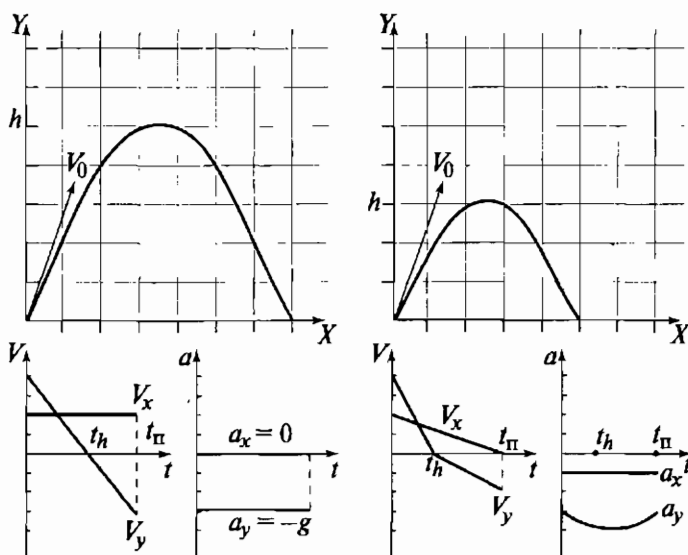


Рис. 3.9

не ощущая влияния воздуха, а бумажный будет кувыркаться в падении. Со скоростью то же самое: если тело успевает в атмосфере разогнаться при падении до скорости 50 м/с, то сила тяжести и сила сопротивления выравниваются и ускорение становится равно нулю.

Рис. 3.9 демонстрирует различие движений тела, брошенного под углом к горизонту в поле тяжести. Слева, в верхней части, показана идеальная баллистическая траектория для движения тела в безвоздушном пространстве. Справа движение происходит в условиях, подобных земным — движущееся тело испытывает воздействие сил трения. В нижней части рисунка изображены графики зависимостей скорости и ускорения от времени.

При наличии сопротивления воздуха ускорение меняется нелинейно и постепенно доходит до нуля с увеличением скорости.

Практикум моделирования

Провести анализ падения капель воды (туман, дождь) и описать их движение в модели движения в однородном потенциальном поле.

3.3. Модели вещества

3.3.1. Модель идеального газа

Данная модель интересна тем, что использует сразу несколько идеализаций, уже описанных ранее. Во-первых, молекулы представляются как материальные точки. Во-вторых, их взаимодействия друг с другом и со стенками сосуда рассматриваются как абсолютно упругие соударения. Кроме этого, потенциальная энергия взаимодействия молекул между собой значительно меньше их кинетической энергии и поэтому данным взаимодействием можно пренебречь.

Модель идеального газа достаточно проста и в то же время достаточно богата, чтобы с ее помощью можно было изучать широкий спектр физических явлений. Например, такие явления, как сжатие и расширение газа при постоянной температуре, нагревание и охлаждение газа при постоянном давлении, или изменение объема при нагревании газа могут быть описаны и объяснены этой моделью с достаточно высокой степенью точности.

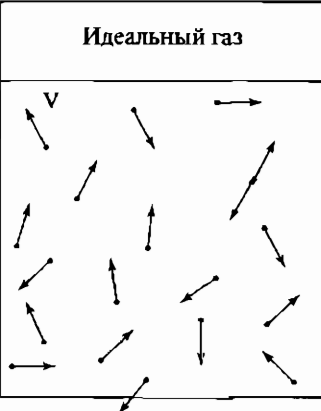
Молекулы — 100 пм	Межъядерные расстояния, пм (10^{-12} м)	Идеальный газ
 O ₂	120,7	
 N ₂	109,4	
 H ₂	74,1	
 H ₂ O 105°	97,1 (O—H)	
 CO ₂	112,8 (C—O)	

Рис. 3.10

На рис. 3.10 слева представлена таблица с изображением моделей молекул: двухатомных — кислород, азот, водород; трехатомных — вода и углекислый газ. Атомы изображены в виде шаров, с указанием масштаба и геометрии молекул. Справа точками изображены модели молекул идеального газа,

с векторами скоростей. В этом случае важны процессы обмена энергией молекул друг с другом и со стенками сосуда.

Практикум моделирования

Приведите примеры физических явлений двух типов. К первому отнесите те, для объяснения и понимания которых достаточно модели идеального газа, а ко второму те, для понимания которых необходимы более сложные модели.

3.3.2. Модель кристаллической решетки

Представление внутреннего устройства физических тел в виде кристаллической решетки характерно для большого класса твердых тел: металлов, диэлектриков, полупроводников.

Стабильная кристаллическая структура предполагает жесткие связи между атомами и определенность их положений в решетке. Атомы совершают малые, по сравнению с межатомными расстояниями, колебания около этих позиций. Кинетическая энергия колебательного движения атомов намного меньше потенциальной. Свойства кристаллов определяются симметрией решетки и характером связей.

Нагревание кристалла приводит к увеличению амплитуд колебаний атомов, их кинетическая энергия возрастает, связи разрываются и кристалл плавится.

Модель кристаллической решетки, традиционно используемая в учебной и научной литературе, представляет собой материальные точки, расположенные в узлах решетки. Структурный анализ позволяет определить координаты этих точек и симметрию их расположения. Каждая точка находится в потенциальном поле остальных атомов решетки. Равновесное положение выделенного атома соответствует минимуму потенциальной энергии.

Рис. 3.11 иллюстрирует наглядные модели кристаллической решетки при различных температурах. Слева изображен фрагмент охлажденной кристаллической решетки с атомами в виде шаров небольшого диаметра, находящихся в небольших «сферах смещений», соответствующих малым, по сравнению с межатомным расстоянием, амплитудам тепловых колебаний. Ниже решетки для выделенного атома представлен график зависимости потенциальной энергии от величины смещения от положения равновесия. Указано энергетическое состояние атома, при котором $E_k \ll E_n$. Справа изображен фрагмент разо-

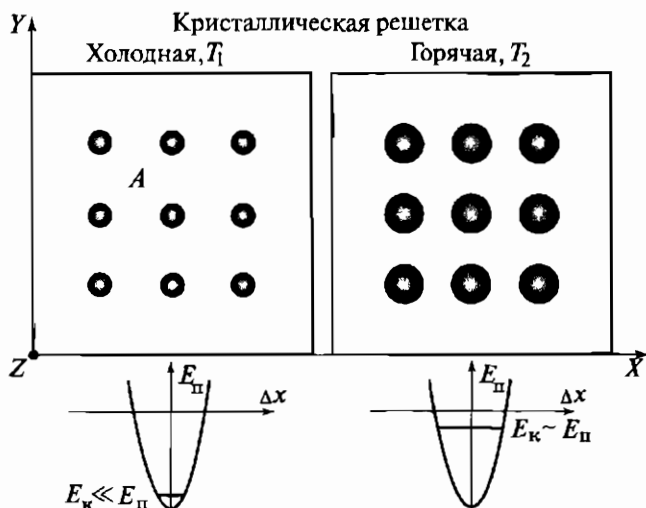


Рис. 3.11

гретой кристаллической решетки, в состоянии предплавления, со сравнимыми с межатомными расстояниями амплитудами тепловых колебаний. Диаметры «сфер смещений» сравнимы с межатомными расстояниями. Ниже решетки для выделенного атома приведен график зависимости потенциальной энергии от величины смещения от положения равновесия. Указано энергетическое состояние атома, при котором $E_{\kappa} \sim E_{\pi}$.

Наглядной механической моделью двумерного кристалла может быть плоская ячеистая кассета-матрица с шариками в каждой ячейке. Плоскость кассеты горизонтальна. Температура имитируется хаотическим смещением кассеты по горизонтали. В состоянии с малой кинетической энергией шарики колеблются около положений равновесия у дна ячейки. Если кинетическая энергия шариков большая, то они могут преодолеть барьер, отделяющий их от соседней ячейки, и решетка разрушается.

На рис. 3.12 (слева) показана наглядная механическая модель двумерной охлажденной кристаллической решетки: поверхность с периодически расположенными глубокими ямочками, в каждой из которых находятся шарики-атомы. Эти атомы совершают малые, по сравнению с межатомными расстояниями, колебания относительно положения равновесия и не могут перескакивать из ямки в ямку. Кинетическая энергия коле-



Рис. 3.12

бательного движения атома меньше потенциальной, решетка устойчива.

Справа представлена модель двумерной нагретой кристаллической решетки: поверхность с периодически расположенными неглубокими ямочками, в каждой из которых находятся шарики-атомы. В нагретом состоянии атомы совершают колебания относительно положения равновесия, амплитуды которых сравнимы с межатомными расстояниями. Атомы могут перескакивать из ямки в ямку, их кинетическая энергия становится сравнимой с потенциальной и решетка разрушается.

Практикум моделирования

Рассмотреть модели кристаллических решеток различной размерности: одномерные (цепочки), двумерные (сетки), трехмерные (пространственные решетки). Выбрать наиболее наглядные варианты для иллюстрации явления плавления кристалла.

3.4. Модели электричества

3.4.1. Модель проводимости

В этой модели будут использованы элементы предыдущих модельных конструкций. Явление проводимости свойственно не только металлам. Электрические токи идут через жидкости с примесями, газ, если есть свободные носители заряда и сила, побуждающая их к упорядоченному движению — электродвижущая сила (ЭДС).

Простейший случай: металлический проводник подсоединен к источнику тока и по нему двигаются электроны. Каждый проводник обладает сопротивлением. Объяснение этого явления возможно, если мы включаем в данную модель представления о кристаллической решетке металла. Электроны проводимости в металлах являются единственными носителями за-

рядов. В процессе движения по кристаллической решетке они сталкиваются с атомами вещества, находящимися в узлах решетки. Происходит передача части кинетической энергии электрона атому, что в целом повышает внутреннюю энергию тела. Это приводит к разогреву проводника, по которому идет ток.

Модель становится более универсальной, если учитывать кулоновское взаимодействие электронов проводимости между собой. Отталкивание отрицательно заряженных свободных электронов приводит к их перемещению на границы проводника. Это означает, что ток в проводнике протекает в поверхностном слое. Предсказанный моделью эффект является частным случаем более сложного явления затухания электромагнитных волн в проводящих средах — скин-эффекта (от английского skin — кожа, оболочка).

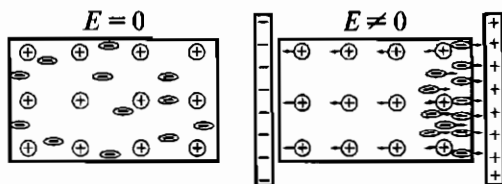


Рис. 3.13

Рис. 3.13 иллюстрирует модель металлического проводника. Слева — модель плоской кристаллической структуры металла с однородным распределением электронов между положительно заряженными ионами остова решетки. Кулоновские силы, действующие на заряженные частицы, уравновешены. Справа — модель кристаллической структуры металла, помещенного в электрическое поле. Распределение электронов между положительно заряженными ионами остова решетки становится неоднородным. Кулоновские силы, действующие на заряженные частицы, не уравновешены. Наблюдается поляризация системы зарядов, электроны скапливаются у поверхности вблизи положительного электрода.

Область применения данной модели: низкие температуры и небольшие токи.

Практикум моделирования

Провести анализ явления с целью обоснования ограничений области применения.

3.4.2. Модель эквипотенциальных поверхностей и силовых линий электрического поля

В электростатике вводятся понятия эквипотенциальной поверхности и силовой линии, что позволяет наглядно представить действие поля на заряженные тела.

Электрическое поле в графическом виде представляется набором векторов в каждой точке. Эти векторы задают силу, действующую на единичный заряд, помещенный в эту точку. Заряды перемещаются под действием силы Кулона из одной точки пространства в другую по некоторой траектории. Касательный вектор к этой траектории в каждой точке определяет направление силы, действующей на заряд.

При перемещении заряда перпендикулярно силовым линиям работа не совершается. Совокупность разнообразных перемещений такого рода образует поверхность, которую называют эквипотенциальной. Наглядный физический смысл такой поверхности иллюстрируется идеально горизонтальной плоскостью в поле тяготения. В любой точке такой плоскости потенциальная энергия тяготения одинакова, эквивалентна. Перемещение любого тела по плоскости без учета сил трения происходит без совершения работы.

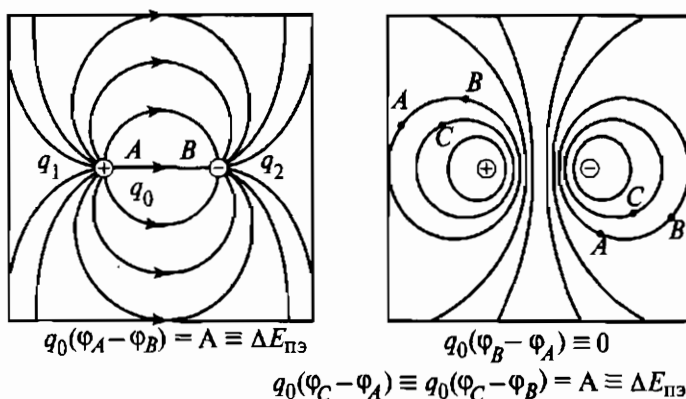


Рис. 3.14

В левой части рис. 3.14 изображена система из двух разноименных зарядов с силовыми линиями электрического поля. На одной из силовых линий указаны две точки, A и B. Движение заряда вдоль силовой линии от A к B приводит к изменению энергии системы.

Справа изображена система из двух разноименных зарядов с линиями эквипотенциальных поверхностей электрического поля. На двух линиях указаны три точки, A , B и C . Движение по эквипотенциальной линии от A к B не приводит к изменению энергии системы. При переходе с одной эквипотенциальной линии на другую, от точки A к точке C или от точки B к точке C , совершается работа. В нижней части рисунка приведены формулы, определяющие изменение энергии через величину заряда и разность потенциалов.

Область применения этой модели электрического поля ограничивается масштабом, где закон Кулона не применим $\sim 10^{-14}$ м. Другое ограничение модели связано с релятивистскими эффектами. Скорость движения зарядов должна быть значительно меньше скорости света.

Практикум моделирования

Изобразить эквипотенциальные поверхности различных систем зарядов.

3.4.3. Модель колебательного контура

Электрический колебательный контур является распространенным физическим устройством. Идеализация этого устройства и превращение в модель состоит в исключении потерь энергии в катушке и конденсаторе, подводящих проводах, связанных с протеканием тока, а также рассеяния энергии через излучение электромагнитного поля элементами контура.

Рис. 3.15 иллюстрирует сходство электрических и механических колебательных процессов. Изображены схемы превращения электромагнитной и механической энергии в колебательном контуре и математическом маятнике. В верхнем ряду изображены пять состояний идеального колебательного контура. Энергия электрического поля в конденсаторе переходит в энергию магнитного поля катушки и обратно. Выше изображений контура приведены формулы для электрической и магнитной энергии в изображенных состояниях. Ниже ряда контуров изображены пять фаз колебаний идеального математического маятника, аналогичных фазам колебаний в контуре, с указанием формул для величин кинетической и потенциальной энергий.

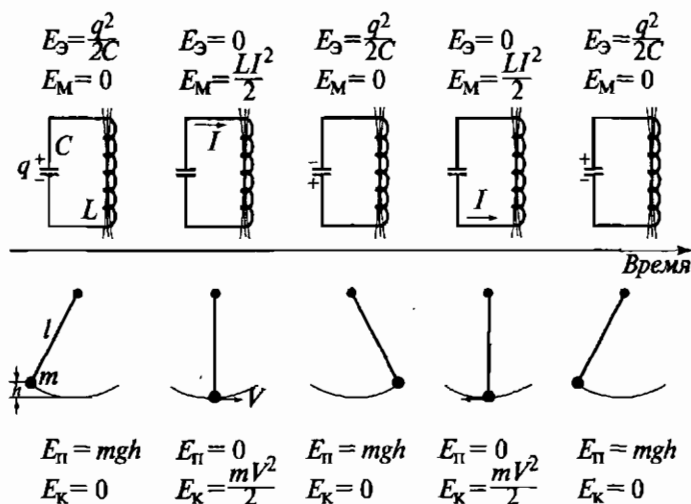


Рис. 3.15

Практикум моделирования

Провести параллельное рассмотрение потерь энергии в колебательном контуре и механическом маятнике в различных условиях.

3.5. Модели оптики

3.5.1. Модель светового луча и тонкой линзы

Изучение световых явлений привело к построению эффективно работающей модели световых явлений — геометрической оптике. В этой модели распространяющийся свет представлен лучами. Наблюдение прямолинейно распространяющихся световых пучков в однородной среде, отражения и преломления на границе раздела привело к идеальной модели луча — бесконечно тонкой линии. Реальная ситуация распространения световых пучков конечной ширины заменяется рассмотрением световых лучей — линий.

Такое видение света накладывает определенные ограничения на круг явлений, которые могут быть описаны с помощью этого приближения. Мы можем эффективно использовать модель для объяснения ряда простых оптических явлений. К ним относится отражение и преломление света.

Эти два явления определяют поведение луча света в оптической среде. Самым распространенным оптическим инструментом для создания изображений является линза. Поэтому очень важно описать рабочую модель линзы для понимания ее реальной работы.

Для этого обычно вводится несколько правил, согласно которым лучи взаимодействуют с поверхностью линзы. Эти правила определяют, как будет двигаться луч после прохождения линзы, если известно, как он двигался до линзы и каковы характеристики линзы.

Идеальная тонкая линза имеет бесконечно малую толщину, характеризуется определенным фокусным расстоянием, коэффициентами отражения поверхностей, если это необходимо. Обычно для идеальной линзы потери на отражение и поглощение не учитывают. Фокус линзы определяется как точка, которую должны пересечь все лучи, падающие на линзу параллельно главной оптической оси.

Хорошим приближением к идеальной линзе является линза с большим фокусным расстоянием F и малой толщиной d , причем $d \ll F$. Радиус кривизны линзы предполагается большим, соответственно, кривизна образующих линзу поверхностей — малой. Для такой линзы легко строится ход преломляющихся лучей, изображение предмета. Анализ подобных треугольников, полученных при пересечении лучей света, позволяет нам вывести все соотношения для фокусного расстояния, увеличения линзы и соотношения размеров изображения и предметов.

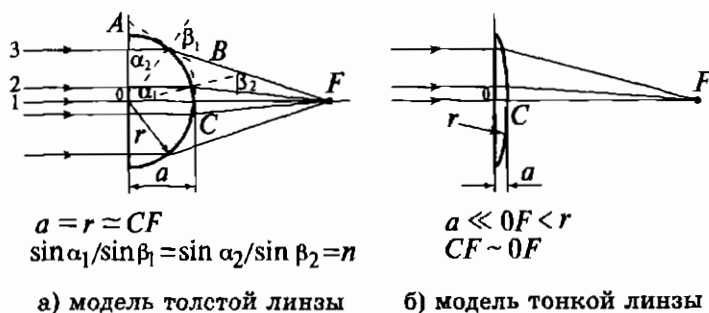


Рис. 3.16

В левой части рис. 3.16 представлено изображение хода пяти лучей в толстой плосковыпуклой линзе. Ниже рисунка указаны: соотношения между радиусом кривизны сферической

поверхности, являющимся одновременно толщиной линзы, и расстоянием по осевому пучку от поверхности линзы до точки фокуса линзы; закон преломления для двух внеосевых лучей.

В правой части того же рисунка изображен ход трех лучей в тонкой плосковыпуклой линзе. Ниже рисунка указаны соотношения между радиусом кривизны сферической поверхности, толщиной линзы и расстоянием по осевому пучку от сферической поверхности линзы до точки фокуса линзы.

Практикум моделирования

Модифицировать модель тонкой линзы до варианта, позволяющего описывать ход лучей в толстой линзе.

3.5.2. Волновая модель света: явления интерференции, дифракции

Свет рассматривается как коротковолновый (100 нм–100 мкм) диапазон электромагнитных волн. Многие оптические явления определяются взаимодействием с веществом электрической составляющей электромагнитного поля.

Источник света возбуждает периодические изменения — волны напряженности электрического поля, которые распространяются в вакууме или веществе. Наглядная модель — аналогия — волны на поверхности воды, где амплитуда отклонения поверхности воды от равновесного положения сопоставляется с амплитудой изменения напряженности электрического поля. Математическое описание волны реализуется с помощью тригонометрических функций, например: $E = E_0 \cos(\omega t + \alpha)$, где E , E_0 — мгновенная и максимальная векторные амплитуды поля, ω — циклическая частота, t — время, α — начальная фаза. Для линейно поляризованного света модель упрощается, векторы напряженности электрического поля заменяют на скалярные величины.

Использование модели для описания явлений интерференции заключается в нахождении эффекта взаимного усиления или ослабления нескольких волн при их наложении в заданной точке пространства. Дифракция как эффект огибания первичной волной некоторого препятствия связана с нахождением условий наложения вторичных волн. Эти волны вводятся в результате использования принципа Гюйгенса—Френеля. Наглядной иллюстрацией модели интерференции является нало-

жение двух и более волн на поверхности воды. Возникающая при этом «рябь» и есть интерференция. Размещение преграды на пути волн приводит к возникновению явления дифракции. Применимость модели для описания дифракционных явлений определяется соотношением характерных размеров преграды a и длины волны λ : $a > \lambda$.

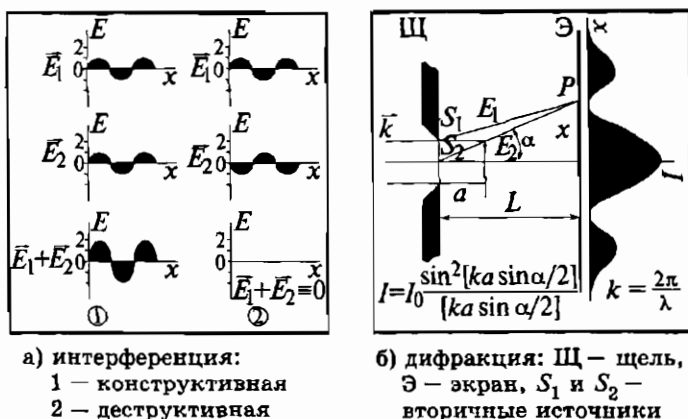


Рис. 3.17

На рис. 3.17 в левой части представлено графическое сложение двух синусоидальных электромагнитных волн: столбец 1 — волны синфазные, интерференция конструктивная; столбец 2 — волны противофазные, интерференция деструктивная. Показана только электрическая составляющая. В правой части рисунка приведено изображение схемы к явлению дифракции плоского волнового фронта на щели, с указанием вторичных источников и параметров, определяющих вид дифракционной картины на экране. Ниже схемы дифракции приведена формула, описывающая распределение интенсивности света на экране за щелью.

Практикум моделирования

Рассмотреть модельные варианты интерференции и дифракции света. Найти оптимальные условия наблюдения в условиях реального эксперимента.

3.6. Атомная физика

3.6.1. Модель атома Резерфорда

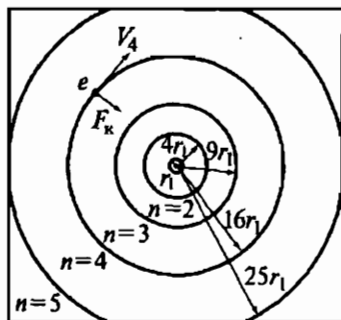
Модель атома, предложенная Резерфордом, состоит из компактного положительно заряженного ядра и электронов, движущихся вокруг ядра по круговым орбитам.

Рис. 3.18 иллюстрирует модель атома водорода, предложенную Н. Бором. В левой части его размещено изображение планетарной модели атома водорода: точечное ядро с круговыми (боровскими) орбитами движения электронов. Размеры радиусов орбит изображены с масштабной единицей, равной первому боровскому радиусу, и пропорциональны квадратам целых чисел: 1, 4, 9, 16, 25. На одной из орбит ($n = 4$) точкой изображен электрон, с указанием векторов силы кулоновского взаимодействия (F_k) и скорости v_4 .

В правой части рисунка дана таблица атомных величин: размеры ядра, радиусы орбит электронов в атоме водорода, сила кулоновского взаимодействия электрона с ядром на орбите с радиусом r_n , скорость его движения по орбите v_n , полная энергия электрона на орбите E_n , значение величин постоянной Планка, массы электрона, заряда электрона и коэффициента пропорциональности в системе СИ ($k = 1/4\pi\epsilon_0$, где ϵ_0 — электрическая постоянная).

Модель привлекательна своей простотой и наглядностью, однако есть неустранимое, в рамках классических представлений, противоречие. Движение электрона по круговой орбите является ускоренным, что приводит к излучению электро-

Атом водорода



$$\begin{aligned} \text{Ядро: } r_n &= 10^{-14} \text{ м} \\ \text{Атом: } r_1 &= r_{\min} = 0,5 \cdot 10^{-10} \text{ м} \\ r_n &= r_1 n^2; n = 1, 2, 3, \dots \\ v_n &= \frac{h}{m_e} \frac{1}{n}; h = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_k &= k \frac{e^2}{r_n^2} \\ E_n &= -k \frac{m_e e^4}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2} \end{aligned} \quad \left\{ \begin{array}{l} m_e = 0,9 \cdot 10^{-30} \text{ кг} \\ e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \\ k = 9 \cdot 10^9 \text{ м/Ф} \end{array} \right.$$

Рис. 3.18

магнитных волн. Уносимая излучением энергия уменьшает кинетическую энергию электрона, приводя к сближению его с ядром.

Однако атом устойчив, электрон не «падает» на ядро. Противоречие планетарной модели Резерфорда было устранено Бором путем введения трех постулатов.

Практикум моделирования

Построить планетарные модели ряда атомов элементов таблицы Менделеева.

3.6.2. Модель атома Бора

Водородный атом Бора есть та же планетарная система ядро-электрон с набором круговых орбит. Постулаты: движение электрона по особым стационарным орбитам происходит без излучения; переход с одной стационарной орбиты на другую совершается с излучением или поглощением порции энергии — кванта электромагнитного поля (фотона); момент импульса движущегося электрона принимает дискретные значения, пропорциональные ряду целых чисел $1, 2, 3, \dots, n$.

На рис. 3.19 слева приведено схематическое изображение возможных изменений состояний атома водорода путем переходов с орбиты на орбиту. Указаны номера состояний (орбит). Переходы сгруппированы по сериям: Лаймана — переходы на первую орбиту с вышележащих орбит, Бальмера — переходы на вторую, Пашена — переходы на третью. В правой части рисунка изображен энергетический спектр состояний атома водорода и переходы, сгруппированные по сериям (Лаймана, Бальмера, Пашена): с нижних состояний вверх (поглощение энергии); с верхних состояний вниз (испускание энергии). Связанные состояния атома характеризуются отрицательными значениями энергии, свободные, после процесса ионизации — положительными.

Ниже левого и правого рисунков в шкале длин волн изображен схематический оптический спектр испускания двух серий атома водорода — Лаймана и Бальмера. Относительная яркость спектральных линий внутри серии пропорциональна высоте отрезков, отображающих отдельные спектральные линии.

При этом разность значений энергии разных уровней определяет энергию излученного кванта. Эта энергия пропорциональна классической частоте излученной атомом электромагнитной волны. Значения энергии каждого уровня вычисляются

Энергетические состояния и спектр атома Н

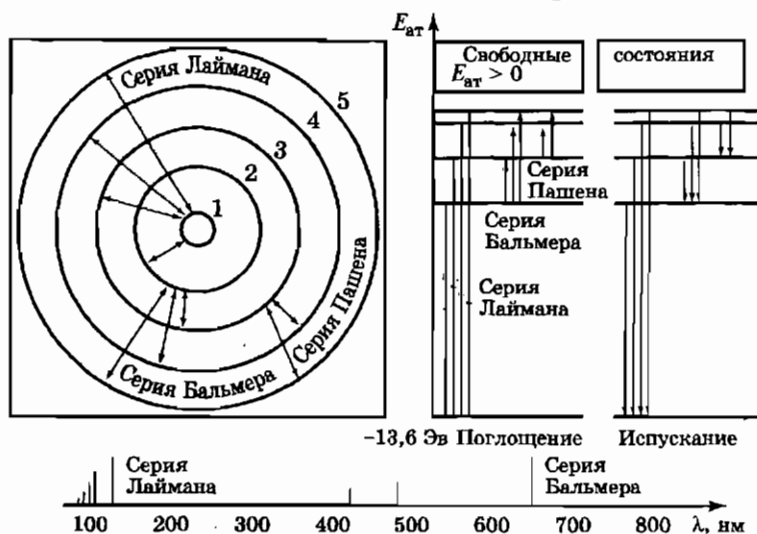


Рис. 3.19

с использованием постулатов Бора и оказываются пропорциональными обратному квадрату целого числа. Спектр излучения дискретен, группируется в серии линий, образованные переходами с верхних уровней на общий нижний уровень. Отрыв электрона и разрушение атома происходит в результате поглощения им энергии, соответствующей переходу на предельно верхнюю орбиту с бесконечно большим значением n . В этой ситуации энергия верхнего уровня стремится к нулевому значению.

Практикум моделирования

Изобразить схему энергетических уровней атома водорода, возможные переходы между уровнями, выделить серии переходов, изобразить спектр излучения водорода.

3.6.3. Модель магнетизма

Природа магнитного поля связана с движением электронов. Микроскопические модели магнетизма основываются на моделях атома и макроскопических магнитных эффектах, связанных с протеканием электрического тока в проводниках. Орбитальное движение электрона в атоме аналогично току

Магнетизм

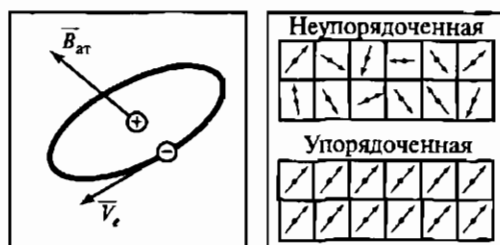


Рис. 3.20

по замкнутому контуру. Такой ток создает магнитное поле, эквивалентное полю витка с током. Возникает элементарный магнетик, микроскопический соленоид из одного витка, с определенной ориентацией полюсов.

В условиях беспорядочной ориентации векторов индукции отдельных соленоидов суммарное поле макроскопического образца будет равно нулю. Если внешним полем сориентировать большое количество элементарных соленоидов, возникает макроскопическая намагниченность. В ферромагнитных материалах эта намагниченность сохраняется, получаются постоянные магниты.

Рис. 3.20 иллюстрирует простейшие модели магнетизма. В левой части рисунка изображена модель атома Бора с выделенной круговой орбитой одного из электронов. Указано направление движения электрона (V_e) и возникающее в результате этого движения магнитное поле с вектором индукции ($B_{ат}$) в области ядра атома. Справа изображены два фрагмента плоской кристаллической структуры с упорядоченной и неупорядоченной системой векторов магнитной индукции элементарных атомных «магнетиков».

Воздействие температуры на упорядоченную структуру приводит к нарушению согласованной ориентации и уменьшению макроскопической намагниченности. При некоторых условиях система переходит в полностью неупорядоченное состояние, макроскопическая намагниченность исчезает. В модели присутствует и зависимость макроскопической намагниченности от магнитных свойств отдельного атома. Структура электронных оболочек атома определяет возможность появления магнитного поля отдельного атома и деления элементов таблицы Менделеева на магнитные и немагнитные.

Практикум моделирования

Разработать модель поведения магнитного материала при нагревании. Рассмотреть эффект усиления магнитного поля катушки с током при введении в нее железного сердечника.

3.6.4. Модель взаимодействия излучения с веществом

В основе модели лежит представление о свете как потоке квантов электромагнитного поля — фотонов. Взаимодействие излучения с веществом представляется как совокупный эффект действий отдельных фотонов. Модель разрабатывается для объяснения светового давления и внешнего фотоэффекта. Значимыми характеристиками фотонов для данной модели являются импульс и энергия. Наглядная механическая модель фотона — идеально упругий невесомый шарик, обладающий некоторой энергией и импульсом, пропорциональными частоте излучения.

Световое давление. Направление падающего потока перпендикулярно поверхности. Фотон взаимодействует с идеальной зеркальной поверхностью, полностью отражается. Вектор импульса $\mathbf{p}$ меняет знак на противоположный $-\mathbf{p}$. Модуль вектора $p = 2\pi/\lambda$ сохраняется. Модуль изменения импульса равен $2p$. Это вариант упругого взаимодействия. Если же свет освещает полностью поглощающую поверхность, то фотоны поглощаются, импульс целиком передается телу, изменение импульса оказывается равным p . В данной ситуации реализуется вариант неупругого взаимодействия.

Сила, возникающая в результате воздействия фотона на тело, пропорциональна изменению импульса. Общее давление, оказываемое потоком фотонов, определяется суммарным воздействием N фотонов, падающих на единичную площадку.

Силы светового давления невелики. Вблизи орбиты Земли световое давление излучения Солнца составляет 4,3–4,5 мкПа. Наблюдение светового давления в лабораторных условиях возможно в условиях высокого вакуума.

Фотоэффект. Световой поток падает на поверхность металла. Энергия фотона $E = h\nu$, где h — постоянная Планка. Фотон взаимодействует с электроном проводимости, полностью передает ему энергию. Электрон с дополнительным запасом энергии преодолевает потенциальный барьер удерживающего поля кристаллической решетки и вылетает. Часть энергии фотона, оставшаяся после затрат на работу выхода, остается

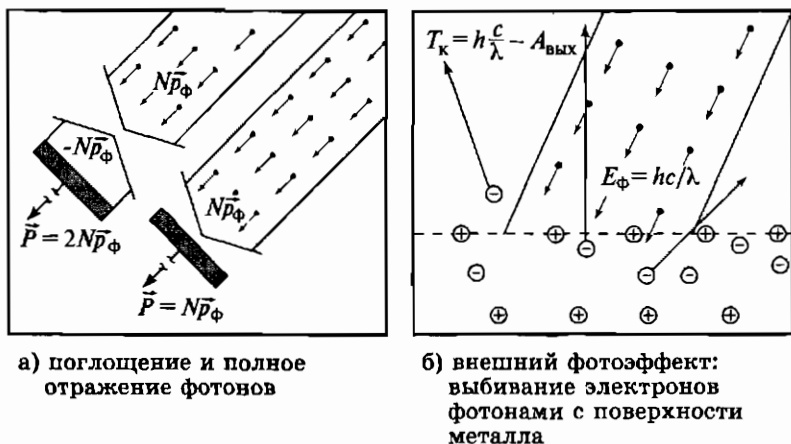


Рис. 3.21

у вылетевшего электрона (фотоэлектрона) в виде кинетической энергии. Все три величины — энергия фотона, работа выхода и кинетическая энергия фотоэлектрона связаны уравнением Эйнштейна $h\nu = A + T_k$. Возможность выбивания фотоэлектронов определяется частотой падающего излучения и работой выхода. Количество выбитых фотоэлектронов зависит от плотности потока фотонов.

На рис. 3.21 слева изображена схема передачи импульса потока фотонов пластинам единичной площади с полностью отражающей (идеальное зеркало) и полностью поглощающей (абсолютно черное тело) поверхностью. Указаны соответствующие импульсы, переданные пластинам.

В правой части представлено схематическое изображение процесса выбивания электронов с поверхности металла — внешний фотоэффект. Стрелками изображены направления импульсов падающих фотонов и выбитых из металла электронов. Соотношение длин стрелок качественно соответствует соотношению величин импульсов.

Практикум моделирования

Рассмотреть соотношение светового давления и давления остаточных газов на поглощающие и зеркальные поверхности.

С помощью рассмотренной модели описать явление электризации металлического шара в поле ультрафиолетового излучения.

Физический практикум

4.1. Механика

4.1.1. Модуль 1. Трение скольжения

1. Введение. Демонстрация различных вариантов движения тел при наличии силы трения

1.1. Введение. Определим силу трения для твердых тел как силу, возникающую при соприкосновении поверхностей тел, препятствующих их относительному перемещению, и направленную вдоль поверхностей соприкосновения. Существует несколько видов трения: трение покоя, качения и скольжения.

Трение покоя проявляется при смещении покоящегося тела и препятствует возникающему движению одного тела по поверхности другого. Минимальная внешняя сила $F_{\text{вн}}$, которая выводит тело из состояния покоя, соответствует силе трения покоя $F_{\text{т.п.}}$ и пропорциональна силе реакции опоры N :

$$F_{\text{вн}} = F_{\text{т.п.}} = \mu_{\text{т.п.}} N,$$

где $\mu_{\text{т.п.}}$ — коэффициент трения покоя. Сила нормального давления тела на опору и сила реакции, возникающая в результате упругой деформации опоры, по третьему закону Ньютона равны по величине и противоположны по направлению.

Трение скольжения проявляется в процессе относительного перемещения соприкасающихся тел. Повседневный опыт показывает, что сила, выводящая соприкасающиеся тела из состояния покоя, всегда больше силы, необходимой для дальнейшего поддержания движения. В процессе скольжения одного тела по другому проявляется сила трения скольжения, которая также пропорциональна силе реакции опоры:

$$F_{\text{тр}} = \mu N,$$

где μ — коэффициент трения скольжения, причем $\mu_{\text{т.п.}}$ больше μ .

Трение качения проявляется при качении округлого тела (шара или цилиндра) по поверхности другого тела. Аналогично предыдущим силам трения, сила трения качения пропорциональна силе реакции опоры N :

$$F_{\text{т.к.}} = \mu_{\text{т.к.}} N,$$

где $\mu_{\text{т.к.}}$ — коэффициент трения качения, причем $\mu_{\text{т.к.}}$ много меньше μ .

Общее соотношение всех трех коэффициентов трения представляется следующим неравенством: $\mu_{\text{т.к.}} \ll \mu < \mu_{\text{т.п.}}$. Например, для трения стали о сталь (колесо железнодорожного вагона о рельс) эти коэффициенты соответственно равны 0,001; 0,4; 0,6.

В данном модуле подробно рассматривается трение скольжения и его влияние на возможность эффективно использовать наклонную плоскость в производстве различных работ. Если обратиться к истории, то на протяжении многих веков широко использовался простой с виду механизм — наклонная плоскость. По наклонной плоскости тяжелые бочки закатывали на палубы судов, поднимали гигантские каменные блоки при создании пирамид в Египте. В наши дни по-прежнему эти, с виду неприметные механизмы, облегчают наше существование. Они присутствуют на входах подземных и наземных переходов, используются в строительстве и на транспорте.

1.2. Демонстрации. Проведем простые опыты, демонстрирующие особенности трения скольжения. Для этого нам понадобятся деревянный брусок с гранями разных площадей и с углублением для грузов и крючком, 3 груза массой по 0,1 кг, наждачная бумага, стекло, деревянная доска, динамометр.

Опыт 1. К бруску прикрепите динамометр, положите брусок на деревянную доску и потяните за динамометр. Зафиксируйте, насколько вытянулась пружина. Повторите опыт два раза, используя в виде подложки стекло и наждачную бумагу (придавите ее пальцами к столу во время опыта). Сделайте выводы.

Повторите опыт, но брусок перемещайте только по деревянной поверхности, положив его на меньшую по площади боковую поверхность. Заметьте, насколько растянулась пружина. Зависит ли растяжение пружины от площади соприкосновения?

Опыт 2. Так же как и в предыдущих опытах, сделайте первую часть или возьмите из нее данные. Измените массу бруска, поместив в углубление груз. Как изменятся показания динамометра? Добавляя каждый раз по грузу, повторите опыт 2 раза. Сделайте выводы.

Опыт 3. Данный опыт схож с первым, но в этом случае один край доски постепенно приподнимайте над уровнем парты. Для проведения этого опыта с наждачной бумагой, ее необходимо кнопками прикрепить к деревянной поверхности. Подведите итоги вашим наблюдениям. От каких параметров зависит сила трения?

2. Цель и задачи экспериментального исследования. Оборудование

2.1. Цель исследования: измерить коэффициент трения скольжения и КПД наклонной плоскости.

2.2. Решаемые задачи:

- Определить силу трения скольжения бруска.
- Рассчитать коэффициент трения скольжения.
- Определить зависимость силы трения от веса бруска.
- Определить КПД наклонной плоскости.

2.3. Необходимое оборудование: штатив, наклонная плоскость, набор грузов по 100 г, линейка, транспортир, динамометр.

3. Экспериментальные исследования

3.1. Метод выполнения работы. Разделяют три вида сил трения. Сила трения покоя, сила трения скольжения и сила трения качения. Сила трения покоя равна по модулю и направлена противоположно силе, приложенной к покоящемуся телу параллельно поверхности соприкосновения его с другим телом. Направление силы трения скольжения $F_{\text{тр}} = \mu \cdot N$ противоположно направлению движения тела; здесь μ — коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом трения, он всегда меньше единицы, N — сила нормального давления.

Для определения μ используют формулу $F_{\text{тр}} = \mu \cdot N$. С помощью динамометра измеряют силу, с которой нужно тянуть брусок с грузами так, чтобы он двигался равномерно. Эта сила равна по модулю силе трения $F_{\text{тр}}$, действующей на брусок. С помощью того же динамометра можно найти вес бруска с

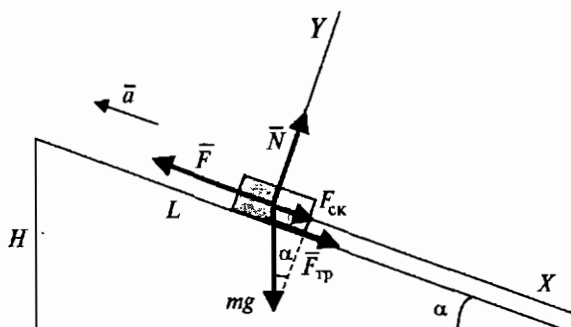


Рис. 1

грузом. Этот вес P равен по модулю силе нормального давления N бруска на поверхность, по которой он скользит. Определив таким образом значения силы трения при различных значениях силы нормального давления, необходимо построить график зависимости $F_{\text{тр}}$ от P и найти среднее значение коэффициента трения.

Если груз тянут по наклонной поверхности (см. рис. 1), то необходимо учитывать угол наклона поверхности к горизонту, тогда $F_{\text{тр}} = \mu \cdot N \cdot \cos \alpha$. Помимо силы трения на брусок действуют сила тяжести и сила реакции опоры. При рассмотрении подобных примеров важно правильно выбрать систему отсчета. Удобно направить оси координат так, как показано на рисунке. Кроме силы трения в этом случае на брусок действует скатывающая сила, которая является равнодействующей сил тяжести и реакции опоры.

В процессе перемещения тела по наклонной плоскости совершается работа, причем только часть ее является полезной, ради которой создан тот или иной механизм, та или иная машина. Но в любой машине, в любом механизме полезная работа всегда меньше полной работы, потому что всегда существуют силы трения, работа которых приводит к нагреванию каких-то частей устройства. Коэффициентом полезного действия называется величина, равная отношению полезной работы ко всей затраченной работе:

$$\eta = \frac{A_{\text{пол}}}{A_{\text{зат}}}.$$

3.2. Проведение эксперимента. Определите вес деревянного бруска. Установите наклонную поверхность на высоту 0,15 м. Определите угол наклона поверхности α . Определите силу трения скольжения бруска. Рассчитайте коэффициент трения μ .

Постройте график зависимости $F_{\text{тр}}$ от P . Определите затраченную ($A_{\text{зат}}$) и полезную ($A_{\text{пол}}$) работу. Определите КПД наклонной плоскости.

На брусок установите груз 100 г. Повторите опыт еще 2 раза, каждый раз добавляя груз по 100 грамм. С последним грузом повторите опыт еще 5 раз, каждый раз увеличивая высоту наклона на 5 см. Полученные результаты занесите в таблицу 1.

Таблица 1

№	N , Н	$F_{\text{тр}}$, Н	H , м	L , м	α	μ	$A_{\text{пол}}$, Дж	$A_{\text{зат}}$, Дж	η

Рассчитайте угол, при котором брусок начнет соскальзывать. Результат проверьте на опыте и найдите абсолютную погрешность.

Постройте графики зависимостей μ от α и N от α .

Постройте графики зависимостей η от α и $A_{\text{зат}}$ от α .

Определите абсолютную погрешность определения μ и сделайте вывод.

4. Обработка экспериментальных данных, полученных в разных группах. Самостоятельная работа групп, оформление необходимых графиков и зависимостей.

5. Обсуждение результатов

Контрольные вопросы:

- Что такое коэффициент трения?
- Что такое полезная и затраченная работы?
- Почему КПД всегда меньше единицы (доказать)?
- Как можно использовать наклонную плоскость в качестве механизма?
- Какое максимальное значение может принять высота наклонной плоскости?

или синего цвета). В центре видна плоскость скольжения, на которой помещены пробное тело и поводок (брусочек с прикрепленной нитью). Поводок соединен с нитью, которая перекинута через блок и соединена с подвешенным грузом. Ниже плоскости скольжения помещены четыре табло.

Табло **Пробное тело — скорость по X** служит для контроля постоянства скорости движения пробного тела. Табло **Сила тяготения на пробное тело** показывает силу тяготения (масса тела подобрана так, чтобы сила тяготения в точности равнялась 3 Н). Табло **Усилие пружины** измеряет силу растяжения пружины, которой пробное тело соединено с поводком (поводок нужен для обеспечения равномерности движения и прикрепления пружины и демпфера). На табло **Сопротивление среды** отражается сила сопротивления, которая введена для обеспечения равномерного движения.

Выбирая коэффициент трения и запуская модель, можно измерять силу трения скольжения, которая определяется как разность между усилием пружины и силой сопротивления среды.

7.2. Метод выполнения работы. На рис. 3 показана наклонная плоскость с пробным телом на ней и ведущим поводком.

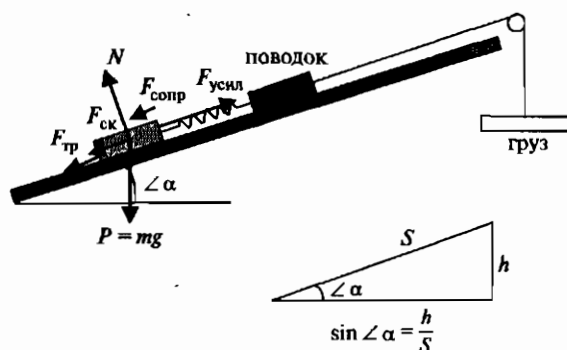


Рис. 3

Направление силы трения скольжения противоположно направлению движения тела: $F_{\text{тр}} = \mu N$, где μ — коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом трения (он всегда меньше единицы), N — сила нормального давления.

Поводок тянет пробное тело с постоянной скоростью. При этом пружина, соединяющая поводок и пробное тело, растя-

гивается и ее усилие сообщает телу равномерную скорость. Как показано на рис. 3, усилию пружины противостоят сила трения, сила сопротивления среды и скатывающая сила.

Следовательно, можно записать: $F_{\text{усил}} = F_{\text{тр}} + F_{\text{ск}} + F_{\text{сопр}}$.

Тогда: $F_{\text{тяги}} = F_{\text{усил}} - F_{\text{сопр}}$.

Коэффициент полезного действия плоскости (η), расположенной под углом α , равен:

$\eta = \frac{A_{\text{пол}}}{A_{\text{зат}}}$; здесь $A_{\text{пол}} = P \cdot h$, $A_{\text{зат}} = F_{\text{тяги}} \cdot S$, где S и h — длина и высота плоскости.

Так как $\sin \alpha = \frac{h}{S} \rightarrow h = S \cdot \sin \alpha$; тогда $\eta = \frac{Ph}{SF_{\text{тяги}}} = \frac{PS \sin \alpha}{SF_{\text{тяги}}} = \frac{P \sin \alpha}{F_{\text{тяги}}}$.

Определяя, при фиксированных $\angle \alpha$ и весе тела P , силу тяги, можно рассчитать КПД наклонной плоскости. $F_{\text{тяги}}$ будет зависеть от коэффициента трения следующим образом:

$$F_{\text{тяги}} = F_{\text{ск}} + F_{\text{тр}} = mg \sin \alpha + \mu mg \cos \alpha.$$

В работе вы должны определить зависимости КПД наклонной плоскости от угла наклона при различных коэффициентах трения скольжения.

7.3. Работа с моделями. Откройте в **module-1** модель **1-05**. В этой модели машина трения повернута на угол $\alpha = 5^\circ$. Аналогичные модели представлены под номерами **1-10**, **1-15**, **1-30**, **1-45**, **1-60**, **1-75** (углы соответственно 10° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75°). Выберите вашу модель (подчеркнутое значение взято для примера). Изменяя μ , запустите модель в работу и определите $F_{\text{усил}}$ и $F_{\text{сопр}}$. Рассчитайте $F_{\text{тяги}}$ и КПД. Заполните таблицу 2.

Таблица 2

$P = 3 \text{ Н} = \text{const.}$		$\sin \alpha = 0,5 (\angle \alpha = 30^\circ)$			
μ (безразмерн.)	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8
$F_{\text{усил}}, \text{ Н}$					
$F_{\text{сопр}}, \text{ Н}$					
$F_{\text{тяги}}, \text{ Н}$					
η					

Откройте последовательно остальные модели с разными углами, проведите моделирование, определите необходимые силы, рассчитайте силу тяги и КПД.

Аналогично составьте таблицы для остальных углов.

Таблица 3

	α (°)	5	10	15	30	45	60	75	90
$\mu = 0,1$	η								1
$\mu = 0,2$	η								1
$\mu = 0,3$	η								1
$\mu = 0,5$	η								1
$\mu = 0,8$	η								1

Сведите все данные в таблицу 3. Постройте графические зависимости КПД от угла наклона плоскости скольжения и коэффициента трения.

Сформулируйте общие выводы по проведенным исследованиям.

8. Обработка данных, полученных в разных группах. Самостоятельная работа учеников.

9. Сопоставление результатов экспериментальных и модельных исследований. Совместная работа учеников и организованная дискуссия.

10. Обсуждение результатов. Формулировка общих выводов

Контрольные вопросы:

- Как сила трения влияет на параметры движения тела?
- Что такое скатывающая сила, откуда она возникает?
- Почему в модели необходимо использовать постоянную скорость движения?
- Чем отличаются трение покоя и трение скольжения?

По результатам обсуждения вопросов и проведенных учебных исследований учащиеся самостоятельно формулируют общие выводы и готовят сообщение о проделанной работе в форме научного доклада.

4.1.2. Модуль 2. Равноускоренное движение

1. Введение. Демонстрация различных вариантов равноускоренного движения тел

1.1. Введение. Равноускоренное движение является одним из распространенных типов движения. Как правило, это движение в поле тяготения при небольших скоростях (приблизительно до 30 м/с) и, соответственно, малой силой сопротивления

воздуха в сравнении с силой тяжести. Такое движение можно наблюдать при падении тел с высоты нескольких метров, например падение яблока с дерева, полет мяча, спуск с горы лыжника, велосипедиста.

Приведите еще примеры равноускоренного движения. Можно ли считать движение капли дождя или груза на маятнике часов равноускоренным движением? Пронаблюдать особенности равноускоренного движения можно и в простых опытах со скатывающимися по гладкой наклонной плоскости округлыми предметами: карандашами, шариками, пуговицами.

1.2. Демонстрации. Дополнением к традиционным наборам по кинематике может быть простая в изготовлении установка на основе штатива, лапки с зажимом, легкого блока, нити, двух пластиковых бутылок (0,33–0,5 л), школьных или бытовых весов, секундомера, рулетки или метровой линейки с точностью отсчета 1 мм, мерного стакана или мензурки с ценой деления 10–50 мл.

На штативе с высокой стойкой (штатив с небольшой стойкой можно установить на краю стола) закрепляется блок для подъема и опускания грузов на 1–1,5 м. На блоке подвешиваются две пластиковые бутылки, связанные тонкой нитью. Предварительно на стенках бутылок скотчем приклеивается градуировочная шкала для определения массы бутылки с налитой в нее водой.

Опыт 1. Необходимо налить в каждую из бутылок одинаковое количество воды, можно использовать и сыпучие вещества (крупа, песок, мелкие камушки), около половины полного объема. Если разница в массах обоих грузов меньше сил трения в блоке, то грузы находятся в равновесии (рис. 1). Очевидно, сообщение системе небольшого импульса приведет ее практически в равномерное движение.

Опыт 2. Перелейте из одной бутылки в другую небольшое количество воды с массой Δm . На блоке получается система с той же самой массой и ускоряющей силой F_y :

$$F_y = (mg + \Delta mg) - (mg - \Delta mg) = 2\Delta mg.$$

Бутылку с большей массой поднимают до самого блока и отпускают. Система приходит в движение с ускорением $a \cong 2\Delta mg/M$, где M — масса всей системы. Выражение для ускорения приближенное, поскольку момент инерции блока мы считаем равным нулю. Повторяя процедуру изменения

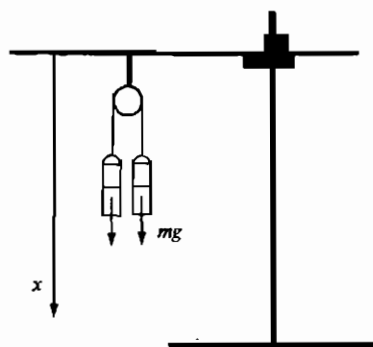


Рис. 1. Исходное положение системы

разницы масс содержимого сосудов, получаем разную ускоряющую силу и при одной и той же движущейся массе можем наблюдать движения с разными ускорениями (рис. 2).

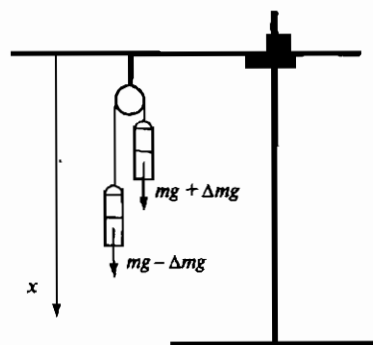


Рис. 2. Демонстрация равноускоренного движения

2. Цель и задачи экспериментального исследования. Оборудование

2.1. Цель исследования: изучить равноускоренное движение тела. Определить, каким образом действующая сила влияет на скорость и ускорение тела.

2.2. Решаемые задачи:

- Определить движущую силу тележки.
- Определить ускорение тележки.

- Определить отношение сил и ускорений.
- Определить погрешность измерений.

2.3. Необходимое оборудование: прибор по кинематике и динамике с движущейся тележкой; груз массой 120 грамм; два перегрузка массой по 3 грамма; линейка; штативы; часы с секундомером.

3. Экспериментальные исследования

3.1. Метод выполнения работы. Из второго закона Ньютона, который показывает, что $F = ma$, следует, что $a = F/m$, отсюда видно, что ускорение a прямо пропорционально F . При равноускоренном движении расстояние рассчитывается следующим образом:

$$S = S_0 + V_0 t + \frac{at^2}{2}.$$

S_0 и V_0 в данной работе равны нулю, тогда

$$S = \frac{at^2}{2},$$

отсюда выражаем ускорение $a = \frac{2S}{t^2}$.

3.2. Подготовка эксперимента. Внимательно рассмотрите устройство прибора и найдите его основные части (рис. 3). Прибор состоит из рельса 1, штативов 2, блока 3, тележки 4, тарелочки 5, соединенной нитью с тележкой.

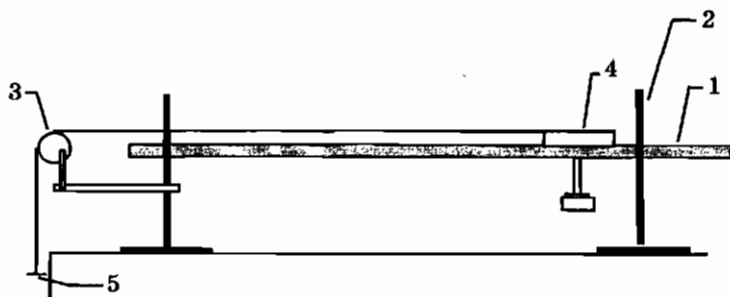


Рис. 3. Схема установки

Установите тележку на рельсе, нагрузите ее грузом, муфтой штатива отрегулируйте уклон рельса так, чтобы от небольшого толчка тележка прошла весь путь до фиксатора равномерно.

Подвесьте тарелочку, закрепив ее за тележку. Закрепите фиксатор на расстоянии 50–60 см от тележки и поупражняйтесь в отсчете времени движения.

3.3. Проведение эксперимента. Проведите опыты по установлению зависимости ускорения от действующей силы при постоянной массе.

Перед началом работы на тележку поместите груз (120 г) и два перегрузка (по 3 г).

Определите общую массу тележки, грузов и перегрузков. Во время опытов эта масса остается постоянной.

Сила, приводящая систему в движение, $F_1 = mg$. Определите эту силу, зная массу тарелочки.

Измерьте расстояние S , пройденное тележкой. Определите время, за которое тележка проходит это расстояние. Опыт повторите 3 раза и определите среднее значение времени движения t_1 .

Вычислите ускорение движения тележки по формуле:

$$a_1 = \frac{2S}{t_1^2}.$$

Снимите перегрузок в 3 г с тележки и положите его на тарелочку. Теперь движущая сила F_2 изменится, то есть увеличится в два раза при прежней массе системы.

Определите ускорение системы под действием силы F_2 .

Переложите на тарелочку третий перегрузок и определите ускорение системы под действием силы F_3 .

Данные занесите в таблицу 1.

Таблица 1

№	F , Н	S , м	t , с	a , м/с ²
1	F_1	S	t_1	a_1
2	F_2	S	t_2	a_2
3	F_3	S	t_3	a_3

Определите абсолютную погрешность измерений ΔF и Δa . Сделайте выводы о зависимости ускорения от действующей силы при постоянной массе. Постройте график зависимости ускорения от действующей силы. Укажите на графике интервалы погрешностей величин F и a .

4. Обработка экспериментальных данных, полученных в разных группах. Самостоятельная работа групп, оформление необходимых графиков и зависимостей.

5. Обсуждение результатов

Контрольные вопросы:

- Изобразите векторы сил, действующих на тележку, и их проекции.
- Для чего рельсу перед опытами придают небольшой уклон в сторону движения тележки?
- Как изменится ускорение, если на тележку поместить два груза вместо одного?
- Почему за массу принимается сумма масс тележки, грузов, перегрузков и тарелочки?

По результатам обсуждения вопросов самостоятельно сформулируйте краткие выводы по проведенным исследованиям.

6. Задачи компьютерного моделирования

Решаемые задачи:

- Определение движущей силы тележки.
- Определение ускорения и конечной скорости тележки.
- Определение зависимостей ускорения и конечной скорости тела от величины движущей силы.
- Определение зависимости ускорения тела от величины движущей силы в присутствии силы трения.
- Определение неизвестного коэффициента трения.

7. Моделирование

7.1. Введение. Описание моделей. Запустите на компьютере программу «Живая физика». Откройте в папке `modely/module-2/2-1`.

На рис. 4 представлена модель 2-1. В верхней левой части расположены органы управления моделью (регуляторы и кнопки запуска).

Регулятор Груз дискретно (через 3 г) меняет массу груза, вызывающего скатывающую силу. Регулятор Система задает общую массу всей системы. Модель построена так, чтобы при изменении массы груза общая масса движущейся системы оставалась постоянной (масса тележки уменьшается на величину добавленного груза).

В центре расположена сама модель, брусок, скользящий по плоскости, к которому привязана нить с грузом на конце.

Выше модели открыто окно перемещения по x и окно секундомера. Модель разработана так, чтобы брусок останавливался после касания упора (после остановки бруска секундомер тоже

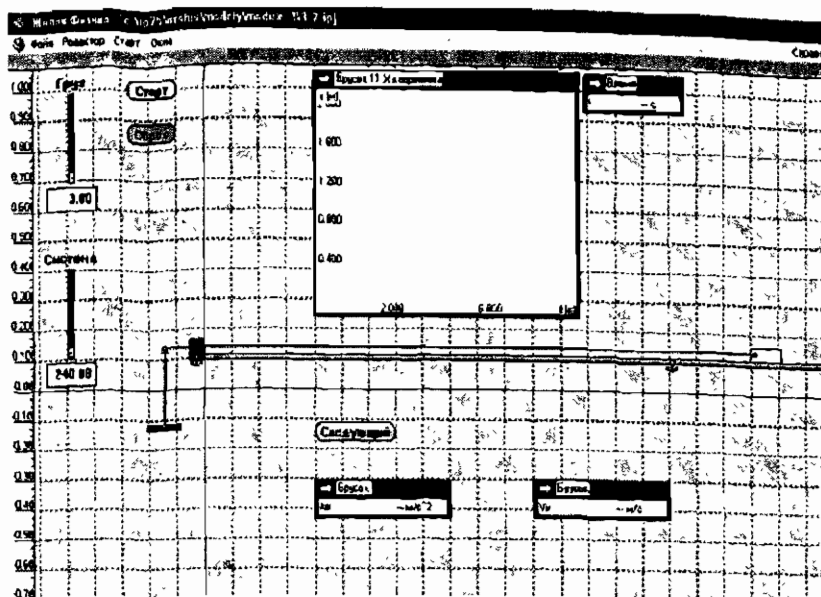


Рис. 4

останавливается). Ниже модели расположена кнопка, которая включает трение скольжения в модели (пустая кнопка — модель без трения, кнопка с крестом — с учетом трения), и два табло для измерения ускорения и скорости тележки (бруса).

7.2. Работа с моделями. Выберите с помощью регулятора Система одну из удобных для вас массу системы (например 240 г). Задавая регулятором Груз различную движущую силу, проведите моделирование и заполните таблицу 2.

Таблица 2

m , г	F , Н	3×10^{-2}	6×10^{-2}	9×10^{-2}	12×10^{-2}	15×10^{-2}	18×10^{-2}	21×10^{-2}
240	t , с							
240	a , м/с ²							
240	v , м/с							

По данным таблицы 2 постройте зависимости ускорения и конечной скорости тележки от движущей силы. Проведите ана-

лиз полученных графиков и определите зависимость ускорения и конечной скорости тела от движущей силы.

Закройте модель 2-1 и перейдите к модели с трением (2-2). Отличие этой модели от предыдущей в наличии кнопки Трение. При нажатии этой кнопки в модели появляется сила трения скольжения с неизвестным коэффициентом трения k .

Проведите работу с моделью аналогично предыдущему случаю и заполните таблицу 3.

Таблица 3

m , г	F , Н	3×10^{-2}	6×10^{-2}	9×10^{-2}	12×10^{-2}	15×10^{-2}	18×10^{-2}	21×10^{-2}
240	t , с							
240	a , м/с ²							

В этом случае нас будет интересовать только время и ускорение тела. По данным таблицы 3 постройте зависимость ускорения тележки от движущей силы при наличии трения в системе. Проведите анализ графиков для обоих случаев и определите силу трения в системе. Рассчитайте коэффициент трения k .

8. Обработка данных, полученных в разных группах. Самостоятельная работа учеников.

9. Сопоставление результатов экспериментальных и модельных исследований. Самостоятельная работа учеников и организованная дискуссия.

10. Обсуждение результатов. Формулировка общих выводов

Контрольные вопросы:

- Как сила трения влияет на параметры движения тележки?
- Какую силу надо приложить, чтобы конечная скорость увеличилась в три раза?
- Как на исследуемые параметры повлияет увеличение массы системы?
- Чем отличаются трение покоя и трение скольжения?

По результатам обсуждения вопросов и проведенных учебных исследований самостоятельно сформулируйте общие выводы и подготовьте сообщение о проделанной работе в форме научного доклада.

4.1.3. Модуль 3. Момент силы

1. Введение. Демонстрация различных вариантов рычагов

1.1. Введение. Демонстрация действия рычага эффективна при условии активизации обыденного опыта учащихся. Минимальный комплект демонстрационного оборудования: подставка и доска-рычаг. Подставка изготавливается из цельного куска дерева в форме треугольной призмы, причем основание призмы представляет собой равнобедренный прямоугольный треугольник с углом $\alpha = 90^\circ$. Оптимальные размеры показаны на рис. 1. Высота призмы $h = 40\text{--}50$ см. Доска-рычаг изготавливается длиной $L = 3$ м, толщиной не менее $H = 4\text{--}5$ см, шириной $B = 30\text{--}35$ см. На одну из широких сторон, по противоположным краям, наносятся контрастной краской две линейных шкалы, с делениями в 10–20 см и противоположным направлением отсчета.

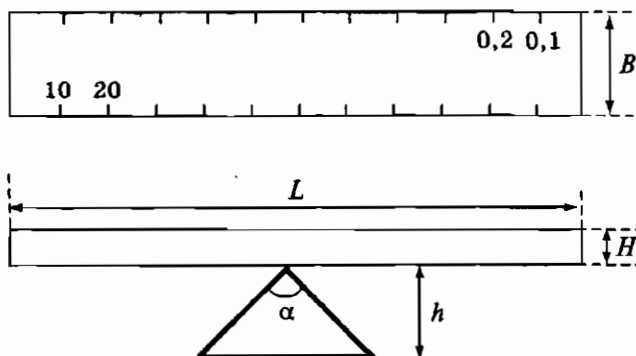


Рис. 1. Схема установки

1.2. Демонстрации

Опыт 1. Для проведения демонстрации приглашаются 4–5 учащихся приблизительно одной комплекции и предлагается сделать «уравновешенные качели» для разных вариантов разбиения на группы, размещенные на противоположных концах доски: 1-1, 1-2, 1-3, 1-4, 2-3.

Параллельно с проведением опытов на классной доске заполняется таблица 1.

Опыт 2. Следующий опыт предлагается учащимся в виде задачи-демонстрации. Опыт можно проводить с той же доской

Таблица 1

№	1	2	3	4	5
L_1					
P_1	1	1	1	1	2
$M_1 = L_1 P_1$					
L_2					
P_2	1	2	3	4	3
$M_2 = L_2 P_2$					

при наличии динамометра с достаточным диапазоном измерений, либо воспользоваться школьным динамометром со шкалой до 4 Н и подобрать металлический стержень массой до 800 г. С помощью двух динамометров определяют вес стержня и кладут его на стол. Рядом со стержнем размещается небольшая платформа, возвышающаяся над столом на 5–7 см. Формулируется задача: каким образом поднять стержень на платформу с помощью устройства, рассчитанного на подъем тяжестей до половины веса стержня?

Опыт 3. Для исследования правила моментов и золотого правила механики можно использовать и подручные средства. В любом кабинете есть дверь, прикрепленная на шарнирах к стене, или составная доска, одна из створок которой также соединена с основной частью шарниром. Для демонстрации опыта необходим крепкий юноша, которому предлагается опереться в дверь или доску возле шарнирного соединения, и девушка, которой предлагается опереться с другой стороны двери, но на расстоянии от шарнирного соединения (лучше всего с самого края). Далее предлагается провести несколько опытов:

1. Попросить учащихся одновременно приложить силу к точкам опоры (если работа проходит с использованием доски, то можно мелом фиксировать положение точек опоры для дальнейшего расчета).
2. Предложить юноше изменять положение точки опоры, перемещая руки к краю доски (двери). Каждый шаг должен быть не более 5 см. Необходимо получить положение равновесия. Предложить сделать выводы из данных опытов.

2. Цель и задачи моделирования

2.1. Цель моделирования: самостоятельный вывод понятия момента силы, формулировка правила моментов.

2.2. Решаемые задачи:

- Установление зависимости усилия сжатия пружины от длины рычага при постоянной нагрузке.
- Установление зависимости усилия сжатия пружины от массы подвешенного груза, при постоянной длине рычага.
- Определение зависимости усилия сжатия пружины от угла поворота рычага. Формулировка понятия плечо силы.
- Сведение всех зависимостей в единое правило моментов.

3. Моделирование

3.1. Введение. Описание моделей. Войдите в программу «Живая физика», выберите папку **modely**, откройте **module-3**, опыт 3-1. В открывшейся модели (первый, самый простой вариант) в центре помещается симметричный рычаг (практически невесомый). На одном конце рычага (рис. 2) закреплен релаксирующий

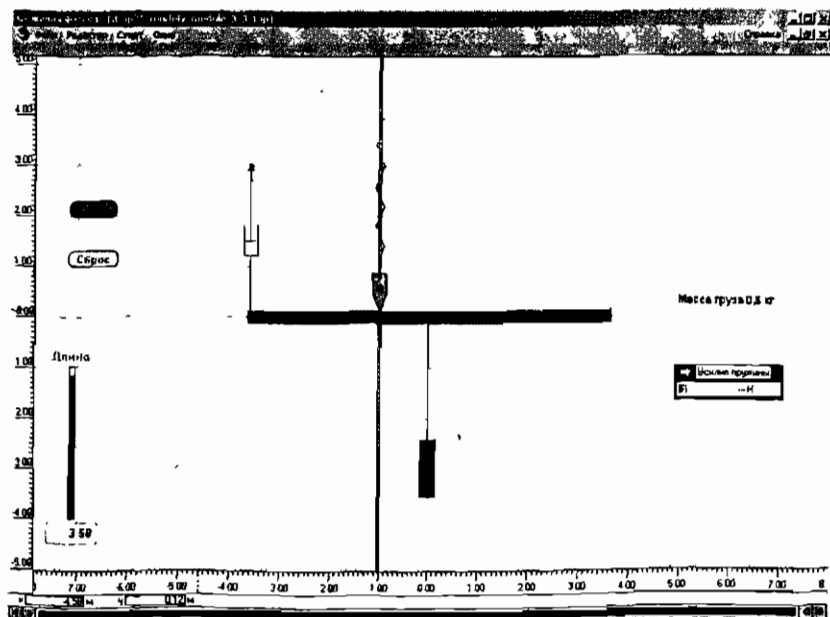


Рис. 2

щий демпфер (он нужен для того, чтобы не приходилось очень уж долго ждать успокоения модели). С этой же целью Соппротивление среды выбрано очень большим. На другой стороне прикреплен постоянный груз. В левой части окна расположены органы управления моделью (стартовая кнопка, кнопка сброса, регулятор перемещения груза на рычаге). Справа расположено табло измерения усилия сжатия пружины. Левое плечо рычага опирается на заостренное тело, укрепленное на вертикальном ползуне. Коэффициент трения между рычагом и телом равен нулю. К верхней части тела прикреплена пружина, усилие сжатия которой мы и будем измерять. Ползун нужен для того, чтобы точка снятия усилия не смещалась при повороте рычага. Таким образом, на фиксированном расстоянии от оси рычага мы будем определять усилие сжатия пружины. Масса заостренного тела подобрана так, чтобы сила тяжести была ровно один ньютон (эту силу нужно прибавлять к усилию сжатия пружины).

3.2. Работа с моделями. Установите груз регулятором на расстоянии 1 м от оси рычага и проведите эксперимент. Меняя точки закрепления груза на рычаге, фиксируйте на табло усилие пружины. Внимание! Не забывайте к каждому измеренному значению усилия прибавлять силу тяжести заостренного тела, которая тоже участвует в процессе. Запишите данные в таблицу 2.

Таблица 2

Длина, м	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
Усилие, Н						

Постройте графически зависимость усилия пружины от длины рычага. Проанализируйте график и установите аналитическую зависимость.

Закройте модель 3-1 и перейдите к модели 3-2. В этой модели слева добавлен регулятор для ступенчатого изменения массы груза. Внимание! Не пытайтесь в эксперименте изменять сразу два параметра. Общее правило экспериментатора: меняется только один параметр, а остальные фиксируются.

Зафиксируйте удобную для вас длину рычага (например 3,5 м) и меняйте в модели массу груза. Поскольку модель работает в поле гравитации Земли, это аналогично изменению силы, приложенной к рычагу ($F = mg$). Заполните таблицу 3 и

Таблица 3

Масса, кг	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
Усилие, Н								

постройте графически зависимость усилия пружины от массы груза на конце рычага.

Сделайте анализ и установите аналитическую зависимость усилия рычага от массы груза (или приложенной к рычагу силы).

Перейдите к модели 3-3 (рис. 3).

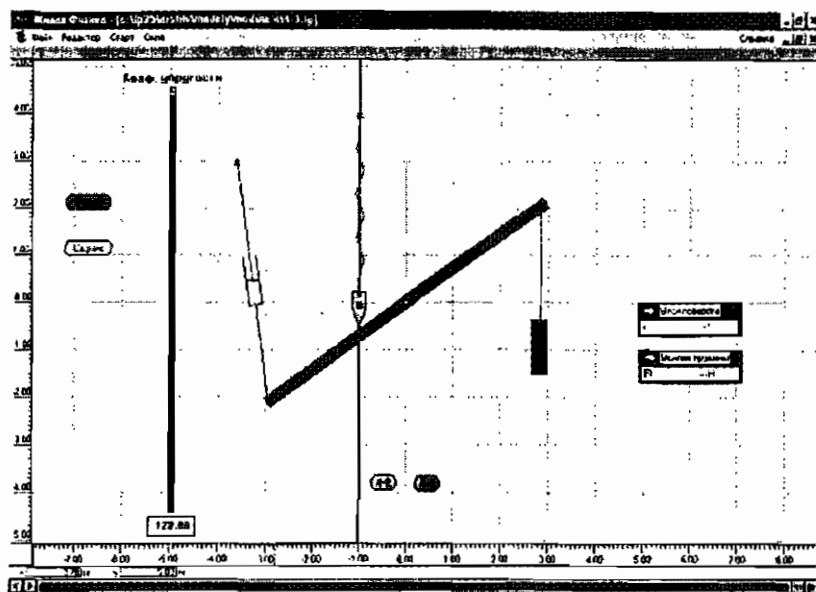


Рис. 3

В модели произошли значительные изменения. Для простоты убраны регуляторы длины рычага и массы груза, добавлен регулятор жесткости пружины. Рычаг теперь расположен под углом. В правой части окна добавлено табло изменения угла рычага. Моделирование вы будете вести следующим образом. Нажимаете кнопку **Старт** и через некоторое время, необходимое на смещение рычага, наводите стрелку курсора на движок регулятора и меняете жесткость пружины до тех пор, пока не

Таблица 4

Угол, град.	+30	+20	+10	0	-10	-20	-30	-40	-45	-50	-60
k , Н/м											
Усилие, Н											

получите необходимый вам угол. Значения углов, коэффициента жесткости k и усилия запишите в таблицу 4. Моделирование с углами больше нуля проводите на модели 3-3, а с углами меньше нуля на модели 3-4.

Постройте график зависимости усилия сжатия пружины от угла рычага. Теперь нужно проанализировать все три зависимости и вывести понятие момента силы.

Перейдите к модели 3-5. На этой модели роль рычага выполняет круглый диск, на который в разных местах прикреплены несколько грузов. Табло показывают смещения по оси X и силы тяжести и упругости по вертикали. Момент силы может быть не один. Попробуйте самостоятельно сформулировать правило нескольких моментов.

4. Обработка данных, полученных в разных группах. Самостоятельная работа учеников.

5. Обсуждение результатов

Контрольные вопросы:

- Что такое линейная зависимость?
- Зачем в модели потребовалось устройство с ползуном?
- Чем плечо силы отличается от длины рычага?
- Почему в модели с диском его масса не мешает моделированию, а в случае прямого рычага ее нужно делать близкой к нулю?
- Зачем в модели вводится демпфер и повышенное сопротивление среды?

После обсуждения вопросов самостоятельно сформулируйте краткие выводы по проведенному моделированию.

6. Цель и задача экспериментального исследования. Оборудование

6.1. Цель исследования: определение неизвестной массы тела с помощью правила момента сил.

6.2. Решаемые задачи:

- Определение плеча силы.
- Определение момента силы.
- Определение направления момента силы.
- Определение массы неизвестного тела.
- Определение погрешности измерения массы неизвестного тела.

6.3. Необходимое оборудование: угольник; динамометр; набор грузов; штатив с муфтой и лапкой; диск с осью; нить с двумя петлями; рычаг; груз неизвестной массы.

7. Экспериментальные исследования

7.1. Метод выполнения работы. Основной деталью установки для проведения работы является диск с втулкой. Он насаживается на ось, которая зажимается в муфте штатива. Над диском укрепляется при помощи лапки рычаг с сержками (неподвижно). В произвольных местах диска, но не слишком близко к его оси, прикрепляются нити с грузами. К одному креплению крепится неизвестный, исследуемый груз, к другому динамометр, который другим концом прикрепляется к рычагу. К остальным — грузы известной массы.

Из курса 7-го класса вы знаете, что твердое тело, имеющее неподвижную точку опоры и свободно вращающееся вокруг нее, называется рычагом. Таковым и является этот диск (рис. 4).

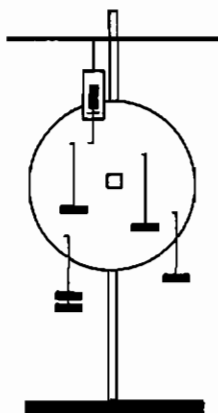


Рис. 4

Рычаг находится в равновесии под действием сил, если сумма моментов сил, вращающих его по часовой стрелке, равна сумме моментов сил, вращающих его против часовой стрелки:

$$\sum M_{\text{по}} = \sum M_{\text{против}}.$$

Моментом силы называют произведение модуля силы, вращающей тело, на ее плечо:

$$M = F \cdot l,$$

где F — действующая сила; l — плечо рычага.

Плечом силы называется кратчайшее расстояние между точкой опоры и прямой, вдоль которой действует на рычаг сила. Чтобы найти плечо силы, надо из точки опоры опустить перпендикуляр на линию действия силы.

7.2. Проведение эксперимента. Соберите установку. Зарисуйте вашу установку и отметьте все силы и плечи сил. Измерьте угольником плечи сил. Определите значения этих сил. Зная величины сил и их плечи, вычислите моменты сил. Из формулы равенства моментов сил найдите неизвестную массу m_x .

Результаты занесите в таблицу 5.

Таблица 5

	F_1	l_1	F_2	l_2	F_3	l_3	F_4	l_4	F_x	l_x	m_x
По часовой стрелке											
Против часовой стрелки											
Моменты сил											

На весах определите истинную массу неизвестного груза $m_{\text{ист}}$. Вычислите абсолютную погрешность $\delta m = \frac{\Delta m}{m_{\text{ист}}} = \frac{m_{\text{изм}} - m_{\text{ист}}}{m_{\text{ист}}}$.

Напишите вывод по данной работе.

8. Обработка экспериментальных данных, полученных в разных группах. Самостоятельная работа групп, оформление необходимых графиков и зависимостей.

9. Обсуждение результатов

Контрольные вопросы:

- Что называется рычагом?
- Выведите правило рычага.
- Что называется плечом силы?
- Что называется моментом силы?

- Какие физические параметры не учтены в модели и дают расхождение при сравнении результатов экспериментального и модельного исследований?

По результатам обсуждения вопросов и проведенных учебных исследований учащиеся самостоятельно формулируют общие выводы и готовят сообщение о проделанной работе в форме научного доклада.

4.1.4. Модуль 4. Исследование баллистического движения тел

1. Введение. Демонстрации

1.1. Введение. Движение тел в поле тяжести Земли наблюдается нами многократно. Интуитивно, бессознательно каждый из нас может совершить точный бросок мячом в баскетбольную корзину с середины площадки. Если любознательный физик попытается выяснить, под каким углом надо бросить мяч и какую ему придать скорость для точного попадания в цель, вразумительного ответа он не получит. Ответы на эти вопросы может дать только физический эксперимент и наука баллистика, которая изучает движение тел в поле тяжести Земли.

1.2. Демонстрации. Один ученик берет обруч для хула-хупа и встает у двери класса (желательно мальчик), другой пытается попасть в обруч резиновым мячом, стоя у окна. Сделайте несколько попыток и посчитайте процент попадания. Теперь то же самое проделайте с надувным шариком. Какой получился процент попадания в этом случае? Почему?

Возьмите шарик для настольного тенниса и литой резиновый шарик (такого же размера). Проделайте опыты с двумя шариками и посчитайте процент попаданий в кольцо.

Предварительные наблюдения сразу определяют физическую модель тела для исследования полетов — небольшой металлический шарик.

Установите баллистический пистолет на штативе и испытайте его возможности (стрельба вверх, под углом к горизонту и горизонтально).

2. Цель и задача экспериментального исследования. Оборудование

2.1. Цель исследования: изучить движение тела, брошенного горизонтально, вертикально и под углом к горизонту.

2.2. Решаемые задачи:

- Исследование зависимости дальности полета от угла вылета снаряда.
- Определение дальности полета при горизонтальной стрельбе.
- Определение начальной скорости снаряда при горизонтальной стрельбе.
- Определение высоты подъема снаряда при выстреле под углом 45° .
- Определение высоты подъема снаряда при зенитной стрельбе.

2.3. Необходимое оборудование: баллистический пистолет; линейка; штатив лабораторный с муфтой и кольцом; лист писчей и копировальной бумаги.

3. Экспериментальные исследования

3.1. Метод выполнения работы. При изучении криволинейных движений учащимися были получены формулы для определения дальности полета тела, брошенного горизонтально:

$$S = V_0 \cdot t = V_0 \cdot \sqrt{\frac{2h}{g}}, \quad (1)$$

а также для определения максимальной высоты подъема и дальности полета тела, брошенного под углом α к горизонту:

$$h = \frac{V_0^2 \cdot \sin^2 \alpha}{2g} \quad (2)$$

и

$$S = \frac{2V_0^2 \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha}{g}. \quad (3)$$

Из анализа двух последних формул следует, что при уменьшении угла стрельбы α от 90° до 0° высота подъема шарика уменьшается от $h = \frac{V_0^2}{2g}$ до нуля, а дальность падения сначала увеличивается от нуля до некоторого максимума, а затем снова уменьшается до нуля. Дальность полета шарика достигает максимального значения, когда произведение $\cos \alpha \cdot \sin \alpha$ становится наибольшим. Легко показать, что это будет при $\alpha = 45^\circ$ (рис. 1).

3.2. Подготовка эксперимента. На край ученического стола привинтите трубку с баллистическим пистолетом, направив

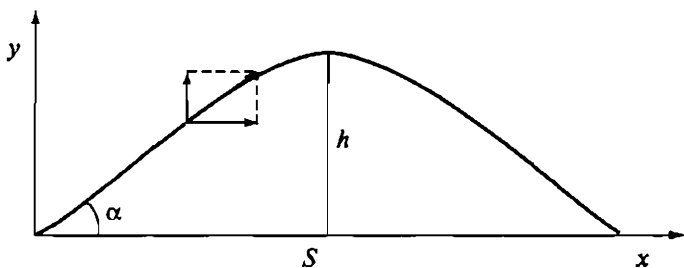


Рис. 1

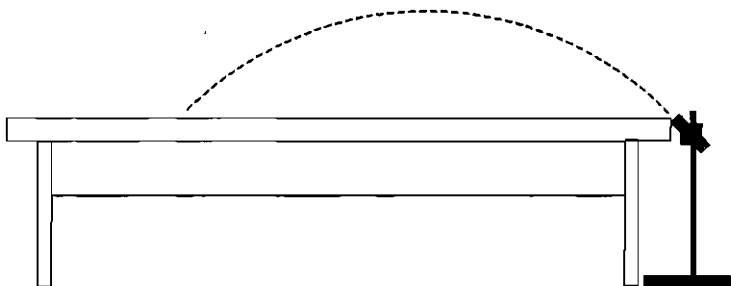


Рис. 2

ствол пистолета вдоль стола. Установите пистолет с помощью угломера под углом 45° (рис. 2).

Произведите пробный выстрел. Заметив место падения шарика, положите на это место лист писчей бумаги и покройте его листом копировальной бумаги. Сделайте несколько выстрелов, снимите копировальную бумагу и проверьте кучность падения шарика. При правильной установке приборов разброс не должен быть слишком большим.

3.3. Проведение эксперимента. Установите пистолет под разными углами (от 20° до 70°) и произведите по три-четыре выстрела при каждой установке. Точки попадания снаряда обведите на бумаге карандашом, а рядом сделайте отметку о величине угла. Измерьте дальность полета снаряда и данные занесите в таблицу 1.

Постройте график зависимости дальности полета от угла наклона баллистического пистолета $S(\alpha)$.

Определите дальность полета при горизонтальной стрельбе. Установите пистолет на штатив как можно выше. Замерьте

Таблица 1

№ опыта	Дальность полета при угле выстрела					
	20°	30°	40°	50°	60°	70°
1						
2						
3						
Среднее S (м)						

высоту h . Сделайте пять выстрелов и измерьте дальность полета снаряда S (рис. 3).

$$S = V_0 \cdot \sqrt{\frac{2h}{g}}. \quad (4)$$

Из формулы (4) выразите и вычислите скорость V_0 и среднюю скорость. Данные занесите в таблицу 2.

Таблица 2

№ опыта	S , м	V_0 , м/с	$V_{0\text{ср}}$, м/с
1			
2			
3			
4			
5			

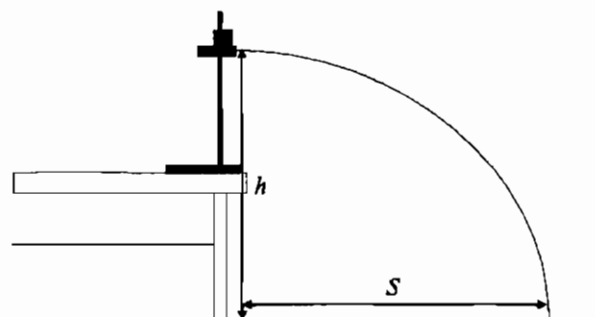


Рис. 3

Установите пистолет для вертикальной (зенитной) стрельбы. Над пистолетом расположите в горизонтальном положении кольцо при помощи штатива. Произведите 2–3 выстрела. Регулируя высоту кольца, добейтесь того, чтобы снаряд касался бумаги, не сбивая ее с кольца. Измерьте высоту кольца h .

Зная начальную скорость снаряда, определите теоретическую высоту его подъема из уравнения (5):

$$h = \frac{V_0^2}{2g}. \quad (5)$$

Определите погрешности для скорости V_0 и h .

4. Обработка экспериментальных данных, полученных в разных группах. Самостоятельная работа групп, оформление необходимых графиков и зависимостей.

5. Обсуждение результатов

Контрольные вопросы:

- При каком угле вылета дальность полета снаряда максимальна?
- При каких углах вылета дальность полета одинакова?
- Чем отличается траектория полета снаряда при углах в 60° и 30° ?
- От чего зависит дальность полета тела, брошенного горизонтально?
- Как изменится высота максимального подъема, если начальную скорость увеличить в два раза, уменьшить в два раза?
- Как можно применить полученные сведения о баллистическом движении на практике?
- Пользуются ли законами баллистики насекомые, птицы и животные?

По результатам обсуждения вопросов самостоятельно сформулируйте краткие выводы по проведенным исследованиям.

6. Задачи компьютерного моделирования

Решаемые задачи:

- Корректировка модели с учетом сопротивления среды.
- Определение зависимости дальности полета снаряда от начальной скорости стрельбы.
- Определение зависимости высоты подъема снаряда при зенитной стрельбе от начальной скорости стрельбы.

7. Моделирование. Запустите на компьютере программу «Живая физика». Откройте в папке `modely/module-4/4-1` (рис. 4).

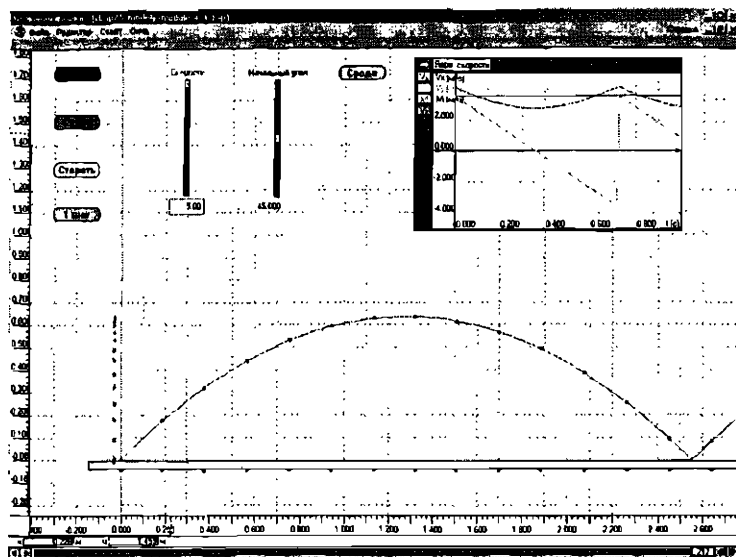


Рис. 4

Регулятором **Скорость** установите начальную скорость, рассчитанную в натурном эксперименте. Регулятором **Начальный угол** установите угол 45° . Кнопкой **Старт** запустите работу модели в режиме отсутствия сопротивления среды. Сравните полученную в модели дальность полета с предыдущим экспериментом. Нажмите кнопку **Среды** и установите **Сопротивление среды** **обычное**. Добейтесь, изменяя коэффициент k , максимального совпадения результатов моделирования с экспериментом. Меняя значение начального угла стрельбы от 20° до 70° , проведите измерения и занесите их в таблицу 3. Постройте зависимость дальности полета снаряда от начального угла стрельбы (желательно на аналогичном графике для натурального случая).

Таблица 3

Начальный угол, α ($^\circ$)	20	30	40	50	60	70
Дальность полета, S (м)						

Попытайтесь объяснить разницу в этих зависимостях. На этом корректировка вашей модели закончена.

Установите регулятор **Начальный угол** в положение 45° . Меняя значение скорости от 1 до 5 м/с, проведите эксперименты и заполните таблицу 4. Постройте зависимость $S(V_0)$.

Таблица 4

Начальная скорость, V_0 (м/с)	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
Дальность полета, S (м)									

Установите начальный угол равным 90° и проведите аналогичное исследование зависимости высоты подъема снаряда от начального значения скорости. Заполните таблицу 5 и постройте зависимость $h(V_0)$.

Таблица 5

Начальная скорость, V_0 (м/с)	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
Высота подъема, h (м)									

Для любознательных. в папке **module-4** есть модель **4-2**, в ней скорость можно менять от 0 до 10 м/с.

8. Обработка данных, полученных в разных группах. Самостоятельная работа учеников.

9. Сопоставление результатов экспериментальных и модельных исследований. Самостоятельная работа учеников и организованная дискуссия.

10. Обсуждение результатов. Формулировка общих выводов

Контрольные вопросы:

- Применимы ли формулы равноускоренного движения к баллистическому движению?
- В чем проявляется влияние среды, в которой движется тело? Как его учитывать в модели?
- Соответствует ли исследованная вами модель реальному эксперименту?
- Какие новые сведения, в сравнении с экспериментом, вы получили?

По результатам обсуждения вопросов и проведенных учебных исследований самостоятельно сформулируйте общие выводы и подготовьте сообщение в форме научного доклада о проделанной работе.

4.2. Молекулярная физика

4.2.1. Модуль 5. Распределение Максвелла

1. Введение. Демонстрации

1.1. Введение. Физическая модель идеального газа — движущиеся в произвольном направлении упругие шарики, сталкивающиеся друг с другом и со стенками, ограничивающими занятый газом объем. Разделение и подсчет молекул с различными скоростями возможно осуществить на демонстрационной имитационной установке.

1.2. Демонстрации. Конструкция установки достаточно простая, ее можно изготовить из доступных в любой школе материалов. Составными элементами являются две плоских коробки с прозрачными стенками, подобными упаковочным коробкам для компакт-дисков. Коробки шарнирно соединены (рис. 1), расположены в вертикальной плоскости, одна над

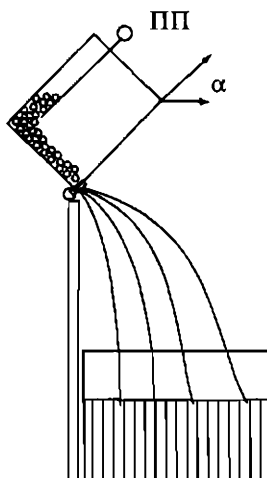


Рис. 1. Схема установки

другой. Нижняя коробка является приемником, разделена тонкими перегородками на ячейки. Возможный вариант изготовления ячеек — использование половинок корпусов прозрачных шариковых ручек, установленных вертикально.

Верхняя коробка вращается в шарнире, ось вращения горизонтальна. В нижней части этой коробки имеется небольшое выпускное отверстие, через которое при наклоне коробки высыпается мелкая дробь или какая-нибудь крупа, например, пшено. В верхней коробке имеется подвижная перегородка (ПП), разделяющая объем на две части. Загрузочный отсек верхней коробки заполняется сыпучим материалом, наклоняется на некоторый угол и подвижная перегородка поднимается на некоторую высоту, выпуская во второй отсек дробь. Скатываясь к выпускному отверстию по дну коробки, имеющему небольшие неровности, дробинки беспорядочно сталкиваются, приобретают разные скорости и вылетают наружу. В каждую из ячеек приемной коробки попадает определенное количество дробинки, имеющих приблизительно одинаковую горизонтальную проекцию скорости. Это количество пропорционально высоте заполненной части ячеек. Распределение молекул по горизонтальной проекции скорости получено! Имитация нагрева газа осуществляется увеличением угла наклона верхней коробки — скорости скатывания возрастают.

2. Цель и задачи экспериментального исследования. Оборудование

2.1. Цель исследования: в модельном эксперименте проверить закон распределения частиц по скоростям в потоке частиц.

2.2. Решаемые задачи:

- Разработать метод подсчета частиц в ячейках.
- Получить зависимость распределения частиц по скоростям от угла наклона выходного отверстия.
- Получить зависимость распределения частиц по скоростям от массы частиц.
- Получить зависимость распределения частиц по скоростям от размера частиц.

2.3. Необходимое оборудование: крупа или дробь, установка (схема которой представлена на рис. 1), транспортер, линейка.

3. Экспериментальные исследования

3.1. Метод выполнения работы. В данной работе исследование распределения частиц в потоке по скоростям производится на модели. Скорость частиц в полете имеет две составляющих: горизонтальную и вертикальную. Горизонтальная составляющая и будет являться аналогом скорости движения мелких частиц.

3.2. Проведение эксперимента

1. Отодвиньте перегородку ПП и засыпьте в верхний резервуар пшениной крупы. Закройте выдвижную перегородку и при помощи транспортера установите резервуар под углом $\alpha = 30^\circ$.
2. Откройте задвижку и дайте возможность высыпаться всей крупе (в этом эксперименте крупы не должно быть много).
3. Подсчитайте количество содержимого в каждой ячейке. Опишите способ, которым вы производите подсчет числа частиц. Полученные данные разместите в таблице 1.

Таблица 1

α	Номер ячейки по порядку от линии соединения резервуаров						
	1	2	3	4	5	...	n
30							
40							
50							
60							
70							

4. Повторите эксперимент, меняя угол наклона. Заполните всю таблицу 1.
5. Для определения зависимости распределения частиц по скоростям от их размера и массы выберите по таблице 1 оптимальный угол наклона, при котором имеет место достаточно большой разброс частиц по ячейкам. Установите под выбранным углом верхний резервуар и проведите опыты с другими сортами частиц. Данные занесите в таблицу 2.

Постройте графики зависимостей распределения частиц по ячейкам от угла наклона.

Постройте график зависимости распределения числа частиц по ячейкам для разных размеров и масс.

Таблица 2

$\alpha =$	Номер ячейки по порядку от линии соединения резервуаров						
Сорт	1	2	3	4	5	...	n
Пшено							
Дробь							
Гречка							

4. Обработка экспериментальных данных, полученных в разных группах. Самостоятельная работа групп, оформление необходимых графиков и зависимостей.

5. Обсуждение результатов

Контрольные вопросы:

- Какой из исследуемых параметров может быть аналогом температуры?
- Как зависит распределение от размера частиц?
- Как зависит распределение от массы частиц?

6. Задачи компьютерного моделирования

6.1. Цель моделирования: промоделировать построение кривой распределения Максвелла.

6.2. Решаемые задачи:

- Установление параметров молекулярно-кинетической модели газа.
- Построение распределения Максвелла, разбор всех его параметров.
- Расчет молярной массы газа, используемого в модели. Определение названия газа по его молярной массе.
- Определение массы молекулы используемого газа.

7. Моделирование

7.1. Введение. Описание моделей. Запустите на вашем компьютере программу «Открытая физика 1.1». Откройте книгу «Термодинамика и молекулярная физика». Выберите «Распределение Максвелла».

В левой части окна (рис. 2) показан объем с частицами газа, в центре шкала температуры, справа график распределения Максвелла. Кнопки **Старт** и **Выбор** (внизу окна) позволяют выбирать температуру эксперимента. Внизу в центре показаны

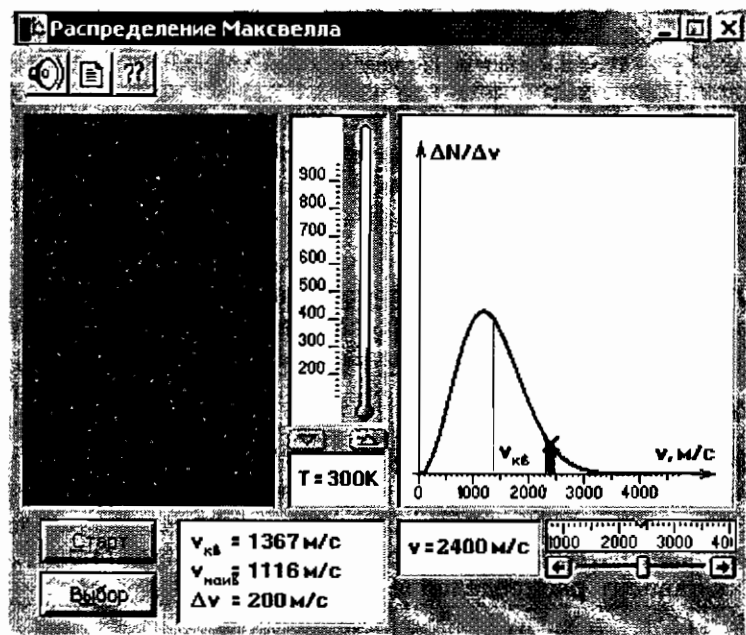


Рис. 2

значения среднеквадратичной скорости опыта, наивысшая скорость опыта и диапазон скоростей, в которых находятся частицы. Внизу справа имеется движок изменения скорости наблюдения. Вверху окна кнопка Документ открывает минимальные сведения о модели. Под кнопкой Вопрос есть расчетная задача.

7.2. Работа с моделью. Нажмите кнопку Документ и ознакомьтесь с материалом, представленным в окне. Выпишите все формулы, имеющиеся в тексте.

Выберите температуру, доставшуюся вашей группе: $T = 200; 300; 400; 500; 600; 700; 800; 900$ К (подчеркнутое значение, например 500 К). Нажмите кнопку Старт и пройдите по линейке скоростей, внимательно наблюдая за поведением частиц в объеме газа. Частицы, имеющие скорость в интервале Δv , высвечиваются зеленым цветом. Обратите внимание, что такие частицы после столкновения меняют свою скорость. После выбора температуры (в правой части окна) появится график примерного распределения молекул по скоростям. Ориентируясь по графику, определите, с каким диапазоном

вам нужно выбирать точки для построения своего графика (точек должно быть не менее семи).

Выберите первую точку для графика, запустите модель. Ваша задача — определить, сколько молекул имеют указанную скорость. Подсчитать зеленые частицы в движении очень сложно. В верхней части общего окна «Открытой физики» есть кнопка **Модель**. Нажмите эту кнопку и в появившемся за ней меню нажмите **Остановить все**. В работе модели наступит пауза и вы сможете спокойно подсчитать количество искомых молекул. Для возобновления работы модели в том же меню нужно нажать **Продолжить все**. (Для большей точности мы советуем делать подсчеты не один раз, а по крайней мере три и брать среднее значение.) Рассчитайте значение $\Delta N/\Delta v$ и заполните таблицу 3.

Таблица 3

v , м/с	400	800	1200	1600	2000	2400	2800
$\Delta N/\Delta v$, (?)							

Постройте график полученного распределения Максвелла и сравните его с видом образца.

Нажмите кнопку **Вопрос** и запишите условие задачи. Выведите формулу и рассчитайте молярную массу газа, с которым вы экспериментировали. По известной молярной массе определите вещество.

Рассчитайте массу одной молекулы данного вещества.

8. Обработка данных, полученных в разных группах. Самостоятельная работа учеников.

9. Сопоставление результатов экспериментальных и модельных исследований. Самостоятельная работа учеников и организованная дискуссия.

10. Обсуждение результатов. Формулировка общих выводов

Контрольные вопросы:

- Какую размерность имеют значения $\Delta N/\Delta v$?
- Почему в распределении Максвелла берется отношение $\Delta N/\Delta v$, а не просто ΔN ?
- Что изменится на графике при увеличении Δv ?

По результатам обсуждения вопросов и проведенных учебных исследований самостоятельно сформулируйте общие выводы и подготовьте сообщение о проделанной работе в форме научного доклада.

4.2.2. Модуль 6. Броуновское движение

1. Введение. Демонстрация

1.1. Введение. Явления, связанные с молекулярным движением, широко распространены в природе. Их можно наблюдать визуально, ощущать запах диффундирующих примесей в газах. Из личного опыта каждый может привести конкретные примеры. Характерные размеры молекул малы, порядка десяти нанометров и поэтому непосредственно перемещение отдельных молекул наблюдать невозможно.

Однако возможно результирующее воздействие многих молекул на более крупные частицы. Этот эффект впервые наблюдал английский ученый Р. Броун в 1827 году, обнаружив с помощью микроскопа хаотические движения цветочной пыльцы, взвешенной в воде. Характерные размеры частиц пыльцы — около 1 микрона. Полную теорию броуновского движения разработали в 1905–1906 годах А. Эйнштейн и М. Смолуховский.

Процесс взаимного проникновения соприкасающихся веществ (твердых, жидких, газообразных) называется диффузией. Броуновское движение является одним из видов диффузии. Именно этот процесс, наблюдаемый непосредственно, удобен для моделирования.

1.2. Демонстрации. Процесс диффузии в газах традиционно демонстрируют на парах брома. В высокий сосуд, например, мензурку, запускают в нижнюю его часть бурые пары брома, который тяжелее воздуха и постепенно поднимается вверх в результате диффузии. Опыт простой, но достаточно длительный. Возможно визуальное наблюдение более быстрых процессов диффузии дыма в атмосфере, молекул пахучих веществ (духи, запах кофе и т. д.) в воздухе, следов падающих на дно высокой мензурки с водой крупинок красителя.

Возможна наглядная и простая имитация диффузии и броуновского движения с помощью прозрачных пластиковых бутылок. В качестве моделей различных «молекул» можно использовать различные крупы: горох, зерна различных злаков и другие сыпучие материалы. В качестве броуновской частицы

удобно использовать тело, превышающее размер «молекул» в несколько раз и отличающееся цветом, например крупный боб или драже. При частом и энергичном встряхивании с небольшой амплитудой «молекулы» испытывают несимметричные случайные соударения и хаотично меняют свое местоположение. Резко прекращая процесс встряхивания, в паузу можно фиксировать положение крупной частицы и строить броуновскую траекторию, а также наблюдать изменение начального распределения разнородных мелких частиц.

2. Цель и задачи экспериментального исследования. Оборудование

2.1. Цель исследования: познакомиться с броуновским движением. Экспериментально проверить диффузионный закон.

2.2. Решаемые задачи:

- Наблюдать броуновское движение на модели.
- Определить смещение крупной частицы.
- Определить время опыта.
- Рассчитать диффузионный коэффициент.
- Проверить, как диффузионный коэффициент зависит от сорта основного материала.

2.3. Необходимое оборудование: пластиковая бутылка, сыпучие материалы с различающимися частицами (крупы, зерна, горох, бобы), маркер, секундомер.

3. Экспериментальные исследования. Необходимо помнить, что предлагаемый эксперимент является модельным. В дальнейшем описании в качестве моделей молекул используется горох, броуновскую частицу моделирует боб. Возможны, по усмотрению читателя, и другие варианты выбора моделей.

3.1. Проведение эксперимента. Засыпьте горох в резервуар, сверху поместите боб. Закройте резервуар крышкой. При выполнении работы отслеживайте положение боба, как по вертикали, так и по горизонтали. Маркером на поверхности бутылки отметьте начальное положение боба.

Пять раз интенсивно встряхните резервуар и определите положение боба, пометив точку на поверхности. При помощи секундомера фиксируйте время t , потраченное на один цикл встряхивания. Опыт повторите 10 раз.

Таблица 1

Номер опыта		1	2	3	4	5	6	7	...	Среднее значение
t , с	горох									
r , см (для $N=5$)	горох									
r^2 , см ²	горох									
t , с	пшено									
r , см (для $N=5$)	пшено									
r^2 , см ²	пшено									

При помощи линейки определите расстояние между положениями боба в каждом из встряхиваний. Данные занесите в таблицу 1.

Рассчитайте коэффициент диффузии: $D_N = \frac{\langle r^2 \rangle}{\Delta t \cdot N}$, где $N = 10$ есть число опытов.

Замените горох пшеном и повторите опыт. Занесите данные в таблицу 1. Определите коэффициент диффузии для этой системы, воспользовавшись предложенной формулой.

4. Обработка экспериментальных данных, полученных в разных группах. Самостоятельная работа групп, расчет коэффициентов диффузии.

5. Обсуждение результатов

Контрольные вопросы:

- Чему соответствует время одного встряхивания бутылки?
- Зачем необходимо между замерами производить несколько встряхиваний?
- Зависит ли коэффициент диффузии от сорта «молекул»?

По результатам обсуждения вопросов самостоятельно сформулируйте краткие выводы по проведенным исследованиям.

6. Задачи компьютерного моделирования

Решаемые задачи:

- Определение шага моделирования в программе «Физика в картинках».
- Определение квадрата смещения броуновской частицы в модели «Физика в картинках».
- Определение диффузионного коэффициента для модели «Физика в картинках».

- Определение шага моделирования в программе «Открытая физика».
- Определение квадрата смещения броуновской частицы в модели «Открытая физика».
- Определение диффузионного коэффициента для модели «Открытая физика».
- Проведение сравнения рассчитанных диффузионных коэффициентов для двух моделей.

7. Моделирование

7.1. Введение. Описание моделей. Запустите на компьютере программу «Физика в картинках». В верхней части окна выберите книгу **Термо**, в открывшейся книге нажмите кнопку **Броуновское движение**.

В левой части окна сверху изображена модель прямоугольного сосуда с атомарным газом, ниже три кнопки **Старт**, **Помощь** и **Очистить экран**. Справа изображена часть объема сосуда с траекторией крупной частицы, а ниже табло со значениями r и N .

Останавливается модель кнопкой **Pause**, запускается вновь кнопкой **Esc**.

7.2. Работа с моделью. Нажмите кнопку **Физика** в верхней части окна. Прочитайте теоретический материал и выпишите формулы.

Общее время работы модели можно определить как $t = \Delta t \cdot N$, где Δt — шаг моделирования (всего таких шагов N).

Для дальнейшей работы вы должны определить время одного шага моделирования.

Выберите измеряемое количество шагов N (например, $N = 50$). Для контроля вам потребуется секундомер (можно позаимствовать из экспериментальной части работы).

Запустите модель в работу, одновременно нажав кнопку **Пуск секундомера**. По достижении нужного N остановите секундомер. Опыт нужно проделать несколько раз (не менее пяти). Данные запишите в таблицу 2.

Таблица 2

Номер опыта, n	1	2	3	4	5	...	N
t_n , с							

Отбросьте максимальное и минимальное значения (будем считать их ошибочными) и рассчитайте среднее время опыта по формуле:

$$t_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^{n-2} t_i}{n-2}; \quad \text{тогда время одного шага } \Delta t = \frac{t_{\text{ср}}}{N}.$$

В дальнейшем, для данной модели, при любом N легко определить время опыта.

Проведите 10–12 экспериментов с броуновской частицей. Значение N для вашей группы $N = 20; 30; \underline{40}; 50; 60; 70; 80$ (подчеркнутое значение). Эксперимент проводите так: нажмите кнопку **Очистить экран**, в табло **Предупреждение** нажмите кнопку **Да**. Модель начнет работать с нулевого N . Дождитесь нужного вам значения N и кнопкой **Pause** остановите модель. Теперь легко прочесть значения N и r . Если модель остановилась раньше достижения заданного N (броуновская частица коснулась края сосуда), повторите операции, а этот опыт считайте неудачным.

Значения r и r^2 занесите в таблицу 3.

Таблица 3

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	...	m
r , мкм (для $N = \dots$)									
r^2 , мкм ²									

Отбросив максимальное и минимальное значение r , рассчитайте значение $\langle r^2 \rangle$ (среднее) для данного N по формуле:

$$\langle r^2 \rangle = \frac{\sum_i r_i^2}{m-2}, \quad \text{где } m — \text{количество опытов.}$$

Рассчитайте значение D_N — диффузионного коэффициента для модели «Физика в картинках», по формуле

$$D_N = \frac{\langle r^2 \rangle}{\Delta t \cdot N}.$$

Сделайте в группе вывод о справедливости или несправедливости диффузионного закона Эйнштейна.

Запустите на вашем компьютере программу «Открытая физика». В Содержании выберите книгу Термодинамика и

молекулярная физика, выберите Броуновское движение. Появившееся окно практически аналогично окну в программе «Физика в картинках». Отличие состоит в значении r^2 . Вам не придется его рассчитывать, можно взять готовое. Останавливать модель можно с помощью кнопки **Модель** (зверху общего окна программы), нажав **Остановить все**.

Проделайте моделирование аналогично выполненному ранее, заполните таблицы, определите время одного шага и рассчитайте диффузионный коэффициент.

Сравните получившиеся диффузионные коэффициенты двух моделей и сделайте выводы.

8. Обработка данных, полученных в разных группах. Самостоятельная работа учеников.

9. Сопоставление результатов экспериментальных и модельных исследований. Самостоятельная работа учеников и организованная дискуссия.

10. Обсуждение результатов. Формулировка общих выводов

Контрольные вопросы:

- Что можно сказать о значениях диффузионных коэффициентов в двух моделях?
- Какой параметр молекулярно-кинетической теории (МКТ) характеризует диффузионный коэффициент?
- Как влияет на моделирование количество шагов N ? (Проведите анализ работы разных групп с сильно отличающимися значениями N .)
- Выполняется или нет диффузионный закон Эйнштейна?

По результатам обсуждения вопросов и проведенных учебных исследований самостоятельно сформулируйте общие выводы и подготовьте сообщение в форме научного доклада о проделанной работе.

4.2.3. Модуль 7. Диффузия

1. Введение. Демонстрации

1.1. Введение. Демонстрацию диффузии на уроках физики традиционно проводят с помощью красителей в жидкости, но это довольно медленный процесс. Однако за время урока можно познакомить учащихся с явлением диффузии и наглядно показать зависимость диффузии от температуры.

1.2. Демонстрации

Опыт 1. Для опыта необходимы две высоких мензурки (40–50 см). Мензурки доверху заполняются водой, одна — горячей (60–70 °С), другая — холодной (до 0–4 °С). В обе мензурки одновременно высыплются 5–7 крупинок перманганата калия. В дальнейшем наблюдениям подвергается разница скорости размытия траекторий движения частиц в воде и скорости образования окрашенного слоя вблизи дна мензурок.

Опыт 2. Для исключения влияния конвективных потоков воды в вертикальных сосудах можно использовать длинную, горизонтально расположенную трубку небольшого диаметра. Трубка полностью заполняется водой. На концах трубки надеются резиновые трубки небольшой длины с зажимами. Поочередно, в оба конца трубки, слегка наклоняя ее, вводят пипеткой раствор красителя, например, эозина или перманганата калия. Трубку с подкрашенной с обоих концов водой размещают горизонтально на штативе и проводят наблюдения. Для демонстрации влияния температуры на диффузию красителя один конец трубки нагревается обычной электрической лампой.

Опыт 3. Наглядная имитационная физическая модель диффузии в газах в школе может быть изготовлена из пластиковых бутылок, заполненных горохом или крупой. Устройство представляет собой две пластиковых бутылки с отрезанным до цилиндрической части дном. Открытыми частями бутылки соединяются вместе: одна из них нагревается и плотно надвигается на холодную — получается достаточно прочное соединение. В месте стыка можно разместить перегородку, с одним или несколькими отверстиями любых конфигураций и размеров (рис. 1).

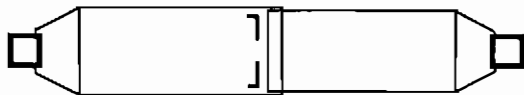


Рис. 1

Получается удобный контейнер с двумя загрузочными отверстиями, закрываемыми пробками. Для изготовления контейнера выбираются бутылки с «шейкой» в верхней части, в которую удобно загружать необходимые сыпучие материалы, не смешивая их до начала опыта.

Демонстрация готовится следующим образом. Подбираются два типа материалов, имитирующих различные газы. Если требуется провести опыт с газами, молекулы которых имеют одинаковую массу, можно в контейнер загрузить горох разного цвета, но близких размеров. Для демонстрации взаимной диффузии легкого и тяжелого газов можно использовать горох и фасоль. Наборы различных круп — пшено, рис, перловка или гречка также пригодны для использования в опытах.

После загрузки необходимо энергично потрясти контейнер некоторое время. Характер встряхивания и его длительность определяют конечный результат. Хороший эффект дает демонстрация с одновременным использованием двух контейнеров: с одинаковыми и разными «газами» или с одинаковыми и разными «полупроницаемыми» перегородками. Возможно проведение количественных исследований моделей — число разнородных частиц, перескочивших из одной части контейнера в другую, легко считается.

2. Задачи компьютерного моделирования

Решаемые задачи:

- Наблюдение процесса диффузии.
- Определение зависимости времени диффузии от диаметра и площади соединительной трубки.
- Расчет флуктуаций числа частиц.

3. Моделирование

3.1. Метод выполнения работы. Диффузией называется процесс самопроизвольного выравнивания концентраций молекул жидкости или газа в различных частях объема. Диффузия стремится приблизить систему к состоянию термодинамического равновесия.

В процессе диффузии можно наблюдать самопроизвольное отклонение числа частиц в половинах сосуда от средних значений. Это явление называется флуктуациями. Флуктуации параметров — общее свойство всех термодинамических систем.

Наиболее заметны флуктуации в системах с малым числом частиц. Как показывает статистическая теория, средняя флуктуация числа частиц в каждой половине сосуда равна

$\sqrt{\frac{N_{\text{ср}}}{2}}$, где $N_{\text{ср}}$ — среднее число частиц данного газа в половине сосуда. Если это выражение поделить на $N_{\text{ср}}$, то мы получим относительную флуктуацию, равную $\delta = \frac{1}{\sqrt{2N_{\text{ср}}}}$. В предлагаемой

модели (для одного из газов) $N_{\text{ср}} = 50$ и, следовательно, $\delta = 0,1$. Таким образом, отклонение числа частиц данного газа от среднего значения в одной половине сосуда равно в среднем 10%.

3.2. Описание моделей. Запустите на вашем компьютере программу «Открытая физика». В Содержании выберите книгу Термодинамика и молекулярная физика, выберите модель Диффузия газов.

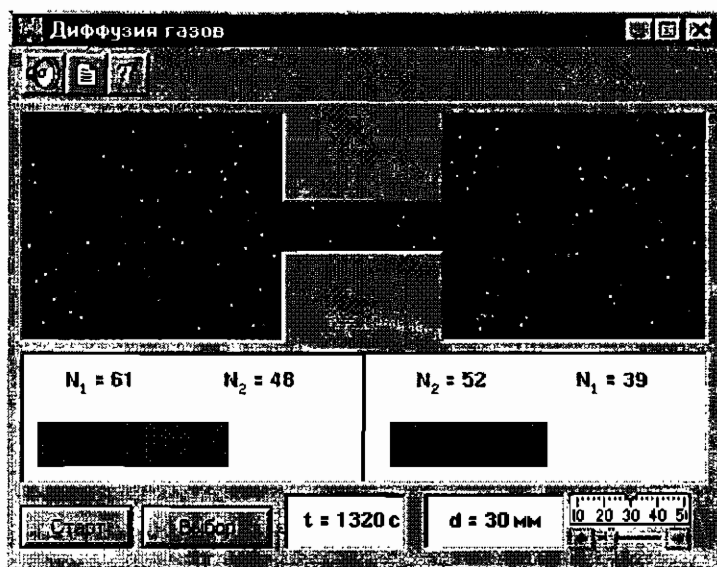


Рис. 2

В окне (рис. 2) расположены два одинаковых объема, соединенные трубой с изменяемым диаметром (можно изменять в ходе моделирования). Ниже объемов расположены табло счета частиц каждого сорта и табло секундомера. Справа внизу находится регулятор изменения сечения трубы с табло диаметра. Слева внизу расположены кнопки **Старт** и **Выбор**.

3.3. Работа с моделями. Регулятором диаметра трубы выберите $d = 20$ мм. Запустите модель и фиксируйте количество частиц (красные и зеленые) в одном сосуда, например в левом, через равные промежутки времени. Данные занесите в таблицу 1.

Таблица 1

t, c	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
N_2 (шт.) зел.											
N_1 (шт.) кр.											

Договоримся в дальнейшем процесс диффузии считать законченным при достижении любым из четырех чисел N_1 , N_2 в обоих объемах значения 50 шт. (это позволит получить одинаковый критерий окончания эксперимента для всех моделей). Постройте графические зависимости N_1 и N_2 от времени (на одном графике).

Для определения зависимости времени диффузии от диаметра трубки изменяйте диаметр соединения сосудов и фиксируйте время диффузии (50 частиц). Занесите данные в таблицу 2, рассчитайте площадь трубы.

Таблица 2

$d, мм$	16	26	30	40	60	80	100	120	130
t, c									
$S, мм^2$									

Постройте графические зависимости времени диффузии от диаметра и площади соединительной трубки. Проанализируйте полученные зависимости и сделайте выводы.

Флуктуации наиболее наглядными будут в опыте с минимальным диаметром соединительной трубки, поэтому выставите диаметр 10 мм и заполните таблицу 3 результатами наблюдений.

Таблица 3

t, c	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
N_1 , шт.										
N_2 , шт.										
$N_1 + N_2$, шт.										

Определите по данным таблицы 3 значения абсолютной флуктуации, рассчитайте относительную флуктуацию и срав-

ните ее с теоретически рассчитанной по формуле:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{2N_{\text{ср}}}}.$$

4. Обработка данных, полученных в разных группах. Самостоятельная работа учеников.

5. Цель и задачи экспериментального исследования. Оборудование

5.1. Цель исследования: изучение явления диффузии.

5.2. Решаемые задачи:

- Наблюдение диффузии для одинакового и разного сорта «молекул».
- Определение зависимости флуктуаций числа частиц от сорта «молекул».

5.3. Необходимое оборудование: контейнер (схема представлена на рис. 1), крупа: горох, перловка.

6. Экспериментальные исследования

6.1. Метод выполнения работы. Изготовление контейнера с меняющейся шириной щели проблематично. В данном эксперименте предлагается провести наблюдение диффузии в различных газах, при фиксированной ширине щели, но с различными по размерам телами. Расчет флуктуаций производится так же как и в случае компьютерной модели.

6.2. Проведение эксперимента. В две половины контейнера насыпьте частицы различных «газов», например сушеный горох и гречневая крупа. Количество частиц подсчитайте заранее. Контейнер несколько раз энергично встряхните. Повторите встряхивания, сохраняя количество возвратно-поступательных движений в каждом из них.

С помощью секундомера определите время одного встряхивания. Подсчитайте количество частиц того и другого сорта в одной половине контейнера и занесите данные в таблицу 4 (аналогично таблице 3 в компьютерной модели). Определите абсолютную флуктуацию, рассчитайте относительную флуктуацию и сравните ее с теоретически рассчитанной (аналогично пункту 3.3 в модельных экспериментах).

7. Обработка экспериментальных данных, полученных в разных группах. Самостоятельная работа групп, оформление необходимых графиков и зависимостей.

8. Сопоставление результатов экспериментальных и модельных исследований. Самостоятельная работа учеников и организованная дискуссия.

9. Обсуждение результатов. Формулировка общих выводов

Контрольные вопросы:

- Что такое состояние термодинамического равновесия частиц?
- Чем отличается средняя флуктуация числа частиц в сосудах от относительной флуктуации?
- Можно ли наличие флуктуаций связать с различным размером частиц в двух сосудах? (Для экспериментов с различными частицами.)
- По какой причине возникают такие значительные флуктуации в модели?
- Исходя из вашего эксперимента, где флуктуации частиц больше, в начале или в конце процесса?

По результатам обсуждения вопросов и проведенных учебных исследований самостоятельно сформулируйте общие выводы и подготовьте сообщение о проделанной работе в форме научного доклада.

4.2.4. Модуль 8. Изопроцессы в идеальном газе

1. Введение. Демонстрации

1.1. Введение. Окружающий нас воздух настолько нам необходим и привычен, что о нем мы вспоминаем в ситуациях, когда его не хватает. Действительно, воздух — это наша среда обитания и необходимый фактор нашей жизнедеятельности. Воздухом мы дышим и получаем для организма кислород, воздух наш охлаждает и нагревает, переносит влагу и удивительные ароматы цветов. Для описания многих свойств воздуха и других газов используется модель идеального газа, в которой молекулы или атомы газов рассматриваются как упругие шары, которые находятся в постоянном хаотическом движении и обмениваются энергией при упругих столкновениях. Макроскопические параметры (давление, объем, температура),

характеризующие любые газы, близкие к идеальным, связаны уравнением состояния Клапейрона—Менделеева:

$$PV = mRT/M,$$

где P — давление, V — объем, m — масса газа, R — универсальная газовая постоянная, T — абсолютная температура, M — молярная масса, которая отражает специфику газа. Состояние данной массы газа однозначно определяется заданием любых пар макроскопических параметров: (P, V) , (P, T) , (V, T) . Третий параметр определяется из уравнения. Процессы взаимного изменения этих пар параметров при неизменном третьем называются **изопроцессами**: изотермическим ($T = \text{const}$), изохорным ($V = \text{const}$), изобарным ($P = \text{const}$).

1.2. Демонстрации. Наглядная и доступная демонстрация изопроцессов возможна с помощью известного опыта с «картезианским водолазом». Прозрачную высокую пластиковую бутылку (1,5 л) почти полностью заполняют холодной водой, до места перехода к сужению. Внутрь бутылки в воду опускают стеклянную пробирку высотой 7–10 см, открытым концом вниз и частично заполненную водой. На пробирке заранее наносятся деления для оценки объема оставшегося в ней воздуха. Опытным путем подбирается уровень заполнения водой части пробирки, чтобы пробирка-«водолаз» имела небольшую положительную плавучесть и располагалась вертикально. Бутылку герметично закрывают и устройство готово к демонстрациям.

Вода и воздух внутри пробирки за время демонстрации, которая проводится за 3–5 минут, практически не изменяются и поэтому процесс можно считать изотермическим. При сжатии бутылки давление внутри ее повышается, воздух внутри пробирки также подвергается сжатию и его объем уменьшается, что наблюдается по подъему уровня воды в пробирке. Плавучесть «водолаза» уменьшается, и он погружается на дно. Изменяя внешнее давление, легко остановить пробирку на любой глубине. По величине усилия, прикладываемого к стенкам бутылки, и изменению объема легко установить обратную пропорциональность давления и объема.

Вариант демонстрации изобарного процесса более длительный. Пробирка заполняется водой до уровня, создающего минимально отрицательную плавучесть, и находится у дна. Бутылка не закрывается и давление внутри постоянно (атмосферное). Далее бутылку с водолазом помещают в сосуд

с горячей водой ($70-80^{\circ}\text{C}$). Через 10–15 минут вода прогреется, воздух в пробирке увеличится в объеме и «водолаз» всплывет. Увеличение объема воздуха в пробирке видно в процессе нагревания и пропорционально увеличению температуры.

2. Цель и задачи экспериментального исследования. Оборудование

2.1. Цель исследования: изучение изопроцессов в приближении модели идеального газа.

2.2. Решаемые задачи:

- Определение зависимости изменения объема от температуры при постоянном давлении.
- Определение зависимости изменения давления от температуры при постоянном объеме.
- Определение зависимости изменения давления от объема при постоянной температуре.

2.3. Необходимое оборудование: измерительная линейка, липкая лента (скотч), 3–4 тонкостенных воздушных шарика, нитки, мензурка или мерный стакан емкостью 0,5–1,0 литра, пробирки или стеклянные трубки с линейной шкалой, длиной 20–30 см, пластиковые бутылки, пластина какого-либо листового материала (плотный картон, органическое стекло, текстолит толщиной 2–4 мм), термометр, вода, лед, нагреватель.

3. Экспериментальные исследования

3.1. Подготовка эксперимента. В мензурку помещают не раздутый, герметично завязанный воздушный шарик с объемом воздуха до $1/2$ полной вместимости мензурки.

Из листового материала вырезают диск, входящий в мензурку с небольшим, порядка 1 мм зазором, и накрывают им шарик с воздухом. Достойной заменой мензурки может быть любой сосуд цилиндрической формы с приклеенной липкой лентой миллиметровой шкалой. На диск-поршень помещают необходимый для опытов груз для создания давления, дополнительного к атмосферному. Грузом может служить набор гирь 0,5–1,0 кг или любой предмет нужной массы, в том числе и другой шарик, наполненный водой. Для уменьшения трения между стенками сосуда и поверхностью шарика их смазывают машинным маслом.

3.2. Варианты проведения экспериментов

3.2.1. Изучение зависимости изменения объема от температуры при постоянном давлении (изобарный процесс, закон Гей-Люссака)

Вариант 1. Охладите сосуд с шариком, прижатым крышкой с грузом, поместив его в резервуар (например, 5-литровое ведро), наполненный водой со льдом. Температуру воздуха, заключенного в шарике, измерьте вставленным в мензурку термометром.

После установления стационарной температуры снимите отсчет температуры T_1 и положение нижнего края поршня h_1 по шкале. Рассчитайте объем воздуха в шарике, используя измеренное ранее сечение сосуда (шкала может быть проградуирована сразу в единицах объема). Значения объема и температуры заносите в заранее заготовленную таблицу 1.

Таблица 1

$P_1 = \dots$ Па, № опыта	1	2	3	4	5
T , К					
V , м ³					
$P_2 = \dots$ Па, № опыта	1	2	3	4	5
T , К					
V , м ³					

Далее сосуд с шариком и тем же грузом поместите в ведро с теплой водой, нагрейте до температуры T_2 и снимите соответствующий отсчет h_2 . Процедуру нагревания повторите, увеличивая температуру водяной бани. У вас должно получиться три-пять значений температуры и объемов. По результатам эксперимента с использованием метода наименьших квадратов постройте зависимость $V(P_1, T)$ при выбранном давлении. Изменив величину давления, повторите весь процесс еще раз и получите зависимость $V(P_2, T)$. На основании полученных данных постройте обе зависимости в координатах (V, T) .

Вариант 2. Одну из пластиковых бутылок с отрезанным сверху коническим сужением заполните водой со льдом для получения температуры 0°C , несколько других (2–3) — водой от комнатной температуры и выше, с шагом $20\text{--}25^\circ\text{C}$.

Пробирка с линейной шкалой, нанесенной на стенку по всей длине, крепится липкой лентой со спиртовым термометром,

расположенным вдоль пробирки с наружной стороны. Резервуар термометра с жидкостью размещается у открытого конца пробирки.

Опустите пробирку в сосуд с наиболее нагретой водой открытым концом вниз, погружая в воду на некоторую глубину. После нагревания воздуха в пробирке (излишки воздуха выходят в виде пузырьков) ее, держа открытым концом вниз, поместите на такую же глубину в сосуд с более холодной, ближайшей по температуре, водой. По мере охлаждения вода поднимается и при установлении теплового равновесия останавливается. По шкале на пробирке зафиксируйте высоту столба воздуха в пробирке, аккуратно выньте ее из воды и перенесите в следующий сосуд, с очередным понижением температуры. Снимите очередной отсчет и процедуру охлаждения воздуха повторите до последнего сосуда, с водой при температуре 0°C . Постоянство давления в пробирке определяется одинаковой глубиной погружения границы воздух-вода в пробирке от поверхности воды в сосуде. Полученные данные занесите в таблицу и проанализируйте по методике, описанной в варианте 1.

3.2.2. Изучение зависимости изменения давления от температуры при постоянном объеме (изохорный процесс, закон Шарля). Сосуд с шаром охладите в воде со льдом до 0°C . Зафиксируйте отсчет положения поршня, причем на поршне должен находиться минимальный груз, обеспечивающий его горизонтальное положение.

Сосуд с шариком, без изменения нагрузки поршня, перенесите в теплую воду. При нагревании воздуха в шарике объем его возрастает и поршень поднимается вверх, давление остается прежним. Отслеживая стабильность температуры воздуха в шарике, добавьте на поршень груз, который сожмет расширившийся газ и опустит поршень до исходного состояния. Сечение поршня известно, вес добавленного груза легко определяется и, таким образом, рассчитывается увеличение давления при изменении температуры на величину ΔT_1 . Далее постройте зависимость $\Delta P(\Delta T)$.

3.2.3. Изучение зависимости изменения давления от объема при постоянной температуре (изотермический процесс, закон Бойля—Мариотта)

Вариант 1. Сосуд с шариком находится при комнатной температуре. Поршень нагружен минимальным грузом. Увеличьте

давление на газ путем добавления груза. В сумме с атмосферным давлением составит величину P_1 . Объем уменьшится на некоторую величину ΔV и станет равным V_1 . Последующие добавления груза дадут, соответственно, величины давления и объема. В координатах (P, V) постройте зависимость $P(V)$. Постройте еще одну изотерму, при постоянной температуре газа 0°C .

Вариант 2. (Идея опыта предложена О. Ф. Кабардиным и В. А. Орловым [5, с. 91].) Перечисленное выше оборудование необходимо дополнить пластиковой или резиновой трубкой с внутренним диаметром 6–10 мм и длиной около 2 метров. Один конец трубки герметично соедините со стеклянной трубкой, такого же диаметра, которая укрепляется на штативе.

Второй конец гибкой трубки соедините с воронкой или горлышком небольшой пластиковой бутылки с отрезанным дном. Располагая верхний, открытый конец на одном уровне с воронкой, заполните всю систему водой комнатной температуры. Закройте верхнее, свободное отверстие стеклянной трубки герметичной пробкой, оставляя 10–15 см воздуха. Изменение давления воздуха под пробкой в стеклянной трубке осуществляется подъемом или опусканием колена с воронкой.

Установите оба колена системы таким образом, чтобы уровни воды в них совпадали. В данном положении определите высоту столба воздуха и вычислите его объем, измерив предварительно внутренний диаметр трубки штангенциркулем или линейкой.

В этом положении давление P воздуха в трубке под пробкой равно атмосферному.

Поднимите воронку на максимальную высоту. Зафиксируйте перепад уровней воды, создаваемое этим перепадом дополнительное давление ΔP_+ и уменьшение объема воздуха в трубке ΔV_- :

$$PV = (P + \Delta P_+)(V - \Delta V_-).$$

Из уравнения найдите атмосферное давление $P = \Delta P_+(V - \Delta V_-)/\Delta V_-$. Далее, изменяя положение воронки относительно равновесного уровня, получите зависимость $P(V)$ и постройте график в координатах (P, V) .

4. Обработка экспериментальных данных, полученных в разных группах. Самостоятельная работа групп, оформление необходимых графиков и зависимостей.

5. Обсуждение результатов

Контрольные вопросы:

- Как выглядит уравнение состояния для идеального газа?
- Почему величина R в уравнении состояния называется универсальной газовой постоянной?
- При каких условиях модель идеального газа может быть применена для расчетов параметров реального газа?

По результатам обсуждения вопросов самостоятельно сформулируйте краткие выводы по проведенным исследованиям.

6. Задачи компьютерного моделирования

Решаемые задачи:

- Наблюдение процесса увеличения давления при уменьшении объема (при постоянной температуре).
- Определение в компьютерном эксперименте критических параметров вещества.
- Определение вещества, используемого в компьютерном эксперименте.
- Построение зависимости давления насыщенного пара от температуры.

7. Моделирование

7.1. Метод выполнения работы. В закрытом сосуде жидкость и ее пар могут находиться в состоянии динамического равновесия, когда число молекул, вылетающих из жидкости, равно числу молекул, возвращающихся в жидкость из пара. Такую систему называют двухфазной. Пар, находящийся в равновесии со своей жидкостью, называют насыщенным.

При повышении температуры давление насыщенного пара и его плотность возрастают, а плотность жидкости уменьшается из-за теплового расширения. При некоторой температуре плотности пара и жидкости становятся одинаковыми. Эту температуру принято называть критической температурой $T_{кр}$. При $T \geq T_{кр}$ исчезают физические различия между жидкостью и ее насыщенным паром.

7.2. Описание модели. Запустите на вашем компьютере программу «Физика в картинках». В открывшемся окне выберите книгу Термо, нажмите кнопку Изотермы реального газа.

В окне слева расположен экспериментальный объем, справа график изменения давления от объема при постоянной температуре. В центре шкала температуры, внизу кнопки Старт

и Выбор, с помощью которых можно выбирать температуру и запускать эксперимент. Значения давления, объема и температуры эксперимента показаны на табло (выше графика давления). Слева от окна демонстраций имеются кнопки дополнительных инструментов и сведений (в этой работе нам потребуется кнопка Таблицы).

7.3. Проведение эксперимента. Найдите в компьютерном эксперименте критическую изотерму реального газа, для которого построена компьютерная модель. Найдите в компьютерном эксперименте критические параметры $T_{кр}$, $P_{кр}$ и $V_{кр}$. Предполагая, что под поршнем находится 1 моль вещества, определите, какому реальному веществу соответствуют найденные параметры.

Задавая различную температуру и проводя моделирование, определите зависимость давления от температуры для данного вещества. Данные занесите в таблицу 2.

Таблица 2

T, K	480	500	520	540	560	580	600	620	640	650
P_0, Pa										

По данным таблицы постройте кривую равновесия $P_0(T)$ для данного вещества.

Откройте окно **Испарение и конденсация**.

По данным компьютерного эксперимента постройте кривую $P_0(T)$ для воды (составив таблицу 3, аналогично предыдущему заданию). Постройте график зависимости $P_0(T)$.

Выполните следующие задания:

Задание 1. Вода закипела при $T = 112^\circ C$. Каково внешнее давление? Получите ответ с помощью компьютерного эксперимента и подтвердите расчетом. Сравните полученное давление с давлением насыщенного пара при этой температуре.

Задание 2. На какую величину ΔT изменится температура кипения воды в горах, если внешнее давление $P = 0,817 \cdot 10^5$ Па? Получите ответ с помощью компьютерного эксперимента и подтвердите расчетом.

8. Обработка данных, полученных в разных группах. Самостоятельная работа учеников.

9. Сопоставление результатов экспериментальных и модельных исследований. Совместная работа учеников и организованная дискуссия.

10. Обсуждение результатов. Формулировка общих выводов

Контрольные вопросы:

- Почему после появления в объеме жидкости давление в нем остается постоянным?
- Как называется это давление?
- Как и почему на температуру кипения жидкости влияет атмосферное давление?
- Что такое критическая температура?
- Как будет вести себя зависимость давления от температуры при температурах выше критических?

По результатам обсуждения вопросов самостоятельно сформулируйте общие выводы по проведенному комплексному исследованию.

4.3. Электричество

4.3.1. Модуль 9. Закон Кулона

1. Введение. Демонстрация различных вариантов взаимодействия заряженных тел

1.1. Введение. Экспериментальные исследования в электростатике достаточно сложны. Особенно ярко это проявляется в опытах со статическим электричеством, которые проводятся в воздухе. В атмосфере всегда присутствуют подвижные электрические заряды, связанные с наличием в ней ионов, заряженных частиц аэрозолей, и поэтому атмосферный воздух обладает проводимостью. В безоблачной, чистой атмосфере равновесное количество заряженных частиц создает статическое электрическое поле. У земной поверхности в сухой, чистой атмосфере напряженность электрических полей колеблется от 50 до 150 В/м. По измеренным значениям напряженности установлен некоторый эффективный заряд Земли -10^5 Кл. Атмосфера обладает эквивалентным положительным зарядом [11].

1.2. Демонстрация различных вариантов взаимодействия заряженных тел. В школе опыты по электростатике реализуются оптимально в зимнее время года, в условиях сухой атмосферы в здании и кабинете физики.

Хорошо получаются в этих условиях опыты с натиранием различных тел шерстяными и шелковыми тканями (особенно

хороши шерстяные варежки). Для демонстраций мы предлагаем использовать полоски полиэтиленовой пленки, подвешенные на шелковой нити. Полоски электризуются натиранием шерстью и бумагой и сравниваются на притяжение и отталкивание.

Хорошо проходят опыты с двумя сложенными вместе полосками, натираемыми одновременно. Полоски натирают и разнимают двумя руками, после этого сближая, показывают их разноименную заряженность.

Из алюминиевой фольги изготавливают небольшие гильзы (накручивая фольгу на круглый карандаш), гильзы подвешивают на шелковых нитях и заряжают сначала разноименными зарядами (притяжение), а затем одноименными зарядами (отталкивание). Для зарядки используют эбонитовый гладкий стержень, натирая его варежкой (отрицательный заряд) и стеклянный стержень, натирая его искусственным шелком (положительный заряд).

Хороший демонстрационный эффект имеет опыт с бумажным султанчиком. Подобные опыты хороши еще тем, что султанчики и гильзы могут быть изготовлены учениками самостоятельно (и всегда немного по-разному), в опыты может быть внесена некоторая соревновательность между школьниками — лучший султанчик (в плане зарядки) или лучший заряжающий.

2. Цель и задача экспериментального исследования. Оборудование

2.1. Цель исследования: качественная демонстрация закона Кулона. Зависимость силы взаимодействия от расстояния между заряженными телами.

2.2. Решаемые задачи:

- Экспериментальное установление зависимости силы взаимодействия заряженных тел от расстояния.
- Построение графиков зависимости $F(x)$ и $F(x^2)$.
- Сравнительный анализ графиков зависимостей $F(x)$ и $F(x^2)$ и установление характера зависимости силы взаимодействия двух одинаковых зарядов от расстояния между ними.

2.3. Необходимое оборудование: высоковольтный источник постоянного напряжения (альтернатива: электрофорная машина, набор для получения зарядов натиранием); электромметр; диэлектрические стержни (пластик, стекло); эбонитовые па-

лочки; измерительная линейка; лабораторные школьные весы; пробные тела — маленькие полые шары (гильзочки), изготовленные из алюминиевой фольги и подвешенные на тонких шелковых нитях.

3. Экспериментальные исследования

3.1. Метод выполнения работы. На штативе подвешиваются два пробных тела таким образом, чтобы тела соприкасались и нити подвеса были параллельны. Длина нитей подбирается экспериментально, после пробной электризации тел. Электрический заряд, полученный, например, от высоковольтного генератора, переносится на тела. Заряд, при условии одинаковости тел, распределяется равномерно между ними и тела отталкиваются друг от друга.

Величина расхождения тел и длина нити позволяют определить угол расхождения. Используя значения угла и массы тел, рассчитывают возвращающую силу $F_v = mg \sin \alpha$, где α — угол отклонения нити от вертикали, m — масса пробного тела, g — ускорение свободного падения. При малых углах $\sin \alpha \cong \alpha$, и силу F_v можно представить в условных единицах:

$$F_v \cong \alpha \cong x/l,$$

где x — отклонение тела от исходного положения, l — длина подвеса.

3.2. Подготовка эксперимента. Закрепите на штативе два пробных тела (легкие металлические гильзы) на шелковых нитях, таким образом, чтобы тела соприкасались и нити подвеса были параллельны. Длина нитей подбирается экспериментально, после пробной электризации тел. Электрический заряд переносится на тела. Заряд, при условии одинаковости тел, распределяется равномерно между ними и тела отталкиваются друг от друга.

3.3. Проведение эксперимента. После первой электризации, по возможности точно повторяя процедуру электризации, передайте заряд двум пробным телам, раздвинутым на некоторое расстояние, но электрически замкнутым свободно лежащей на пробных телах проводящей полоской фольгой.

Приблизленно величина переданного заряда сохраняется, но расстояние увеличивается в два раза. Повторите процедуру для расстояния в два раза большего. Занесите данные в таблицу 1.

Постройте зависимости $F(x)$ и $F(x^2)$. Проанализируйте полученные зависимости и сделайте заключение о характере

Таблица 1

R , м			
x , м			
F , Н			

зависимости силы взаимодействия двух одинаковых зарядов от расстояния между ними.

4. Обработка экспериментальных данных, полученных в разных группах. Самостоятельная работа групп, оформление необходимых графиков и зависимостей.

5. Обсуждение результатов

Контрольные вопросы:

- Чем определяется сила взаимодействия между двумя заряженными телами?
- Как зависит сила взаимодействия от расстояния между зарядами?

По результатам обсуждения вопросов самостоятельно сформулируйте краткие выводы по проведенным исследованиям.

6. Задачи компьютерного моделирования

Решаемые задачи:

- Определение зависимости силы взаимодействия двух заряженных тел от величины заряда.
- Определение зависимости силы взаимодействия двух заряженных тел от расстояния между ними.
- Сведение воедино полученных зависимостей и вывод закона взаимодействия двух неподвижных зарядов.

7. Моделирование

7.1. Описание модели. Запустите на вашем компьютере программу «Физика в картинках». Откройте в верхней правой части окна книгу История. Нажмите кнопку Опыт Кулона.

В центральной части открывшегося окна изображены крутильные весы в изометрии (справа) и вид сверху (слева). Между ними показана шкала закручивания нити подвеса, со стрелкой, позволяющей закручивать нить на угол до $\pm 720^\circ$. Внизу окна расположены шарики с зарядами разной величины и знака. Между шариками находится заземленная шина.

Курсор в области модели заменен палочкой с нейтральным шариком на конце. Зарядка шаров в крутильных весах происходит следующим образом. Подвижным шариком касаемся заряженного и, нажимая левую кнопку мыши, распределяем заряд равномерно между подвижным и неподвижным шариками. Затем перетаскиваем мышью подвижный шарик к крутильным весам и заряжаем один из двух шариков (при этом заряд также распределяется поровну).

В верхнем углу окна высвечивается заряд шариков Q_1 и Q_2 , расстояние между ними и сила взаимодействия между шариками. Перетаскивая заряд с неподвижных шариков на шарики в крутильных весах, можно сообщить последним заряд различного знака и величины. Уменьшить заряды на весах можно, снимая заряд подвижным шариком и разряжая его на заземленной шине.

7.2. Работа с моделью. Зафиксируйте значение заряда Q_1 и расстояние между зарядами (например, $R = 70 \cdot 10^{-2}$ м). Изменяя Q_2 от $10 \cdot 10^{-12}$ Кл до $40 \cdot 10^{-12}$ Кл, заполните таблицу 2.

$$Q_1 = 30 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}; R = 70 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Постройте графически зависимость F от Q_2 .

Таблица 2

$Q_2, \text{Кл} \cdot 10^{-12}$	10	15	20	25	30	35	40
$F, \text{Н} \cdot 10^{-7}$							

Таблица 3

$Q_1, \text{Кл} \cdot 10^{-12}$	10	15	20	25	30	35	40
$F, \text{Н} \cdot 10^{-7}$							

Зафиксируйте Q_2 и R . Изменяя величину заряда Q_1 , заполните таблицу 3 и постройте графически зависимость F от Q_1 (выберите произвольно).

$$Q_2 = \text{const}; R = \text{const.}$$

Проведите анализ зависимостей и установите пропорцию для силы взаимодействия.

Сообщите шарикам одинаковые заряды (лучше брать максимальные) и, меняя расстояние с помощью закрутки, фикси-

Таблица 4

$R, \text{ м}$	1,7	1,5	1,3	1,1	0,9	0,8	0,7	0,6
$F, \text{ Н} \cdot 10^{-9}$								

руйте силу взаимодействия между зарядами. Занесите данные в таблицу 4.

$$Q_1 = Q_2 = \text{const.}$$

Постройте график $F(R)$, сделайте анализ и определите зависимость силы взаимодействия от расстояния между зарядами.

Сведите все три зависимости воедино и определите зависимость силы взаимодействия зарядов от величины зарядов и расстояния между ними.

8. Обработка данных, полученных в разных группах. Самостоятельная работа учеников.

9. Сопоставление результатов экспериментальных и модельных исследований. Самостоятельная работа учеников и организованная дискуссия.

10. Обсуждение результатов. Формулировка общих выводов

Контрольные вопросы:

- Как взаимодействуют одноименные и разноименные заряды?
- Во времена Кулона еще не было общепринятых единиц электрического заряда. Каким способом были получены кратные заряды?
- На какой известный вам закон похож закон Кулона?

По результатам обсуждения вопросов и проведенных учебных исследований самостоятельно сформулируйте общие выводы и подготовьте сообщение о проделанной работе в форме научного доклада.

4.3.2. Модуль 10. Движение заряженных частиц в электрическом поле

1. Введение. Демонстрация

1.1. Введение. Экспериментальное изучение движения заряженных частиц в электрическом поле реализуется с помощью учебного осциллографа. Фактически проводятся исследования

влияния электрического поля на движущийся электрон с помощью электронно-лучевой трубки.

Целесообразно работу начать с демонстрации учебного макета электронно-лучевой трубки (если таковая имеется в кабинете физики), либо подробно рассмотреть устройство электронно-лучевой трубки осциллографа, кинескопа телевизора или монитора компьютера на заранее подготовленном макете. Далее учащимся предлагается ознакомиться с устройством, конструктивными особенностями и адаптированной к уровню подготовки школьников принципиальной схемой осциллографа. В этой части работы подробно рассматриваются правила работы с прибором.

1.2. Демонстрация. Включить осциллограф, прогреть, настроить фокусировку и яркость луча. Установить нулевое напряжение развертки по оси X . Чувствительность входа по оси Y установить 3–5 В. Собрать регулируемый делитель напряжения с источником постоянного тока (элементом типа «Крона») напряжением 9 В. Подать напряжение на вход Y . Параллельно входу подключить вольтметр для контроля подаваемого напряжения. По положению электронного пучка на экране установить величину смещения электронов в плоскости экрана.

Поменять полярность подаваемого напряжения и повторить опыт.

Увеличить напряжение на входе до величины, отклоняющей пучок электронов за пределы экрана. С помощью делителя входа Y вернуть пучок в пределы экрана.

Включить развертку по оси X . Подать на вход Y переменное напряжение от звукового генератора или из сети. Установить режим развертки для получения синусоидальной кривой. Восстановить траекторию движения электронов в переменном электрическом поле управляющих пластин.

По данным ускоряющего напряжения трубки осциллографа оценить скорость электрона, время пролета электроном ускоряющих пластин, полученное ускорение и полученную при этом проекцию скорости вдоль оси Y . Изобразить в рабочей тетради схему движения электрона в электронно-лучевой трубке. Оценить предельное временное разрешение учебного макета осциллографа.

2. Цель и задачи экспериментального исследования. Оборудование

2.1. Цель исследования: изучить действие электрического поля на движущиеся электроны.

2.2. Решаемые задачи:

- Экспериментальное установление качественной зависимости силы, действующей на электрон, от величины напряженности электрического поля.
- Разработка метода определения величины напряженности электрического поля по измеренным смещениям электронного пучка.
- Проведение измерений.

2.3. Необходимое оборудование: электронный осциллограф, источник постоянного напряжения, соединительные провода, вольтметр, линейка или рулетка, масштабная тонкая бумага.

3. Экспериментальные исследования

3.1. Метод выполнения работы. Начало работы связано с детальным изучением устройства осциллографа и принципа его действия. Наиболее удобен для этой цели школьный демонстрационный макет осциллографа, в котором электронно-лучевая трубка открыта, видны отклоняющие пластины, и линейные размеры элементов электронной трубки могут быть измерены. Необходимо указать также данные об ускоряющем напряжении электронной трубки осциллографа. Конкретная геометрия электронно-лучевой трубки позволяет рассчитать кинематические параметры траектории электрона.

3.2. Проведение эксперимента. Изучить устройство электронно-лучевой трубки, измерить длину отклоняющих пластин a , расстояния между пластинами d , длину пути L от пластины до экрана осциллографа. Изобразить схему пролета электронов в электронно-лучевой трубке с указанием действующих сил. Включить осциллограф и прогреть его в течение 3–5 мин. Сфокусировать электронный пучок и установить след электронного пучка в середине экрана. Включить источник постоянного напряжения, прогреть и с помощью соединительных проводов подать напряжение на одну из пар отклоняющих пластин. Измерить величину отклонения на экране y пучка электронов в зависимости от поданного на пластины потенциала U . Полученные данные занести в таблицу 1.

Таблица 1

№ опыта	U , В	y , мм	a , мм	d , мм	L , мм	E , В/м
1						
2						
3						

4. Обработка экспериментальных данных, полученных в разных группах. Самостоятельно вывести рабочую формулу для нахождения напряженности электрического поля, исходя из кинематической схемы движения электрона. По результатам измерений рассчитать величину E и погрешность измерений ΔE .

5. Обсуждение результатов. Началом обсуждения могут быть контрольные вопросы и задания на понимание смысла выполненных экспериментальных исследований.

- Какие силы действуют на электрон после вылета из катода электронной пушки?
- Какие параметры электронно-лучевой трубки определяют время пролета электрона до экрана?
- Каков максимальный угол отклонения пучка электронов в поперечном электрическом поле?
- Нужно ли учитывать влияние силы тяжести на электрон во время действия на него электрической силы?

По результатам обсуждения вопросов самостоятельно сформулируйте краткие выводы по проведенным исследованиям.

6. Задачи компьютерного моделирования

Решаемые задачи:

- Определение ускоряющей разности потенциалов.
- Определение зависимости скорости электрона от ускоряющей разности потенциалов.
- Построение зависимостей скорости и координаты смещения заряда от напряжения на конденсаторе.
- Построение аналогии между законом всемирного тяготения и законом Кулона.

7. Моделирование

7.1. Описание моделей. Запустите на компьютере программу «Открытая физика 1.1». В окне Содержание выберите книгу

Электричество и магнетизм, в открывшемся окне нажмите кнопку **Движение заряда в электрическом поле**.

В верхней части открывшегося окна показан плоский конденсатор (оси координат X и Y прорисованы внутри конденсатора). Электрический заряд расположен в начале координат. Ниже есть регуляторы управления движением заряда и табло значений параметров движения заряда в электрическом поле. Внизу помещены кнопки **Старт** и **Выбор**. Справа появляется окно **Движение заряда в электрическом поле** (можно пока закрыть его).

Потренируйтесь в регулировании движения заряда в конденсаторе.

7.2. Метод выполнения работы. Работа электрического поля равна:

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Можно считать, что на электрон в электрическом поле действуют только кулоновские силы (другими силами пренебрежем). В этом случае изменение кинетической энергии электрона равно работе сил электрического поля:

$$\Delta W_k = A = q(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Начальную скорость электрона можно считать равной нулю, поэтому кинетическая энергия электрона в конце пути

$$\frac{mv_{0x}^2}{2} = q(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Скорость электрона в конце пути: $v_{0x} = \sqrt{\frac{2q(\varphi_1 - \varphi_2)}{m}}$.

Воздействуя на электрон постоянным электрическим полем, мы ускоряем его до скорости v_{0x} . Если теперь направить его параллельно пластинам конденсатора, то скорость по X остается постоянной (время движения между пластинами $t = \frac{l}{v_{0x}}$).

В это же время на электрон по оси Y действует постоянная сила $F_Y = qE$, следовательно смещение электрона от первоначального направления равно:

$$s = \frac{a_Y t^2}{2}.$$

Ускорение электрона равно:

$$a_Y = \frac{F_Y}{m} = \frac{qE}{m} = \frac{e(\varphi_2 - \varphi_1)}{md}.$$

Вдоль оси Y в этом случае на электрон сила не действует.

7.3. Проведение моделирования. В первую очередь зададимся вопросом, какую разность потенциалов должен пройти электрон, чтобы набрать скорость по оси X от 10^6 до $5 \cdot 10^6$ м/с.

Установите в модели скорость от 10^6 м/с до $5 \cdot 10^6$ м/с, рассчитайте необходимую разность потенциалов и заполните таблицу 2.

Таблица 2

$v_{0x} \times 10^6$, м/с	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
U , В										

Постройте график зависимости $v_{0x}(U)$. Проведите его анализ и определите аналитическую зависимость скорости электрона от разгоняющего напряжения.

Установите регуляторами скорость v_{0x} максимальной ($5 \cdot 10^6$ м/с), а скорость $v_{0y} = 0$. Изменяя разность потенциалов на конденсаторе от -10 В до $+10$ В, фиксируйте координату по Y и скорость v_{0y} . Заполните таблицу 3.

Таблица 3

U , В	-10	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10
$v_{0y} \times 10^6$, м/с											
$Y \times 10^{-3}$, м											

Постройте зависимости v_{0y} и Y от разности потенциалов.

Вернитесь к модели, установите максимальные скорости по X и Y , а разность потенциалов на конденсаторе 150 В. Проведите моделирование. Сравните движение заряда с движением тела в поле тяжести Земли.

Запишите рядом закон всемирного тяготения и закон Кулона. Попробуйте провести аналогию. Чему в законе Кулона соответствуют m и g ?

8. Обработка данных, полученных в разных группах. Самостоятельная работа учеников.

9. Сопоставление результатов экспериментальных и модельных исследований. Самостоятельная работа учеников и организованная дискуссия. Роль учителя — организация и консультация.

10. Обсуждение результатов. Формулировка общих выводов. Началом обсуждения, как было отмечено в п. 5, могут быть

контрольные вопросы на понимание смысла выполненных модельных исследований и их соответствия эксперименту.

- Из последнего моделирования особенно хорошо видно, что движение заряда по оси Y является равноускоренным. В то же время, при изменении напряжения на управляющих электродах осциллографа луч смещается на экране на одно и то же расстояние. Как можно объяснить этот факт?
- Какой величине в законе Кулона соответствует ускорение свободного падения в законе всемирного тяготения?
- Какой величине в законе Кулона соответствует масса тела в законе всемирного тяготения?

По результатам обсуждения вопросов и проведенных учебных исследований самостоятельно сформулируйте общие выводы и подготовьте сообщение о проделанной работе в форме научного доклада.

4.3.3. Модуль 11.

Конструирование электрических цепей

1. Введение. Демонстрации

1.1. Введение. Варьируя составляющие части электрической цепи (катушки индуктивности, конденсатора, резистора) и их соединение, можно наблюдать различные световые эффекты. В данной работе будут рассмотрены типы соединений, а также определено внутреннее сопротивление источника тока.

1.2. Демонстрации. Для наблюдения необходимо собрать электрическую цепь, имеющую различные элементы (рис. 1). В качестве излучателя можно использовать обыкновенные лам-

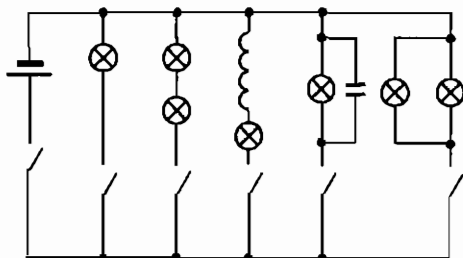


Рис. 1

почки накаливания и наблюдения проводить по яркости их светимости, времени загорания и т. д.

Переключая ключи разных ветвей, пронаблюдайте зависимость яркости свечения ламп при разных способах включения, и времени загорания от наличия дополнительных элементов в цепи.

Сделайте выводы из наблюдаемых явлений. Каким образом в вашей квартире подключаются бытовые приборы?

2. Цель и задача экспериментального исследования. Оборудование

2.1. Цель исследования: конструирование электрических цепей. Определение внутреннего сопротивления гальванического элемента.

2.2. Решаемые задачи:

- Проверка выполнения закона Ома для участка цепи.
- Определение внутреннего сопротивления источника тока.

2.3. Необходимое оборудование: 2 резистора, амперметр, вольтметр, соединительные провода, источник тока — гальванический элемент (желательно квадратная батарейка).

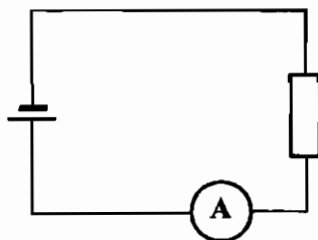


Рис. 2. Принципиальная схема установки

3. Экспериментальные исследования

3.1. Метод выполнения работы. Запишем закон Ома для полной цепи: $E = I(R + r)$, где E — ЭДС источника, I — сила тока, r — внутреннее сопротивление источника, R — сопротивление внешней цепи.

При использовании двух резисторов с известным сопротивлением и амперметра можно определить внутреннее сопротивление источника тока.

3.2. Проведение эксперимента. Изобразите электрическую схему эксперимента, соберите цепь, проведите измерения, данные запишите в таблицу 1.

Таблица 1

R	I

По данным ваших измерений рассчитайте внутреннее сопротивление источника тока. Проверьте результаты расчета экспериментально (если это возможно).

4. Обработка экспериментальных данных, полученных в разных группах. Самостоятельная работа групп, оформление необходимых графиков и зависимостей.

5. Обсуждение результатов

Контрольные вопросы:

- Какие внутренние сопротивления имеют вольтметр и амперметр?
- С какой целью источники тока включаются параллельно или последовательно?
- Чем отличаются ЭДС, разность потенциалов и напряжение источника тока?
- При каких условиях можно измерить внутреннее сопротивление источника тока?

По результатам обсуждения вопросов самостоятельно сформулируйте краткие выводы по проведенным исследованиям.

6. Задачи компьютерного моделирования

Решаемые задачи:

- Создание и расчет емкостных цепей.
- Создание и расчет активного сопротивления электрических цепей.
- Создание модели источника тока и расчет его внутреннего сопротивления.

7. Моделирование

7.1. Создание и расчет емкостных цепей. Запустите на вашем компьютере программу «Физика в картинках». Откройте в

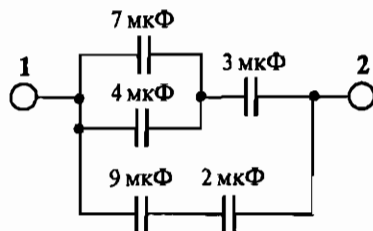


Рис. 3

верхней части окна книгу **Электричество и магнетизм**. Нажмите кнопку **Конструктор конденсаторов**.

В открывшемся окне справа есть пять кнопок. Их названия (сверху вниз): **Проводник**, **Конденсатор**, **Удалить**, **Измерить**, **Помощь**. Нажимая любую из первых четырех кнопок, а за ней кнопку **Помощь**, ознакомьтесь с инструкцией установки и удаления элементов на рабочем поле. Потренируйтесь в установке и удалении различных элементов электрической цепи. Теперь вы готовы к работе.

Создайте в рабочем поле схему, состоящую из трех конденсаторов, соединенных параллельно. Вначале создайте конденсаторы одинаковой емкости, затем различной. Рассчитайте значение емкости получившейся цепи. Установите измерительные клеммы и измерьте емкость. Сравните результаты расчетов и измерений.

Создайте в конструкторе схему, приведенную на рис. 3. Рассчитайте емкость между точками 1 и 2. Проверьте расчеты на модели.

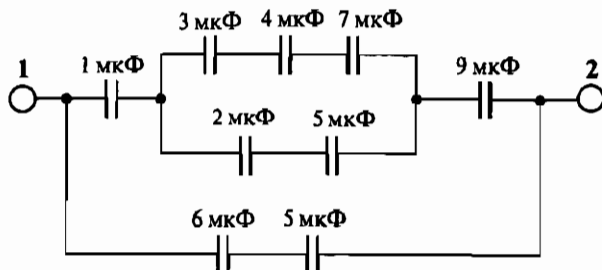


Рис. 4

Создайте в конструкторе схему, приведенную на рис. 4. Рассчитайте емкость между точками 1 и 2. Проверьте расчеты на модели.

7.2. Параллельное и последовательное соединение резисторов. Проверка закона Ома для полной цепи. Запустите на компьютере программу «Открытая физика 1.1». В Содержании откройте книгу Электричество и магнетизм, выберите модель Цепи постоянного тока.

Познакомьтесь с моделью, потренируйтесь в создании и измерении различных цепей.

Согласно закону Ома для полной цепи, ЭДС источника, его внутреннее сопротивление, сила тока в цепи и сопротивление внешней цепи связаны соотношением $I = \frac{E}{R+r}$. Если к исследуемому источнику тока подключать поочередно два резистора с разными сопротивлениями, то измеряя при этом силу тока в обоих случаях, можно записать два уравнения, из которых легко вычислить ЭДС и внутреннее сопротивление источника:

$$I_1 = \frac{E}{R_1 + r} \quad \text{и} \quad I_2 = \frac{E}{R_2 + r}.$$

Соберите цепь, состоящую из батареи с ЭДС ($E = 4 \text{ В}$) и двух последовательно соединенных резисторов $R_1 = 1 \text{ Ом}$ и $R_2 = 9 \text{ Ом}$. Включите в цепь амперметр. Подключите к резистору R_2 вольтметр (для измерения напряжения на резисторе). Рассчитайте значение напряжения на втором резисторе и ток в цепи. Проведите моделирование и сравните полученные результаты с вашим расчетом.

Соберите цепь, приведенную на рис. 5.

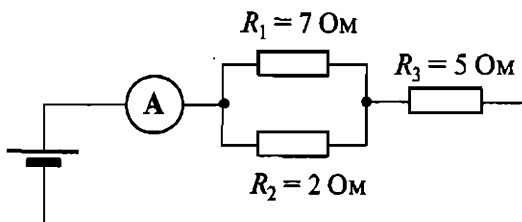


Рис. 5

Рассчитайте значения тока в цепи и напряжения на резисторе R_3 . Подключите к третьему резистору вольтметр и проведите моделирование. Сравните результаты расчетов и моделирования.

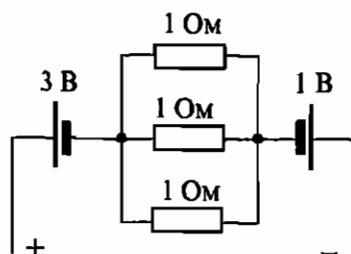


Рис. 6

Соберите источник питания по схеме на рис. 6 (в дальнейшем будем обозначать его на схеме Ист. X). Соберите электрическую цепь по схеме на рис. 7 ($R_1 = 1 \text{ Ом}$). Измерьте силу тока. Замените резистор R_1 на $R_2 = 9 \text{ Ом}$ и измерьте новую силу тока. Вычислите внутреннее сопротивление источника тока и его ЭДС. Полученные значения занесите в таблицу 2.

Таблица 2

$I_1, \text{ А}$	$I_2, \text{ А}$	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$r, \text{ Ом}$	ЭДС, В

Сравните вычисленное значение с полученным в моделировании (для измерения ЭДС отключите от источника питания все потребители и подключите к нему вольтметр). Сделайте вывод.

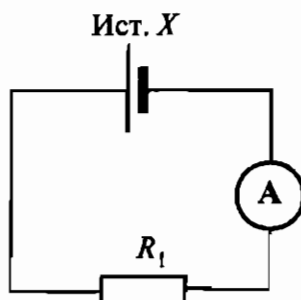


Рис. 7

8. Обработка данных, полученных в разных группах. Самостоятельная работа учеников.

9. Сопоставление результатов экспериментальных и модельных исследований. Самостоятельная работа учеников и организованная дискуссия.

10. Обсуждение результатов. Формулировка общих выводов. Началом обсуждения могут быть контрольные вопросы на понимание смысла выполненных модельных исследований и их соответствия эксперименту.

Контрольные вопросы:

- По каким правилам рассчитываются емкости цепей?
- По каким правилам рассчитывается активное сопротивление цепи?
- Каковы основные причины параллельного и последовательного присоединения измерительных приборов?

По результатам обсуждения вопросов и проведенных учебных исследований самостоятельно выведите правила соединения емкостей и активных сопротивлений, сформулируйте общие выводы и подготовьте сообщение о проделанной работе в форме научного доклада.

4.3.4. Модуль 12. Резонанс в RLC-контуре

1. Введение. Демонстрации

1.1. Введение. Как правило, все электрические приборы созданы для того, чтобы использовать их в практических целях. Электрические цепи в приборах содержат разнообразные элементы: соединительные провода и шины, сопротивления, катушки индуктивности, конденсаторы. Объединенные в единый блок или контур омическое сопротивление, индуктивность и емкость образуют RLC-контур, который нашел широкое применение в радиоаппаратуре. Каждый из нас, не задумываясь, пользуется этой конструкцией. Любой радиоприемник содержит такой контур, используемый для точной настройки на частоту передающей станции. Так, подкручивая ручку приемника, мы меняем либо емкость конденсатора, либо индуктивность катушки, тем самым настраивая приемник на ту или иную частоту. В процессе настройки мы задаем такие параметры контура, чтобы его собственные колебания совпадали с колебаниями передающей радиостанции.

1.2. Демонстрация различных систем, входящих в резонанс. Для наблюдения вхождения RLC-контура в резонанс нам понадобится любой радиоприемник. Подкручивая ручку настройки, внимательно вслушайтесь в звук. На частотах, близких к резонансной, на которой сигнал самый чистый (звучание четкое), можно услышать сквозь шум и слабое звучание сигнала искомой станции. Этот сигнал по мере приближения к резонансной частоте нарастает и затем, по мере удаления от нее, уменьшается. При этом данный эффект наблюдается при частотах больших и меньших, чем резонансная частота передающей станции. Определите по шкале радиоприемника интервал частот, на которых происходит усиление и спад сигнала станции.

2. Компьютерное моделирование

2.1. Цели и задачи компьютерного моделирования. Цель исследования: изучение механизма возникновения вынужденных электрических колебаний и вхождения системы в резонанс; определение зависимости тока в контуре от частоты генератора.

2.1.2. Задачи компьютерного моделирования:

- Определение собственной частоты колебательного контура, выяснение ее связи с резонансной частотой.
- Определение понятия добротности контура.
- Влияние активного сопротивления на резонанс системы.
- Создание «идеальной» модели системы, входящей в резонанс.

3. Моделирование

3.1. Описание моделей. Запустите на вашем компьютере программу «Открытая физика 1.1». В Содержании откройте книгу Электричество и магнетизм, нажмите кнопку «Вынужденные колебания в RLC контуре». Появившееся окно эксперимента разбито на несколько частей (рис. 1).

В левой верхней части окна изображена электрическая схема контура. В правой верхней части окна расположена резонансная кривая контура. В левой нижней части находятся движки изменения сопротивления, индуктивности, емкости контура и частоты колебаний генератора. В правой нижней части окна показана векторная диаграмма напряжений и тока в элементах контура. Кнопки сверху слева вызывают звуковое

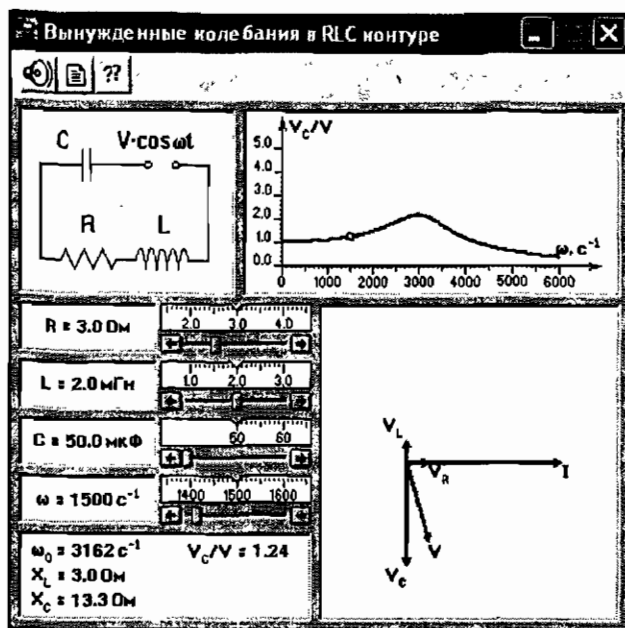


Рис. 1

сопровождение, документ с теоретической частью и справочную информацию.

Для дальнейшей работы вы должны знать следующую информацию:

- На какой частоте происходят вынужденные колебания?
- При каких условиях наступает резонанс в колебательном контуре?

Формулы для расчетов индуктивного сопротивления X_L , емкостного сопротивления X_C , частоты колебаний ν и циклической частоты колебаний ω можно обнаружить в окне Документ, открываемом щелчком мыши по значку в левом верхнем углу окна эксперимента.

4. Метод выполнения работы. Ознакомьтесь с работой модели и регуляторами управления.

Выберите значения параметров RLC-контра: $C = 50$ мкф; $R = 1$ Ом; $L = 2$ мГн. Рассчитайте собственную циклическую частоту ω_0 и собственную частоту ν_0 контра.

Определите (в условиях предыдущей задачи) в компьютерном эксперименте (в состоянии резонанса) отношение амплитуды напряжения на конденсаторе V_C к амплитуде напряжения генератора V (это отношение называется добротностью контура).

Увеличивайте сопротивление R , отслеживая добротность контура $Q = V_C/V$ в состоянии резонанса. Данные занесите в таблицу 1.

Таблица 1

R , Ом	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	5,0	6,0
Добротность										

Постройте график зависимости добротности контура от активного сопротивления.

Рассчитайте X_C , X_L для данной колебательной системы в состоянии резонанса (при условиях: $C = 50$ мкФ; $R = 1$ Ом; $L = 2$ мГн). Проведите компьютерный эксперимент и сравните экспериментальные значения ω , X_C , X_L , ν с расчетными.

Действующее значение напряжения переменного тока на генераторе 4 В. Активное сопротивление $R = 2$ Ом, $C = 50$ мкФ, $L = 2$ мГн. Используя компьютерную модель, определите (или рассчитайте) недостающие величины и заполните таблицу 2.

Таблица 2

ω , с ⁻¹	1260	1880	2510	3140	3770	4400	5020	5650
Z , Ом								
I , А								

Постройте график зависимости действующего значения тока в контуре от циклической частоты.

5. Обработка данных, полученных в разных группах. Самостоятельно произвести выводы и расчеты всех величин, упомянутых в тексте п. 4. Построить необходимые зависимости.

6. Обсуждение результатов. Формулировка выводов. Началом обсуждения могут быть контрольные вопросы на понимание смысла выполненных модельных исследований.

Контрольные вопросы:

- При каких условиях наступает резонанс в колебательном контуре?
- Почему X_L и X_C называют реактивным сопротивлением?
- В чем отличие реактивного и активного сопротивлений?
- Что такое добротность контура? При каких условиях она выше?
- Что произойдет с добротностью, если активное сопротивление упадет до нуля?

По результатам обсуждения вопросов и проведенного моделирования самостоятельно сформулируйте варианты задач для экспериментальных исследований.

7. Цель и задачи экспериментального исследования. Оборудование

7.1. Цель исследования: изучение резонанса в цепи переменного тока. Определение добротности и волнового сопротивления контура.

7.2. Решаемые задачи:

- Исследование зависимости силы тока от частоты в цепи из последовательно соединенных резистора, катушки и конденсатора.
- Определение условий электрического резонанса.
- Определение добротности и волнового сопротивления контура.
- Определение индуктивности неизвестной катушки.

7.3. Необходимое оборудование: генератор звуковой ГЗ-109; магазин конденсаторов с изменяемой емкостью от 0,5 до 60 мкФ; батарея конденсаторов на 40 мкФ; катушка индуктивности; провода соединительные; амперметр и вольтметр переменного тока, омметр (собраны в одном приборе).

8. Экспериментальные исследования

8.1. Метод выполнения работы. В электрической цепи из последовательно включенных резистора, конденсатора и катушки под действием переменного напряжения, изменяющегося со временем по гармоническому закону, возникают вынужденные гармонические колебания силы тока. При постоянной амплитуде колебаний напряжения генератора амплитуда колебаний напряжения на конденсаторе и силы тока в цепи зависит от частоты.

На низких частотах емкостное сопротивление конденсатора переменному току X_C очень велико. При увеличении частоты приложенного напряжения емкостное сопротивление конденсатора X_C убывает. Индуктивное сопротивление X_L катушки мало на низких частотах, но увеличивается с ростом частоты.

При некоторой частоте $\nu_0 = \omega_0/2\pi$, называемой резонансной частотой цепи, индуктивное сопротивление катушки X_L равно емкостному сопротивлению конденсатора X_C . Амплитуда колебаний напряжения на конденсаторе при резонансной частоте ν_0 равна амплитуде колебаний напряжения на катушке. Фазы колебания напряжения на конденсаторе и катушке отличаются на π , поэтому сумма напряжений V_L на идеальной катушке и V_C на конденсаторе при резонансе равна нулю. Полное напряжение V при резонансе равно напряжению V_R на резисторе сопротивлением R . При резонансной частоте амплитуда колебаний силы тока в цепи достигает максимального значения, так как общее сопротивление цепи минимально и равно активному сопротивлению цепи.

8.2. Проведение эксперимента. Соберите электрическую цепь по схеме, представленной на рис. 2.

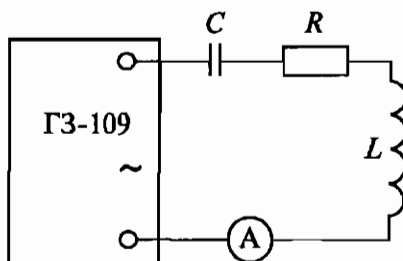


Рис. 2

Проведите измерения напряжения на конденсаторе или силы тока в цепи на различных частотах, изменяя частоту переменного напряжения, подаваемого с выхода генератора звуковой частоты. Постройте график зависимости силы тока в цепи от частоты и найдите резонансную частоту ν_0 колебательного контура, при которой амплитуда колебаний силы тока в цепи достигает максимального значения:

$$\nu_0 = 1/T = 1/2\pi\sqrt{LC}, \quad \omega_0 = 1/\sqrt{LC}.$$

По закону Ома для последовательной цепи переменного тока сила тока определяется выражением:

$$I = V/Z = V/\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}.$$

При резонансе индуктивное сопротивление X_L равно емкостному сопротивлению X_C , поэтому сила тока в цепи равна

$$I_p = V/R.$$

В условиях резонанса индуктивное сопротивление X_L катушки и равное ему емкостное сопротивление X_C конденсатора называется волновым сопротивлением ρ последовательного контура:

$$\rho = \omega_0 L = 1/\omega_0 C = \sqrt{L/C}.$$

Напряжение V_p на конденсаторе (или катушке) при резонансе равно

$$V_{cp} = I_p \rho = V \sqrt{L/C}/R,$$

а напряжение на всей цепи V равно

$$V = I_p Z = I_p R.$$

Отношение напряжения V_{cp} на конденсаторе к общему напряжению V при резонансе называется добротностью контура Q :

$$Q = V_{cp}/V = \rho/R = (\sqrt{L/C})/R.$$

Настройте прибор на измерение переменной силы тока (диапазон 500 мА). Соберите электрическую цепь измерения напряжения на конденсаторе по схеме, представленной на рис. 2 (в качестве емкости используйте магазин конденсаторов). Включите генератор переменного напряжения и установите с помощью ручки регулятора напряжение на выходе 4 В (для контроля используйте вольтметр переменного тока). Роль сопротивления в вашей цепи выполняет активное сопротивление катушки. В магазине конденсаторов установите емкость 50 мкФ.

Изменяйте частоту подаваемого переменного напряжения от 200 до 900 Гц ступенями по 100 Гц. При каждом значении частоты проводите измерения тока, текущего в контуре. **Внимание!** Следите с помощью встроенного вольтметра за выходным напряжением генератора, не допускайте его изменения. Результаты измерений занесите в таблицу 3. Рассчитайте значение круговой частоты и занесите в таблицу.

Постройте график зависимости силы тока от циклической частоты. Определите резонансную частоту ν_p колебаний в

Таблица 3

ν , Гц	200	300	400	500	600	700	800	900
ω , с ⁻¹								
I , А								

контуре, рассчитайте индуктивность катушки, сравните полученный график с соответствующим графиком компьютерного моделирования. Проанализируйте графики (определите, чем идеальный график отличается от реального).

Измерьте активное сопротивление катушки (воспользуйтесь для этого омметром, переключив прибор для измерения сопротивления).

Переключите универсальный прибор на измерение напряжения и подключите его к конденсатору. Измерьте максимальное напряжение на конденсаторе, вычислите добротность контура и его волновое сопротивление.

Сравните полученные данные с данными компьютерного эксперимента (параметры емкости, индуктивности и активного сопротивления должны совпадать). Сравните добротности контуров в обоих случаях (объясните разницу).

Используя полученную добротность контура и волновое сопротивление, рассчитайте реальное активное сопротивление контура, сравните его с измеренным активным сопротивлением катушки (объясните разницу).

Увеличьте емкость конденсатора до 100 мкФ (воспользуйтесь дополнительной батареей конденсаторов). Проведите все предыдущие измерения (включая заполнение таблиц и построение графиков). Сравните полученный график с компьютерным экспериментом, найдите волновое сопротивление и добротность нового контура, проведите анализ.

Замените в контуре рабочую катушку индуктивности на неизвестную. Определите резонансную циклическую частоту контура и измерьте индуктивность неизвестной катушки (емкость конденсатора выбирайте произвольно, на ваше усмотрение).

9. Обработка экспериментальных данных, полученных в разных группах. Самостоятельная работа групп, оформление необходимых графиков и зависимостей.

10. Обсуждение результатов. Формулировка общих выводов. Началом обсуждения могут быть контрольные вопросы на понимание результатов экспериментальных исследований и их соответствия модельным исследованиям.

Контрольные вопросы:

- Почему амплитуда колебаний силы тока в цепи из конденсатора и катушки при постоянной амплитуде колебаний переменного напряжения сначала возрастает с увеличением частоты, а затем уменьшается?
- При каком условии наступает электрический резонанс? Что происходит в этот момент с полным сопротивлением контура?
- Почему добротности идеального (компьютерный эксперимент) и реального контура так сильно отличаются?
- Где используется явление электрического резонанса?

По результатам обсуждения вопросов и проведенных учебных исследований самостоятельно сформулируйте общие выводы и подготовьте сообщение о проделанной работе в форме научного доклада.

4.4. Оптика

4.4.1. Модуль 13. Дифракция. Измерение длины световой волны

1. Введение. Демонстрации

1.1. Введение. Волновая природа света является причиной изменения фронта световой волны при ее распространении в неоднородной среде. Это явление называется дифракцией. Дифракция свойственна всем волновым процессам и проявляется в огибании волнами препятствий. Дифрагированный свет проникает в область геометрической тени и образует характерную картину распределения освещенности, называемую дифракционной. Широко известен опыт, в котором свет проникает в центр геометрической тени за непрозрачным диском (пятно Пуассона). В 1818 году французский математик Симон-Дени Пуассон предсказал этот эффект и его отсутствием в эксперименте надеялся опровергнуть волновую теорию света. Однако в проведенном эксперименте пятно наблюдалось точно

в центре геометрической тени и вместо опровержения блестяще подтвердило волновую теорию света.

Среди природных дифракционных световых явлений наиболее доступно для наблюдений гало вокруг Луны, закрытой полупрозрачными облаками. Лунный свет дифрагирует на частицах льда или капельках воды и образует чередующиеся темные и светлые, с радужной окраской, кольца.

1.2. Демонстрации

1.2.1. Оборудование: полупроводниковый лазер (лазерная указка), раздвижная щель, непрозрачный экран с двумя близко расположенными щелями, непрозрачный экран с двумя наборами пар круглых отверстий, экран с миллиметровой шкалой, штативы с лапками, измерительный микроскоп или лупа с измерительной насадкой, объект-микрометр, измерительная линейка, набор светофильтров.

1.2.2. Дифракция света при отражении от компакт-диска. Установите на штативах в лапках лазерную указку, экран, компакт-диск. На поверхность диска направьте пучок белого света, например, от хорошего карманного фонаря или проектора. Отраженный пучок направьте на экран и наблюдайте сплошной спектр при различных углах падения пучка света на диск. Необходимо обратить внимание на порядок расположения цветов по углам дифракции и яркость дифракционных максимумов.

Осветите поверхность диска лазерным пучком. На экране наблюдается симметричный веер дифрагированных пучков в различных порядках.

Осветите поверхность диска одновременно белым светом и лазерным пучком. В данном опыте лазерный пучок служит угловой меткой различных порядков дифракции. Сравните ширину радужной полосы в разных порядках.

1.2.3. Дифракция на пропускательной дифракционной решетке. Направьте лазерный пучок на дифракционную решетку (100 штрихов на 1 мм). Наблюдайте дифракцию пучка, посчитайте порядки дифракции, оцените изменения яркости дифрагированных пучков различных порядков.

1.2.4. Дифракция на двумерной решетке. Кусок капроновой ткани внесите в лазерный луч. Плоскость ткани расположите перпендикулярно лучу. На экране наблюдается характерная двумерная картина дифракции от квадратной решетки. Де-

формируйте решетку, растягивая ткань в одном направлении. Отклоните плоскость ткани от перпендикулярного положения относительно луча. Наблюдается изменение дифракционной картины.

Разместите вблизи ткани в зоне дифракции во вращающейся оправке целевую диафрагму. Наблюдайте изменение дифракционной картины при повороте щели относительно направления нитей ткани и уменьшения ее ширины.

1.2.5. Дифракция на щели с переменной шириной. Установите в область луча щель с регулируемой шириной (альтернатива — штангенциркуль). Экспериментально подберите ширину щели ($a \cong 0,3$ мм) для наблюдения четко выраженной дифракционной картины. Поочередно уменьшая и увеличивая щель, наблюдайте изменение дифракционной картины. Обратите внимание на условия, при которых четкая структура размывается, исчезает. В случае отсутствия регулируемой щели используйте самостоятельно изготовленные несколько щелей с разной шириной, либо (самый простой вариант переменной щели) поворачивайте щель штангенциркуля относительно оси, перпендикулярной лазерному лучу.

2. Цель и задачи экспериментального исследования. Оборудование

2.1. Цель исследования: определение длины световой волны лазера и периода дифракционной решетки.

2.2. Решаемые задачи:

- Определение длины световой волны лазера по дифракции на щели.
- Определение длины световой волны с помощью дифракционной решетки.
- Определение периода дифракционной решетки (компакт-диска).

2.3. Необходимое оборудование: лазер (лазерная указка), дифракционная щель, дифракционная решетка, компакт-диск, экран с масштабной шкалой, линейка, штативы с зажимами.

3. Экспериментальные исследования

3.1. Определение длины световой волны лазера по дифракции на щели. Дифракционное распределение светового поля

после прохождения щели при малых углах [15] описывается выражением:

$$I(\theta) = I_0(\sin u)/u,$$

где $u = (\pi a/\lambda) \sin \theta$, λ — длина волны, a — ширина щели. Угловые направления θ_m на минимумы освещенности определяются условием $a \cdot \sin \theta_m = m\lambda$, $m = 1, 2, 3 \dots$

Приблизленно, при малых углах $\sin \theta_m \cong \theta_m \cong x/L$, где x — расстояние между соседними минимумами, L — расстояние от щели до экрана.

На лабораторном столе соберите оптическую схему, показанную на рис. 1.

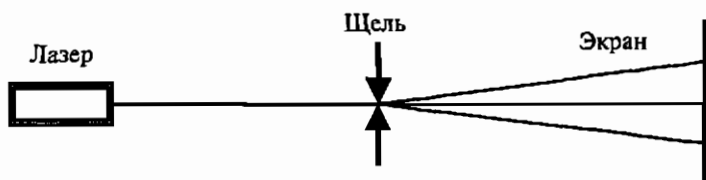


Рис. 1. Оптическая схема дифракции лазерного излучения на щели

Измерения проводите при нескольких значениях ширины щели.

На экране с миллиметровой шкалой определите θ_m для нескольких минимумов. Измерения проводите для нескольких вариантов ширины щели a и расстояния L .

Данные занесите в таблицу 1.

Таблица 1

№	L , м	L/a	x , м	λ , нм

По полученному массиву данных методом наименьших квадратов постройте прямую в координатах $x(L/a)$, тангенс угла наклона которой к оси (L/a) , даст вам искомую длину волны. Определите погрешность измеренной величины λ .

3.2. Определение длины световой волны с помощью дифракционной решетки. Известна формула для отклонения лучей, прошедших сквозь решетку:

$$d \cdot \sin \theta = k\lambda,$$

где d — период решетки, θ — угол отклонения луча, k — порядок дифракции, $k = 1, 2, 3, \dots$, λ — длина световой волны дифрагированного пучка.

В данном опыте углы θ не являются малыми, и поэтому необходимо вычислять точное значение $\sin \theta$. Расстояние от решетки до экрана обозначается буквой L , расстояние от центрального максимума до максимумов порядка k обозначим величиной x_k .

Для пропускательной дифракционной решетки на лабораторном столе соберите оптическую схему, показанную на рис. 1, в которой щель заменена решеткой. Период решетки может быть известен (например, школьная дифракционная решетка, 100 штрихов на 1 мм). Если период решетки неизвестен, его можно определить с помощью измерительного микроскопа.

Измерьте значения L и x_k (измеряются линейкой с миллиметровой шкалой). Из прямоугольного треугольника, образованного отрезками L и x_k , вычислите $\sin \theta = \frac{x_k}{\sqrt{(L^2 + x_k^2)}}$ и определите $\lambda = \frac{x_k d}{k \sqrt{(L^2 + x_k^2)}}$.

Значения измеренных величин запишите в таблицу 2.

Таблица 2

№	d , мм	k	L , м	x_k , м	$\sqrt{(L^2 + x_k^2)}$	λ , нм

По полученному массиву данных, методом наименьших квадратов, постройте прямую в координатах $\left\{ dx_k/k, \sqrt{(L^2 + x_k^2)} \right\}$, тангенс угла наклона которой к оси $\sqrt{(L^2 + x_k^2)}$ дает вам искомую длину волны.

Определите погрешность измеренной величины λ .

3.3. Определение периода дифракционной решетки (компакт-диска). На лабораторном столе соберите оптическую схему, показанную на рис. 2.

Экран и лазер поместите в близких плоскостях, решетку-диск ориентируйте таким образом, чтобы дифрагированные пучки лежали в горизонтальной плоскости (условные обозначения совпадают с используемыми в эксперименте с пропускающей решеткой).

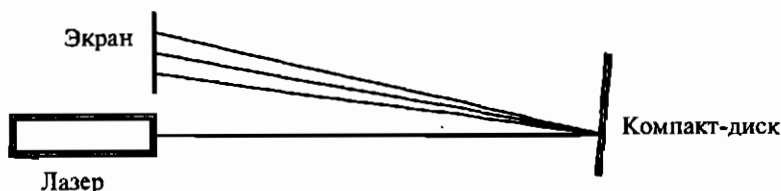


Рис. 2. Оптическая схема дифракции лазерного излучения на компакт-диске

Данные измерений заносите в таблицу 3.

Таблица 3

№	λ , нм	k	L , м	x_k , м	$\sqrt{(L^2 + x_k^2)}$	d , м

По полученному массиву данных, методом наименьших квадратов, постройте прямую в координатах

$$\left\{ x_k/k, \lambda \sqrt{(L^2 + x_k^2)} \right\}.$$

Тангенс угла наклона этой прямой к оси $\lambda \sqrt{(L^2 + x_k^2)}$ даст вам искомую величину d .

Определите погрешности измеренной величины d .

4. Обработка экспериментальных данных, полученных в разных группах. Самостоятельная работа групп, оформление необходимых графиков и зависимостей (указаны выше в тексте модуля).

5. Обсуждение результатов. Началом обсуждения являются контрольные вопросы на понимание результатов экспериментальных исследований и возможности их использования.

Контрольные вопросы:

- Почему возникает дифракция на щели?
- Почему возникает дифракция на решетке?
- Можно ли использовать дифракционную решетку в качестве основного узла спектрального прибора?
- Известно, что дифракционная решетка с концентрическими линиями может служить линзой (модель — компакт-диск). Объясните как это происходит.

Постройте график зависимости $d(x)$. Определите тип зависимости, получившейся в виде кривой.

Вернитесь к экспериментальной установке. Запустите лазер, установите неизвестную решетку на штатив и определите на экране расстояние до первого максимума. Оно равно 31 см.

Пользуясь результатами определения типа зависимости, увеличьте значения x , заполните таблицу 5 и постройте недостающую часть графика.

Таблица 5

d , мкм	1	2	3	4	5	6	7	8	9
x , см									

Отложите на полученном графике значения x и определите порядок неизвестной дифракционной решетки.

8. Обработка данных, полученных в разных группах. Самостоятельная работа учащихся. Необходимо выполнить расчетные и графические задания, указанные выше.

9. Сопоставление результатов экспериментальных и модельных исследований. Самостоятельная работа учеников и организованная дискуссия. Роль учителя — организация и консультация.

10. Обсуждение результатов. Формулировка общих выводов. Началом обсуждения являются контрольные вопросы на понимание смысла выполненных модельных исследований и их соответствия эксперименту.

Контрольные вопросы:

- Как связаны (формула) длина волны и период решетки?
- От каких параметров, кроме использованных в работе, будет зависеть расстояние до максимумов в интерференционной картине?
- Какой минимальный порядок, по вашему мнению, может иметь дифракционная решетка?

По результатам обсуждения вопросов и проведенных учебных исследований самостоятельно сформулируйте общие выводы и подготовьте сообщение о проделанной работе в форме научного доклада.

4.5. Кванты и атомы

4.5.1. Модуль 14. Фотоэффект

1. Введение. Демонстрации

1.1. Введение. Явления микромира наблюдать в обычных условиях достаточно сложно, однако традиционное школьное учебное оборудование позволяет провести ряд интересных демонстраций. Необходимое оборудование: осветитель с ртутно-кварцевой лампой, набор металлических пластин (медная, алюминевая, цинковая), электрометр, набор для электризации или источник высокого постоянного напряжения, штативы с зажимами, микроамперметр, вакуумный фотоэлемент, набор светофильтров.

1.2. Демонстрации

1.2.1. Разрядка электрометра в условиях подсветки светом в ультрафиолетовом и видимом диапазонах. Металлические пластины, закрепленные на металлических стержнях, устанавливают поочередно в электрометр и заряжают отрицательным зарядом от эбонитовой палочки (или от отрицательного выхода высоковольтного источника). Стрелка электрометра отклоняется и фиксируется под определенным углом к вертикальной стойке — заряд в электрометре сохраняется в сухой атмосфере достаточно длительное время. Обращают внимание учащихся на неизменность заряда, напоминают процесс разрядки, коснувшись пластины проводником, и заряжают электрометр заново. Включают ртутно-кварцевую лампу и направляют световой поток на зачищенную поверхность пластины. В процессе разрядки прерывают освещение световым затвором осветителя (или на пути светового потока ставят светонепроницаемый экран). Прекращение освещения прерывает разрядку электрометра. Повторяют демонстрацию на пластинах с другими металлами. Процесс разрядки при подсветке идет аналогично.

Повторяют опыт, размещая лампу на разных расстояниях от электрометра.

Размещая источник света на расстояниях x и $2x$ от пластины, оценивают время разрядки электрометра и убеждаются, что оно увеличивается при переходе от x к $2x$ приблизительно в 4 раза, что пропорционально уменьшению интенсивности светового потока. Это означает, что количество теряемых за-

рядов в единицу времени уменьшилось в 4 раза (закон Столетова).

Повторяют опыт с заряженным электрометром, подсвечивая его светом, прошедшим через стеклянную пластину-фильтр. На всех металлических пластинах, вставленных в электрометр, разрядка отсутствует. Размещают на пути света вместо стекла ультрафиолетовый фильтр (типа УФС). Электрометр разряжается.

Разряжают электрометр с металлической пластиной полнотой и сообщают ему положительный заряд от стеклянной палочки (или от положительного выхода высоковольтного источника). Подсвечивают пластину и наблюдают отсутствие процесса разрядки — положение стрелки электрометра не меняется.

Демонстрируется таблица 1 работ выхода (A) и соответствующих ей длин волн (λ) красных границ внешнего фотоэффекта от некоторых металлов, среди которых имеются используемые в демонстрациях. Обсуждается связь пропускаемого стеклянной пластиной излучения с возможностью вызвать фотоэффект.

Таблица 1

Металл	A , эВ	λ , нм	Металл	A , эВ	λ , нм	Металл	A , эВ	λ , нм
Алюминий	3,74	331	Калий	2,15	577	Никель	4,84	256
Барий	2,29	542	Кобальт	4,25	292	Платина	5,29	234
Висмут	4,62	268	Литий	2,39	519	Серебро	4,28	338
Вольфрам	4,50	275	Медь	4,47	277	Титан	3,92	316
Железо	4,36	284	Молибден	4,27	290	Цезий	1,89	656
Золото	4,58	271	Натрий	2,27	546	Цинк	3,74	331

1.2.2. Электрический пробой воздуха (опыт Герца). Источник высокого напряжения подключается к двум одинаковым металлическим пластинам. Пластины сближаются до минимального предпробойного расстояния для выбранного напряжения (5 или 25 кВ). Для сухого воздуха пороговая напряженность электрического поля пробоя 30 кВ/см. Без подсветки пробоя не наблюдается. При освещении светом ртутно-кварцевой лампы катода возникает пробой. Опытным путем подбирается расстояние и интенсивность засветки, достаточная для получения стационарного искрового разряда. Прерывание светового пото-

ка или установка светофильтра, задерживающего ультрафиолетовое излучение, приводит к прекращению разряда. Освещение направленным пучком света анода не «включает» пробой — дополнительных носителей заряда в воздухе не появляется.

2. Цель и задача экспериментального исследования. Оборудование

2.1. Цель исследования: изучить внешний фотоэффект.

2.2. Решаемые задачи:

- Исследование вольтамперных характеристик вакуумного фотоэлемента.
- Определение работы выхода.
- Определение красной границы фотоэффекта.
- Определение постоянной Планка.

2.3. Необходимое оборудование: вакуумный фотоэлемент в светонепроницаемом кожухе с оптическим затвором, осветители с лампой накаливания и газоразрядной ртутной лампой (источники сплошного и линейчатого спектров), светофильтры, гальванометр, вольтметр, регулируемый источник постоянного напряжения, оптический конденсор (собирающая линза).

3. Экспериментальные исследования

3.1. Метод выполнения работы. Внешний фотоэффект — выбивание электронов с поверхности металла под действием кванта света. Данный эффект является квантовым, электрон, получив достаточную энергию от фотона, вылетает из металла с некоторой кинетической энергией $T_k = mv^2/2$, где m — масса электрона, v — его скорость. Энергия кванта расходуется, согласно уравнению Эйнштейна, следующим образом:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + T_k,$$

где h — постоянная Планка, ν — частота излучения, $A_{\text{вых}}$ — работа выхода для данного материала катода, T_k — кинетическая энергия вылетевшего электрона.

В фотоэлементе электроны выбиваются с поверхности катода, некоторое их количество достигает второго электрода фотоэлемента — анода. В электрической цепи с фотоэлементом возникает электрический ток. Ток зависит от количества

фотонов, падающих на поверхность фотокатода, и пропорционален энергетической освещенности фотокатода. При отсутствии положительного потенциала на аноде часть электронов пролетают мимо. Положительная разность потенциалов между анодом и катодом обеспечивает большее количество электронов, попадающих на анод. Повышение этого напряжения увеличивает количество собранных электронов, но до некоторого максимального числа, практически равного всем электронам, выбитым с поверхности катода. Эти электроны определяют фототок насыщения, который, согласно закону Столетова, при неизменном спектральном составе освещающего излучения пропорционален энергетической освещенности фотокатода.

При подаче постоянного отрицательного напряжения на анод фототок постепенно убывает, обращаясь в нуль при некотором напряжении, называемом задерживающим или запирающим. Наличие тока при отрицательном напряжении свидетельствует о том, что вылетевшие электроны имеют достаточную кинетическую энергию для совершения работы против электрических сил, действующих на электрон со стороны поля. При некотором значении задерживающего напряжения анодный ток прекращается.

Максимальная скорость фотоэлектронов связана с величиной задерживающего потенциала соотношением: $mv^2/2 = eU_3$, где e — заряд электрона, U_3 — задерживающий потенциал.

Для каждого фотокатода существует красная граница внешнего фотоэффекта — максимальная длина волны $\lambda_{гр}$, при которой энергия светового кванта равна работе выхода: $hc/\lambda_{гр} = A_{вых}$, где c — скорость света в вакууме.

Из уравнения Эйнштейна следует, что в фотоэлементе с задерживающим потенциалом выполняется следующее соотношение: $U_3 = (h/e)v - A_{вых}/e$. Это выражение представляет собой уравнение прямой линии в координатах (v, U_3) . Экстраполяция прямой до пересечения с осью ординат определяет потенциал выхода $\phi_{вых} = A_{вых}/e$, точка пересечения с осью абсцисс — граничную частоту красной границы, тангенс угла наклона прямой к оси частот дает отношение h/e .

3.2. Подготовка эксперимента. Изучить экспериментальную установку, методику работы с отдельными измерительными приборами и осветителем (рис. 1). Аккуратно настроить оптическую схему установки, направить на всю площадь фотока-

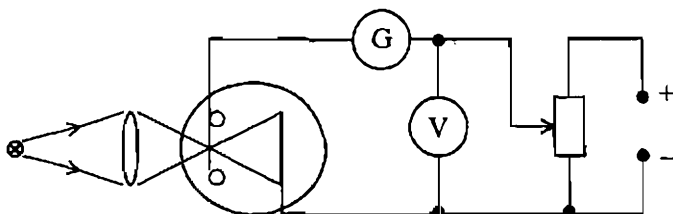


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки для исследования фотоэффекта

тогда световой поток. Проверить светонепроницаемость оптического канала для паразитной засветки. Включить измерительные приборы для прогрева.

3.3. Проведение эксперимента. Выделить в спектре излучения синюю область (или спектральную линию) с помощью светофильтра. Сделать наблюдения при освещении фотоэлемента без подачи напряжения на анод. Подать на анод ускоряющее напряжение. Подобрать условия освещения для получения режима насыщения тока при увеличении ускоряющего анодного напряжения $U_{\text{ан}}$. Снять зависимость фототока I от ускоряющего, а затем и тормозящего анодного напряжения. Данные занести в таблицу 2.

Таблица 2

№	λ , нм	ν , Гц	$U_{\text{ан}}$, В	U_s , В	I , А

4. Обработка экспериментальных данных, полученных в разных группах. Построить вольтамперные характеристики $I(U_{\text{ан}})$ для нескольких длин волн в синей, зеленой и красной областях спектра и по линейному участку кривых определить запирающее напряжение для каждой из используемых длин волн (3–5 длин волн). Значения U_s записать в таблицу 2.

Самостоятельно, с использованием метода наименьших квадратов построить график $U_s(\nu)$ и рассчитать значения постоянной Планка, красной границы и работы выхода. Оценить погрешности значений полученных величин.

5. Обсуждение результатов

Контрольные вопросы:

- В чем проявляется квантовый характер явления внешнего фотоэффекта?
- Зависит ли величина работы выхода от частоты падающего света?
- Зависит ли величина кинетической энергии выбитого электрона от частоты падающего света?
- Что такое «красная граница» фотоэффекта?
- Какое количество фотонов участвует в выбивании электрона с поверхности металла?

По результатам обсуждения вопросов самостоятельно сформулируйте краткие выводы по проведенным исследованиям.

6. Компьютерное моделирование. Запустите на вашем компьютере программу «Открытая физика 1.1», выберите в Содержании книгу Квантовая физика, модель Фотоэффект. В появившемся окне (рис. 2) слева вверху схематически показана экспериментальная установка для изучения фотоэффекта, справа сверху график фототока, текущего через

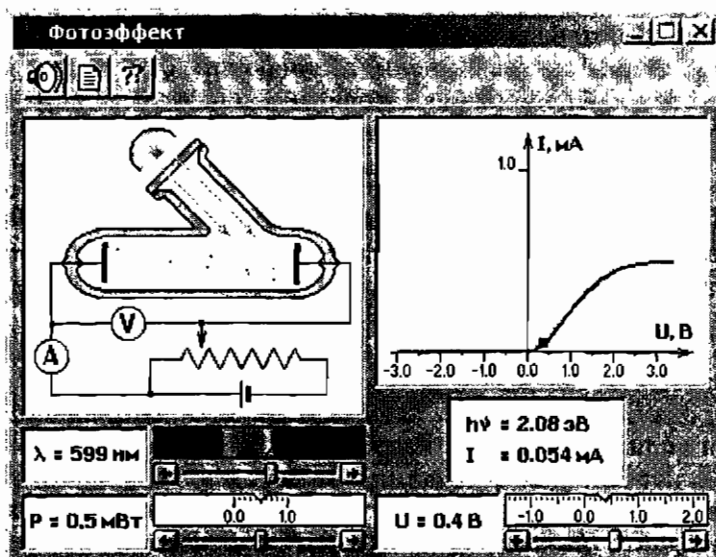


Рис. 2

фотоэлемент. Внизу расположены органы управления моделью: регуляторы изменения длины волны облучающего света, мощности излучения и напряжения на электродах фотоэлемента.

Познакомьтесь с моделью, меняя доступные параметры опыта, посмотрите, каким образом изменяется фототок в цепи.

7. Постановка цели и задач компьютерного моделирования

7.1. Цель исследования: изучить механизм возникновения фотоэффекта.

7.2. Задачи компьютерного моделирования:

- Определение «красной границы» фотоэффекта материала, использованного в модели.
- Расчет задерживающего напряжения для фиксированной длины волны.
- Определение характера зависимости максимальной скорости фотоэлектронов от длины волны излучения.
- Определение принципиальной возможности использования различных материалов для создания фотоэффекта.

7.3. Метод выполнения работы: закономерности внешнего фотоэффекта, изложенные выше в экспериментальной части, наглядно иллюстрируются в компьютерной модели. Задаются значения работы выхода для используемого материала, мощности и длины световых волн, облучающих фотокатод, и анализируется зависимость фототока от мощности и напряжения между анодом и катодом.

8. Моделирование. Определите «красную границу» фотоэффекта для материала, использованного в данной компьютерной модели. Рассчитайте работу выхода A . Установите соответствие между работой в джоулях и электрон-вольтах. Выразите работу выхода в электрон-вольтах (эВ).

По таблице 3 определите, из какого материала сделан катод фотоэлемента, используемого в модели.

Определите величину задерживающего напряжения для длины волны $\lambda = 510$ нм. Рассчитайте максимальную скорость фотоэлектронов для этой длины волны.

Рассчитайте $v_{\max}$ для различных λ и заполните таблицу 4.

Постройте зависимость $v_{\max}(\lambda)$. Определите по таблице работ выхода, какие еще материалы можно использовать в качестве фотокатода в данной модели. Заполните таблицу 5.

Таблица 3

Металл	A , эВ	Металл	A , эВ	Металл	A , эВ
Алюминий	3,74	Калий	2,15	Никель	4,84
Барий	2,29	Кобальт	4,25	Платина	5,29
Висмут	4,62	Литий	2,39	Серебро	4,28
Вольфрам	4,50	Медь	4,47	Титан	3,92
Железо	4,36	Молибден	4,27	Цезий	1,89
Золото	4,58	Натрий	2,27	Цинк	3,74

Таблица 4

λ , нм	380	400	450	500	510	550	600	620
$v_{\text{тах}}$, М/с								

Таблица 5

Материал					
A , эВ					

Объясните, почему для материала катода выбран только один элемент (определенный вами в начале работы) и не использованы остальные элементы с приемлемыми работами выхода.

9. Обработка данных, полученных в разных группах. Произвести выводы и расчеты всех величин, упомянутых в тексте п. 8. Построить необходимые зависимости.

10. Сопоставление результатов экспериментальных и модельных исследований. Самостоятельная работа в группах.

11. Обсуждение результатов. Формулировка общих выводов по комплексному исследованию. Началом обсуждения являются контрольные вопросы на понимание смысла выполненных модельных исследований и их соответствия эксперименту.

Контрольные вопросы:

- Что такое работа в 1 эВ?
- Как изменяется кинетическая энергия электронов при приближении к «красной границе» фотоэффекта?
- Чему равна кинетическая энергия электронов непосредственно на «красной границе» фотоэффекта?

- Из какого материала (по условиям модели) должно быть изготовлено окно для пропускания излучения от источника света?

По результатам обсуждения вопросов и проведенных учебных исследований самостоятельно сформулируйте общие выводы и подготовьте сообщение о проделанной работе в форме научного доклада.

4.5.2. Модуль 15. Атом водорода

1. Введение. Демонстрации

1.1. Введение. Строение атома интенсивно исследуется с конца 19 века. Характерные размеры, масса, внутренняя структура исследуются многими методами. Первые модели атома были предложены в начале 20-го века на основе фундаментальных экспериментов Дж. Дж. Томпсона, Э. Резерфорда, многочисленных исследований оптических спектров электрического разряда в газе. В условиях школы наиболее доступны для экспериментального изучения спектры излучения газов, которые несут в себе информацию об энергетической структуре атома. Необходимое оборудование для этого является типовым для физического кабинета школы: источник возбуждения атомных спектров газов, газоразрядные трубки с водородом, гелием, неоном, ртутью, натрием, набор дифракционных решеток, линейка-дифрактометр, штативы с зажимами, набор светофильтров, источник сплошного спектра (лампа накаливания), школьный спектроскоп.

1.2. Демонстрации линейчатых и сплошных спектров. Источник возбуждения спектров газов, лампа накаливания, школьный спектроскоп, штатив с линейкой-дифрактометром устанавливаются на лабораторном столе. Поочередно наблюдайте с помощью спектроскопа или через дифракционную решетку сплошной спектр теплового источника — лампы накаливания, и дискретные, линейчатые спектры газовых разрядов в различных газах. Зафиксируйте различие спектров нагретых тел и газовых разрядов, отличие дискретных спектров друг от друга. Наблюдаемую картину спектров зарисуйте в рабочую тетрадь.

1.3. Свойства газов. Демонстрируется таблица с информацией о строении и свойствах водорода в сравнении с азотом и воздухом. В таблице приведены молярная масса M в кг/моль, температуры T плавления и кипения в градусах Кельвина,

плотность ρ в кг/м^3 , скорость звука V в м/с (при 273 К и давлении $1,01 \cdot 10^5$ Па), межъядерные равновесные расстояния в молекулах r_e в нанометрах, энергия ионизации $E_{\text{ион}}$ в электрон-вольтах и потенциал возбуждения $U_{\text{воз}}$ в вольтах для атомарных состояний газов [27].

Газ	$M \cdot 10^{-3}$, кг/моль	$T_{\text{пл}}$, К	$T_{\text{кип}}$, К	ρ , кг/м ³	V , м/с	r_e , нм	$E_{\text{ион}}$, эВ	$U_{\text{воз}}$, В
Водород, H_2	2,016	-257	-253	0,09	1284	0,0741	13,598	10,2
Азот, N_2	28,02	-210	-196	1,25	334	0,1094	14,53	10,33
Воздух	28,98	-217	-194	1,29	331	—	—	—

2. Цель и задачи экспериментального исследования. Оборудование

2.1. Цель исследования: спектральные особенности излучения атома водорода в видимом диапазоне.

2.2. Решаемые задачи:

- Наблюдение спектров различных источников излучения с помощью простейшего спектроскопа.
- Наблюдение сериальных закономерностей линий в спектре излучения атома водорода в видимой области.
- Измерение длин волн излучения линий серии Бальмера с помощью дифракционной решетки.

2.3. Необходимое оборудование: газоразрядная трубка, наполненная водородом, источник возбуждения разряда, дифракционные решетки с периодами 0,01 и 0,02 мм, измерительная линейка с держателем для решеток и подвижным экраном со щелью и миллиметровой шкалой, штатив с зажимами.

3. Экспериментальные исследования

3.1. Метод выполнения работы. Теоретической базой для изучения спектра атома водорода является простейшая модель атома, предложенная Нильсом Бором в 1913 году. Свои представления об особых свойствах атомов Бор сформулировал в виде постулатов:

1. Атом может находиться только в стабильных стационарных состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия. В этих состояниях атом не излучает.

2. При переходе атома из одного стационарного состояния в другое испускается или поглощается квант электромагнитного излучения (фотон). Энергия излученного или поглощенного фотона равна разности энергий стационарных состояний:

$$h\nu = E_n - E_m,$$

где $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с — постоянная Планка, ν — частота фотона.

Оба этих постулата противоречат законам классической физики, но они хорошо согласуются с экспериментальными результатами.

3. Третий постулат Бора определяет правило квантования стационарных орбит.

Для случая круговых орбит электронов в планетарной модели атома третий постулат Бора записывается в виде:

$$m\nu r_n = n \frac{h}{2\pi},$$

где m — масса электрона, ν — его скорость, r_n — радиус стационарной орбиты.

Целое число n называют квантовым числом.

В применении к круговым орбитам атома водорода квантовые постулаты Бора приводят к следующим соотношениям:

Радиусы стационарных орбит:

$$r_n = r_1 n^2,$$

где $r_1 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2}$ — радиус первой боровской орбиты.

Энергия стационарных состояний:

$$E_n = -\frac{1}{\epsilon_0^2} \frac{m e^4}{8 h^2 n^2}.$$

Низшее энергетическое состояние атома ($n = 1$) называется основным. Для атома водорода $E_1 = 21,7 \cdot 10^{-19}$ Дж = $-13,6$ эВ. Электрон в этом состоянии обладает максимальной энергией связи. Удаление электрона из атома возможно при ионизации в случае передачи ему энергии, равной $13,6$ эВ, которая называется энергией ионизации.

При переходах между энергетическими уровнями формируются серии спектральных линий, характерное распределение которых в шкале длин волн для коротковолновой серии Лаймана показано на рис. 1. Высота линий приближенно соответствует яркости излучения. Пунктирной линией указан предел серии.

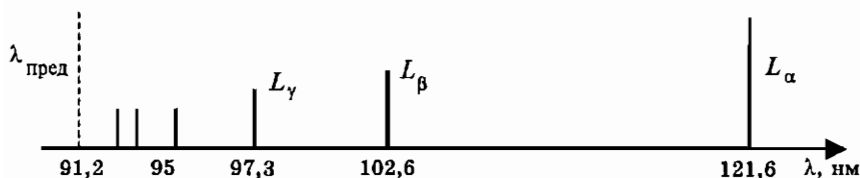


Рис. 1. Схематическое изображение спектра водорода серии Лаймана

3.2. Подготовка эксперимента. Установите измерительную линейку на штативе в горизонтальном положении и расположите штатив и газоразрядную лампу на лабораторном столе. Решетка, экран со щелью, светящаяся нить спектральной лампы устанавливаются на одной линии, причем линия наблюдения должна быть перпендикулярна нити разряда. На линейке дифракционная решетка должна быть на расстоянии $L = 50$ см от экрана с прорезью.

Сквозь дифракционную решетку наблюдайте нить разряда. В результате дифракции на шкале отчетливо различаются три линии спектра водорода: красная H_α , сине-зеленая H_β и яркосиняя H_γ .

3.3. Проведение эксперимента. Линии наблюдайте по обе стороны от прорези в экране (в условиях затемнения вы должны видеть несколько порядков по обе стороны от прорези). Длину волны для каждой из линий определите из формулы для дифракционной решетки $d \sin \theta = k\lambda$, где d — период решетки, θ — угол отклонения луча, k — порядок дифракции, $k = 1, 2, 3, \dots$, λ — длина световой волны дифрагированного пучка.

Углы отклонения максимумов 1-го и 2-го порядков при расстоянии между решеткой и экраном более 40 см малые, поэтому возможно использование приближенного метода вычисления $\sin \theta \cong \tan \theta \cong x/L$, где x — расстояние от щели на экране до дифракционного максимума, L — расстояние от щели до экрана. В данном приближении длина волны определится по формуле $\lambda = dx_k/kL$. Измерения проведите для нескольких порядков k и расстояний L на решетках с периодом $d_1 = 0,01$ мм, $d_2 = 0,02$ мм. Данные занесите в таблицу 1.

По полученному массиву данных, используя метод наименьших квадратов, постройте прямую в координатах $(d/k, L/x_k)$,

Таблица 1

№	d	L	k	x_k	λ

тангенс угла наклона которой к оси L/x_k дает искомую длину волны. Определите погрешность измеренных величин λ для всех трех линий H_α , H_β , H_γ спектра водорода.

Значения длин волн позволят вам рассчитать энергии квантов, излучаемых атомом в процессе изменения энергетических состояний. Энергия квантов $h\nu = hc/\lambda$ представляет собой величину, пропорциональную «обратной» длине волны $1/\lambda$. В спектроскопических исследованиях эта величина используется с размерностью см^{-1} . Физический смысл этой единицы простой: это количество длин волн монохроматического светового излучения в вакууме ($\lambda_{\text{вак}}$), укладывающихся на 1 см.

Эти же значения рассчитайте из боровской модели атома по формуле Ридберга для серии Бальмера:

$$1/\lambda_{\text{вак}} = R(1/4 - 1/n^2).$$

Значения $\lambda_{\text{вак}}$ вычислите по данным, полученным для длин волн спектральных линий в воздухе путем учета показателя преломления воздуха: $\lambda_{\text{вак}} = n\lambda$. В таблицах спектральных линий [1] приведены поправки для перехода от λ к $\lambda_{\text{вак}}$: $\lambda_{\text{вак}} = \lambda + \Delta\lambda$. Для линий серии Бальмера H_α , H_β , H_γ поправки составляют 0,18, 0,14 и 0,12 нм.

Данные измерений занесите в таблицу 2, причем необходимость учета поправок определяется точностью проведенных измерений.

Таблица 2

№	λ , нм	$1/\lambda$, см^{-1}	$1/\lambda_{\text{вак}}$, см^{-1}	n	$1/4 - 1/n^2$

По полученному массиву данных методом наименьших квадратов постройте прямую в координатах $\{1/\lambda_{\text{вак}}, (1/4 - 1/n^2)\}$, тангенс угла наклона которой к оси $(1/4 - 1/n^2)$ дает константу Ридберга, выраженную в см^{-1} . По результатам проведенных измерений и вычислений определите погрешность измеренной величины R .

4. Обработка экспериментальных данных, полученных в разных группах. Самостоятельная работа групп, оформление необходимых графиков и зависимостей (указанных выше в тексте).

5. Обсуждение результатов. Началом обсуждения являются контрольные вопросы на понимание результатов экспериментальных исследований и возможности их использования.

Контрольные вопросы:

- Что такое стационарное состояние?
- При каких условиях атом излучает квант света?
- Что такое серия Бальмера?

По результатам обсуждения вопросов самостоятельно сформулируйте краткие выводы по проведенным исследованиям.

6. Постановка цели и задач компьютерного моделирования

6.1. Цель исследования: изучение сериальных закономерностей в спектре атома водорода методом компьютерного моделирования.

6.2. Задачи компьютерного моделирования:

- Изучение спектра атома водорода на компьютерной модели.
- Определение длин волн спектра атома водорода.

7. Моделирование. Запустите на компьютере «Открытую физику 1.1», в Содержании откройте книгу Квантовая физика, выберите модель Постулаты Бора. В открывшемся окне познакомьтесь с работой модели и определите диапазон для серии Бальмера (переходы с орбиты на орбиту показывают вам линии).

Закройте модель Постулаты Бора. В Содержании откройте книгу Оптика, выберите модель Дифракционная решетка.

Используя результаты эксперимента, подставьте данные таблицы 1 в модель (значения d_1 и d_2 , L , x_k выбирайте на ваше усмотрение). Проведите моделирование и определите длины волн излучения атома водорода. Сравните длины волн излучения модели атома водорода с полученными ранее экспериментальными данными.

8. Обработка данных, полученных в разных группах. Произведите расчеты всех величин, упомянутых в тексте рассматриваемой модели «Открытой физики», сделайте краткие выводы.

Подготовьте рисунки распределения спектральных линий в шкале длин волн.

9. Обсуждение результатов. Формулировка общих выводов. Самостоятельная работа учеников и организованная дискуссия. Роль учителя — организация и консультация.

Контрольные вопросы:

- Что такое работа в 1 эВ?
- Какому переходу соответствует красная линия в спектре атома водорода?
- Сформулируйте правило квантования.

По результатам обсуждения вопросов и проведенных учебных исследований самостоятельно сформулируйте общие выводы и подготовьте сообщение о проделанной работе в форме научного доклада.

Краткий справочник физических величин

1. Фундаментальные физические постоянные

Скорость света в вакууме	$c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Гравитационная постоянная	$G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Универсальная газовая постоянная	$R = 8,314 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,380 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Атомная единица массы	$1 \text{ а. е. м.} = 1,660 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Объем моля идеального газа при нормальных условиях	$V_0 = 2,241 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{моль}$
Нормальное атмосферное давление	$P_n = 101\,325 \text{ Па}$
Ускорение свободного падения	$g = 9,80665 \text{ м/с}^2$
Элементарный заряд (заряд электрона)	$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Постоянная Фарадея	$F = N_A \cdot e =$ $= 9,648 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}$
Масса электрона	$m_e = 9,109534 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Удельный заряд электрона	$e/m_e = 1,759 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$
Масса протона	$m_p = 1,6726485 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса нейтрона	$m_n = 1,6749543 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Энергия покоя электрона	$m_e c^2 = 0,5110034 \text{ МэВ}$
Постоянная Стефана—Больцмана	$\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$
Постоянная Вина	$b = \lambda_{\text{max}} T =$ $= 2,89782 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$
Постоянная Ридберга	$R_\infty = \mu_0^2 m_e c^3 e^4 / (8h^3) =$ $= 1,097373143 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$
Постоянная Планка	$h = 6,626176 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 0,885 \cdot 10^{-11} \text{ Ф/м}$
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$
Радиус Бора	$r_B = 0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м}$
Классический радиус электрона	$r_e = 2,82 \cdot 10^{-15} \text{ м}$
Комптоновская длина волны электрона	$\Lambda = h/(m_e c) =$ $= 2,4263089 \cdot 10^{-12} \text{ м}$
Энергия, соответствующая 1 а. е. м.	931,5016 МэВ
Масса атома водорода ^1H	1,07825036 а. е. м.
Масса атома дейтерия ^2H	2,014101795 а. е. м.
Масса атома гелия-4 ^4He	4,002603267 а. е. м.
Электронвольт	1 эВ = $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$
Температура, соответствующая 1 эВ	11606 К

2. Астрономические величины

Космическое тело	Средний радиус, м	Масса, кг	Средняя плотность, 10^3 кг/м^3	Период обращения вокруг оси, сутки
Солнце	$6,95 \cdot 10^8$	$1,97 \cdot 10^{30}$	1,41	25,4
Земля	$6,37 \cdot 10^6$	$5,96 \cdot 10^{24}$	5,52	1,0
Луна	$1,74 \cdot 10^6$	$7,30 \cdot 10^{22}$	3,30	27,3

Планеты Солнечной системы	Среднее расстояние от Солнца, 10^6 км	Период обращения вокруг Солнца в годах
Меркурий	57,87	0,241
Венера	108,14	0,615
Земля	149,50	1,000
Марс	227,79	1,881
Юпитер	777,8	11,862
Сатурн	1426,1	29,458
Уран	2867,7	84,013
Нептун	4494	164,790
Плутон	9508	248,430

3. Плотность веществ

Твердые вещества	ρ , г/см ³	Жидкости	ρ , г/см ³
Алмаз	3,5	Бензол	0,88
Алюминий	2,7	Вода	1,00
Вольфрам	19,1	Глицерин	1,26
Графит	1,6	Касторовое масло	0,90
Железо (сталь)	7,8	Керосин	0,80
Золото	19,3	Ртуть	13,6
Кадмий	8,65	Спирт	0,79
Кобальт	8,9	Тяжелая вода	1,1
Лед	0,916	Эфир	0,72
Медь	8,9		
Молибден	10,2	Газы (при нормальных условиях)	ρ , кг/м ³
Никель	8,9		
Олово	7,4		
Платина	21,5	Азот	1,25
Пробка	0,20	Аммиак	0,77
Свинец	11,3	Водород	0,09
Серебро	10,5	Воздух	1,293
Титан	4,5	Кислород	1,43
Уран	19,0	Метан	0,72
Фарфор	2,3	Углекислый газ	1,98
Цинк	7,0	Хлор	3,21

4. Коэффициенты теплового расширения (при комнатных температурах)

Твердое тело	Коэффициент линейного расширения α , 10 ⁻⁶ К ⁻¹	Жидкость	Коэффициент объемного расширения β , 10 ⁻⁴ К ⁻¹
Алюминий	22,9	Вода	2,1
Латунь	18,9	Глицерин	5,0
Медь	16,7	Керосин	10,0
Сталь (железо)	11	Ртуть	1,8
Стекло обычное	8,5	Спирт этиловый	11,0

Примечание: $\alpha = \frac{1}{l} \frac{\partial l}{\partial T}$, $\beta = \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial T}$.

5. Упругие постоянные. Предел прочности

Материал	Модуль Юнга E , ГПа	Модуль сдвига G , ГПа	Коэффициент Пуассона μ	Предел прочности на разрыв σ_m , ГПа	Коэффициент сжимаемости β , ГПа ⁻¹
Алюминий	70	26	0,34	0,10	0,014
Медь	130	40	0,34	0,30	0,007
Свинец	16	5,6	0,44	0,015	0,022
Сталь (железо)	200	81	0,29	0,60	0,006
Стекло	60	30	0,25	0,05	0,025
Вода	—	—	—	—	0,49

Примечание: Коэффициент сжимаемости $\beta = -\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial P}$.

6. Давление насыщенных паров воды

°C	Давление, кПа	°C	Давление, кПа	°C	Давление, кПа
0	0,61	25	3,15	60	19,9
5	0,87	30	4,23	70	31,0
10	1,22	35	5,60	80	47,3
15	1,70	40	7,35	90	70,0
20	2,33	50	12,3	100	101,3

**7. Постоянные газов
(при нормальных условиях)**

Газ, относительная молекулярная масса	$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$	Теплопро- водность $\chi, \frac{\text{мВт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	Вязкость $\eta, \text{мкПа} \cdot \text{с}$	Диаметр молекулы $d, \text{нм}$	Постоянные Ван-дер-Ваальса	
					$a, \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^6}{\text{моль}^2}$	$b, 10^{-6}, \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$
He (4)	1,63	141,5	18,9	0,20	—	—
Ar (40)	1,67	16,2	20,9	0,35	0,132	32
H ₂ (2)	1,41	168,4	8,7	0,27	0,024	27
N ₂ (28)	1,40	24,3	16,7	0,37	0,137	39
O ₂ (32)	1,40	24,4	19,9	0,35	0,137	32
CO ₂ (44)	1,30	23,2	14,6	0,40	0,367	43
H ₂ O (18)	1,32	15,8	9,0	0,30	0,554	30
Воздух (29)	1,40	24,1	17,2	0,35	—	—

Примечание: В этой таблице приведены средние значения диаметров молекул. При более точных расчетах следует иметь в виду, что значения d , полученные из коэффициентов вязкости, теплопроводности и диффузии и постоянной b Ван-дер-Ваальса, заметно отличаются друг от друга.

**8. Постоянные жидкостей и твердых тел
(при нормальных условиях)**

Вещество	Теплоемкость $c, \frac{\text{Дж}}{\text{г} \cdot \text{К}}$	Теплота парообразования $\lambda, \text{Дж/г} \cdot \text{К}$	Теплота плавления $\tau, \text{Дж/г}$	Поверхностное натяжение $\alpha, \text{мН/м}$
Вода	4,18	2250	—	73
Глицерин	2,42	—	—	66
Ртуть	0,14	284	—	490
Спирт	2,42	853	—	22
Алюминий	0,90	—	321	—
Лед	2,09	—	333	—
Медь	0,39	—	175	—
Серебро	0,23	—	88	—

9. Диэлектрические проницаемости
(относительные)

Диэлектрик	–	Диэлектрик	–
Вода	81	Слюда	7,5
Воздух	1,00058	Спирт	26
Керосин	2,0	Стекло	6,0
Парафин	2,0	Фарфор	6,0
Плексиглас	3,5	Эбонит	2,7
Полиэтилен	2,3		

10. Удельное сопротивление проводников

Проводник	Удельное сопротивление (при 20 °С) ρ , нОм·м	Температурный коэффициент α , К ⁻¹
Алюминий	25	4,5
Вольфрам	50	4,8
Железо	90	6,5
Золото	20	4,0
Медь	16	4,3
Свинец	190	4,2
Серебро	15	4,1
Нихром	11	0,1

11. Магнитные проницаемости пара- и диамагнетиков
(относительные)

Парамагнетики	$\mu - 1, 10^{-6}$	Диамагнетики	$\mu - 1, 10^{-6}$
Азот	0,013	Водород	-0,063
Воздух	0,38	Бензол	-7,5
Кислород	1,9	Вода	-9,0
Эбонит	14	Медь	-10,3
Алюминий	23	Стекло	-12,6
Вольфрам	176	Каменная соль	-12,6
Платина	360	Кварц	-15,1
Жидкий кислород	3400	Висмут	-176

12. Показатели преломления

Вещество	n	Вещество	n
Воздух	1,00029	Стекло	1,50
Вода	1,33	Алмаз	2,42

Примечание: Известно, что показатели преломления зависят от вещества и длины волны света, поэтому приведенные в этой таблице значения n следует рассматривать как условные.

Длина волны λ , нм	Цвет	Исландский шпат		Кварц	
		n_e	n_o	n_e	n_o
678	Красный	1,484	1,653	1,550	1,541
656	Оранжевый	1,485	1,655	1,551	1,542
589	Желтый	1,486	1,658	1,553	1,544
527	Зеленый	1,489	1,664	1,556	1,547
486	Голубой	1,491	1,668	1,559	1,550
431	Сине-фиолетовый	1,495	1,676	1,564	1,554
400	Фиолетовый	1,498	1,683	1,568	1,558

13. Работа выхода электрона из металлов

Металл	A , эВ	Металл	A , эВ	Металл	A , эВ
Алюминий	3,74	Калий	2,16	Никель	4,84
Барий	2,29	Кобальт	4,25	Платина	5,29
Висмут	4,62	Литий	2,39	Серебро	4,28
Вольфрам	4,50	Медь	4,47	Титан	3,92
Железо	4,36	Молибден	4,27	Цезий	1,89
Золото	4,58	Натрий	2,27	Цинк	3,74

14. Потенциалы ионизации атомов

Z	Атом	Потенциал ионизации σ , В	Z	Атом	Потенциал ионизации σ , В
1	H	13,59	7	N	14,54
2	He	24,58	8	O	13,62
3	Li	5,39	9	F	17,42
4	Be	9,32	10	Ne	21,56
5	B	8,30	11	Na	5,14
6	C	11,27	80	Hg	10,44

Образовательные сайты естественных наук

Много интересной научно-популярной, учебной, научной информации можно найти на специализированных сайтах:

www.scientific.ru — междисциплинарный научный сервер;

<http://physnet.ru> — портал фундаментального физического образования России;

www.chemnet.ru — портал фундаментального химического образования России;

www.science.gov (English) — сайт по науке правительства США;

www.science.org.au/nova — новости науки (Австралия);

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu> — образовательная справочно-информационная служба по всем разделам физики;

<http://physicsweb.org> — сайт по физике Британского Института физики;

<http://physnet.uni-oldenburg.de/PhysNet> — ресурсы по физике (Physics Net);

www.phys.msu.ru — физический факультет МГУ;

www.phys.spbu.ru — физический факультет Санкт-Петербургского университета;

www.phys.nsu.ru — физический факультет Новосибирского университета;

www.mephi.ru — Московский инженерно-физический институт (Государственный университет);

www.mipt.ru — Московский физико-технический институт (технический университет);

www.physicon.ru — Московский физико-технический институт (технический университет), ФИЗИКОН;

www.ifmo.ru — Институт точной механики и оптики (технический университет), Санкт-Петербург;

www.lan.krasu.ru/depts/phys — физический факультет Красноярского государственного университета.

Рекомендации к подготовке отчета и доклада по лабораторным исследованиям

Результат работы представляется в краткой и понятной для читателя форме. Отчет должен содержать необходимое количество графиков и таблиц, не дублирующих друг друга. В текст отчета вносятся математические выражения и формулы для строгого описания изучаемых явлений и закономерностей. Указываются погрешности измерений. При использовании количественных данных, полученных другими или заимствованных из опубликованных источников (книг, журналов, Интернета), делается ссылка на источник информации.

Примерная структура отчета следующая.

1. Тема работы.
2. Цель работы.
3. Предварительная информация об исследуемом явлении или объекте.
4. Наблюдение. Дополнительные особенности явления (объекта), выявленные в результате наблюдения.
5. План дальнейших исследований.
6. Цели и задачи экспериментальных исследований.
7. Оборудование, приборы и материалы.
8. Экспериментальная установка. Методика исследований.
9. Ход работы: измерения, получение и обработка данных.
10. Результаты измерений. Погрешности.
11. Обсуждение и анализ экспериментальных результатов.
12. Цель и задачи компьютерного моделирования.
13. Результаты модельных исследований. Обсуждение и анализ.
14. Сопоставление результатов наблюдений, экспериментальных и модельных исследований.
15. Заключение. Общие выводы по комплексному исследованию.
16. Список использованной литературы.

По итогам работы проводится обсуждение в форме семинара. Автор исследований готовит краткое сообщение-доклад.

Примерная структура доклада следующая.

1. Тема, постановка задачи исследования.
2. Методы исследования (наблюдение, эксперимент, моделирование), особенности их использования.
3. Результаты исследований.
4. Краткие итоги работы и выводы.

Представление доклада сопровождается демонстрацией графиков, таблиц и рисунков, иллюстрирующих содержание работы. На 10–15-минутный доклад необходимо 5–7 иллюстраций. Каждая из иллюстраций в оптимальном варианте содержит несколько строк текста, не более двух-трех рисунков или диаграмм, или таблицу с количеством столбцов и строк не более пяти. Возможно использование компьютерного проектора и сопровождение доклада иллюстрациями, подготовленными в программной оболочке Microsoft Power Point.

Заключение

Курс завершен. Пора сделать паузу и посмотреть на выполненную работу. Мы надеемся, что многое у вас получилось. Вы можете гордиться своими результатами.

Авторы рассматривают данный курс как широкое окно в физику и одновременно как место для испытания себя в сложном, но интересном деле — познании нового и неизведанного. Физика — одна из наиболее развитых наук, в ней накоплен большой опыт глубокого изучения природы, сделаны открытия, дающие людям энергию, возможность поговорить друг с другом на любом расстоянии, работать в космосе. Самые смелые мечты фантастов со временем становятся реальностью благодаря открытиям физиков.

В процессе наблюдения физических явлений, размышлений над их природой и работы в лаборатории вы научились главному в жизни — двигаться вперед и осваивать новое. Это замечательное качество, по нашему мнению, можно приобрести в любой науке, однако наиболее эффективно такое универсальное обучение происходит только в физике.

Но! Наш мир сложен, изучается разными науками, и поэтому не только физики удивляют человечество открытиями.

Природа и ее законы едины, взаимосвязь явлений и процессов объединяет не только науки, но и людей. Методы физических исследований, физические модели проникли в химию, биологию и медицину, технологии, экономику и политику. Это факт, доказанный нашей действительностью.

Литература

1. Физический энциклопедический словарь. / Гл. ред. А. М. Прохоров. Ред. кол. Д. М. Алексеев, А. М. Бонч-Бруевич, А. С. Боровик-Романов и др. — М.: Сов. энциклопедия, 1984.
2. Лабораторный практикум по общей физике: учеб. пособие для студентов физ.-мат. фак. пед. ин-тов, под ред. Гершензона Е. М. — М.: Просвещение, 1985.
3. Лабораторные занятия по физике: учебное пособие, под ред. Гольдина Л. Л. — М.: Наука, 1983.
4. Касьянов В. А., Коровин В. А. Тетрадь для лабораторных работ 10 кл. — М.: Дрофа, 2002.
5. Кабардин О. Ф., Орлов В. А. Экспериментальные задания по физике. 9–11 классы: учебное пособие для учащихся общеобразовательных учреждений. — М.: Вербум, 2001.
6. Саенко П. Г., Физика 9. — М.: Просвещение, 1992.
7. Демонстрационный эксперимент по физике в старших классах средней школы, часть 1, под ред. А. А. Покровского — М.: Просвещение, 1967.
8. Анциферов Л. И., Пищеков И. М. Практикум по методике и технике физического эксперимента. — М.: Просвещение, 1984.
9. Зайдель А. Н. Ошибки измерений физических величин. — Л.: Наука, Ленингр. отд., 1977.
10. Каменецкий С. Е., Солодухин Н. А. Модели и аналогии в курсе физики в средней школе: Пособие для учителей. — М.: Просвещение, 1982.
11. Семенченко Б. А. Физическая метеорология. — М.: АСПЕКТ-пресс, 2002.
12. Тарасов Л. В. Физика в природе: Кн. для учащихся. — М.: Просвещение, 1988.
13. Стаханов И. П. О физической природе шаровой молнии. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
14. Развитие физики в России (очерки). Т. 1. Сост. А. Ф. Кононков. Пособие для учителей. Под ред. А. С. Предводителя и Б. И. Спасского. — М.: Просвещение, 1970.
15. Ахманов С. А., Никитин С. Ю. Физическая оптика. — М. Изд-во Моск. ун-та, 1998.
16. Рачлис Х. Физика в ванне. — М.: Наука, 1986.

17. Физический факультатив. Сост. Тихомирова В. А., Черноуцан А. И. (Приложение к журналу «Квант», № 3/2001). — М.: Бюро Квантум, 2001.
18. Лаборатория «Кванта». Сост. Тихомирова В. А., Черноуцан А. И. (Приложение к журналу «Квант», № 3/2000). — М.: Бюро Квантум, 2001.
19. Квант: приложение к журналу «Физика и спорт». — М.: Бюро Квантум, 2000.
20. Квант: приложение к журналу, Лаборатория «Кванта» — М.: Бюро Квантум, 2000.
21. Липкин А. И. Основания современного естествознания. Модельный взгляд на физику, синергетику, химию. — М.: «Вузовская книга», 2001.
22. Энциклопедия для детей, т. 16: Физика, под ред. В. А. Володина. — М.: Аванта+, 2000.
23. Энциклопедия: Современное естествознание в 10 т. Т. 3, 4. — М.: Просвещение, 2000.
24. Билимович Б. Ф., Световые явления вокруг нас: книга для внеклассного чтения учащихся 8–10 кл. — М.: Просвещение, 1986.
25. Бемеловский В. Д., Эти удивительные жидкие кристаллы: книга для внеклассного чтения учащихся 8–10 классов. — М.: Просвещение, 1987.
26. Углубленное изучение физики в 10–11 классах: Кн. для учителя / О. Ф. Кабардин, С. И. Кабардина, В. А. Орлов. — М.: Просвещение, 2002.
27. Таблицы физических величин. Справочник. / Под ред. И. К. Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976.
28. Касьянов В. А. Физика. 11 класс. Тетрадь для лабораторных работ. / В. А. Касьянов, В. А. Коровин. — 2-е изд. — М.: Дрофа, 2003.

Учебное издание

**Сорокин Анатолий Васильевич,
Торгашина Наталья Геннадьевна,
Ходос Евгений Александрович,
Чиганов Андрей Семенович**

**ФИЗИКА: НАБЛЮДЕНИЕ,
ЭКСПЕРИМЕНТ, МОДЕЛИРОВАНИЕ**
Элективный курс
Учебное пособие

Ведущий редактор Б. И. Копылов
Художник Ф. Инфантэ
Художественный редактор О. Г. Лапко
Оригинал-макет подготовлен С. А. Янковой
в пакете L^AT_EX 2_ε

Подписано в печать 29.05.06 г. Формат 60 × 90/16
Гарнитура Школьная. Бумага офсетная. Печать офсетная
Усл. печ. л. 12,5. Тираж 5000 экз. (1-й завод 2000 экз.) Заказ № 2413

Издательство «БИНОМ. Лаборатория знаний»
Телефон (495) 157-1902, e-mail: Lbz@aha.ru
<http://www.Lbz.ru>



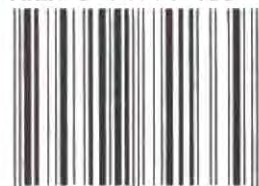
Отпечатано с готового оригинал-макета
в ОАО «ИПП «Правда Севера».
163002, г. Архангельск, пр. Новгородский, 32.
Тел./факс (8182) 64-14-54, тел.: (8182) 65-37-65, 65-38-78, 29-20-81
www.ippps.ru, e-mail: ippps@atnet.ru

44	Sc	47,90	22	Ti	50,942	23	V	51,996	24	Cr	54,938	25	Mn	55,847	26	Fe	58,933	27	Co	58,933	28	Ni	58,71	29	Cu	63,546	30	Zn	65,31	31	Ga	72,59	32	Ge	72,64	33	As	74,92	34	Se	78,96	35	Br	79,904	36	Kr	83,80	37	Rb	85,468	38	Sr	87,62	39	Y	88,905	40	Zr	91,22	41	Nb	92,91	42	Mo	95,94	43	Tc	98,906	44	Ru	101,07	45	Rh	102,905	46	Pd	106,4	47	Ag	107,868	48	Cd	112,40	49	In	114,82	50	Sn	118,69	51	Sb	121,75	52	Te	127,60	53	I	126,905	54	Xe	131,29	55	Cs	132,905	56	Ba	137,327	57	La	138,905	58	Ce	140,12	59	Pr	140,91	60	Nd	144,24	61	Pm	144,913	62	Sm	150,36	63	Eu	151,96	64	Gd	157,25	65	Tb	158,925	66	Dy	162,50	67	Ho	164,93	68	Er	167,26	69	Tm	168,932	70	Yb	173,054	71	Lu	174,967	72	Hf	178,49	73	Ta	180,95	74	W	183,85	75	Re	186,2	76	Os	190,2	77	Ir	192,2	78	Pt	195,08	79	Au	196,967	80	Hg	200,59	81	Tl	204,37	82	Pb	207,19	83	Bi	208,98	84	Po	209	85	At	210	86	Rn	222	87	Fr	223	88	Ra	226	89	Ac	227	90	Th	232,0377	91	Pa	231,03688	92	U	238,02891	93	Np	237,048173	94	Pu	244,06422	95	Am	243,061381	96	Cm	247,070353	97	Bk	247,070353	98	Cf	251,0825	99	Es	252,083	100	Fm	257,10	101	Mendelevium	258	102	No	259	103	Lr	262	104	Rf	261,101	105	Db	262,103	106	Sg	266,104	107	Bh	264,107	108	Hs	277,109	109	Mt	268,109	110	Darmstadtium	271	111	Ro	272	112	Cn	285	113	Nh	284	114	Fl	289	115	Mc	288	116	Lv	293	117	Ts	294	118	Og	294	119	Uut	298	120	Uuq	299	121	Uub	301	122	Uuq	302	123	Uub	304	124	Uut	307	125	Uuq	310	126	Uub	311	127	Uut	312	128	Uuq	315	129	Uub	318	130	Uut	319	131	Uuq	321	132	Uub	324	133	Uut	325	134	Uuq	327	135	Uub	330	136	Uut	331	137	Uuq	333	138	Uub	336	139	Uut	337	140	Uuq	339	141	Uub	342	142	Uut	343	143	Uuq	345	144	Uub	348	145	Uut	349	146	Uuq	351	147	Uub	354	148	Uut	355	149	Uuq	357	150	Uub	360	151	Uut	361	152	Uuq	363	153	Uub	366	154	Uut	367	155	Uuq	369	156	Uub	372	157	Uut	373	158	Uuq	375	159	Uub	378	160	Uut	379	161	Uuq	381	162	Uub	384	163	Uut	385	164	Uuq	387	165	Uub	390	166	Uut	391	167	Uuq	393	168	Uub	396	169	Uut	397	170	Uuq	399	171	Uub	402	172	Uut	403	173	Uuq	405	174	Uub	408	175	Uut	409	176	Uuq	411	177	Uub	414	178	Uut	415	179	Uuq	417	180	Uub	420	181	Uut	421	182	Uuq	423	183	Uub	426	184	Uut	427	185	Uuq	429	186	Uub	432	187	Uut	433	188	Uuq	435	189	Uub	438	190	Uut	439	191	Uuq	441	192	Uub	444	193	Uut	445	194	Uuq	447	195	Uub	450	196	Uut	451	197	Uuq	453	198	Uub	456	199	Uut	457	200	Uuq	459	201	Uub	462	202	Uut	463	203	Uuq	465	204	Uub	468	205	Uut	469	206	Uuq	471	207	Uub	474	208	Uut	475	209	Uuq	477	210	Uub	480	211	Uut	481	212	Uuq	483	213	Uub	486	214	Uut	487	215	Uuq	489	216	Uub	492	217	Uut	493	218	Uuq	495	219	Uub	498	220	Uut	499	221	Uuq	501	222	Uub	504	223	Uut	505	224	Uuq	507	225	Uub	510	226	Uut	511	227	Uuq	513	228	Uub	516	229	Uut	517	230	Uuq	519	231	Uub	522	232	Uut	523	233	Uuq	525	234	Uub	528	235	Uut	529	236	Uuq	531	237	Uub	534	238	Uut	535	239	Uuq	537	240	Uub	540	241	Uut	541	242	Uuq	543	243	Uub	546	244	Uut	547	245	Uuq	549	246	Uub	552	247	Uut	553	248	Uuq	555	249	Uub	558	250	Uut	559	251	Uuq	561	252	Uub	564	253	Uut	565	254	Uuq	567	255	Uub	570	256	Uut	571	257	Uuq	573	258	Uub	576	259	Uut	577	260	Uuq	579	261	Uub	582	262	Uut	583	263	Uuq	585	264	Uub	588	265	Uut	589	266	Uuq	591	267	Uub	594	268	Uut	595	269	Uuq	597	270	Uub	600	271	Uut	601	272	Uuq	603	273	Uub	606	274	Uut	607	275	Uuq	609	276	Uub	612	273	Uut	613	274	Uuq	615	275	Uub	618	276	Uut	619	277	Uuq	621	278	Uub	624	279	Uut	625	280	Uuq	627	281	Uub	630	282	Uut	631	283	Uuq	633	284	Uub	636	285	Uut	637	286	Uuq	639	287	Uub	642	288	Uut	643	289	Uuq	645	290	Uub	648	291	Uut	649	292	Uuq	651	293	Uub	654	295	Uut	655	296	Uuq	657	297	Uub	660	298	Uut	661	299	Uuq	663	300	Uub	666	301	Uut	667	302	Uuq	669	303	Uub	672	304	Uut	673	305	Uuq	675	306	Uub	678	309	Uut	679	310	Uuq	681	311	Uub	684	315	Uut	685	316	Uuq	687	317	Uub	690	318	Uut	691	319	Uuq	693	320	Uub	696	321	Uut	697	322	Uuq	699	323	Uub	702	324	Uut	703	325	Uuq	705	326	Uub	708	329	Uut	709	330	Uuq	711	331	Uub	714	335	Uut	715	336	Uuq	717	337	Uub	720	338	Uut	721	339	Uuq	723	340	Uub	726	341	Uut	727	342	Uuq	729	343	Uub	732	344	Uut	733	345	Uuq	735	346	Uub	738	349	Uut	739	350	Uuq	741	351	Uub	744	355	Uut	745	356	Uuq	747	357	Uub	750	358	Uut	751	359	Uuq	753	360	Uub	756	361	Uut	757	362	Uuq	759	363	Uub	762	364	Uut	763	365	Uuq	765	366	Uub	768	369	Uut	769	370	Uuq	771	371	Uub	774	375	Uut	775	376	Uuq	777	377	Uub	780	378	Uut	781	379	Uuq	783	380	Uub	786	381	Uut	787	382	Uuq	789	383	Uub	792	384	Uut	793	385	Uuq	795	386	Uub	798	389	Uut	799	390	Uuq	801	391	Uub	804	395	Uut	805	396	Uuq	807	397	Uub	810	398	Uut	811	399	Uuq	813	400	Uub	816	401	Uut	817	402	Uuq	819	403	Uub	822	404	Uut	823	405	Uuq	825	406	Uub	828	409	Uut	829	410	Uuq	831	411	Uub	834	415	Uut	835	416	Uuq	837	417	Uub	840	418	Uut	841	419	Uuq	843	420	Uub	846	421	Uut	847	422	Uuq	849	423	Uub	852	424	Uut	853	425	Uuq	855	426	Uub	858	429	Uut	859	430	Uuq	861	431	Uub	864	435	Uut	865	436	Uuq	867	437	Uub	870	438	Uut	871	439	Uuq	873	440	Uub	876	441	Uut	877	442	Uuq	879	443	Uub	882	444	Uut	883	445	Uuq	885	446	Uub	888	449	Uut	889	450	Uuq	891	451	Uub	894	455	Uut	895	456	Uuq	897	457	Uub	900	458	Uut	901	459	Uuq	903	460	Uub	906	461	Uut	907	462	Uuq	909	463	Uub	912	464	Uut	913	465	Uuq	915	466	Uub	918	469	Uut	919	470	Uuq	921	471	Uub	924	475	Uut	925	476	Uuq	927	477	Uub	930	478	Uut	931	479	Uuq	933	480	Uub	936	481	Uut	937	482	Uuq	939	483	Uub	942	484	Uut	943	485	Uuq	945	486	Uub	948	489	Uut	949	490	Uuq	951	491	Uub	954	495	Uut	955	496	Uuq	957	497	Uub	960	498	Uut	961	499	Uuq	963	500	Uub	966	501	Uut	967	502	Uuq	969	503	Uub	972	504	Uut	973	505	Uuq	975	506	Uub	978	509	Uut	979	510	Uuq	981	511	Uub	984	515	Uut	985	516	Uuq	987	517	Uub	990	518	Uut	991	519	Uuq	993	520	Uub	996	521	Uut	997	522	Uuq	999	523	Uub	1002	524	Uut	1003	525	Uuq	1005	526	Uub	1008	529	Uut	1009	530	Uuq	1011	531	Uub	1014	535	Uut	1015	536	Uuq	1017	537	Uub	1020	538	Uut	1021	539	Uuq	1023	540	Uub	1026	541	Uut	1027	542	Uuq	1029	543	Uub	1032	544	Uut	1033	545	Uuq	1035	546	Uub	1038	549	Uut	1039	550	Uuq	1041	551	Uub	1044	555	Uut	1045	556	Uuq	1047	557	Uub	1050	558	Uut	1051	559	Uuq	1053	560	Uub	1056	561	Uut	1057	562	Uuq	1059	563	Uub	1062	564	Uut	1063	565	Uuq	1065	566	Uub	1068	569	Uut	1069	570	Uuq	1071	571	Uub	1074	575	Uut	1075	576	Uuq	1077	577	Uub	1078	579	Uut	1079	580	Uuq	1081	581	Uub	1084	585	Uut	1085	586	Uuq	1087	587	Uub	1090	588	Uut	1091	589	Uuq	1093	590	Uub	1096	591	Uut	1097	592	Uuq	1099	593	Uub	1102	594	Uut	1103	595	Uuq	1105	596	Uub	1108	599	Uut	1109	600	Uuq	1111	601	Uub	1114	605	Uut	1115	606	Uuq	1117	607	Uub	1120	608	Uut	1121	609	Uuq	1123	610	Uub	1126	611	Uut	1127	612	Uuq	1129	613	Uub	1132	614	Uut	1133	615	Uuq	1135	616	Uub	1138	619	Uut	1139	620	Uuq	1141	621	Uub	1144	625	Uut</
----	----	-------	----	----	--------	----	---	--------	----	----	--------	----	----	--------	----	----	--------	----	----	--------	----	----	-------	----	----	--------	----	----	-------	----	----	-------	----	----	-------	----	----	-------	----	----	-------	----	----	--------	----	----	-------	----	----	--------	----	----	-------	----	---	--------	----	----	-------	----	----	-------	----	----	-------	----	----	--------	----	----	--------	----	----	---------	----	----	-------	----	----	---------	----	----	--------	----	----	--------	----	----	--------	----	----	--------	----	----	--------	----	---	---------	----	----	--------	----	----	---------	----	----	---------	----	----	---------	----	----	--------	----	----	--------	----	----	--------	----	----	---------	----	----	--------	----	----	--------	----	----	--------	----	----	---------	----	----	--------	----	----	--------	----	----	--------	----	----	---------	----	----	---------	----	----	---------	----	----	--------	----	----	--------	----	---	--------	----	----	-------	----	----	-------	----	----	-------	----	----	--------	----	----	---------	----	----	--------	----	----	--------	----	----	--------	----	----	--------	----	----	-----	----	----	-----	----	----	-----	----	----	-----	----	----	-----	----	----	-----	----	----	----------	----	----	-----------	----	---	-----------	----	----	------------	----	----	-----------	----	----	------------	----	----	------------	----	----	------------	----	----	----------	----	----	---------	-----	----	--------	-----	-------------	-----	-----	----	-----	-----	----	-----	-----	----	---------	-----	----	---------	-----	----	---------	-----	----	---------	-----	----	---------	-----	----	---------	-----	--------------	-----	-----	----	-----	-----	----	-----	-----	----	-----	-----	----	-----	-----	----	-----	-----	----	-----	-----	----	-----	-----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-------

Победитель конкурса по созданию учебной литературы
нового поколения для средней школы,
проводимого НФПК - Национальным Фондом подготовки кадров
и Министерством образования Российской Федерации



ISBN 5-94774-133-4



9 785947 741339