

Э П Е К Т И В Н Ы Й   К У Р С



С. И. Кабардина   Н. И. Шефер

# ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

**Методическое пособие**



БИНОМ

С. И. Кабардина Н. И. Шефер

# **ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН**

**Методическое пособие**

Под редакцией О. Ф. Кабардина

Издание подготовлено при содействии  
НФПК – Национального фонда подготовки кадров



Москва  
БИНОМ. Лаборатория знаний  
2005

УДК 54.051/.056

ББК 24.4

К12

**Кабардина С. И.**

**К12** Измерения физических величин. Элективный курс:  
Методическое пособие / С. И. Кабардина, Н. И. Шефер. —  
М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. — 136 с., ил.

ISBN 5-94774-147-4

Методическое пособие является частью учебно-методического комплекта элективного курса по физике, рассчитанного на учащихся 10–11 классов. В пособии обсуждаются принципиальные теоретические вопросы, непосредственно связанные с материалом учебного курса. Основное внимание уделяется методическим рекомендациям по выполнению наиболее сложных практических работ и решению задач, предлагаемых учащимся.

Предназначено для учителей физики общеобразовательных школ.

УДК 54.051/.056

ББК 24.4

---

*Учебное издание*

**Кабардина Светлана Ильинична,  
Шефер Никодим Иванович**

**ИЗМЕРЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН**

**Элективный курс**

**Методическое пособие**

Ведущий редактор *Е. Григорьева*

Художник *Ф. Инфантэ*. Художественный редактор *О. Лапко*

Технический редактор *Т. Блэнцева*. Корректор *Н. Савельева*

Оригинал-макет подготовлен *В. Цлаф*

в пакете  $\LaTeX 2_{\epsilon}$  с использованием

кириллических шрифтов семейства LН

Подписано в печать 7.02.05 г. Формат 60 × 90/16

Гарнитура Школьная. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 8,5. Тираж 3000 экз. Заказ 2314

Издательство «БИНОМ. Лаборатория знаний»

Адрес для переписки: Москва, 119071, а/я 32

Телефон (095)955-0398, e-mail: Lbz@aha.ru, http://www.Lbz.ru

Отпечатано с готовых диапозитивов

в полиграфической фирме «Полиграфист»

160001, г. Вологда, ул. Челюскинцев, 3

---

© Кабардина С. И., Шефер Н. И.,  
2005

© БИНОМ. Лаборатория знаний,  
2005

ISBN 5-94774-147-4

# Оглавление

Предисловие .....	6
Глава 1. Методы измерений физических величин .....	7
§ 1. Физические величины и их единицы .....	7
Как человек познает мир? Практика и теория в процессе познания мира. Физические величины. Масса. Сила. Единица длины — метр.	
§ 2. Измерения физических величин .....	15
Лабораторная работа 1. Измерение расстояний до небесных тел. Светолокация. Измерения малых расстояний.	
§ 3. Погрешности прямых однократных измерений .....	21
§ 4. Безопасность эксперимента .....	25
Обеспечение безопасности эксперимента для человека. Обеспечение безопасности эксперимента для измерительных приборов и оборудования.	
§ 5. Планирование и выполнение эксперимента .....	27
Выбор метода измерений и измерительных приборов. Предварительные измерения. Необходимость точных измерений.	
§ 6. Оценка границ случайных погрешностей измерений .....	32
Повторные измерения и нахождение среднего арифметического значения измеряемой величины. Лабораторная работа 5.	
§ 7. Обработка результатов измерений .....	37
Запись результатов измерений и вычислений. Оценка границ погрешностей косвенных измерений. Цели написания отчетов. Лабораторная работа 6.	
§ 8. Построение графиков .....	46
Построение графиков. Построение графиков с помощью компьютера.	
§ 9. Измерение времени .....	51
Сутки — естественная единица времени. Лабораторные работы 8 и 9.	
§ 10. Методы измерения тепловых величин .....	57
Температура.	

§ 11. Методы измерения электрических величин .....	60
Ампер. Приборы для измерения силы тока и напряжения.	
§ 12. Методы измерения магнитных величин .....	62
Магнитная индукция, магнитный поток, индуктивность.	
§ 13. Методы измерения световых величин .....	66
§ 14. Методы измерений в атомной и ядерной физике .....	68
Естественный фон облучения. Предельно допустимая доза.	
<b>Глава 2. Физические измерения в повседневной жизни ...</b>	<b>71</b>
§ 15. Как нужно измерять температуру .....	71
Медицинский термометр. Электронный термометр. Измерения температуры воздуха. Максимальный и минимальный термометры.	
§ 16. Измерение влажности воздуха .....	76
§ 17. Исследования работы сердца .....	79
§ 18. Электрические токи сердца .....	80
§ 19. Источники электрического напряжения вокруг нас .....	82
Газоразрядный индикатор. Изучение электрической зажигалки. Демонстрация прямого пьезоэффекта. Демонстрация обратного пьезоэффекта.	
§ 20. Бытовые источники света .....	87
Изучение принципа работы люминесцентной лампы. Холодный свет. Принцип действия люминесцентной лампы. Механизм генерации излучения в газовом разряде. Механизм преобразования излучения в люминофоре.	
<b>Глава 3. Физический практикум .....</b>	<b>96</b>
<i>Лабораторная работа 23. Исследование явления термоэлектронной эмиссии .....</i>	
	97
<i>Лабораторная работа 24. Измерение работы выхода электрона ..</i>	
	98
<i>Лабораторная работа 25. Исследование свойств лазерного излучения .....</i>	
	100
<i>Лабораторная работа 26. Исследование линейчатого спектра излучения .....</i>	
	102
<i>Лабораторная работа 27. Определение периода полураспада естественного радиоактивного изотопа .....</i>	
	103
<i>Экспериментальное задание 1. Изготовление модели газового термометра .....</i>	
	106
<i>Экспериментальное задание 2. Опыт с радиометром Крукса .....</i>	
	108
<i>Экспериментальное задание 3. Исследование параметров «черного ящика» на постоянном токе .....</i>	
	108
<i>Экспериментальное задание 4. Исследование параметров «черного ящика» на переменном токе .....</i>	
	114
<i>Экспериментальное задание 5. Изготовление модели автомата пожарной сигнализации .....</i>	
	117

<i>Экспериментальное задание 6. Расчет и испытание модели автомата для регулирования температуры</i> .....	119
<i>Экспериментальное задание 7. Исследование радиоактивной загрязненности</i> .....	122
<b>Приложение. Программа элективного курса «Измерения физических величин» (70 часов)</b> .....	129
Объяснительная записка .....	129
Основное содержание курса .....	131
Организация и проведение аттестации учеников .....	134
Аннотированный список литературы .....	135

# Предисловие

Чтобы решить, стоит ли выбрать курс «Измерения физических величин» для элективных занятий со школьниками, нужно знать, что может дать этот курс учащимся. Очевидно, что без измерений физических величин нет и физики. Но на элективных занятиях в школе не готовят специалистов-физиков. Их задачей является лишь подготовка учащихся к сознательному, обоснованному выбору своего жизненного пути. Каким же образом предлагаемый элективный курс может помочь этому выбору?

Количество школьных учебных предметов и элективных курсов очень мало по сравнению с множеством специальностей и видов практической деятельности. Поэтому элективный курс физики не должен быть ориентирован только на тех школьников, которые собираются стать физиками. Более разумно так выбрать содержание элективных занятий и методы обучения, чтобы курс был привлекательным для учащихся с различными интересами, склонностями и жизненными устремлениями.

Курс «Измерения физических величин» будет полезен не только будущим физикам, но и тем, кто предполагает выбрать любую профессию, связанную с экспериментальными исследованиями, инженерными разработками, с практическим применением разнообразных измерительных приборов и устройств. Занятия по предлагаемой программе также принесут пользу любому человеку при использовании различной бытовой техники.

Вместе с тем учителю следует помнить, что важно не только научить школьников работать с конкретными приборами. Гораздо важнее, чтобы ученики приобрели опыт самостоятельного планирования и проведения экспериментов, научились обрабатывать, анализировать и представлять результаты выполненных исследований, понимали общие принципы безопасного использования измерительных приборов и технических устройств. Предлагаемый элективный курс позволяет учителю уделять этим вопросам самое пристальное внимание.

Программа элективного курса «Измерения физических величин» приведена в приложении.

# Методы измерений физических величин

## § 1. Физические величины и их единицы

Как человек познает мир? Физика как одна из наук о природе возникла потому, что человек стремился понять окружающий мир, объяснить причины и сущность наблюдаемых природных явлений.

На основе опыта взаимодействия с различными предметами у каждого человека формируются *понятия* о предметах и явлениях. Понятия о предметах и явлениях природы существенно отличаются от самих предметов и явлений. Предметы и явления объективны, существуют независимо от того, смотрит на них кто-то, думает о них или нет. Понятия о предметах и явлениях существуют лишь в человеческих мыслях, в умах людей. Опыт взаимодействия каждого человека с окружающим миром индивидуален, субъективен, неповторим. Поэтому понятия о предметах и явлениях у людей субъективны, различны. Солнце одно и то же для всех людей, а понятие о том, что такое Солнце, у каждого человека свое особенное, субъективное. Понятия одного человека о мире невозможно передать другому, так как они у каждого человека формируются только на основе личного практического опыта и собственных размышлений, собственных умственных усилий. Каким же образом в таком случае развивается наука, передается опыт прошлых человеческих поколений новым поколениям?

Начнем с самого начала. Ребенок видит различные предметы и слышит слова родителей: «Это каша. Это яблоко. Это мяч.» При этом родители вовсе не передают ребенку свои понятия о предметах, а лишь сообщают, как называются эти предметы. Понятия же обо всех предметах формируются в сознании ребенка только на основе его личного опыта взаимодействия с этими предметами, на основе собственных ощущений. Таким образом, уже в процессе простого называния, наименования предметов начинается передача опыта познания мира.



Ребенок собственным умом вскоре устанавливает связь между последовательностью звуковых сигналов со сложным спектральным составом, улавливаемых ухом, и видимыми или осязаемыми при этом предметами. Самые приятные ощущения он испытывает при соприкосновениях с объектом внешнего мира, появление которого сопровождается звуковыми сигналами, которые обозначаются в записи словом «мама». Вскоре ребенок научится сам произносить слово «мама», чтобы вызвать появление самого замечательного и постоянно нужного ему в этом мире объекта. Но какое понятие возникает в уме ребенка, когда он слышит слово «мама», знает только сам ребенок, а остальные люди, глядя на выражение его лица, могут лишь предполагать и догадываться, какое это светлое и радостное понятие.

Язык служит не только для обозначения предметов, но и для подачи сигналов, побуждающих к определенным действиям: «Встань! Сядь! Открой рот! Иди сюда! Стой! Дай! На!» Сигналы побуждения к действию характерны не только для языка человека, но и для языков многих животных. Стая птиц взлетает по сигналу тревоги одной птицы, кошка бежит к своему котенку, услышав его писк, собака своим лаем устрашает противника и одновременно призывает на помощь членов стаи или хозяина.

Установление связей между звуками (словами) и осязаемыми предметами, обнаружение возможности управлять событиями путем подачи звуковых сигналов — это особый процесс *овладения языком*. При этом ребенок учится анализировать и выделять сигналы по определенным признакам, устанавливать причинно-следственные связи между сигналами от разных органов чувств; в результате и совершается качественный скачок умственного развития ребенка. Обучение языку — необходимое условие и самое эффективное средство передачи человеческого опыта познания мира.

**Практика и теория в процессе познания мира.** Однако какое отношение имеют все эти разговоры о понятиях, о языке к изучению физики и измерениям физических величин? Рассмотрим один пример. Для того чтобы сигнал опасности был понятным, человек должен иметь собственное понятие об опасности. Предупреждение словом «горячо!» не имеет никакого смысла для ребенка, если раньше перед прикосновением к горячей чашке, лампе или утюгу он не слышал этого слова

и не имел возможности установить его связь с собственными ощущениями при соприкосновениях с горячими предметами. Только на основе собственного опыта у любого человека постепенно формируется обобщенное понятие о горячем как свойстве, которое может быть присуще любому предмету. Аналогично формируются понятия «холодный», «сладкий», «горький», «тяжелый», «легкий» и т. п., характеризующие свойства предметов реального мира.

Возникновение у человека понятий о качествах предметов — это новая, более высокая ступень развития мышления, поскольку в природе нет таких предметов или явлений, как «тепло», «холод», «тяжесть», «сладость», «горечь» и т. п. Это понимали уже древнегреческие философы-атомисты. Демокрит (460—370 гг. до н. э.) писал: «Лишь в общем мнении существует цвет, в мнении — сладкое, в мнении — горькое, в действительности же существуют только атомы и пустота». Демокрит полагал, что все ощущаемые нами качества возникают из соединения атомов и существуют лишь для нас, воспринимающих их, в природе же нет ничего ни белого, ни черного, ни желтого, ни красного, ни горького, ни сладкого.

Обозначение словом какого-то качества, свойственного многим различным предметам, происходит только после того, как на основе взаимодействия с этими предметами в сознании человека возникло понятие о таком качестве. Понятиям о качествах не соответствуют какие-либо объективно существующие предметы, эти понятия созданы умом человека для выражения качественной меры вещей по отношению к человеку. Это *теоретические понятия*.

Процесс взаимодействия человека с предметами материального мира, являющийся основой формирования элементарных знаний об окружающем мире, называют *практикой*. Систему обобщенных знаний о мире, в которой рассматриваются абстрактные понятия, созданные умом человека на основе практики взаимодействия с реальным миром, называют *теорией*. Теория описывает, объясняет совокупность явлений реального мира и предсказывает какие-то новые явления или свойства исследуемых объектов. В отличие от практики теория не включает процесс непосредственного взаимодействия человека с реальным миром.

**Физические величины.** Описывая свойства предметов с использованием таких понятий, как «большой» или «маленький»,

человек указывал, прежде всего, каковы размеры предмета по отношению к размерам тела человека, слова «горячий» или «холодный» передавали ощущения человека при соприкосновениях с телами, у которых, говоря современным языком физики, температура выше или ниже температуры тела человека, и т. д.

Использование личных ощущений человека в качестве меры качеств предметов приводит к тому, что опыт познания мира, приобретенный одним человеком, не может быть точно передан другим людям, так как ощущения каждого человека субъективны, отличны от ощущений других людей. То, что одному человеку «тяжело», другому «легко». Большинство мужчин способны отличить красный цвет от зеленого, но примерно 8% мужчин эти цвета не различают. Таких людей называют дальтониками по имени ученого Джона Дальтона, который обладал таким недостатком зрения и впервые описал его. Дальтонику с использованием общих житейских понятий невозможно объяснить, чем отличаются предметы красного и зеленого цвета.

Для перехода от формирования обычных житейских понятий о качествах предметов к формированию научных понятий и научных методов познания мира необходимо было найти способы объективного описания свойств тел и природных явлений, с помощью которых любому человеку можно было бы передать полную информацию о любых природных явлениях, наблюдаемых другим человеком. Чем же отличаются научные понятия и методы познания от обычных житейских?

Научными называют такие понятия и методы исследования, с помощью которых могут быть установлены *научные факты*. Научными фактами называют такие утверждения, которые могут быть проверены и независимо подтверждены при выполнении заданных условий другим человеком.

Для установления научных фактов при исследованиях природных явлений в физике вводятся понятия, с помощью которых возможна объективная количественная характеристика свойств тел и природных процессов, не зависящая от субъективных ощущений человека. Введение таких понятий является процессом создания особого языка — *языка науки физики*. Как без овладения обычным языком нельзя понять других людей и невозможно объяснить им свои мысли и желания, так и без овладения научным языком нельзя понять физику и ее законы. Основу языка физики составляют понятия, называемые *физическими величинами*.

**Масса.** Рассмотрим для примера один из способов определения физической величины «масса». Всем известно, что одни тела Земля притягивает сильнее, другие — слабее. Следовательно, все тела обладают чем-то, от чего зависит их притяжение к Земле. Это «что-то» и назовем массой тела. Однако название — это еще не определение физической величины. Для определения массы как физической величины нужно выбрать единицу измерения массы и задать способ ее измерения.

В физике за единицу массы (килограмм) принята масса международного прототипа килограмма. Международный прототип килограмма — это цилиндрическая гиря из сплава платины с иридием диаметром и высотой 39 мм, он хранится в Международном бюро мер и весов в г. Севре, во Франции.

Измерение массы любого тела заключается в сравнении притяжения этого тела к Земле с притяжением прототипа (или эталона) килограмма. Если тело притягивается к Земле так же, как прототип килограмма, то масса этого тела равна одному килограмму. Равенство притяжения двух тел к Земле можно установить с помощью равноплечных весов — если притяжение тел к Земле одинаково, то весы находятся в равновесии.

Перед учащимися можно поставить вопрос: «Каким образом измерить массу любого другого тела, если его масса не равна массе эталона?» Ответ на вопрос кажется очевидным: нужно воспользоваться набором гирь. Но как отградуировать гири разной массы? Нужно изготовить несколько тел массой по одному килограмму — килограммовые гири. Используя две гири по 1 кг можно изготовить гирю массой 2 кг и так далее все большей массы. Разделив тело массой 1 кг на две равные части и сравнив их массы с помощью весов, мы получим две гири по 0,5 кг. Продолжая аналогичные процедуры, можно изготовить комплект гирь с различными массами и затем с помощью весов и гирь определять массу любого тела. Изготовив комплекты гирь, сверенные с эталоном килограмма, можно снабдить одинаковыми гирями все лаборатории, заводы, фабрики, магазины и всюду измерять массы тел одинаковым объективным методом и получать одинаковые результаты при измерениях масс одинаковых тел.

Масса определена независимо от других физических величин и не выражается через другие величины. Поэтому она относится к так называемым *основным физическим величинам*.

На этом этапе учителю следует обратить внимание на несколько тонкостей. Первая из них заключается в том, что при таком способе введения понятия массы в неявном виде используется закон всемирного тяготения, согласно которому на тела одинаковой массы со стороны Земли действуют одинаковые силы, и условие равновесия рычага. Однако в описании способа измерения масс тел не случайно ни разу не использовано понятие «сила», а говорится просто о притяжении тел к Земле. Дело в том, что физическая величина «сила» в СИ является производной величиной, определяемой через основную физическую величину «масса». Поэтому если при определении понятия «масса» использовать понятие «сила», то получится логический круг.

Вторая тонкость связана с кажущимся очевидным предположением о том, что при делении тела массой 1 кг на две равные половины мы получаем два тела массами по 0,5 кг, а при соединении двух тел массами по 1 кг получаем тело массой 2 кг. Такое предположение выражает в классической физике свойство аддитивности масс, из которого следует закон сохранения массы при любых взаимодействиях тел. Но современной релятивистской физикой установлено, что масса не обладает свойством аддитивности и масса системы тел не сохраняется при их взаимодействиях. Это особенно явно наблюдается при осуществлении ядерных реакций. Однако во всех опытах и измерениях масс тел в повседневной человеческой практике отклонения от закона сохранения массы не обнаружимы, поэтому описанный способ изготовления гирь соответствует реальной практике.

Третья тонкость связана с тем, что фактически в физике используются два независимых эталона массы — эталон килограмма и атом изотопа углерода-12. Первый используется при измерениях масс макроскопических тел, второй — при измерениях масс атомов, атомных ядер и элементарных частиц.

На указанные тонкости едва ли следует обращать внимание учеников, если они сами не задают вопросов на эти темы. Мы затронули данные проблемы для того, чтобы учитель был готов дать убедительные ответы на подобные вопросы, если их зададут школьники.

**Сила.** После определения массы как физической величины и задания практического способа ее измерения можно ввести

силу как физическую величину и дать способ ее измерения. Силой действия одного тела на другое называют физическую величину  $\vec{F}$ , равную произведению массы  $m$  тела на его ускорение  $\vec{a}$  в результате этого действия:

$$\vec{F} = m\vec{a}. \quad (1)$$

Обоснованием для такого определения силы является тот опытный факт, что при любых взаимодействиях двух тел произведение массы  $m_1$  одного тела на его ускорение  $\vec{a}_1$  всегда точно равно по модулю и противоположно по направлению произведению массы  $m_2$  второго тела на его ускорение  $\vec{a}_2$ :

$$m_1\vec{a}_1 = -m_2\vec{a}_2.$$

Таким образом, в качестве количественной меры взаимодействия тел выбрана величина, одинаковая по модулю для двух взаимодействующих тел.

Поскольку единицы измерения массы и ускорения были уже выбраны ранее, единица измерения силы определяется через них на основании соотношения (1) и имеет собственное название *ньютон*:

$$1 \text{ Н} = 1 \text{ кг} \times 1 \text{ м/с}^2 = 1 \text{ кг} \cdot \text{м/с}^2.$$

*Физическая величина, определяемая через основные величины, называется производной физической величиной.* Сила — производная физическая величина.

Вычисление силы через измерения массы и ускорения возможно в астрономии и космонавтике при наблюдениях движений планет, космических кораблей и искусственных спутников Земли, в ядерной физике и физике элементарных частиц. Но в технике и повседневной человеческой практике силы не измеряют по ускорениям тел. Более простой способ измерения сил использует тот факт, что взаимодействия тел приводят не только к возникновению ускорений, но могут вызывать и деформацию тел. Это позволяет использовать для измерения сил прибор, называемый *динамометром*.

Как устроен динамометр, какое свойство пружины используется при изготовлении динамометра, как можно самому изготовить динамометр и отградуировать его, должны рассказать учащиеся.

Могут ли придуманные человеком абстрактные понятия играть существенную роль в процессе познания реального мира? Не только могут, но и безусловно играют. С введением понятий массы и силы экспериментальный факт, что тела любой массы

имеют у поверхности Земли одинаковое ускорение свободного падения, может быть выражен как закон притяжения всех тел Землей: любое тело притягивается к Земле с силой, пропорциональной массе тела. Этот закон уже имеет математическое выражение:

$$F = mg.$$

Далее экспериментальные исследования приводят к открытию закона зависимости сил взаимного притяжения любых тел от расстояния между ними и от масс тел — закона всемирного тяготения:

$$F = G \frac{mM}{r^2}.$$

Этот пример показывает, что введение физических величин открывает возможности для экспериментальных исследований взаимных связей между ними, точного количественного описания природных процессов и явлений, открытия законов природы.

Результаты любого экспериментального исследования в физике могут быть представлены в понятном для других физиков виде только на языке физики — с представлением результатов измерений физических величин.

В любой физической теории, в любом физическом законе устанавливаются связи между физическими величинами, а не между какими-то реальными телами. Любое теоретическое исследование в физике проводится на основе операций с физическими величинами.

Таким образом, измерения физических величин лежат в основе всего здания науки физики. Понимание законов физики возможно только на основе формирования понятий о физических величинах, а понятия о физических величинах формируются наиболее успешно в процессе проведения самостоятельных экспериментов с соответствующими измерениями. Такие эксперименты и составляют содержание данного элективного курса.

**Единица длины — метр.** После рассмотрения истории поисков природной основы для выбора единицы длины ученикам предлагается творческое задание — придумать природную основу для определения единицы длины. Возможными вариантами решения можно считать предложения определить единицу длины через диаметр атома водорода, одинакового во

всей Вселенной и неизменного во времени, или через длину волны одной из спектральных линий излучения водорода. Это в принципе правильные решения, они не приняты для практического применения по той причине, что определение метра через скорость света позволяет достигнуть большей точности измерений.

## § 2. Измерения физических величин

Для того чтобы приступить к выполнению измерений физических величин, школьников необходимо познакомить с такими понятиями, как размер и значение физической величины, пояснить, что такое мера и что называется измерительным прибором, какие измерения называются прямыми и какие косвенными, что такое абсолютная и относительная погрешности измерений. Однако теоретическое знакомство должно быть очень кратким и непосредственно связанным с выполнением лабораторной работы и творческого задания.

**Лабораторная работа 1.** Измерения длины — это самые простые и привычные измерения, постоянно встречающиеся в повседневной жизни. Простая задача измерения диаметра монеты с помощью масштабной линейки и затем микрометра предлагается ученикам для того, чтобы они на практике применили приобретенные знания об абсолютной и относительной погрешностях измерений и подготовились к введению на следующем занятии понятий об инструментальной погрешности и погрешности отсчета. Вторая задача лабораторной работы — знакомство с точным измерительным прибором (микрометром).

**Задача.** В сильной группе учащихся лабораторная работа 1 займет малую долю урока и большую часть времени можно использовать на решение задачи, знакомящей школьников с конкретными примерами косвенных измерений расстояний и достижениями современной науки в этой области.

Задача об измерениях расстояний до небесных тел и их размеров имеет важное значение для формирования представлений учащихся о мире и возможности его познания. Для принципиального решения задачи нужно догадаться, что для измерения расстояния до недоступного предмета можно использовать свойства подобных треугольников. Когда эта идея высказана, остается найти способы практического решения



задачи. Вероятно, начать лучше с использования модели Луны. В классе роль «Луны» может выполнить любое шарообразное тело (глобус, мяч, резиновый шар), установленное на демонстрационном столе или укрепленное на классной доске. Автор идеи должен представить объяснение своего решения с использованием чертежа на доске. Этот чертеж и будет ориентиром для учеников при практическом выполнении задания.

Для определения расстояния от точки  $A$ , в которой находится наблюдатель, до недоступной точки  $B$  отметим направление прямой  $AB$  и переместимся на некоторое измеренное расстояние до точки  $C$  по прямой, перпендикулярной направлению  $AB$  (рис. 1). Из прямоугольного треугольника  $ABC$  искомое расстояние  $AB$  равно:  $AB = AC \cdot \text{ctg } \alpha$ . Так как расстояние  $AC$  измерено, для решения задачи нужно найти значение котангенса угла  $\alpha$ . Угол  $\alpha = 90 - \beta$  можно определить непосредственным измерением угла  $\beta$  между прямыми  $CA$  и  $CB$ . Но более удобно выполнить следующее дополнительное построение. Прикрепим к листу картона лист белой бумаги и положим его на ученический стол таким образом, чтобы левый край листа совпал с прямой  $AB$ . Совпадение проконтролируем наблюдением совпадения двух булавок, вколотых по левому краю листа, с центром «Луны» в точке  $B$ . Затем, не изменяя положения листа на столе, переместим глаз к правому углу листа. Вколем первую булавку в правый угол листа, а вторую на пересечении прямой, соединяющей первую булавку с центром «Луны», с дальним краем листа. Как видно по рис. 1,

$$\text{ctg } \alpha = \frac{a}{b}.$$

Следовательно, искомое расстояние  $AB$  равно:

$$AB = AC \frac{a}{b}.$$

После нахождения расстояния до небесного тела может быть решена задача нахождения размеров небесного тела, если удастся измерить угловой диаметр  $\gamma$  тела. Обозначим расстоя-

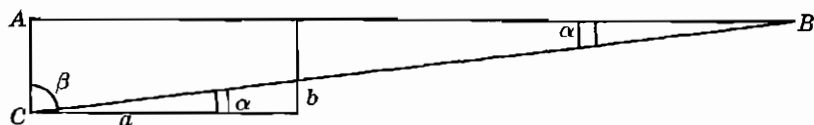


Рис. 1

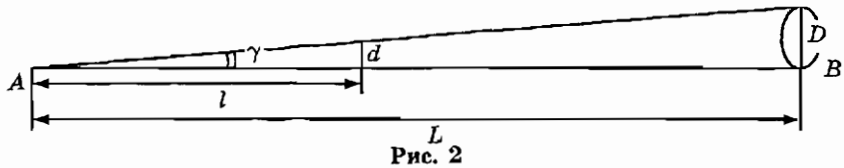


Рис. 2

ние до небесного тела  $AB = L$ . Тогда диаметр  $D$  небесного тела можно вычислить по измеренному углу  $\gamma$ , под которым виден диаметр небесного тела с Земли, и расстоянию  $L$ :

$$D = L \cdot \operatorname{tg} \gamma.$$

Тангенс угла  $\gamma$  можно найти, направив масштабную линейку вдоль прямой  $AB$  и измерив расстояние  $l$ , на котором монета диаметром  $d$  точно закрывает диск «Луны» (рис. 2):

$$\frac{D}{L} = \frac{d}{l}, \quad D = L \frac{d}{l}.$$

**Измерение расстояний до небесных тел.** Одному из учащихся можно заранее поручить подготовку сообщения об измерениях расстояний до небесных тел. В этом сообщении должно быть объяснено, что при измерениях расстояний от Земли до других небесных тел в пределах Солнечной системы в качестве базиса используют радиус Земли. Для измерений расстояний до ближайших звезд земной радиус в качестве базиса непригоден, так как угол, под которым радиус Земли виден со звезды, оказывается неизмеримо мал. Даже угол, под которым виден со звезды радиус земной орбиты, оказывается очень трудно измеримым.

Расстояние  $R$  от Земли до Солнца называют астрономической единицей, оно равно примерно 150 000 000 км. Угол  $p$ , на который происходит кажущееся смещение близкой звезды относительно более далеких звезд при перемещении Земли на расстояние  $R$ , называется *годовым параллаксом* (рис. 3). Звезды так далеки от Земли, что параллактическое смещение большинства звезд не обнаружимо даже с помощью современных телескопов.

В 1837 г. впервые удалось измерить годичный параллакс одной из наиболее близко расположенных к Земле звезд — звезды Веги. Эта задача была решена основателем и первым директором Пулковской обсерватории Василием Яковлевичем Струве.

Зная параллакс  $p$  звезды и расстояние  $R$  от Земли до Солнца, можно найти расстояние  $D$  до звезды:

$$\frac{R}{D} = \sin p, \quad D = \frac{R}{\sin p}.$$

Расстояние, с которого радиус земной орбиты виден под углом в одну угловую секунду, называют *парсеком* (от слов «параллакс» и «секунда»):

$$1 \text{ пс} \approx 3,086 \cdot 10^{16} \text{ м.}$$

Расстояние до Веги оказалось равным примерно 8,26 пс или  $2,55 \cdot 10^{17}$  м.

Чтобы представить себе, что значат эти числа, найдем, сколько времени затрачивает свет на преодоление такого пути. Расстояние, которое свет проходит за один земной год, в астрономии называют *световым годом*. Скорость света в вакууме равна примерно  $3 \cdot 10^8$  м/с, откуда расстояние размером в световой год равно:

$$1 \text{ св.г.} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \cdot 365,25 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ с} \approx 9,46 \cdot 10^{15} \text{ м.}$$

Выразим расстояние до Веги в световых годах:

$$\frac{2,55 \cdot 10^{17} \text{ м}}{9,46 \cdot 10^{15} \text{ м}} \approx 27,$$

т. е. расстояние от Земли до Веги 27 световых лет.

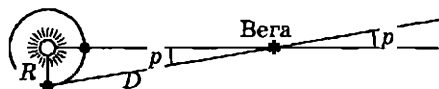


Рис. 3

Как показали измерения расстояний до звезд, самой близкой к Солнечной системе звездой является звезда Альфа Центавра. Расстояние до нее равно 4,35 световых лет.

**Светолокация.** Световой луч служит не только основой для определения единицы длины, но и средством для особо точных измерений больших расстояний. Использование световых сигналов для измерений расстояний стало возможным после изобретения мощных источников света — лазеров. Лазерные дальномеры используются для геодезических измерений на поверхности Земли, для измерения расстояний до искусственных спутников Земли, космических кораблей и планет Солнечной системы. Для измерения расстояния до космического корабля на оптическом телескопе устанавливают лазер и направляют его луч на космический корабль. На корабле устанавливают специальный лазерный отражатель. Импульс света отражается от корабля и возвращается к приемному устройству телескопа. По длительности времени между моментами отправления светового сигнала и его возвращения определяется расстояние до корабля. Лазерный дальномер расстояние до 1500 км измеряет с погрешностью не более 30 см.

**Измерения малых расстояний.** Второе сообщение можно поручить на тему об измерениях сверхмалых расстояний. Это позволит оценить современные возможности физики в области измерений расстояний и линейных размеров тел как в области мегамира, так и в области микромира. Поскольку информацию об измерениях сверхмалых расстояний отыскать не очень просто, эту тему можно поручить ученику, имеющему опыт поиска нужной информации в Интернете. Задание можно сформулировать следующим образом: нужно найти статьи, в которых описан принцип действия *растрового туннельного микроскопа* и рассказать об этом приборе и получаемых с его помощью результатах.

В растровом туннельном микроскопе над поверхностью исследуемого тела устанавливается металлическое острие малого диаметра, между острием и поверхностью образца создается электрическое поле. Под действием электрического поля электроны вытягиваются с поверхности острия, однако их возможное удаление от конца острия не превышает диаметра атома. Если расстояние от острия до исследуемой поверхности



Рис. 4

меньше 1 нм, то между острием и поверхностью протекает электрический ток. При изменении расстояния на диаметр атома сила тока изменяется в 1000 раз. Это позволяет по силе тока очень точно определять расстояние от острия до исследуемой поверхности. Если перемещать острие по прямой вдоль горизонтально расположенной поверхности и автоматически поддерживать постоянное значение силы тока в цепи путем перемещений острия по вертикали, то полученная кривая зависимости вертикальной координаты острия от горизонтальной даст срез рельефа поверхности вдоль одной прямой. Повторяя такие срезы шаг за шагом, можно получить сведения о строении поверхности и преобразовать их в объемную картину на экране компьютера.

На рис. 4 представлена картина строения поверхности кристалла кремния, полученная с помощью растрового туннельного микроскопа. Бугры и впадины на этой картинке показывают структуру внешних электронных оболочек атомов кремния в кристалле. Очевидно, что для получения такой картины нужно иметь способ перемещения острия на очень малые расстояния во всех трех направлениях и способ точного измерения этих перемещений. Точные малые перемещения острия осуществляются за счет использования явления обратного пьезоэлектрического эффекта. Этот эффект заключается в том, что некоторые кристаллы, например кварц, под действием внешнего электрического поля удлиняются или сокращаются. Подавая на электроды на поверхности такого кристалла напряжение порядка  $10^{-5}$  В, можно изменять его размеры на 0,1 нм и менее. Прикрепив острие к трем таким кристаллам, расположенным взаимно перпендикулярно, можно перемещать его на точно определенные расстояния в любых направлениях.

### § 3. Погрешности прямых однократных измерений

Знакомство с понятиями границ абсолютной и относительной погрешности прямого измерения, с понятиями инструментальной погрешности, погрешности отсчета и погрешности метода измерения необходимо для сознательного выбора метода измерений и измерительных приборов, для понимания смысла результатов эксперимента и грамотного их представления. Однако текст § 3 учебного пособия вовсе не предназначен для заучивания определений всех видов погрешностей измерений. После первого общего обращения к тексту этого параграфа (как и к текстам остальных параграфов первой главы) ученики могут возвращаться к нему неоднократно по мере изучения элективного курса.

Формирование понятий о границах различных видов погрешностей измерений происходит успешнее при непосредственном выполнении учениками практических работ с использованием разнообразных измерительных приборов. Поэтому после краткого теоретического объяснения целесообразно приступить к практическому знакомству с измерительными приборами. Каждому учащемуся можно выдать несколько измерительных приборов, например динамометр, вольтметр, амперметр. Лучше, если приборы у всех школьников будут одинаковые, так как в этом случае проще контролировать правильность результатов, получаемых каждым учеником.

Работу с приборами можно организовать следующим образом. На классной доске представлен образец отчетной таблицы, которую каждому учащемуся нужно скопировать и заполнять по мере выполнения заданий. Задания формулируются всей группе и выполняются каждым школьником самостоятельно. Учащийся, выполнивший задание первым, приглашается к доске и записывает результат в таблицу. Если у кого-то получается другой результат, находящийся у доски ученик обосновывает свое решение, расхождения обсуждаются коллективно и находится правильное решение. Для записи результата и обоснования решения каждого нового задания вызывается другой учащийся.

Можно предложить следующие задания.

1) Рассмотрите каждый из имеющихся у вас измерительных приборов и определите цену деления  $C$  на шкале

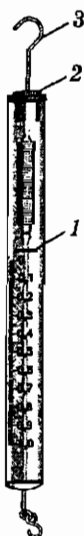


Рис. 5

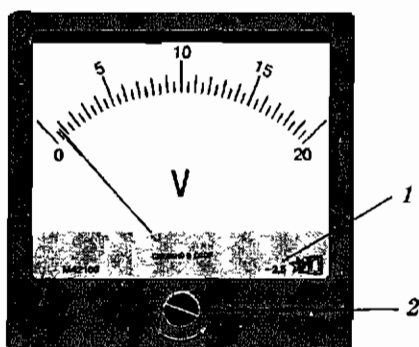


Рис. 6

каждого прибора. Результаты запишите в отчетную таблицу.

Динамометр на рис. 5 имеет цену деления 0,01 Н, у вольтметра на рис. 6 цена деления 0,5 В.

2) Оцените границу абсолютной инструментальной погрешности  $\Delta_{\text{инст}}$  каждого прибора. Результаты запишите в отчетную таблицу.

Это задание требует разъяснений. Нужно обратить внимание учащихся на то, что для уменьшения возможной систематической инструментальной погрешности прежде всего нужно проверить, находится ли до начала измерения стрелка или указатель прибора на нулевом делении шкалы. (Чтобы школьники могли научиться самостоятельно регулировать измерительные приборы нужно на одном-двух приборах в каждом комплекте заранее вращением корректора сдвинуть стрелку от нулевой риски на одно-два деления.) Если указатель динамометра не находится на нулевом делении шкалы, то необходимо отрегулировать прибор. В динамометре, представленном на рис. 5, установка указателя (1) на нулевое деление шкалы осуществляется вращением стержня (3) при вертикальном расположении динамометра, окончательное положение стержня фиксируется гайкой (2). В динамометре такого типа, какой представлен на

рис. 4 пособия для учащихся, перемещается и закрепляется шкала.

Стрелка вольтметра (рис. 6) или другого электроизмерительного прибора устанавливается на нулевую риску шкалы вращением корректора (2) с помощью отвертки.

Если прибор не имеет регулировочного устройства, то отклонение стрелки от нулевого штриха шкалы в нерабочем состоянии должно учитываться при снятии показаний прибора во время измерений.

После установки стрелки вольтметра на нулевую риску шкалы для нахождения границы абсолютной погрешности прибора учащимся нужно применить свои знания о классах точности электроизмерительных приборов. Учитель должен научить их, как определить класс точности прибора, указав цифры на шкале (отмечены цифрой 1 на рис. 6). Граница абсолютной инструментальной погрешности вольтметра  $\Delta U_{\text{инст}}$  определяется как произведение границы его относительной инструментальной погрешности  $\epsilon_{\text{инст}}$  при максимальном отклонении стрелки на максимальное измеряемое значение напряжения  $U_{\text{макс}}$ :

$$\Delta U_{\text{инст}} = \epsilon_{\text{инст}} \cdot U_{\text{макс}} = 2,5\% \cdot 20 \text{ В} = 0,025 \cdot 20 \text{ В} = 0,5 \text{ В}.$$

Для динамометра с неизвестным классом точности границу абсолютной инструментальной погрешности прибора можно принять примерно равной цене деления шкалы прибора:

$$\Delta F_{\text{инст}} = C = 0,01 \text{ Н}.$$

3) *Оцените границу абсолютной погрешности отсчета  $\Delta_{\text{отс}}$  при снятии показаний с каждого прибора. Результаты запишите в отчетную таблицу.*

При выполнении этого задания нужно предложить учащимся посмотреть на стрелку электроизмерительного прибора вертикально сверху, затем слева и справа от вертикальной линии, проходящей через стрелку, для того чтобы обнаружить параллактическое смещение стрелки относительно шкалы.

Так как граница абсолютной погрешности отсчета  $\Delta_{\text{отс}}$  примерно равна половине цены деления шкалы прибора  $C$ , то для динамометра и вольтметра получаем соответственно значения:

$$\Delta F_{\text{отс}} = 0,005 \text{ Н} \quad \text{и} \quad \Delta U_{\text{отс}} = 0,25 \text{ В}.$$

4) *Оцените границу абсолютной погрешности измерения  $\Delta$  при выполнении измерений каждым прибором:*

$$\Delta = \Delta_{\text{инст}} + \Delta_{\text{отс}}.$$

*Результаты запишите в отчетную таблицу.*



Для динамометра получаем  $\Delta F = \Delta F_{\text{инст}} + \Delta F_{\text{отс}} = 0,01 \text{ Н} + 0,005 \text{ Н} = 0,015 \text{ Н}$ , для вольтметра получаем  $\Delta U = \Delta U_{\text{инст}} + \Delta U_{\text{отс}} = 0,5 \text{ В} + 0,25 \text{ В} = 0,75 \text{ В}$ .

5) Вычислите границу относительной погрешности измерения силы с помощью данного динамометра и напряжения с помощью данного вольтметра при заданных в таблице результатах измерений этих величин.

В таблицу учителю следует внести значения, относящиеся примерно к середине шкалы прибора и к четверти шкалы прибора. Например, для вольтметра, представленного на рис. 6, задаются значения измеренного напряжения 10 В и 5 В. В этом случае границы относительной погрешности измерения напряжения таковы:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta U}{U_1} = \frac{0,75 \text{ В}}{10 \text{ В}} = 0,075 = 7,5\%,$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta U}{U_2} = \frac{0,75 \text{ В}}{5 \text{ В}} = 0,15 = 15\%.$$

Нужно обратить особое внимание на смысл полученного результата. Для вольтметра, на шкале которого указана граница относительной инструментальной погрешности 2,5%, при измеренном значении напряжения 10 В граница относительной погрешности измерения оказывается равной 7,5%, а при измеренном значении напряжения 5 В граница относительной погрешности измерения оказывается равной 15%! При еще меньших значениях напряжения относительная погрешность измерения будет еще большей. Отсюда следует сделать вывод, что для достижения высокой точности измерений нужно выбрать такой прибор высокого класса точности, у которого предел напряжения по шкале прибора наиболее близок к измеряемому значению.

### Отчетная таблица

Измерительный прибор	Цена деления, С	Граница абсолютной инструментальной погрешности, $\Delta_{\text{инст}}$	Граница абсолютной погрешности отсчета, $\Delta_{\text{отс}} = C/2$	Граница абсолютной погрешности измерения, $\Delta$	Граница относительной погрешности измерения, $\varepsilon$
Динамометр					
Амперметр					
Вольтметр					

## § 4. Безопасность эксперимента

**Обеспечение безопасности эксперимента для человека.** Обеспечение полной безопасности учащихся является обязательным условием организации лабораторных занятий по физике. Реальная опасность для жизни школьника при работе с физическими приборами связана, в первую очередь, с использованием любых приборов, подключаемых к электрической сети.

*Прикосновение к неизолированным проводам или контактам под напряжением 127 или 220 В может вызвать смертельное поражение человека электрическим током.* Отсюда обязательным правилом при оборудовании школьной физической лаборатории является оснащение ее комплектом электрооборудования с подведением к ученическим столам переменного напряжения 42 В.

Однако не следует забывать, что учащиеся дома повседневно пользуются различными электрическими приборами, включаемыми в сеть переменного тока с напряжением 220 В. Поэтому важно не только оградить школьников от возможной опасности поражения током на занятиях в кабинете физики, но и научить их грамотному и безопасному обращению с электроприборами и электрическими цепями.

После выяснения механизма поражения электрическим током важно, чтобы при выполнении лабораторной работы 3 учащиеся на основе собственных измерений электрического сопротивления своего тела рассчитали значение опасного для жизни электрического напряжения и не относились к источникам электрического напряжения 60–90 В как к совершенно безопасным.

Во всех источниках постоянного и переменного тока с напряжением на выходе выше 12 В следует установить последовательно выходу ограничивающие резисторы. Расчет электрического сопротивления  $R$  ограничивающего резистора делается по максимальному значению напряжения  $U$  на выходе источника и максимальному значению безопасного для жизни значения силы тока:

$$R = \frac{U B}{0,02 A}.$$

Например, для источника тока с максимальным напряжением 42 В на выходе получаем значение сопротивления ограничива-

ющего резистора

$$R = \frac{42 \text{ В}}{0,02 \text{ А}} \approx 2000 \text{ Ом.}$$

Резистор должен быть рассчитан на рассеяние мощности до значения, определяемого по формуле:

$$N = U \cdot I = 42 \text{ В} \cdot 0,02 \text{ А} \approx 1 \text{ Вт.}$$

Установка таких ограничивающих резисторов не только гарантирует безопасность учащихся, но и уменьшит число случаев порчи источников питания и электроизмерительных приборов.

Опасность для здоровья учащихся могут представлять не только эксперименты с использованием электрических приборов. При работе с насосом, создающим повышенное или пониженное давление в замкнутом объеме, необходимо помнить о том, что сосуд, с которым выполняется эксперимент, имеет определенный предел прочности. При выполнении опытов с повышенным или пониженным давлением в сосуде нужно обязательно предусмотреть возможность его разрушения и предотвратить опасность поражения людей. *Поэтому следует исключить проведение учащимися опытов по выкачиванию или накачиванию воздуха с использованием стеклянных сосудов.* Безопаснее использовать для таких опытов пластмассовые бутылки или другие пластмассовые сосуды, не дающие при разрушении поражающих осколков.

**Обеспечение безопасности эксперимента для измерительных приборов и оборудования.** В процессе исследования необходимо обеспечить не только безопасность экспериментатора, но и сохранность измерительных приборов и оборудования. Особенно это требование относится к использованию приборов для измерения силы тока. Поскольку учащиеся еще не обладают навыками работы с электроизмерительными приборами, можно сформулировать для них одно простое обязательное правило: *прежде чем подключить к источнику тока электрическую цепь, убедитесь, что общее электрическое сопротивление цепи больше такого значения  $R_{\text{мин}}$ , при котором сила тока в цепи достигает максимального значения, измеряемого данным прибором.* Если общее сопротивление неизвестно, то последовательно с прибором для измерения силы тока в цепь необходимо включить резистор, ограничивающий силу тока в

цепи до максимального значения, измеряемого данным прибором.

Например, если для исследования вольтамперной характеристики полупроводникового диода вы используете миллиамперметр с максимальным измеряемым значением силы тока 5 мА и источник регулируемого напряжения с максимальным значением напряжения на выходе 10 В, то электрическое сопротивление ограничивающего резистора должно быть не менее, чем

$$R = \frac{10 \text{ В}}{5 \cdot 10^{-3} \text{ А}} = 2000 \text{ Ом.}$$

При решении задачи 2 должен получиться ответ

$$R = \frac{12 \text{ В}}{5 \cdot 10^{-5} \text{ А}} = 2,4 \cdot 10^5 \text{ Ом.}$$

## § 5. Планирование и выполнение эксперимента

**Выбор метода измерений и измерительных приборов.** Любые измерения физических величин производятся для того, чтобы найти их приближенные значения с минимальными погрешностями измерений. Поэтому на этапе выбора метода измерений и измерительных приборов следует сделать предварительную оценку границ возможных погрешностей измерений при использовании различных методов и измерительных приборов. Эта оценка может показать, какой из методов измерения дает возможность получить результат с меньшей погрешностью, какие условия следует выполнить для уменьшения погрешностей измерений, какие измерительные приборы целесообразнее использовать в данном эксперименте.

Для выяснения вопроса о том, как связаны между собой выбор метода измерений и выбор измерительных приборов, можно поставить перед учащимися следующую простую практическую задачу.

*В вашем распоряжении имеются измерительная линейка длиной 30 см и измерительная лента длиной 10 м. Граница инструментальной погрешности линейки равна 1 мм, граница инструментальной погрешности измерительной ленты — 1 см. Чем следует воспользоваться для измерения длины кабинета физики для получения более точного результата: линейкой или лентой?*

На первый взгляд может показаться очевидным, что для получения более точного результата нужно воспользоваться измерительной линейкой, так как ее границы инструментальной погрешности и погрешности отсчета в 10 раз меньше соответствующих границ погрешностей для измерительной ленты. Однако обоснованный ответ на поставленный вопрос нельзя дать только на основании сравнения границ инструментальных погрешностей приборов, так как в процессе измерения могут быть внесены еще погрешности отсчета и погрешности метода измерений.

Оценим границы погрешностей измерений в первом и втором случае. При измерении длины комнаты с помощью измерительной ленты производится одно прямое измерение. Граница абсолютной систематической погрешности измерений  $\Delta_1$  в этом случае складывается из инструментальной и отсчетной границ абсолютных погрешностей:

$$\Delta_1 = \Delta_{\text{инстр}1} + \Delta_{\text{отс}1} = 1,0 \text{ см} + 0,5 \text{ см} = 1,5 \text{ см}.$$

При измерении длины комнаты с помощью измерительной линейки кроме инструментальной  $\Delta_{\text{инстр}2}$  и отсчетной  $\Delta_{\text{отс}2}$  погрешностей существенную роль играет погрешность метода измерений  $\Delta_{\text{мет}2}$ . Возникновение этой погрешности обусловлено тем, что длина линейки меньше длины комнаты и для измерения всей длины комнаты окажется необходимым выполнить не одно, а  $n$  измерений. При каждом измерении необходимо делать отметку, от которой производится следующий отсчет и т. д. Можно принять, что граница инструментальной погрешности равна 1 мм, граница погрешности метода (в связи с необходимостью нанесения отметки) тоже равна 1 мм, граница погрешности отсчета — 0,5 мм. Если длина кабинета физики 12 метров, то необходимо будет сделать 40 отсчетов. При этом граница абсолютной систематической погрешности окажется в 40 раз больше границы абсолютной погрешности одного измерения:

$$\begin{aligned} \Delta_2 &= 40 \cdot (\Delta_{\text{инстр}2} + \Delta_{\text{отс}2} + \Delta_{\text{мет}2}) = \\ &= 40 \cdot (0,1 \text{ см} + 0,1 \text{ см} + 0,05 \text{ см}) = 10 \text{ см}. \end{aligned}$$

Таким образом, при измерении длины комнаты граница погрешности измерений будет меньшей при использовании измерительной ленты, у которой большая инструментальная погрешность. В этом нет ничего удивительного, так как именно измерительная лента предназначена для измерения длин

порядка нескольких метров. Использование приборов высокого класса точности вне области их применения может привести не к уменьшению, а к увеличению общей погрешности измерения.

**Предварительные измерения.** При обсуждении необходимости предварительных измерений в учебном пособии говорится о существовании нелинейных элементов электрической цепи. Чтобы этот разговор не был чисто абстрактным, можно представить на классной доске в качестве примера вольтамперную характеристику диода (рис. 7) и поставить вопрос, каково электрическое сопротивление диода? Ответом должно быть утверждение, что диод нельзя охарактеризовать однозначно таким параметром, как электрическое сопротивление. Но для каждого заданного значения напряжения можно по графику определить силу тока через диод. Электрическое сопротивление диода, например, при напряжении 0,10 В и 0,25 В можно определить делением напряжения на силу тока, найденную по графику на рис. 7:

$$R_1 = \frac{0,10 \text{ В}}{1 \cdot 10^{-4} \text{ А}} = 1000 \text{ Ом}, \quad R_2 = \frac{0,25 \text{ В}}{1 \cdot 10^{-3} \text{ А}} = 250 \text{ Ом}.$$

**Необходимость точных измерений.** Учащимся необходимо объяснить, почему в экспериментальных исследованиях стремятся выполнять измерения физических величин с максимально достижимой точностью? Ответ на этот вопрос довольно прост: все (или почти все), что можно было открыть нового

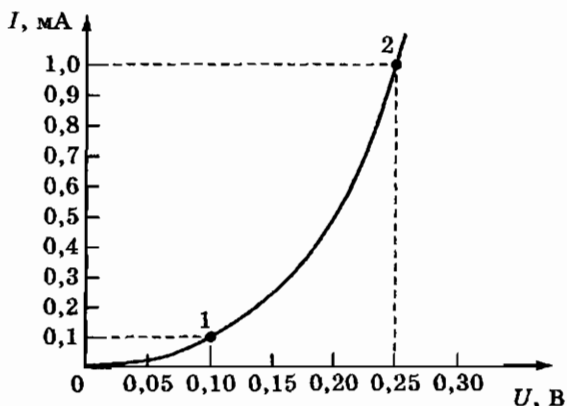


Рис. 7

при измерениях с ранее достигнутой точностью измерений, уже кем-то открыто и многократно перепроверено. Для открытия чего-то неизвестного ранее нужно либо проводить исследования тел в областях ранее неисследованных значений физических величин (сверхвысоких или сверхнизких значений температуры, давления, напряженности электрического поля и т. д.), либо в области ранее исследованных значений физических величин, но с более высокой точностью измерений.

Примером замечательного открытия в физике, основанного на разработке более точного метода измерений массы, может служить открытие дейтерия. В начале XX в. выполненные химическими методами (т. е. путем взвешивания макроскопических количеств веществ до и после химической реакции) измерения массы атома водорода показали, что она равна  $1,00799 \pm 0,00002$  а.е.м. (атомная единица массы в то время определялась как  $1/16$  доля массы атома кислорода). После изобретения масс-спектрометра, позволяющего сравнивать массы отдельных атомов (точнее, их ионов) по их отклонению в магнитном поле, в 1927 г. английский физик Ф. Астон обнаружил, что масса атома водорода равна  $1,00778 \pm 0,00005$  а.е.м. Расхождение результатов примерно на  $0,0002$  а.е.м. (всего лишь на  $0,02\%$ !) нельзя было считать пренебрежимо малым, так как граница абсолютной погрешности не превышала  $0,00005$  а.е.м. Для объяснения расхождения результатов измерений, выполненных химическими и физическими методами, была высказана гипотеза о том, что водород состоит из двух изотопов, причем масса атома второго изотопа (дейтерия) в два раза больше массы атома обычного изотопа водорода. Эта гипотеза получила экспериментальное подтверждение в 1932 году.

Если будет использован этот пример, то можно дополнить его вопросом, требующим творческого применения знаний по физике и химии, и задачей повышенной трудности.

*Объясните, почему химический и физический методы измерения массы атома водорода дают различные результаты?*

**Задача.** Используя приведенные выше данные о результатах измерения массы атома водорода химическим и физическим методами, вычислите, сколько атомов обычного водорода приходится на один атом дейтерия в природной смеси изотопов водорода?

Ответ на вопрос о различии химического и физического методов измерения массы атома водорода заключается в том, что в химических реакциях участвуют одинаково все изотопы водорода. Поэтому при измерениях массы одного атома химическими методами получается среднее значение масс атомов всех изотопов природной смеси. При использовании физического метода (масс-спектрометрии) измеряются массы отдельных атомов одного изотопа.

Для решения задачи нужно использовать предположение, что природный водород состоит из двух изотопов, масса атома одного изотопа в два раза больше массы атома другого изотопа водорода. В этом случае среднее значение массы  $m_{\text{ср}}$  одного атома природной смеси изотопов водорода равно:

$$m_{\text{ср}} = x \cdot m + (1 - x) \cdot 2m,$$

где  $m$  — масса атома легкого изотопа водорода, называемого протием,  $x$  — доля атомов протия в природной смеси изотопов водорода. Решая уравнение, получаем:

$$x = 2 - \frac{m_{\text{ср}}}{m} = 2 - \frac{1,00799}{1,00778} = 0,99979.$$

Доля атомов тяжелого изотопа водорода (дейтерия) в смеси изотопов составляет

$$1 - x = 0,00021.$$

Следовательно, отношение числа атомов обычного водорода к числу атомов дейтерия равно:

$$\frac{x}{1 - x} = \frac{0,99979}{0,00021} \approx 4800.$$

Мы получили, что в природной смеси изотопов водорода на один атом дейтерия приходится примерно 4800 атомов протия.

### Решение задачи 1

При подключении вольтметра к точкам 1 и 3 (рис. 14 книги для учащихся) вольтметр измеряет сумму падений напряжения на резисторе  $U_R$  и миллиамперметре  $U_A$ :

$$U_1 = U_R + U_A = I_1 R + I_1 R_A. \quad (2)$$

При подключении к точкам 2 и 3 вольтметр измеряет падение напряжения на миллиамперметре  $U_A$ :

$$U_2 = I_2 R_A. \quad (3)$$



Из уравнений (2) и (3) получаем:

$$R = \frac{U_1}{I_1} - R_A = \frac{U_1}{I_1} - \frac{U_2}{I_2} = \\ = \frac{7,2 \text{ В}}{50 \cdot 10^{-3} \text{ А}} - \frac{0,5 \text{ В}}{49,5 \cdot 10^{-3} \text{ А}} \approx 144 \text{ Ом} - 10 \text{ Ом} \approx 134 \text{ Ом}.$$

### Решение задачи 2

Изменение результатов взвешивания могло произойти по нескольким причинам. Во-первых, могло измениться атмосферное давление. Изменение давления при постоянной температуре ведет к изменению плотности воздуха и, следовательно, архимедовой силы. Во-вторых, могла измениться температура воздуха. При неизменном давлении это также ведет к изменению плотности воздуха и архимедовой силы. В третьих, могла измениться влажность воздуха. При неизменных значениях давления и температуры это ведет к изменению плотности воздуха и архимедовой силы. Наконец, могли измениться и давление, и температура, и влажность воздуха. Можно вычислить, какое изменение каждого из трех параметров могло привести к обнаруженному изменению результата взвешивания.

## § 6. Оценка границ случайных погрешностей измерений

Повторные измерения и нахождение среднего арифметического значения измеряемой величины. Для лучшего понимания особенностей экспериментов, в которых существенными оказываются случайные погрешности измерений, полезно рассмотреть конкретный пример. В практической жизни часто применяется способ определения скорости  $v$  автомобиля по длине его тормозного пути  $S$ . Как показывает опыт, при одинаковой начальной скорости тела длина его тормозного пути при повторных опытах оказывается не совсем одинаковой и различия результатов выходят за границы возможных систематических погрешностей.

Распределение отклонений результатов измерений от истинного значения может быть представлено с помощью гистограммы. Для этого по оси абсцисс отсчитываются результаты

измерений, а по оси ординат — число измерений, в которых получены результаты с такими значениями.

Для построения гистограммы необходимо разбить весь диапазон полученных значений измеряемой величины  $x$  на некоторое число равных интервалов  $\Delta x$  и сосчитать число опытов, в которых получены результаты измерений величины  $x$  в пределах данного интервала значений.

В учебном пособии объяснено, почему для уменьшения случайных погрешностей следует находить среднее арифметическое значение результатов нескольких повторных измерений. В сильной группе учащихся это объяснение можно дополнить знакомством со способом представления результатов повторных измерений с помощью столбчатых диаграмм.

В таблице приведены результаты 100 повторных опытов по измерению тормозного пути монеты, отпускаемой из одного начального положения на наклонной плоскости, диапазон значений тормозного пути разбит на интервалы шириной 1 см.

Число опытов	2	4	11	21	26	21	8	5	1	1
Тормозной путь, см	35-36	36-37	37-38	38-39	39-40	40-41	41-42	42-43	43-44	44-45

Из таблицы видно, что из 100 опытов только в двух тормозной путь оказался в интервале от 35 см до 36 см, в четырех опытах — в интервале от 36 см до 37 см, в 11 опытах — в интервале от 37 см до 38 см, в 21 опыте — в интервале от 38 см до 39 см, в 26 опытах — в интервале от 39 см до 40 см, в 21 опыте — в интервале от 40 см до 41 см и т. д.

Откладывая по оси абсцисс длину тормозного пути, а по оси ординат число опытов, в которых были получены значения тормозного пути в пределах данного интервала, можно представить графически число опытов, соответствующих каждому из интервалов, в виде прямоугольного столбца, высота которого пропорциональна числу  $n$  опытов. Распределение результатов измерений тормозного пути, полученное при выполнении 100 опытов, изображено в виде диаграммы на рис. 8. Такую столбчатую диаграмму называют гистограммой. Гистограмма наглядно показывает, что среднее арифметическое значение тормозного пути в данной серии опытов находится в интервале

от 39 см до 40 см, отклонения от среднего значения лежат приблизительно в пределах от  $-5$  см до  $+6$  см.

Экспериментальные исследования показали, что малые случайные отклонения от истинного значения при измерениях любых физических величин любыми приборами подчиняются одному общему закону. Закон распределения малых случайных отклонений результатов измерений от истинного значения измеряемой величины называется *законом нормального или гауссовского распределения*. Кривую, представляющую нормальное распределение случайных величин, можно получить как линию, огибающую столбчатую диаграмму при неограниченном увеличении числа опытов ( $n \rightarrow \infty$ ) и уменьшении ширины интервалов ( $\Delta x \rightarrow 0$ ). Площадь под участком кривой нормального распределения пропорциональна числу опытов, в которых получены результаты в данном интервале значений величины  $x$ . Если площадь под всей кривой нормального распределения принять за 100%, то площадь под участком кривой, ограниченная ординатами  $x_i$  и  $x_i + \Delta x$ , будет выражать число опытов (в %), в которых может быть получен результат измерений в пределах от  $x_i$  до  $x_i + \Delta x$  (рис. 9).

Мерой случайных погрешностей может служить *среднее квадратичное отклонение*. Средним квадратичным отклонением  $S$  называется корень квадратный из суммы квадратов отклонений результатов отдельных измерений величины  $x_i$  от среднего арифметического  $x_{\text{ср}}$ , деленной на число  $n$  измерений:

$$S = \sqrt{\frac{(x_1 - x_{\text{ср}})^2 + (x_2 - x_{\text{ср}})^2 + \dots + (x_n - x_{\text{ср}})^2}{n}}$$

Для оценки границ случайных погрешностей используются свойства нормального распределения, получаемого при неограниченном возрастании числа  $n$  измерений. В этом случае среднее арифметическое значение  $x_{\text{ср}}$  результатов измерений величины  $x$  стремится к истинному значению величины  $x_0$ , среднее квадратичное отклонение называется *стандартным отклонением* и обозначается греческой буквой «сигма»:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_1 - x_0)^2 + (x_2 - x_0)^2 + \dots + (x_n - x_0)^2}{n}}$$

Рассмотрение закона нормального распределения показывает, что стандартное отклонение  $\sigma$  имеет следующий смысл:

- в пределах  $[x_0 \pm \sigma]$  находятся  $\approx 68\%$  результатов измерений, за пределами  $\approx 32\%$ ;

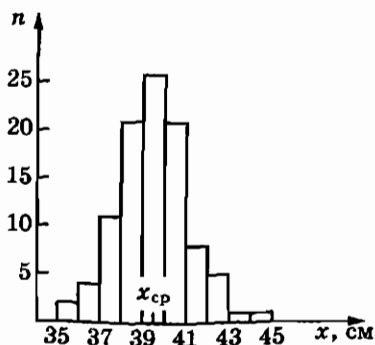


Рис. 8

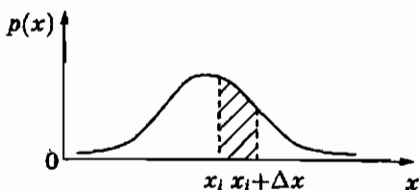


Рис. 9

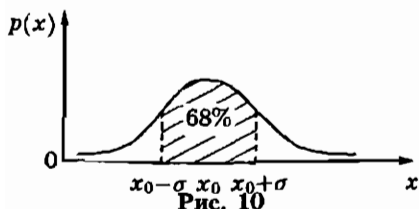


Рис. 10

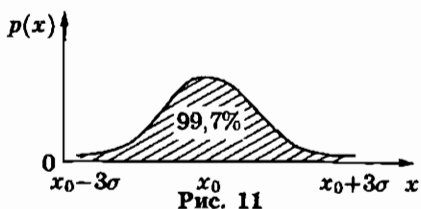


Рис. 11

- в пределах  $[x_0 \pm 2\sigma]$  находятся  $\approx 95\%$  результатов, за пределами  $\approx 5\%$ ;
- в пределах  $[x_0 \pm 3\sigma]$  находятся  $\approx 99,7\%$  результатов, за пределами  $\approx 0,3\%$ .

Это свойство нормального распределения иллюстрируют рис. 10 и 11.

Так как за пределами интервала  $[x_0 \pm 3\sigma]$  находится лишь  $\approx 0,3\%$  результатов единичных измерений, то можно принять, что границей случайных погрешностей единичного измерения  $\Delta x_{\text{случ}}$  является утроенное значение стандартного отклонения  $\sigma$ :

$$\Delta x_{\text{случ}} \approx 3\sigma.$$

Поэтому истинное значение  $x_0$  измеряемой величины  $x$  связано с результатом единичного измерения  $x_i$  выражением:

$$x_0 = x_i \pm \Delta x_{\text{случ}} \approx x_i \pm 3\sigma.$$

Если произведено  $n$  повторных измерений физической величины  $x$  в одинаковых условиях и для уменьшения влияния случайных погрешностей найдено среднее арифметическое  $x_{\text{ср}}$  из  $n$  результатов измерений, то естественно ожидать, что средний арифметический результат  $x_{\text{ср}}$  из  $n$  измерений находится

в более узком интервале значений около истинного значения  $x_0$ , чем интервал возможных значений единичных измерений. И это действительно так.

Теория и практика показывают, что граница случайной погрешности  $\Delta_{\text{случ. ср}}$  среднего значения  $x_{\text{ср}}$  из  $n$  измерений равна границе случайной погрешности  $\Delta_{\text{случ}}$  единичного измерения, деленной на корень квадратный из числа  $n$  измерений:

$$\Delta_{\text{случ. ср}} = \frac{\Delta_{\text{случ}}}{\sqrt{n}} \approx \frac{3\sigma}{\sqrt{n}},$$

где  $\sigma$  — стандартное отклонение результатов единичных измерений. В практических расчетах принимается, что стандартное отклонение  $\sigma$  примерно равно среднему квадратичному отклонению  $S$  от среднего арифметического  $x_{\text{ср}}$  из  $n$  измерений:

$$\sigma \approx S.$$

Граница случайной погрешности  $\Delta_{\text{случ. ср}}$  среднего значения  $x_{\text{ср}}$  из  $n$  измерений равна:

$$\Delta_{\text{случ. ср}} \approx \frac{3S}{\sqrt{n}}.$$

Последнее выражение показывает, что граница случайной погрешности среднего арифметического из  $n$  результатов повторных измерений уменьшается с увеличением числа  $n$  измерений. Так как граница погрешности убывает обратно пропорционально корню квадратному из  $n$ , то для уменьшения границы случайной погрешности, например, в 10 раз, число измерений нужно увеличить в 100 раз. Следовательно, принципиальная возможность уменьшения границ случайных погрешностей путем увеличения числа измерений на практике сталкивается с существенными ограничениями и нужно всегда найти разумную меру при выборе числа повторных измерений.

Изложенный выше материал о законе нормального распределения результатов измерений и способах оценки случайных погрешностей обычно выходит за пределы круга интересов большинства школьников, проявляющих интерес к физике. Поэтому на занятиях с группой учащихся вполне достаточно изучить материал учебного пособия, а материал о законе нормального распределения можно использовать лишь в индивидуальной работе с теми учениками, которые проявят особый интерес к данной теме.

**Лабораторная работа 5.** При выполнении лабораторной работы по измерению коэффициента трения учащиеся могут предложить другие способы измерений. Например, можно положить монету на наклонную плоскость при небольшом значении угла  $\alpha$  и, медленно поднимая один ее край, постепенно увеличивать угол наклона. В том положении, при котором монета равномерно скользит по наклонной плоскости после легкого толчка, выполняется условие:

$$\mu mg \cos \alpha = mg \sin \alpha$$

или

$$\mu = \operatorname{tg} \alpha.$$

Для нахождения значения тангенса угла  $\alpha$  можно измерить высоту  $h$  и расстояние  $S$  (рис. 12):

$$\mu = \operatorname{tg} \alpha = \frac{h}{S}.$$

В этом варианте потребуются повторные измерения величин  $h$  и  $S$ , нахождение их средних арифметических значений. Интересно сравнить результаты измерений, полученные разными методами, и проверить, лежит ли различие результатов в пределах суммы границ погрешностей двух методов измерений.

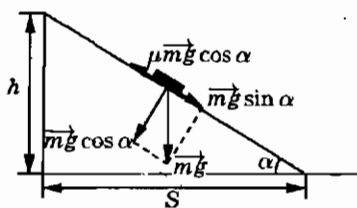


Рис. 12

## § 7. Обработка результатов измерений

**Запись результатов измерений и вычислений.** Правила записи приближенных чисел довольно просты, но, чтобы уверенно пользоваться ими, необходим опыт применения их на практике. Для того чтобы каждый учащийся мог проверить, понял ли он правила записи результатов измерений в виде приближенных чисел и понимает ли смысл записей результатов измерений, полезно после теоретического объяснения дать следующее задание. Это задание в группе учащихся с высоким уровнем подготовки можно провести в форме теста, если же для значительной части школьников такое задание будет трудным для самостоятельного выполнения, можно коллективно обсудить способы решения каждой задачи.

Задание для самопроверки знаний учащихся  
по теме: «Запись результатов измерений»

Сколько значащих цифр в следующих числах?

1. 20,00. А. 1. Б. 2. В. 4. Г. 20.

2. 0,20. А. 0. Б. 1. В. 2. Г. 3.

3. 0,002. А. 0. Б. 1. В. 2. Г. 4.

4. 200,00. А. 1. Б. 3. В. 5. Г. 200.

5.  $2 \cdot 10^6$ . А. 1. Б. 2. В. 3. Г.  $10^6$ .

6. Какая первая значащая цифра в числе 0,0156 ?

А. 0. Б. 0,01. В. 1. Г. 6.

7. Какая последняя значащая цифра в числе 259,06?

А. 2. Б. 9. В. 0. Г. 6.

8. Каким приближенным числом нужно записать результат измерения массы, если показания весов 128,1 г, а граница абсолютной погрешности измерений  $\Delta m = 0,1$  г?

А. 128,1 г. Б. 128,2 г. В. 128,0 г. Г. 128 г.

9. Каким приближенным числом нужно выразить результат измерений, если показания секундомера 5,34 с, а граница абсолютной погрешности измерений  $\Delta t = 0,15$  с?

А. 5,34 с. Б. 5,49 с. В. 5,19 с. Г. 5 с.

10. Каким приближенным числом нужно выразить результат измерений длины, если отсчет показаний измерительного прибора дал результат 245 см, а граница относительной погрешности равна 1%?

А. 245 см. Б. 247,45 см. В. 240 см. Г.  $2,4 \cdot 10^2$  см.

11. Каково значение границы абсолютной погрешности измерений, если приближенное значение результата измерения выражено числом 6,62 кг ?

А. 1 кг. Б. 0,02 кг. В. 0,01 кг. Г. 0,005 кг.

12. Каково значение границы абсолютной погрешности измерений, если приближенное значение результата измерения выражено числом 0,1 м?

А. 0,1 м. Б. 0,05 м. В. 0,02 м. Г. 0,01 см.

13. Каково значение границы абсолютной погрешности измерений, если приближенное значение результата измерения выражено числом  $3,1 \cdot 10^2$  м?

А. 0,1 м. Б. 0,05 м. В. 5 м. Г. 10 м.

14. Какое из приведенных ниже чисел правильно выражает результат измерения, если известно, что измерения выполнены с абсолютной погрешностью, не превышающей 1 см?

А. 420 м. Б.  $4,2 \cdot 10^2$  м. В. 420,0 м. Г. 420,00 м.

15. Каково значение границы относительной погрешности измерения, если приближенный результат измерений выражен числом 20 см?

А. 0,05. Б. 0,025. В. 0,005. Г. 0,0025.

16. Каково значение границы относительной погрешности измерений, если приближенное значение результата измерения выражено числом 20,0 см?

А. 5%. Б. 2,5%. В. 0,5%. Г. 0,25%.

17. Какой из приведенных ниже вариантов записи результатов измерений является наиболее целесообразным?

А.  $4,025 \text{ м} \pm 0,010 \text{ м}$ . Б.  $4,025 \text{ м} \pm 10 \text{ мм}$ . В.  $402,5 \text{ см} \pm 10 \text{ мм}$ .  
Г.  $4025 \text{ мм} \pm 1,0 \text{ см}$ .

*Код правильных ответов*

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
В	В	Б	В	А	В	Г	Г	Г	Г	Г	Б	В	В	Б	Г	А

**Оценка границ погрешностей косвенных измерений.** При знакомстве с методами оценки границ погрешностей косвенных измерений в группе с сильным составом учащихся можно предложить в качестве задач для самостоятельного решения вывод простейших формул. Формулы для вычисления границ абсолютной и относительной погрешностей величины  $z$ , являющейся суммой непосредственно измеряемых величин  $x$  и  $y$ , можно вывести следующим образом. Величину  $z$  мы находим из выражения:

$$z = x + y,$$

где  $x$  и  $y$  — результаты измерений. Для точных значений  $z_0$ ,  $x_0$ ,  $y_0$  выполняется соотношение:

$$z_0 = x_0 + y_0, \text{ или } z_0 \approx x \pm \Delta x + y \pm \Delta y,$$

где  $\Delta x$  и  $\Delta y$  — границы абсолютных погрешностей измерений.

Граница абсолютной погрешности при нахождении значения величины  $z$  равна:

$$\Delta z = z_0 - z = (x \pm \Delta x) + (y \pm \Delta y) - x - y = \pm \Delta x \pm \Delta y.$$



Следовательно, граница абсолютной погрешности  $\Delta z$  при нахождении величины  $z$  равна сумме границ погрешностей  $\Delta x$  и  $\Delta y$ :

$$\Delta z = \Delta x + \Delta y.$$

Для физической величины  $z$ , которая находится как произведение непосредственно измеряемых величин  $x$  и  $y$ , оценку границ относительной погрешности измерений можно сделать следующим способом.

Для точных значений  $x_0, y_0, z_0$  выполняется равенство:

$$z_0 = x_0 y_0 \approx (x \pm \Delta x)(y \pm \Delta y).$$

При нахождении величины  $z$  как произведения результатов измерений величин  $x$  и  $y$  получаем:

$$z = xy, \\ \Delta z = z - z_0 = \pm y \Delta x \pm x \Delta y \pm \Delta x \Delta y.$$

Разделив обе части равенства на произведение  $xy$ , получаем:

$$\frac{\Delta z}{z} = \pm \frac{\Delta x}{x} \pm \frac{\Delta y}{y} \pm \frac{\Delta x \Delta y}{xy}.$$

Последнее слагаемое  $\frac{\Delta x \Delta y}{xy}$  существенно меньше каждого из двух других, поэтому выполняется приближенное равенство:

$$\frac{\Delta z}{z} \approx \pm \frac{\Delta x}{x} \pm \frac{\Delta y}{y}.$$

Отсюда граница относительной погрешности величины  $z$  приблизительно равна сумме границ относительных погрешностей величин  $x$  и  $y$ :

$$\frac{\Delta z}{z} = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y}, \quad \text{или} \quad \varepsilon_z = \varepsilon_x + \varepsilon_y.$$

Для приобретения опыта оценки границ погрешностей косвенных измерений полезно решить несколько задач.

**Задача.** Оцените границы погрешностей измерений при выполнении лабораторной работы по определению электрического сопротивления провода катушки. В опыте было получено, что при напряжении на катушке 4 В сила тока в катушке 10 мА. Влияние вольтметра на показания миллиамперметра было пренебрежимо малым. Использованные в опыте приборы обладали следующими характеристиками:

вольтметр с пределами измерения 0 — 15 В и ценой деления шкалы 0,5 В класса точности 4,0;

миллиамперметр с пределами измерения 0 — 50 мА и ценой деления шкалы 2 мА класса точности 4,0.

*Решение.* Электрическое сопротивление проводника определяется выражением

$$R = \frac{U}{I},$$

где  $R$  — электрическое сопротивление,  $U$  — электрическое напряжение,  $I$  — сила электрического тока. Относительная погрешность измерения частного равна сумме относительных погрешностей делимого и делителя:

$$\varepsilon_R = \varepsilon_U + \varepsilon_I.$$

Мы получили, что для оценки границ относительной погрешности при определении сопротивления проводника необходимо оценить относительную погрешность измерения напряжения  $U$  и силы тока  $I$ .

Оценим границы относительной погрешности измерения напряжения. При классе точности вольтметра 4,0 максимальное значение относительной инструментальной погрешности при максимальном отклонении стрелки прибора равно 4% или  $\varepsilon_U = 0,04$ . Следовательно, граница инструментальной абсолютной погрешности при измерении напряжения равна:

$$\Delta U_{\text{инстр}} = \varepsilon_U \cdot U_{\text{макс}} = 0,04 \cdot 15 \text{ В} = 0,60 \text{ В}.$$

Границу абсолютной погрешности отсчета при измерении напряжения можно принять равной половине цены деления шкалы прибора:

$$\Delta U_{\text{отс}} = 0,25 \text{ В}.$$

Поскольку влияние вольтметра на показания миллиамперметра было пренебрежимо малым, ошибку метода измерений можно считать равной нулю. В этом случае граница абсолютной погрешности измерения равна:

$$\Delta U = \Delta U_{\text{инстр}} + \Delta U_{\text{отс}} = 0,60 \text{ В} + 0,25 \text{ В} = 0,85 \text{ В}.$$

Так как измеренное значение напряжения равно 4 В, граница относительной погрешности измерения напряжения равна:

$$\varepsilon_U = \frac{\Delta U}{U} = \frac{0,85 \text{ В}}{4 \text{ В}} \approx 0,21 = 21\%.$$

Границы погрешностей измерения силы тока оценим аналогично:

$$\begin{aligned}\Delta I &= \Delta I_{\text{инстр}} + \Delta I_{\text{отс}} = \\ &= \varepsilon_I \cdot I_{\text{макс}} + C/2 = 0,04 \cdot 50 \cdot 10^{-3} \text{ А} + 1 \cdot 10^{-3} \text{ А} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ А}, \\ \varepsilon_I &= \frac{\Delta I}{I} = \frac{3 \cdot 10^{-3} \text{ А}}{10 \cdot 10^{-3} \text{ А}} = 0,3 \approx 30\%.\end{aligned}$$

Следовательно, граница относительной погрешности измерения сопротивления равна:

$$\varepsilon_R = \varepsilon_U + \varepsilon_I = 21\% + 30\% \approx 50\%.$$

Такая большая погрешность измерений в большинстве практических случаев недопустима. Можно ли повысить точность измерений сопротивления с теми же измерительными приборами?

В данном случае такая возможность имеется. В опыте приборы использовались не в оптимальном режиме, так как отклонения стрелок составляли менее третьей части шкалы. При постоянном значении границы абсолютной погрешности измерений это приводило к увеличению границы относительной погрешности измерений более чем в три раза против возможного минимального значения.

Для уменьшения границы относительной погрешности измерений можно произвести измерения силы тока через катушку при максимальном значении напряжения, измеряемого данным вольтметром. Границы относительных погрешностей измерений напряжения и силы тока при напряжении на катушке 15 В и силе тока в цепи 37,5 мА равны:

$$\begin{aligned}\varepsilon_U &= \frac{\Delta U}{U} = \frac{0,85 \text{ В}}{15 \text{ В}} \approx 0,057 \approx 6\%, \\ \varepsilon_I &= \frac{\Delta I}{I} = \frac{3 \cdot 10^{-3} \text{ А}}{37,5 \cdot 10^{-3} \text{ А}} = 0,08 = 8\%.\end{aligned}$$

Граница относительной погрешности измерения сопротивления равна:

$$\varepsilon_R = \varepsilon_U + \varepsilon_I = 6\% + 8\% = 14\%.$$

Таким образом, граница относительной погрешности измерения сопротивления при увеличении значения измеряемого напряжения действительно уменьшилась более чем в 3 раза. Однако невозможно все измерения выполнять только вблизи предела шкалы прибора. Поэтому приборы класса 4,0 или

2,5 не используются в исследовательских лабораториях. Для точных измерений используются приборы класса 0,05 или 0,1.

**Цели написания отчетов.** Составление и написание отчета о выполненной работе — это обязательный и очень важный элемент деятельности не только ученого, но и организатора производства, инженера, работника в области маркетинга, рекламы и во многих других областях. В зависимости от конкретного вида деятельности человека требования к содержанию и форме его отчета о результатах работы могут быть различными, но многие из целей составления и написания отчетов являются общими для любого вида деятельности человека. Поэтому следует объяснить учащимся, что опыт составления и написания отчетов о результатах выполненных экспериментальных исследований по физике может оказаться полезным не только будущим физикам, но и тем, кто выберет любой вид самостоятельной деятельности, сопровождающейся получением новых результатов, о которых нужно сообщить другим людям.

Любые отчеты готовятся для представления информации о результатах выполненной работы в таком виде, чтобы предполагаемый потребитель информации мог понять, с какой целью и какими способами выполнялась эта работа, какие результаты получены и какие выводы следует сделать из полученных результатов.

В конкретном случае работы ученика в школьной физической лаборатории составление отчета о выполнении экспериментального задания дает опыт оформления отчета о работе вообще и опыт подготовки отчета о результатах экспериментального исследования по физике в частности. Поэтому требования к отчету о выполнении лабораторной работы должны в общих чертах соответствовать требованиям, предъявляемым к научному сообщению о результатах экспериментального исследования.

Сообщение о результатах экспериментального исследования — это сообщение об установлении новых научных фактов. Факт признается научно установленным только в том случае, если он подтверждается независимыми экспериментами или наблюдениями в таких же условиях. Поэтому в сообщении о результатах экспериментального исследования обязательно должны содержаться полные сведения об объекте и методе исследования, описание экспериментальной установки и из-

мерительных приборов, результаты измерений и вычислений, обсуждение полученных результатов.

**Лабораторная работа 6. Изучение движения системы связанных тел.** В книге для учащихся сформулированы задачи этой лабораторной работы и даны лишь краткие указания к порядку выполнения эксперимента. Ученикам предлагается самостоятельно найти теоретическое решение задачи, спланировать и выполнить эксперимент, оценить границы погрешности измерений и сделать вывод о согласии или расхождении результатов теории и эксперимента. Если для многих учащихся в группе самостоятельное выполнение всех этапов

работы окажется слишком сложной задачей, можно провести предварительно коллективное обсуждение плана эксперимента с записью основных результатов на классной доске и в рабочих тетрадях. План работы может быть следующим.

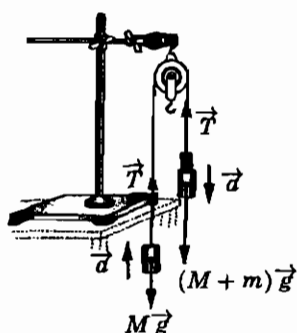


Рис. 13

1. *Теоретическое решение.* При отсутствии сил трения и влияния блока под действием силы тяжести  $Mg$  и силы упругости  $T$  груз массой  $M$  движется с некоторым ускорением  $a$  вверх, груз массой  $M + t$  с равным по модулю ускорением  $a$  движется вниз (рис. 13).

На основании второго закона Ньютона для первого груза справедливо уравнение

$$Ma = T - Mg, \quad (4)$$

для второго

$$(M + t)a = (M + t)g - T. \quad (5)$$

Из уравнений (4) и (5) следует, что

$$a = \frac{mg}{2M + t}.$$

Подставив значения масс  $M$  и  $t$ , получим теоретическое значение ускорения:

$$a_{\tau} = \frac{5 \cdot 10^{-2} \cdot 9,81}{2 \cdot 1 + 5 \cdot 10^{-2}} \text{ м/с}^2 \approx 0,24 \text{ м/с}^2.$$

2. *Экспериментальное решение.* Для экспериментального определения ускорения  $a$  можно измерить время  $t$  движения груза из состояния покоя в верхней точке на расстоянии  $h$  от пола до момента удара о пол.

По измеренным значениям времени и пути вычисляется ускорение  $a_3$ :

$$a_3 = \frac{2h}{t^2}. \quad (6)$$

Действие силы трения можно компенсировать, помещая на верхний груз небольшие добавочные грузы до тех пор, пока после легкого толчка верхний груз станет двигаться равномерно вниз, а нижний груз подниматься равномерно вверх.

После компенсации действия силы трения на верхний груз ставится дополнительный груз массой 50 г и одновременно запускается секундомер. При достижении верхним грузом пола секундомер останавливается и записывается его показание  $t$ . Опыт можно повторить 5 раз и найти среднее значение времени  $t$  движения груза.

Границы абсолютных погрешностей прямых измерений расстояния  $\Delta h$  и времени  $\Delta t$  определяются параметрами используемых измерительных приборов, граница относительных погрешностей косвенных измерений ускорения  $\varepsilon_{a_3}$  на основании уравнения (6) равна:

$$\varepsilon_{a_3} = \varepsilon_h + 2\varepsilon_t.$$

По найденному значению границы относительных погрешностей измерения ускорения  $\varepsilon_{a_3}$  вычисляется граница абсолютной погрешности измерения ускорения  $\Delta a_3$ :

$$\Delta a_3 = \varepsilon_{a_3} \cdot a_3.$$

Результаты измерений и вычислений записываются в отчетную таблицу. Вывод о результатах эксперимента можно сделать на основе сравнения значений ускорения  $a_T$ , полученного теоретически, и  $a_3$ , полученного экспериментально. Если модуль разности между значениями ускорения  $a_T$  и  $a_3$  меньше границы абсолютной погрешности измерения ускорения  $\Delta a_3$ ,

$$|a_T - a_3| < \Delta a_3,$$

результаты расчета и эксперимента совпадают в пределах границ погрешностей измерений. В противном случае результаты расчета и эксперимента нельзя признать совпадающими и нужно искать причину расхождения в условиях выполнения эксперимента или из-за ошибки в расчетах.

## Отчетная таблица

$M$ , кг	$m$ , кг	$a_{\tau}$ , м/с <sup>2</sup>	$h$ , м	$\Delta h$ , м	$t$ , с	$\Delta t$ , с	$a_3$ , м/с <sup>2</sup>	$\Delta a_3$ , м/с <sup>2</sup>

## § 8. Построение графиков

**Построение графиков.** В учебном пособии подробно обсуждается значение графиков для представления результатов измерений физических величин и качественного анализа полученных результатов. Однако получить необходимые практические навыки учащиеся могут только в процессе самостоятельного выполнения экспериментов, в которых для анализа полученных результатов требуется построение графиков.

Для предоставления учащимся полной самостоятельности при выполнении лабораторной работы 7 пояснения в пособии практически отсутствуют. Большинству школьников задание покажется настолько простым, что возникнет вопрос, зачем учитель предлагает ученикам, интересующимся физикой, такое простое задание, ответ на которое заранее известен каждому.

На подобные вопросы перед началом выполнения задания можно ответить: «Многие открытия в физике были сделаны в результате тщательных экспериментальных проверок таких утверждений, которые всем казались очевидными. Может быть, и вам сегодня удастся получить такой результат, которого вы не ожидаете».

Поскольку в задании не указаны ступени изменения напряжения и силы тока в эксперименте, ученики могут получить несколько различные результаты. В таблице приведены результаты одной серии измерений.

$U$ , В	$\Delta U$ , В	$I$ , мА	$\Delta I$ , мА
0,111	0,003	10	3
0,242	0,003	20	3
0,381	0,004	30	3
0,788	0,006	40	3
1,242	0,008	50	3

На рисунке 14 представлены экспериментальные точки с указанием границ погрешностей измерений по оси ординат. По оси абсцисс границы погрешностей не указаны по той причине, что прибор для измерения напряжения имел границы

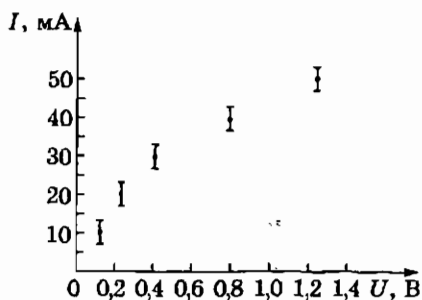


Рис. 14

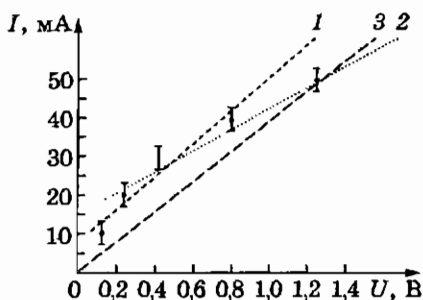


Рис. 15

относительной инструментальной погрешности и погрешности отсчета почти в 10 раз меньше, чем прибор для измерения силы тока. (Сила тока измерялась миллиамперметром класса 4,0, напряжение измерялось цифровым мультиметром класса 0,5.)

Границы погрешностей около экспериментальных точек указаны на графике по той причине, что точки, вопреки ожиданию, не лежат на прямой, поэтому нужно проверить, не лежат ли отклонения от линейной зависимости в пределах границ погрешностей измерений. Многие учащиеся по таким результатам измерений проводят прямые линии типа 1 и 2 на рис. 15.

Школьники строят график в виде прямой, заметно выходящей за границы погрешностей измерений одной или двух точек, по той причине, что заранее уверены в существовании линейной зависимости силы тока от напряжения на лампе по закону Ома. Небольшие, как им кажется, отклонения экспериментальных результатов от линейной зависимости они склонны объяснить тем, что реальные погрешности измерений больше тех значений, которые были получены в их расчетах.

Однако в действительности отклонения результатов от линейной зависимости несомненны. Дело в том, что ученики обычно забывают о существовании еще одной экспериментальной точки с нулевой абсолютной погрешностью измерений. Это точка в начале координат, соответствующая тому несомненному факту, что при нулевом напряжении на лампе сила тока также равна нулю. Поэтому график зависимости силы тока от напряжения должен обязательно проходить через начало координат. Если провести прямую 3 через начало координат и через точку, соответствующую максимальному значению силы тока,



то почти все остальные точки лежат вне прямой за пределами границ погрешностей измерений. Можно предположить, что последняя точка получена в результате промаха, но повторные контрольные измерения опровергнут такое предположение.

Следовательно, нужно признать, что согласно результатам эксперимента сила тока через лампу не возрастает прямо пропорционально приложенному напряжению, как можно было ожидать на основании закона Ома. Для завершения обработки результатов измерений нужно провести через экспериментальные точки плавную кривую (рис. 16). Эта кривая является графиком зависимости силы тока от напряжения на лампе.

До обсуждения полученного результата полезно обратить внимание тех учащихся, которые построили графики в виде прямых типа 1 или 2 на рис. 15, на принципиальную ошибку таких решений: выражаемый данными графиками закон зависимости силы тока от напряжения противоречит здравому смыслу. Действительно, прямые 1 и 2 пересекают ось ординат в точках, отличных от нуля, как будто сила тока через лампу может быть отлична от нуля при отсутствии напряжения. Это пример проверки полученного результата на соответствие здравому смыслу или основным законам физики.

Затем следует обсудить смысл результата, полученного в эксперименте с лампой. Можно спросить учащихся, не опровергает ли данный эксперимент закон Ома?

Полученный результат действительно противоречит утверждению о том, что на участке цепи сила тока прямо пропорциональна напряжению. Но в физике такое утверждение относится только к участку цепи, находящемуся в неизменных условиях (хотя это и не оговаривается во многих школьных учебниках). Если бы нить лампы находилась в неизменных условиях, то результат опыта мог быть основанием для опровержения закона Ома.

Можно обратить внимание и еще на одну особенность закона Ома: в системе СИ этот закон — всего лишь следствие определения электрического сопротивления как физической величины. Поскольку электрическим сопротивлением называется величина, равная отношению напряжения к силе тока, закон Ома в форме  $I = U/R$  выполняется везде и всегда. Однако отсюда не следует, что сила тока в цепи возрастает прямо пропорционально напряжению на участке цепи при любых значениях напряжения и тока. Изменения силы тока

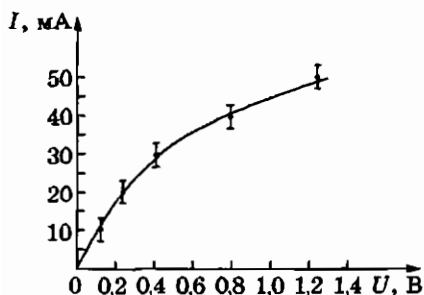


Рис. 16

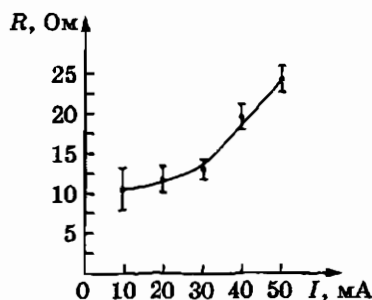


Рис. 17

могут приводить к изменениям физических свойств вещества, по которому течет ток.

Для того чтобы понять, что происходит с лампой в данном эксперименте, можно вычислить значения электрического сопротивления нити лампы при разных значениях силы тока и построить график соответствующей зависимости электрического сопротивления нити лампы от силы тока  $R(I)$  (рис. 17). Этот график показывает, что с увеличением силы тока сопротивление нити лампы возрастает. Учащиеся догадаются объяснить этот факт нагреванием нити лампы протекающим током, так как им известно, что повышение температуры металлов приводит к увеличению их удельного электрического сопротивления.

**Построение графиков с помощью компьютера.** Если в школе имеется компьютер и учитель умеет им пользоваться, то можно познакомить учащихся с возможностями, открываемыми компьютером в области графического представления результатов измерений. Можно продемонстрировать школьникам, как по табличным данным наносят экспериментальные точки на координатную плоскость и строят по ним график.

В программе векторной графики «Corel Draw» следует открыть новый документ, при этом на экране он будет выглядеть, как лист белой бумаги. Нарисуем координатные оси с началом координат точно в левом нижнем углу «листа бумаги». В этом случае по краю рабочего поля слева будет видна масштабная линейка отсчета ординат в миллиметрах, сверху — линейка отсчета абсцисс.

Координата любой точки на рабочем столе может быть отсчитана по этим линейкам при помещении в эту точку

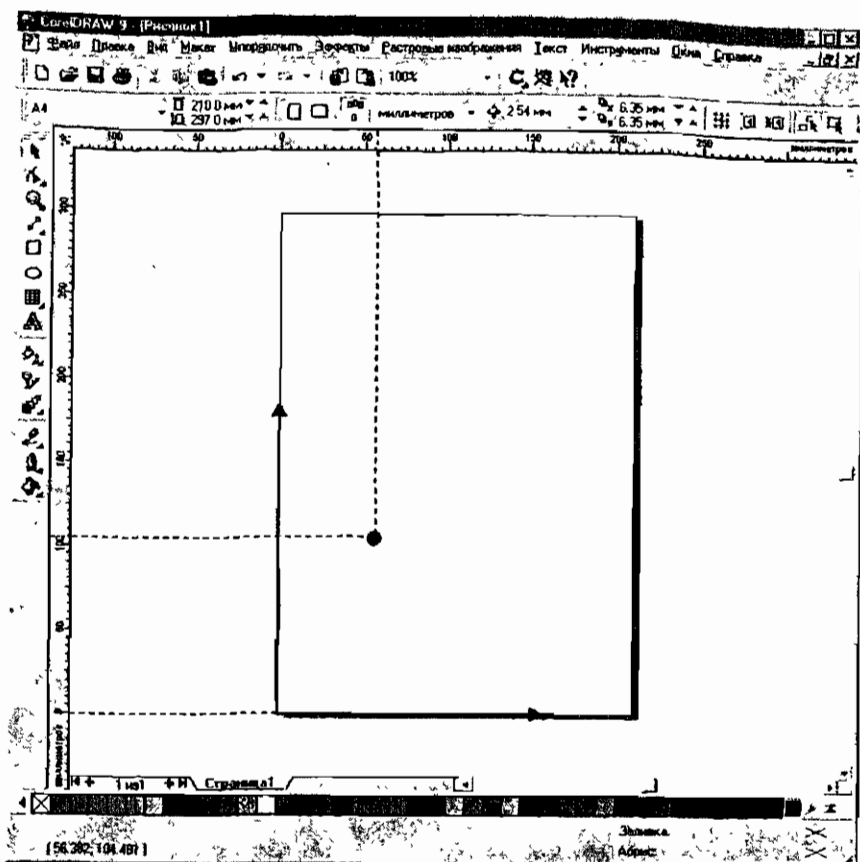


Рис. 18

конца стрелки инструмента «указатель». Выбрав удобный масштаб пересчета измеренных величин в миллиметры, можно перемещением указателя найти на координатной плоскости точку (рис. 18), координаты которой будут соответствовать экспериментальным значениям измеренных величин. Таким же способом наносятся на координатную плоскость остальные экспериментальные точки.

Для построения по точкам гладкой кривой соединим отрезком первую экспериментальную точку с последней точкой, затем преобразуем его в ломаную, проходящую через все экспериментальные точки. Для этого сначала выделим отрезок, затем двойным нажатием инструмента *Shape Tool* создадим на

произвольных местах отрезка столько точек, сколько имеется еще экспериментальных точек. Каждую из этих точек на отрезке поочередно касаемся концом инструмента *Shape Tool*, при нажатой левой клавише мыши подтягиваем до очередной экспериментальной точки и отпускаем клавишу мыши. При этом линия отрезка «зацепляется» за экспериментальную точку. Такая процедура повторяется со всеми остальными точками.

Для превращения ломаной линии в гладкую кривую нужно инструментом «указатель» выделить эту линию, затем инструментом *Shape Tool* выделить область, внутри которой находится ломаная линия. После этого нужно нажать сначала на клавишу «*to curve*», затем на клавишу «*smooth*».

Учитель может предложить одному из учеников, хорошо владеющих компьютером, подготовить сообщение на эту тему и продемонстрировать процесс построения графика с помощью компьютера всей группе.

## § 9. Измерение времени

Сутки — естественная единица времени. В группе учащихся, проявляющих интерес не только к физике, но и к астрономии, можно подробнее рассмотреть довольно трудную задачу об астрономическом способе измерения времени.

Длительность одного оборота Солнца вокруг Земли при его видимом движении называют *истинными солнечными сутками*. Когда люди научились делать точные механические часы, то вскоре обнаружили, что истинные солнечные сутки день ото дня имеют неодинаковую длительность. Отличия длительности истинных солнечных суток от их среднегодового значения в разные дни года представлены графиком на рис. 19. Можно предложить учащимся найти объяснение этому факту.

Предположение о возможной неравномерности вращения Земли вокруг своей оси в принципе правомерно, но оно не соответствует действительности. Наблюдения за звездами показывают, что любая звезда совершает видимый оборот вокруг Земли в любой день года за одинаковый интервал времени. Этот интервал времени называется *звездными сутками*. Следовательно, Земля относительно звезд вращается равномерно. Да и трудно представить себе, по какой причине вращение Земли вокруг оси могло бы периодически, регулярно в течение года то ускоряться, то замедляться.

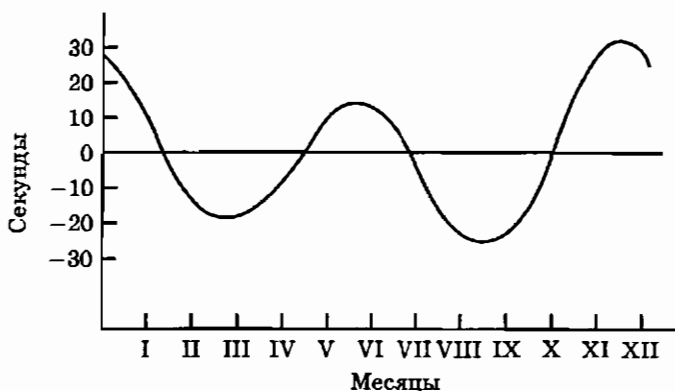


Рис. 19

Навести на правильное решение могут такие вопросы: «Какие сутки длиннее — солнечные или звездные? В чем причина различия длительности солнечных и звездных суток? Почему разница длительности солнечных и звездных суток в течение года изменяется?»

Кратко на эти вопросы можно ответить следующим образом. Солнечные сутки длиннее звездных потому, что вследствие годового движения Земли вокруг Солнца происходит видимое движение Солнца относительно звезд. В северном полушарии Солнце за год совершает полный оборот среди звезд в направлении против часовой стрелки по кругу, называемому *эклиптикой*. За сутки Солнце отстает от звезд примерно на один градус и поэтому солнечные сутки длиннее звездных примерно на 4 минуты. Однако из-за неравномерного движения Земли по орбите вокруг Солнца оказывается неравномерным и видимое движение Солнца среди звезд. По второму закону Кеплера Земля движется вокруг Солнца с постоянной секторной скоростью, при этом угловая скорость обращения Земли максимальна на самом близком расстоянии от Солнца (в декабре) и минимальна на самом далеком расстоянии (в июне). Поэтому отставание Солнца от звезд за сутки максимально в декабре и продолжительность истинных солнечных суток самая большая в декабре.

Общий вывод: из-за неравномерности видимого движения Солнца нельзя проводить точные измерения времени на основе наблюдений за его движением. По этой причине природной основой для измерений времени выбраны значительно более

стабильные процессы электромагнитных колебаний, возникающих при переходах атомов из одного состояния в другое.

**Лабораторные работы 8 и 9.** В учебном пособии в § 9 предлагаются две лабораторные работы. Учитель может либо сам выбрать одну из них, либо предложить на выбор учащимся. Обе работы даются школьникам для самостоятельного выполнения без инструкций и указаний. Если для некоторых учащихся такое задание окажется еще слишком сложным, можно дать им краткие инструкции.

*Исследование зависимости периода колебаний маятника от массы, амплитуды колебаний и длины*

*Возможный вариант выполнения задания*

1. Подвесьте стальной шарик на нити к лапке штатива. Измерьте длину  $l$  маятника как расстояние от точки подвеса до центра шарика. Отведите шарик от положения равновесия на небольшой угол и отпустите. Измерьте время  $t$  двадцати колебаний и вычислите период  $T$  колебаний маятника:

$$T = \frac{t}{n}.$$

2. Изменяя длину маятника, повторите измерения периода колебаний 5 раз. Результаты измерений занесите в табл. 1.

Таблица 1

$l, \text{ см}$					
$\sqrt{l}$					
$t, \text{ с}$					
$\Delta t, \text{ с}$					
$T, \text{ с}$					
$\Delta T, \text{ с}$					

3. Оцените границы абсолютных погрешностей измерений времени  $\Delta t$  и периода колебаний  $\Delta T$ . При оценке можно принять, что граница инструментальной погрешности секундомера равна 0,1 с, граница погрешности метода при измерении времени, связанная с определением «на глаз» момента завершения колебания, равна примерно  $T/4$ .

Так как  $T = \frac{t}{n}$ , то  $\Delta T = \Delta t/n$ .

4. Постройте графики зависимости  $T = f(l)$  и  $T = f(\sqrt{l})$ . Сделайте вывод о зависимости периода колебаний маятника от его длины.

5. Изменяя значения начального отклонения  $a$  маятника от положения равновесия, выполните измерения периода колебаний маятника при различных значениях амплитуды колебаний. Результаты измерений занесите в табл. 2.

Сделайте вывод о зависимости периода колебаний маятника от амплитуды колебаний.

Таблица 2

$a$ , см					
$t$ , с					
$T$ , с					

6. Измерьте периоды колебаний маятников одинаковой длины с различной массой. Сделайте вывод о зависимости периода колебаний от массы маятника.

По результатам эксперимента учащиеся должны обнаружить, что период колебаний маятника в пределах границ погрешностей измерений прямо пропорционален корню квадратному из длины маятника и не зависит ни от массы маятника, ни от амплитуды колебаний. Правда, последнее утверждение не вполне точное: при больших значениях амплитуды колебаний может быть обнаружено небольшое изменение периода колебаний. Оно объясняется тем, что формула для периода колебаний математического маятника приближенная, она выведена для случая малых амплитуд колебаний.

### *Измерение времени реакции человека на световой сигнал*

#### *Возможные варианты выполнения задания*

Интервал времени между моментом действия светового сигнала на глаз человека и моментом ответного мышечного действия называется временем реакции. Учитывать существование времени реакции необходимо людям многих профессий: водителям автомобилей, летчикам, операторам в различных системах управления.

Для измерения времени реакции мышц руки на световой сигнал нужно одновременно с подачей светового сигнала запустить секундомер. В момент времени реакции мышц руки

на этот сигнал секундомер нужно остановить. Показания секундомера будут равны времени реакции.

**Вариант 1.** Однако в комплекте предложенного оборудования нет секундомера. В этом случае эксперимент можно выполнить следующим образом. Один ученик держит измерительную линейку в вертикальном положении, второй располагает пальцы своей руки около нулевой риски шкалы линейки таким образом, чтобы поймать линейку, как только он увидит, что она начала падать (рис. 20).

Расстояние  $h$ , которое пролетает линейка от момента начала падения до момента схватывания ее пальцами, определяется временем  $t$  реакции второго ученика:

$$h = \frac{gt^2}{2}, \quad t = \sqrt{\frac{2h}{g}}.$$

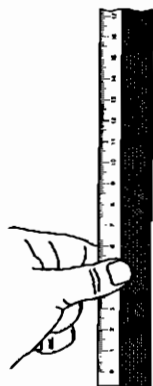


Рис. 20

Измерения следует повторить 3–5 раз и вычислить среднее арифметическое значение.

**Вариант 2.** В эксперименте участвуют два ученика и используют два секундомера. Учащийся, время реакции которого необходимо измерить (испытуемый), берет секундомер № 1, а второй учащийся (контролер) берет секундомер № 2. Оба экспериментатора располагаются рядом, чтобы секундомер контролера был виден испытуемому. Контролер запускает свой секундомер (№ 2), а испытуемый должен запустить свой секундомер (№ 1) в тот момент, как увидит движение стрелки секундомера № 2 или смену цифр на дисплее цифрового секундомера.

После запуска секундомеров таким способом испытуемый и контролер обмениваются секундомерами и производят остановку секундомеров в том же порядке: контролер останавливает секундомер № 1, а испытуемый — секундомер № 2 в момент, когда заметит остановку секундомера № 1.

Испытуемый запускает секундомер № 1 с опозданием на время реакции  $\Delta t$  и останавливает секундомер № 2 опять с опозданием на время реакции  $\Delta t$ . Поэтому показания секундомера № 1 должны быть меньше показаний секундомера № 2 на удвоенное время реакции  $2\Delta t$  испытуемого:

$$t_2 - t_1 = 2\Delta t.$$



Время  $\Delta t$  реакции испытуемого на световой сигнал определяется выражением:

$$\Delta t = \frac{t_2 - t_1}{2}.$$

Измерения необходимо повторить трижды и определить среднее значение времени реакции.

**Вариант 3.** Для измерения времени реакции человека на световые сигналы можно использовать электронный измеритель времени из комплекта «Лаборатория L-микро» по механике. Электронный секундомер этого комплекта (рис. 21) может запускаться и останавливаться либо нажатием кнопки «пуск—стоп» на корпусе 1 секундомера, либо с помощью магнитоуправляемых контактов (герконов) в выносных датчиках 2 и 3. Геркон (герметический контакт) состоит из двух близко расположенных упругих ферромагнитных контактов, которые при внесении его в магнитное поле или при приближении магнита намагничиваются и притягиваются друг к другу. В результате замыкается участок электрической цепи, соединенный с выводами геркона. Схема электронного секундомера устроена так, что при одном замыкании электрических контактов на его входе происходит запуск секундомера, при следующем замыкании секундомер останавливается. К электрическим контактам входа секундомера подключены параллельно выводы от герконов и от кнопки «пуск—стоп».

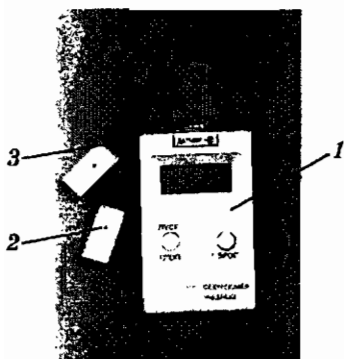


Рис. 21

Время реакции человека на световые сигналы с помощью электронного измерителя времени можно измерить следующим образом.

1. Нажатием на кнопку «Сброс» производится установка нуля. Испытуемый берет датчики секундомера и готовится к тому, чтобы возможно быстро поднести магнит 3 одного датчика к геркону 2 второго датчика. (Геркон находится внутри пластмассовой пластины датчика, напротив отверстия.)

2. Контролер запускает электронный секундомер нажатием кнопки «Пуск». Испытуемый должен остановить секундомер, поднеся магнит 3 одного датчика к геркону 2 второго датчика.

На дисплее будет показано время, отсчитанное от момента запуска до момента остановки секундомера. Это и есть время реакции испытуемого на световые сигналы.

3. Измерения нужно повторить 3–5 раз и найти среднее арифметическое значение.

## § 10. Методы измерения тепловых величин

**Температура.** Принцип измерения температуры основан на том предположении, что если в двух телах при их соприкосновении не изменяются никакие физические параметры, например объем и давление, то о телах говорят, что они находятся в *тепловом равновесии* или *имеют одинаковые температуры*. Самым простым прибором для измерения температуры является жидкостный термометр, состоящий из небольшого стеклянного сосуда с жидкостью, например спиртом или ртутью, и тонкой стеклянной трубки, из которой выкачан воздух. Для измерения температуры тела термометр приводится в соприкосновение с телом. Если температура тела выше температуры термометра, жидкость в сосуде термометра нагревается и расширяется, уровень заполнения трубки жидкостью повышется. При соприкосновении с более холодным телом жидкость сжимается, столбик жидкости в трубке укорачивается. Для количественных измерений температуры в практической жизни во многих странах употребляется шкала Цельсия, в которой за  $0^{\circ}\text{C}$  принята температура таящего льда, а за  $100^{\circ}\text{C}$  — температура кипящей воды при нормальном давлении. Жидкостные термометры обладают рядом недостатков. Во-первых, из-за неодинаковости зависимости объема разных жидкостей от температуры показания термометров зависят от вида применяемой жидкости. Если шкалы спиртового и ртутного термометров изготовить одинаковым способом, разделив отрезок между уровнями жидкости в трубках термометров при помещении в таящий лед и в кипящую воду на сто равных частей, то показания эти термометров при промежуточных значениях температуры будут расходиться. Для того чтобы показания спиртового и ртутного термометров были одинаковыми при промежуточных значениях температуры, шкалу спиртового термометра приходится делить неравномерно. Во-вторых, од-

ни жидкости кипят при сравнительно низких температурах, другие затвердевают при не очень низких температурах.

Газовый термометр основан на использовании связи давления идеального газа при постоянном объеме с температурой по абсолютной шкале:

$$p = p_0 [1 + \alpha (T - T_0)] = p_0 \alpha T.$$

Молекулярно-кинетическая теория установила связь между средней кинетической энергией беспорядочного поступательного движения молекул идеального газа и абсолютной температурой газа:

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT,$$

где коэффициент  $k$  называется *постоянной Больцмана*. Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул идеального газа пропорциональна первой степени абсолютной температуры газа. Таким образом, температура тела, измеряемая с помощью макроскопического прибора (термометра), имеет в молекулярно-кинетической теории смысл микроскопического параметра, являясь величиной, прямо пропорциональной средней кинетической энергии хаотического движения молекул. Другими словами, в молекулярной физике можно с равным основанием измерять среднюю кинетическую энергию теплового движения атомов или молекул в кельвинах или джоулях. Постоянная Больцмана имеет физический смысл множителя для перевода единицы измерения энергии «джоуль» в единицу температуры «кельвин».

Трудно объяснить, почему же вводится еще одна основная физическая величина «температура», если она по смыслу совпадает с уже введенной ранее величиной «энергия». Однако основания для этого, безусловно, имеются. Перевод абсолютной температуры в среднюю кинетическую энергию теплового движения частиц имеет смысл для вещества, но теряет смысл для электромагнитного излучения. Электромагнитное излучение может находиться в тепловом равновесии с телами из вещества и поэтому может характеризоваться температурой.

Понятие температуры, не связанное со средней кинетической энергией поступательного движения частиц, вводится в термодинамике. Эта температура называется *термодинамической температурой*.

Термодинамическая температурная шкала основывается на использовании второго начала термодинамики, согласно кото-

рому при совершении цикла Карно отношение количества теплоты  $Q_1$ , полученного любым рабочим телом от теплоотдатчика, к количеству теплоты  $Q_2$ , отданному теплоприемнику, равно отношению температуры  $T_1$  теплоотдатчика к температуре  $T_2$  теплоприемника:

$$Q_1/Q_2 = T_1/T_2.$$

Если произвольно приписать значение  $T_0$  температуре холодильника и провести цикл Карно с использованием нагревателя, то температуру  $T$  нагревателя можно определить, измерив количества теплоты  $Q_1$  и  $Q_2$ .

В качестве исходной точки при построении термодинамической температурной шкалы выбрана тройная точка воды. Тройной точкой называется точка на фазовой диаграмме состояний вещества, в которой сосуществуют в равновесии все три фазы — твердая, жидкая и газообразная (рис. 22). В отличие от точек кипения и плавления тройная точка характеризуется единственным значением температуры. Температура эта не зависит от давления, так как давление в тройной точке имеет единственное значение (для воды  $p = 609$  Па). Важно и то, что температура тройной точки воды может быть измерена с большей точностью, чем температура кипения или таяния льда.

За единицу термодинамической температуры принят кельвин абсолютной температурной шкалы, измеряемой по газовому термометру. Температура тройной точки воды на  $0,01$  К выше температуры таяния льда при нормальных условиях, т. е. равна  $273,16$  К. Поэтому  $1$  К равен  $1/273,16$  доле температуры тройной точки воды.

Термодинамическая температура  $T$  отсчитывается по термодинамической шкале температур от абсолютного нуля.

На практике более точным является метод измерения температуры с помощью газовых термометров. Поэтому весьма полезно практическое знакомство с принципом их действия при выполнении учениками экспериментального задания кон-

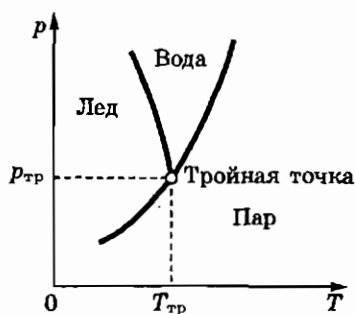


Рис. 22

структорского типа по изготовлению и испытанию газового термометра с воздухом в качестве рабочего тела.

## § 11. Методы измерения электрических величин

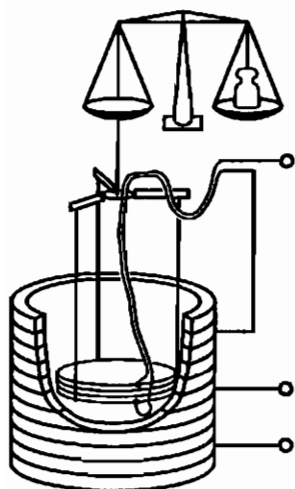


Рис. 23

**Ампер.** При обсуждении вопроса о способе воспроизведения единицы силы электрического тока (ампера) можно рассказать учащимся, как устроены токовые весы. Измеряемый электрический ток подводится к среднему витку большой катушки, делится на две равные части и в противоположных направлениях протекает через верхнюю и нижнюю половины катушки. В верхней и нижней половинах большой катушки возникают противоположно направленные магнитные поля, на уровне среднего витка вертикальная составляющая магнитного поля равна нулю. На этом уровне внутри большой катушки помещается измерительная катушка, соединенная последовательно с верхней половиной большой катушки (рис. 23). Оси катушек ориентированы вертикально.

Измерительная катушка подвешена к коромыслу чувствительных аналитических весов, изготовленных из немагнитных материалов. Ток, проходящий через верхнюю половину большой катушки, проходит и через измерительную катушку. На измерительную катушку действует вертикально направленная сила, пропорциональная квадрату силы тока в катушках. Измерение этой силы дает возможность сравнивать измеряемые токи.

**Приборы для измерения силы тока и напряжения.** При рассмотрении методов измерений силы тока и напряжения можно познакомить учащихся с устройством приборов электродинамической и электростатической систем. Главным достоинством приборов электродинамической системы (рис. 24)

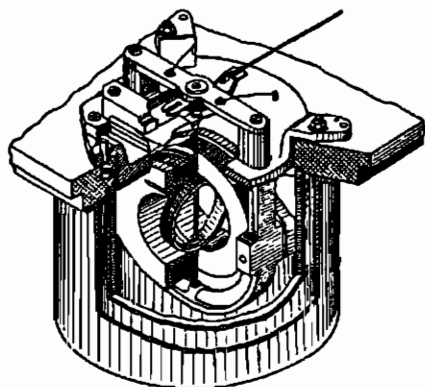


Рис. 24

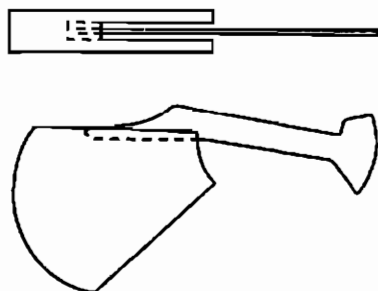


Рис. 25

является их применимость для измерений силы тока и напряжения как при постоянном, так и при переменном токе.

Приборы электростатической системы предназначены для измерений постоянных и переменных напряжений. Их достоинством является очень большие значения электрического сопротивления приборов. Действие электростатических приборов основано на использовании сил взаимодействия между разноименно заряженными подвижными и неподвижными электродами, подвижные электроды втягиваются внутрь системы неподвижных электродов (рис. 25).

Если школьный кабинет располагает цифровыми электроизмерительными приборами с более широкими возможностями, чем у мультиметра, описанного в учебном пособии, то целесообразно познакомить учащихся со способами измерений емкости, индуктивности, частоты. Например, мультиметр типа СЧУ 17 (рис. 26) позволяет измерять емкость конденсаторов при подключении их выводов к гнездам 5 с маркировкой  $C_x$  и повороте переключателя функций и диапазонов в зону 4. При повороте переключателя функций и диа-

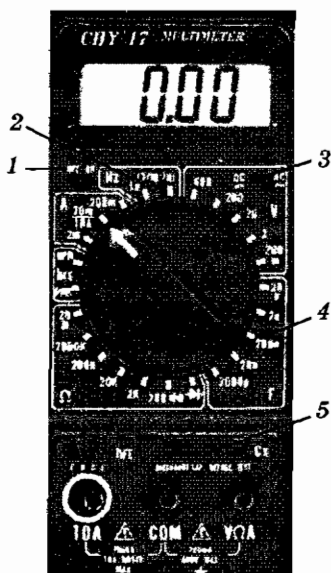


Рис. 26

пазонов в зону 2 и подключении выводов щупов к источнику переменного напряжения на дисплее будет представлена частота колебаний напряжения. Переключатель 3 должен ставиться в положение «DC» при измерениях постоянного тока или напряжения и в положение «AC» при измерениях переменного тока или напряжения. Переключателем 1 прибор включается и выключается.

## § 12. Методы измерения магнитных величин

**Магнитная индукция, магнитный поток, индуктивность.** Магнитные величины могут быть определены двумя независимыми способами. Первый способ, использованный в учебном пособии, основан на измерении силы Лоренца (или силы Ампера). Второй возможный вариант определения магнитной индукции и магнитного потока основан на использовании явления электромагнитной индукции.

В этом варианте магнитный поток  $1 \text{ Вб}$  равен магнитному потоку, при убывании которого до нуля в сцепленной с ним электрической цепи сопротивлением  $1 \text{ Ом}$  через поперечное сечение проводника проходит количество электричества  $1 \text{ Кл}$ .

Магнитная индукция  $1 \text{ Тл}$  равна магнитной индукции, при которой магнитный поток сквозь поперечное сечение площадью  $1 \text{ м}^2$  равен  $1 \text{ Вб}$ .

Индуктивность  $1 \text{ Гн}$  равна индуктивности электрической цепи, в которой возникает ЭДС самоиндукции  $1 \text{ В}$  при равномерном изменении силы тока в ней со скоростью  $1 \text{ А/с}$ .

Если в кабинете физики имеется прибор для исследования магнитного поля (рис. 27), его можно использовать в лабораторной работе по измерению магнитной индукции между полюсами подковообразного магнита.

Вместо лабораторной работы с подковообразным магнитом можно предложить учащимся измерить магнитную индукцию магнитного поля Земли баллистическим методом. Баллистический метод основан на использовании следующей особенности чувствительного прибора для измерения силы тока, называемого гальванометром: если через рамку измерительной системы гальванометра электрический ток протекает за такое короткое время  $\Delta t$ , которое много меньше периода  $T$  свободных

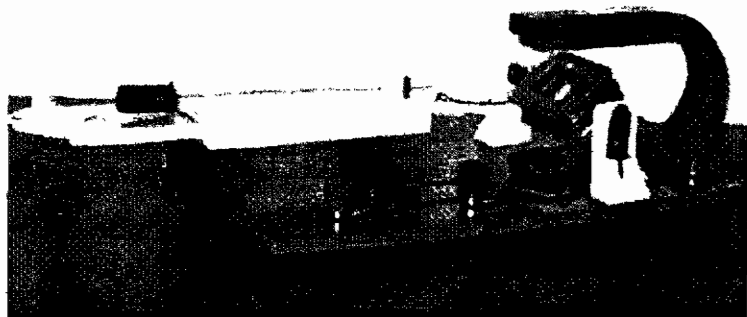


Рис. 27

колебаний измерительной системы ( $\Delta t \ll T$ ), то максимальный поворот измерительной системы оказывается пропорциональным электрическому заряду  $q$ , прошедшему через рамку измерительного прибора. Таким образом гальванометр может служить прибором для измерения заряда.

Градуировку шкалы гальванометра в единицах заряда можно осуществить подключением к его выводам конденсатора известной электроемкости  $C$ , заряженного до известного напряжения  $U$ :

$$q = UC.$$

При максимальном отклонении указателя на  $N$  делений цена деления прибора  $a$  в кулонах равна:

$$a = \frac{q}{N} = \frac{UC}{N}.$$

Если плоскость контура площадью  $S$  расположена перпендикулярно вектору  $B$  индукции магнитного поля, то магнитный поток  $\Phi$  через контур равен произведению модуля вектора индукции  $B$  магнитного поля Земли на площадь  $S$  контура:

$$\Phi = BS.$$

При повороте контура в пространстве на  $180^\circ$  магнитный поток  $\Phi$  через контур, оставаясь тем же по модулю, изменяет свой знак. Изменение магнитного потока через контур при его повороте равно:

$$\Delta\Phi = 2BS.$$



Изменение магнитного потока через контур сопровождается возникновением ЭДС индукции, которая по закону электромагнитной индукции равна:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{2BS}{\Delta t}.$$

В катушке из  $n$  витков провода ЭДС индукции в  $n$  раз больше:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\Phi \cdot n}{\Delta t} = \frac{2nBS}{\Delta t}.$$

Если выводы катушки замкнуть, в цепи будет протекать индукционный ток:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{2nBS}{R\Delta t}.$$

Умножив обе части уравнения на  $\Delta t$ , получим:

$$I \cdot \Delta t = q = \frac{2nBS\Delta t}{R\Delta t} = \frac{2nBS}{R},$$

где  $q$  — заряд, протекающий в цепи при повороте катушки,  $R$  — общее электрическое сопротивление цепи. Отсюда индукция магнитного поля равна:

$$B = \frac{q \cdot R}{2nS}.$$

Заряд  $q$  можно измерить с помощью отградуированного гальванометра, подключенного к концам провода катушки.

При практическом выполнении работы, когда известно расположение в пространстве плоскости магнитного меридиана, можно в двух отдельных опытах определить горизонтальную  $B_r$  и вертикальную  $B_v$  компоненты вектора индукции (рис. 28) и вычислить модуль  $B$  их геометрической суммы:

$$B^2 = B_r^2 + B_v^2.$$

Отличие баллистического метода измерения магнитного поля Земли от более простого метода измерения с использованием катушки с током и компаса заключается, во-первых, в том, что этот метод не требует использования формулы для вычисления индукции в центре кругового тока, даваемой учащимся без вывода. Во-вторых, этим методом измеряются вертикальная и горизонтальная составляющие вектора индукции и тем самым

определяется его полный модуль и направление в пространстве.

### Определение индукции магнитного поля Земли баллистическим методом

*Оборудование.* Проволочная катушка, гальванометр типа М-273/9, компас (магнитная стрелка), омметр.

*Задание.* Определите индукцию магнитного поля Земли в месте наблюдения.

#### Порядок выполнения работы

1. Для выполнения этой работы нужно из медного провода изготовить прямоугольную катушку из 20–40 витков размерами примерно  $30 \times 40$  см. Присоедините выводы катушки к гальванометру. Установите катушку вертикально и расположите ее плоскость перпендикулярно горизонтальной составляющей вектора индукции магнитного поля Земли, ориентируясь по стрелке компаса (рис. 28).

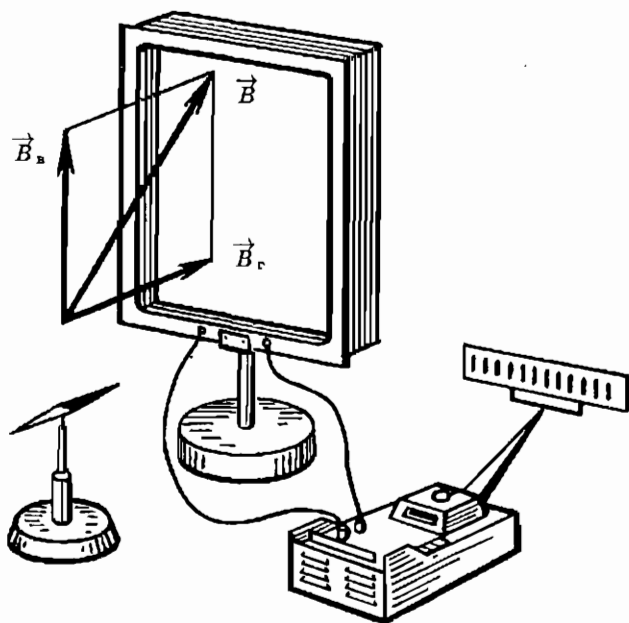


Рис. 28

2. Поверните рамку на  $180^\circ$  вокруг вертикальной оси и сделайте отсчет отброса светового указателя гальванометра. Повторите опыт 5 раз и найдите среднее значение. Определите по значению отброса электрический заряд, протекающий в катушке при ее повороте.
3. Измерьте площадь катушки  $S$  и электрическое сопротивление  $R_k$  провода катушки. Определите по паспорту гальванометра сопротивление  $R_r$  его рамки и полное сопротивление цепи  $R$ :  $R = R_k + R_r$ .  
По найденным значениям  $R$ ,  $q$  и  $S$  и известному значению числа  $n$  витков провода на рамке вычислите модуль  $B_r$  горизонтальной составляющей вектора индукции магнитного поля Земли.
4. Расположите рамку горизонтально и поверните ее на  $180^\circ$  вокруг горизонтальной оси. Сделайте аналогичные расчеты и определите модуль  $B_v$  вертикальной составляющей вектора индукции магнитного поля Земли.
5. Вычислите модуль  $B$  индукции магнитного поля Земли. Результаты измерений и вычислений занесите в отчетную таблицу.

## § 13. Методы измерения световых величин

Поскольку со световыми величинами и единицами учащиеся знакомятся только в 11-м классе при углубленном изучении физики, в большинстве случаев придется изложить этот материал на уроке в очень сжатом виде, примерно так, как это сделано в книге для учащихся.

Здесь мы остановимся лишь на главных моментах, на которых следует акцентировать внимание учеников. Источники света можно разделить на естественные (Солнце, звезды, Луна) и искусственные (лампы накаливания, люминесцентные лампы). Они различаются не только количеством, но и качеством испускаемого света, его спектральным составом. Необходимо подчеркнуть важность применения оптимального освещения, а следовательно, и световых измерений в быту, на производстве.

Измерения световых величин разделяются на субъективные, в которых «измерительным прибором» является глаз, и объективные, когда глаз заменяется физическим прибором или

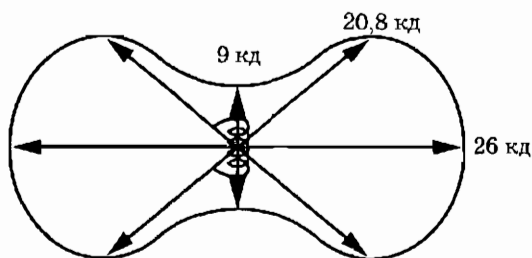


Рис. 29

устройством. Световые измерения проводятся в затемненном или в частично затемненном помещении. Лабораторный стол рекомендуется покрыть черной бумагой или черной тканью для уменьшения отраженного света, попадающего на фотоэлемент. С этой же целью следует убрать со стола все посторонние предметы. Фотоэлемент нужно защитить от рассеянного света. Если же световой фон — показания микроамперметра при выключенной лампочке — окажется все же заметным, то при измерениях его можно учесть вычитанием.

В качестве эталонного источника света удобно воспользоваться осветителем для теневой проекции, так как он имеет блок питания. Для этого снимается чехол, а лампочка (6 В, 26 кд) закрепляется в лапке штатива цоколем вверх так, чтобы ее нить была параллельна плоскости фотоэлемента. Высота расположения лампы и фотоэлемента от поверхности стола должна быть одинаковой. Из-за протяженности нити на сравнительно небольших расстояниях от лампы сила света в разных направлениях неодинакова. Это видно на полярной диаграмме, которую полезно показать учащимся (рис. 29).

В опытах по фотометрии, в частности при градуировке шкалы микроамперметра в люксах, можно использовать и другие электрические лампочки. Ниже приводим значения максимальной силы света некоторых автомобильных лампочек.

№	Характеристики, указанные на цоколе	Максимальная сила света, кд
1	12 В, 3 кд	4
2	12 В, 21 кд	27
3	12 В, 21 Вт	42

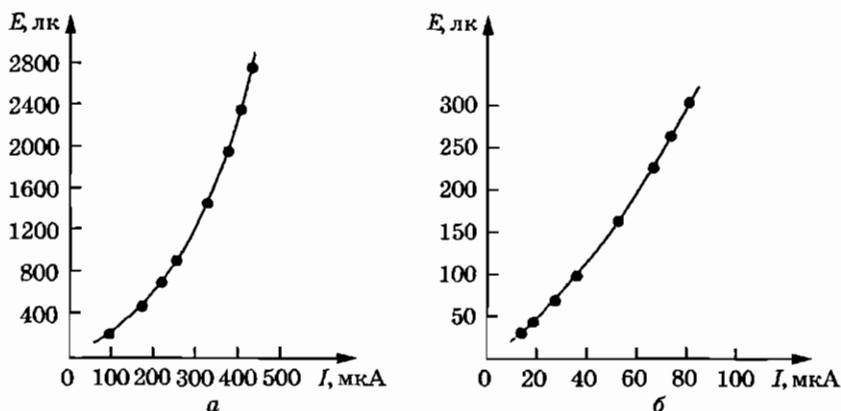


Рис. 30

В заключение приведем два графика градуировки шкал микроамперметров 500 и 100 мкА в люксах (рис. 30, а и б соответственно).

## § 14. Методы измерений в атомной и ядерной физике

**Естественный фон облучения.** Выполнение измерений физических величин атомной и ядерной физики в условиях школьного кабинета физики встречается с серьезными затруднениями. Главное из них связано с отсутствием в большинстве школ приборов для регистрации ядерных излучений. Если в кабинете нет радиометра для выполнения лабораторной работы, описанной в пособии для учащихся, учитель может продемонстрировать действие счетчика Гейгера—Мюллера на панели, соединив его выход со входом усилителя низкой частоты с динамиком на выходе.

Мы живем в такое время, когда информированность о возможной опасности ионизирующего излучения для здоровья и жизни человека необходима не только профессионалам, но и каждому человеку. Вполне естественно желание современного человека снизить уровень радиационного облучения до минимального значения. Однако необходимо понимать, что снижение уровня облучения имеет предел в виде *естественного фона облучения*. Можно поручить одному или нескольким ученикам подготовить краткие сообщения о единицах измерения

доз облучения, влиянии различных доз на здоровье человека, естественном фоне облучения, методах регистрации ядерных излучений.

Естественный фон облучения создается гамма-излучением естественных радиоактивных изотопов, имеющих в земной коре и земной атмосфере, естественными радиоактивными изотопами, имеющимися в организме человека, космическим излучением, приходящим на землю из межпланетного пространства.

Общая эквивалентная доза от естественного радиационного фона составляет около 2 мЗв в год. Естественный уровень радиации в разных местах на Земле различается в несколько раз. От искусственных источников ионизирующего излучения в промышленно развитых странах, в первую очередь от рентгеновского излучения при медицинских обследованиях, человек в среднем получает в год эквивалентную дозу около 1 мЗв.

**Предельно допустимая доза.** Исследования влияния ионизирующих излучений на уровне естественного радиационного фона на здоровье и продолжительность жизни людей не обнаружили никаких отрицательных воздействий. На этом основании установлена предельно допустимая доза облучения для людей, чья профессиональная деятельность связана с использованием источников ионизирующей радиации. Эта доза равна 50 мЗв за год. Для населения установлена допустимая эквивалентная доза 5 мЗв за год.

Для измерения эквивалентных доз излучения иногда продолжают применять устаревшую единицу — бэр («биологический эквивалент рентгена»). Связь между старой и новой единицами эквивалентной дозы излучения дается выражением:

$$1 \text{ бэр} = 0,01 \text{ Зв.}$$

При эквивалентной дозе однократного облучения всего организма человека 3–5 Зв около 50% облученных умирает от лучевой болезни в течение 1–2 месяцев после облучения. Основная причина смерти людей при лучевой болезни — поражение костного мозга, вырабатывающего лейкоциты крови. Резкое снижение количества лейкоцитов в крови делает организм человека беззащитным против любых болезнетворных микроорганизмов.

При эквивалентной дозе однократного общего облучения менее 0,5 Зв признаков лучевой болезни не обнаруживается,

однако длительные наблюдения за состоянием здоровья людей, получивших небольшие дозы облучения, показали, что любые дозы облучения увеличивают вероятность таких болезней, как лейкоз, раковые заболевания различных органов. Кроме того, возрастает вероятность генетических дефектов у детей облученных родителей.

К изучению данной темы можно для наглядности подготовить представленную ниже таблицу.

## ДОПУСТИМЫЕ И ОПАСНЫЕ ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ

### Естественные источники радиации



### Предельно допустимые эквивалентные дозы облучения

Для профессионалов	→ за год →	50 мЗв (5 бэр)
Для ограниченной части населения	→ за год →	5 мЗв (0,5 бэр)
	→ за 70 лет →	350 мЗв (35 бэр)

### Предельно допустимая мощность экспозиционной дозы

Для профессионалов (1700 рабочих часов в год):  
30 мкЗв/час (3 мбэр/час)

### Опасные дозы однократного общего облучения

Гибель отдельных клеток крови и половых клеток: 0,1–0,5 Зв (10–50 бэр)  
Нарушения в работе кровяной системы: 0,5–1,0 Зв (50–100 бэр)

\* Мощности экспозиционной дозы 3 мбэр/час для рентгеновского и гамма-излучения соответствует экспозиционная доза 3 мР/час

# Физические измерения в повседневной жизни

## § 15. Как нужно измерять температуру

**Медицинский термометр.** К этому занятию одному из учеников можно поручить подготовку краткого сообщения об истории создания термометра, различных температурных шкалах и современном понимании смысла понятия температура.

В практической жизни важно знать главные особенности медицинского термометра и уметь им пользоваться. Прежде всего, необходимо обратить внимание на тонкую капиллярную трубку между баллоном с ртутью и трубкой на шкале и на тот факт, что после измерения температуры тела показания термометра не изменяются со временем. При рассматривании термометра через лупу видно, что между ртутью в баллоне и ртутью в трубке при этом образуется разрыв (рис. 32).

Принцип работы медицинского ртутного термометра следующий. При нагревании ртуть в баллоне расширяется, и часть ее проталкивается сквозь капилляр в трубку. При понижении температуры объем ртути в баллоне уменьшается, но часть ртути, прошедшая сквозь капилляр, остается в трубке. Столбик ртути в трубке после снижения температуры удерживается действием сил поверхностного натяжения в тонком капилляре. Ртуть не смачивает стекло, поэтому силы поверхностного натяжения препятствуют продвижению ртути в капиллярную стеклянную трубку. Таким образом, ртутный медицинский термометр — это термометр, показывающий максимальное значение температуры за период измерения.



Рис. 32



Для подготовки термометра к новому измерению необходимо «сбросить» старые показания, «стряхнуть» термометр. При стряхивании вниз и резкой остановке в термометре возникает перегрузка, «потяжелевшая» ртуть преодолевает капилляр и возвращается в баллон. Над капилляром можно заметить расширение трубки термометра, в котором находится капля ртути. Наличие этой капли облегчает прохождение ртути через капилляр при стряхивании термометра.

! *Осторожно, ртуть!* При работе с ртутным термометром необходимо соблюдать особую осторожность. Пока ртуть находится внутри стеклянного баллона, она совершенно безвредна для человека. Но если термометр разрушается и ртуть из него разливается, собрать ее довольно трудно. Разлитая ртуть постепенно испаряется и ее пары попадают при дыхании в организм человека. Длительное вдыхание паров ртути наносит вред здоровью человека.



**Электронный термометр.** В настоящее время в быту все чаще употребляются электронные термометры. Датчиком температуры в таком термометре служит термопара. Сигнал от термопары в виде разности потенциалов, пропорциональной измеряемой температуре, поступает на вход электронного устройства, преобразующего этот сигнал в цифровые показания на жидкокристаллическом дисплее. Показания с такого термометра следует снимать при условии теплового контакта с телом после того, как наступит тепловое равновесие между термопарой и телом, т. е. после того, как показания термометра перестают изменяться.

Если на занятии будет демонстрироваться электронный термометр (рис. 33), то необходимо объяснить физический принцип его работы. Он заключается в следующем. Если у длинного металлического проводника температура одного конца выше температуры другого конца, то от конца с более высокой температурой часть электронов диффундирует к более холодному концу. Между холодным и горячим концами проводника возникает разность потенциалов. У проводников из разных металлов концентра-

Рис. 33

ция свободных электронов различна. Поэтому при одинаковой разнице температур между холодным и горячим концами у проводников из разных металлов разность потенциалов оказывается различной. Если соединить два конца проволок из разных металлов и место их соединения нагреть, то между свободными холодными концами проволок возникает разность потенциалов. При соединении свободных концов в цепи возникает электрический ток. Это явление называется *термоэлектрическим эффектом*. Причина возникновения термоэлектрического тоска — электродвижущая сила, называемая *термоэдс*. Термоэдс различных пар металлов отличаются друг от друга, но все имеют очень небольшие значения, порядка 0,5–10 мВ при разности температур между холодными и горячими концами 100°С.

**Измерения температуры воздуха.** Серия опытов в лабораторной работе 15 при правильном выполнении дает следующие результаты.

Опыт 1 демонстрирует, что показания термометра «на солнце» заметно выше его показаний «в тени». При отсутствии «солнечного освещения» температуры воздуха и стола одинаковы. В результате теплообмена со столом и воздухом термометр приходит в тепловое равновесие с ними и показывает температуру воздуха. Во втором случае под действием поглощаемого излучения «солнца» температура стола повышается, а прозрачный воздух этим излучением почти не нагревается. Термометр с одной стороны осуществляет теплообмен с поверхностью стола, а с другой стороны — с воздухом. В результате его температура оказывается выше температуры воздуха, но ниже температуры поверхности стола. Каков же тогда смысл показаний термометра «на солнце»?

Упорный любитель измерений температуры воздуха «на солнце» может на это возразить, что его не интересует температура воздуха «в тени», когда сам он находится «на солнце». Пусть это будет не температура воздуха, просто показания термометра «на солнце», но именно они его и интересуют. В этом случае ему пригодятся результаты опыта 2. Этот опыт показывает, что показания термометра на темной подложке значительно выше показаний термометра на светлой подложке. Следовательно, на вопрос о показаниях термометра «на солнце» нет однозначного ответа. Результат будет сильно за-

висеть от цвета подложки под термометром, цвета и структуры поверхности баллона термометра, наличия или отсутствия ветра.

Температура воздуха на улице при измерениях вдали от нагретых солнечным излучением предметов и при исключении прямого воздействия излучения на термометр одинакова «на солнце» и «в тени», это просто температура воздуха. Но измерять ее следует действительно только «в тени». Если в квартире есть окно, выходящее на север, то именно за этим окном и нужно укрепить уличный термометр. Если же такого окна в квартире нет, термометр должен быть укреплен возможно дальше от нагреваемых солнцем стен, напротив слабо нагреваемых оконных стекол. Баллон термометра должен быть защищен от нагревания солнечным излучением. Результаты опыта 3 показывают, что при попытке защиты термометра от солнечного излучения экран сам нагревается и нагревает термометр. Так как белый экран нагревается меньше, защитный экран должен быть светлым, располагать его следует в достаточном удалении от термометра.

В результате выполнения домашнего задания должно быть установлено, что показания комнатного термометра зависят от места его расположения в комнате. Если нас интересует температура воздуха в комнате, то нужно исключить влияние на него всех остальных тел. На термометр не должен падать прямой солнечный свет, нельзя располагать термометр вблизи нагревательных и осветительных приборов. Не следует вешать термометр на внешнюю стену комнаты, которая летом имеет повышенную, а зимой пониженную температуру относительно температуры воздуха в комнате.

**Максимальный и минимальный термометры.** Творческое задание по конструированию максимального и минимального термометра хорошо сочетать с демонстрацией реального примера такого термометра. После обсуждения собственных изобретений учащихся можно предложить им разгадать устройство этого термометра.

Внешний вид одного из таких термометров представлен на рис. 34. Для выполнения измерений термометр располагается вертикально. Он имеет две шкалы и две трубки со ртутью. При повышении температуры ртуть в правой трубке движется вверх и перемещает вверх небольшой стержень. В левой труб-

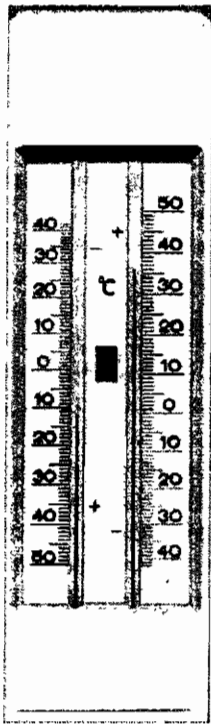


Рис. 34

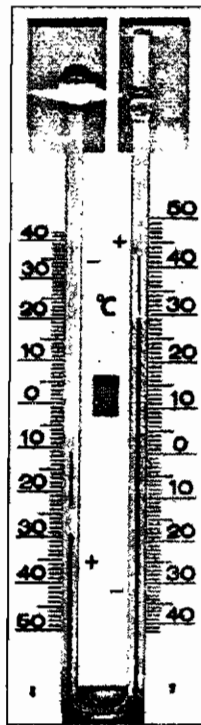


Рис. 35

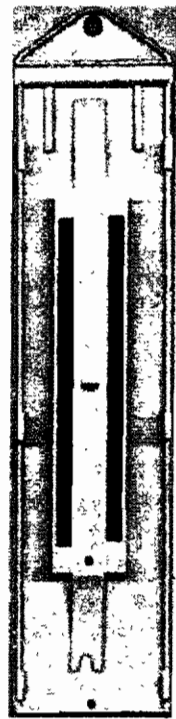


Рис. 36

ке при повышении температуры ртуть движется вниз, а стержень за ртутью не движется. При понижении температуры ртуть в правой трубке движется вниз, а стержень за ртутью не движется. В левой трубке при понижении температуры ртуть движется вверх и перемещает вверх стержень. Таким образом, положение нижнего края правого стержня отмечает максимальное значение температуры, а положение нижнего края левого стержня отмечает минимальное значение температуры за период наблюдения. Для подготовки термометра к новым измерениям нажимают кнопку между коленами термометра и стержни опускаются до столбиков ртути в трубках.

Когда все гипотезы обсуждены, вскрывается крышка термометра и сравнивается ожидаемое с действительным (рис. 35). В данном термометре рабочим телом является не ртуть, а прозрачная жидкость, находящаяся в стеклянном баллоне, соединенном с верхним концом левого колена трубки термометра.

Левое колено трубки соединено внизу с правым коленом, ртуть находится в сообщающихся сосудах. При повышении температуры рабочее тело расширяется и движет ртуть в левом колене вниз, в правом колене уровень ртути при этом повышается, а жидкость над ртутью выталкивается в полупустой стеклянный баллон. Температура определяется по делению шкалы против уровня ртути в трубке.

Если в начальный момент времени стержни в трубках находились в соприкосновении со столбиками ртути, то при повышении температуры столбик в правой трубке поднимается ртутью вверх, а в левой трубке остается на прежнем месте. От движения вниз под действием силы тяжести его удерживает притяжение магнитной полосы, находящейся за пластиной со шкалой. Притяжение к магниту обусловлено тем, что в стержне находится железная проволока. При понижении температуры уровень поверхности ртути в правой трубке опускается вниз, а стержень остается на месте, отмечая значение максимальной температуры. При нажатии кнопки магнитные полосы (рис. 36) отодвигаются от трубок термометра и не удерживаемые магнитным притяжением стержни под действием силы тяжести опускаются до столбиков ртути в трубках.

## § 16. Измерение влажности воздуха

Занятие, посвященное методам измерения влажности атмосферного воздуха, можно начать с рассмотрения устройства бытовых приборов для измерения влажности. Один или два таких прибора должны быть разобраны учителем перед занятием, чтобы эти приборы не оставались для учащихся «черными ящиками» и они могли рассмотреть все детали их устройства (рис. 37). Это может удовлетворить естественный интерес школьников к тому, что находится внутри приборов и, возможно, предотвратит разборку подобного прибора дома.

Основной частью занятия по этой теме должно стать самостоятельное планирование и выполнение школьниками эксперимента по измерению абсолютной и относительной влажности. Этот эксперимент должен показать, что некоторые экспериментальные исследования, имеющие практическую ценность, могут и сегодня выполняться с использованием очень простых измерительных приборов и методов при понимании физической сути поставленной задачи. Краткие теоретические

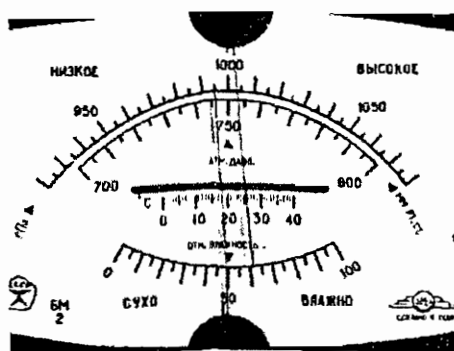


Рис. 37

сведения по теме в учебном пособии даны не для изучения и опроса, а лишь для напоминания изученного или для определения понятия влажности, если в основном курсе оно еще не изучено.

Холодную воду можно приготовить, добавив несколько кусков льда в стакан с водой комнатной температуры. Однако во время проведения опыта, чтобы точнее определить температуру точки росы, лучше понемногу добавлять в первый стакан холодную воду из второго стакана, а не куски льда. Прикрепление алюминиевой фольги к стакану не обязательно, но на ее поверхности появление росы легче заметить. Когда учащиеся готовы приступить к выполнению опыта, можно обратить их внимание на тот факт, что роса должна появиться только ниже уровня воды в стакане. В момент ее появления нужно записать показания термометра. Если в группе есть ученики, желающие выполнять более сложные исследования, то им можно предложить следующую экспериментальную задачу.

### **Экспериментальная задача**

Вам дан стеклянный сосуд, резиновая трубка, водяной манометр, стакан с водой и пипетка. Используя это оборудование, измерьте абсолютную влажность атмосферного воздуха.

### **Возможный вариант выполнения эксперимента**

Возьмем стеклянную колбу или бутылку и подберем к ней резиновую пробку. В пробке сделаем отверстие и вставим в него стеклянную трубку. Соединим стеклянную трубку с

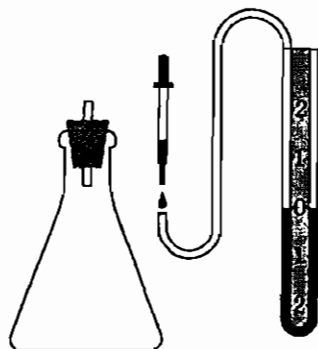


Рис. 38

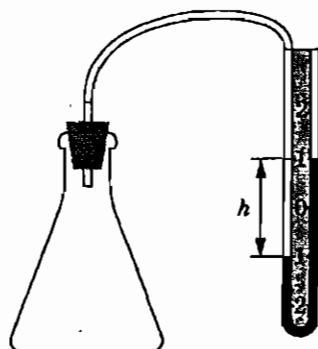


Рис. 39

помощью резиновой или пластиковой трубки с водяным манометром.

Проверим герметичность экспериментальной установки. Для этого приложим к колбе ладони рук. Нагревание колбы должно привести к повышению давления воздуха в колбе и соответствующему изменению показаний манометра. После проверки установки на герметичность можно приступить к основному эксперименту.

Снимем резиновую трубку со стеклянной трубки. С помощью пипетки введем в резиновую трубку несколько капель воды (рис. 38). Наденем конец резиновой трубки с водой на стеклянную трубку и стряхнем воду в колбу. Во время этих операций следует брать рукой только резиновую пробку, чтобы избежать нагревания колбы теплом руки!

Если давление водяных паров в атмосферном воздухе равно  $p$ , то в колбе в результате испарения воды через несколько минут давление водяного пара достигнет значения  $p_0$ , равного значению давления насыщенного пара при данной температуре. При этом изменение давления  $\Delta p$  в колбе равно:

$$\Delta p = p_0 - p.$$

Измерив изменение давления  $\Delta p$  в колбе с помощью водяного манометра (рис. 39) и определив давление  $p_0$  насыщенного пара при данной температуре  $t$  по таблице, можно найти значение давления  $p$  водяного пара:

$$p = p_0 - \Delta p = p_0 - \rho gh.$$

Относительная влажность воздуха равна

$$\varphi = \frac{p}{p_0}.$$

При обсуждении результатов следует обратить внимание учащихся на некоторые тонкости проведения эксперимента. К ним относятся: проверка герметичности собранной установки до начала эксперимента; предосторожности против нагревания колбы руками экспериментатора; оценка минимальной массы воды, необходимой для насыщения воздуха в колбе водяными парами; учет изменения объема воздуха для проведения измерений при постоянном объеме; снятие показаний манометра после прекращения их изменений.

## § 17. Исследования работы сердца

При подготовке к занятию, на котором будут рассматриваться вопросы, касающиеся физики работы сердца, нужно выяснить, есть ли в группе учащиеся, интересующиеся вопросами биологии и медицины. Если такие ученики найдутся, то именно им можно поручить подготовку кратких сообщений об устройстве кровеносной системы человека и физике работы сердца.

Для выполнения практической работы по измерению кровяного давления нужно иметь сфигмоманометр (тонометр). Если нет возможности приобрести этот недорогой прибор для кабинета физики, то его можно взять на день занятия в школьном медицинском пункте или попросить школьников, у которых такой прибор имеется дома, принести его на занятие.

Перед началом практической работы нужно показать ученикам, как подготовить сфигмоманометр к работе, обратив особое внимание на способ изменения давления в манжете с помощью регулятора давления.

При надевании манжеты на руку следует избегать крайностей: если манжета будет закреплена на руке слишком свободно, то нагнетанием воздуха в нее не удастся сжать артерию в руке до перекрытия движения крови. При слишком плотном стягивании манжеты движение крови в артерии может быть затруднено до начала нагнетания в нее воздуха и тем самым станет невозможным измерение кровяного давления. Если есть





Рис. 40

возможность, следует продемонстрировать учащимся современный электронный автоматический тонометр (рис. 40).

## § 18. Электрические токи сердца

Знакомство с «системой электрического управления» работой сердца необходимо каждому человеку как элемент общей культуры. Предложение врача снять электрокардиограмму не должно пугать человека как обязательный признак какого-то нездоровья. Он должен понимать, что это нормальная процедура общего медицинского обследования.

Если многие школьники интересуются медицинскими проблемами, то вместе с вопросом об электрической активности сердца можно обсудить применение достижений физики и электроники в современной медицине. Один из таких примеров — использование электрокардиостимуляторов. Сообщение об этих устройствах может подготовить один из учащихся.

Частота сокращений сердца должна соответствовать физиологическим потребностям организма. Частота пульса более 100 ударов в минуту обозначается как тахикардия, пульс менее 60 ударов в минуту называют брадикардией, нерегулярный ритм — аритмией. Многие нарушения ритма, вызванные различными поражениями сердца, не удается устранить с помощью лекарств. И тогда на помощь приходит стимулятор.

Основной частью электрокардиостимулятора является миниатюрный генератор электрических импульсов. Этот генератор вместе с источником питания вшивается под кожу на груди больного. По тонким изолированным проводникам электрические импульсы подводятся к внутренней поверхности правого

желудочка и правого предсердия и заставляют сердце работать в нормальном ритме.

На первом этапе разработки метода электрокардиостимуляции сердца для подведения проводников от генератора к сердцу выполнялась хирургическая операция со вскрытием грудной полости. В настоящее время подключение стимулятора осуществляется без хирургической операции. В вену под ключицей вводится пластмассовая трубка и через нее вводится электрод. Продвижение электрода непрерывно контролируется наблюдениями на экране рентгеновского аппарата. При достижении правого предсердия электрод фиксируется на его стенке.

Созданы стимуляторы, с помощью которых искусственное регулирование ритма сердца приближается по своему качеству к естественному. Для этого в стимулятор вставляется электронное устройство, являющееся по сути небольшим компьютером. Этот компьютер управляет частотой и амплитудой импульсов в соответствии с потребностями организма.

Общее знакомство с методами регистрации электрических токов сердца на занятии хорошо завершить экскурсией в кардиографический кабинет поликлиники или больницы. Кроме наблюдения процесса снятия электрокардиограммы можно попросить показать учащимся примеры кардиограмм здорового сердца и кардиограмм сердец с различными видами заболеваний.

Если нет возможности провести экскурсию в кардиографический кабинет, то можно продемонстрировать примеры изменений кардиограммы при заболевании сердца, приведенные на рис. 41.

На этом рисунке представлены электрокардиограммы сердца человека в трех отведениях I, II, и III до заболевания (а),



Рис. 41

в первый день заболевания — воспаления перикарда, внешней оболочки сердца (б), в период 3–20 дней заболевания (в), в период 3–4 недель заболевания (г), при инфаркте миокарда (д). (Инфаркт миокарда — заболевание сердечной мышцы, вызванное закупоркой артерии сердца сгустком крови (тромбом) или резким сужением, спазмом одной из артерий сердца.)

## § 19. Источники электрического напряжения вокруг нас

**Газоразрядный индикатор.** При знакомстве с устройством и принципом действия газоразрядного индикатора напряжения, а также применением его на практике для проверки наличия высокого электрического напряжения полезно решить следующую задачу.

### *Задача*

Вычислите максимальное значение силы тока через тело человека при проверке розетки в сети с напряжением 220 В с помощью отвертки с газоразрядным индикатором, если электрическое сопротивление резистора в отвертке равно 3 МОм.

### *Решение*

Напряжение на газоразрядном индикаторе примерно равно 70 В, поэтому на резисторе максимальное значение напряжения равно  $220 \text{ В} - 70 \text{ В} = 150 \text{ В}$ .

Сила тока равна  $I = \frac{150 \text{ В}}{3 \cdot 10^6 \text{ Ом}} = 50 \cdot 10^{-6} \text{ А} = 0,05 \text{ мА}$ .

Эта сила тока в несколько сотен раз меньше, чем сила тока, опасного для жизни человека.

**Изучение электрической зажигалки.** Прежде чем объяснять принцип действия пьезозажигалки, необходимо ознакомить учащихся с явлением пьезоэлектрического эффекта. Этому вопросу можно посвятить групповое занятие, на котором один из учеников расскажет о сущности пьезоэффекта, уделяя главное внимание механизму этого явления. Другие ученики покажут заранее подготовленные демонстрации пьезоэффекта и расскажут о его технических применениях.

Пьезоэлектрический эффект был открыт в 1880 г. братьями Пьером и Жаком Кюри. *Прямым пьезоэлектрическим эффектом* называется появление разноименных электрических

зарядов на противоположных поверхностях кристалла при его деформации. Причиной пьезоэлектрического эффекта является нарушение электрического равновесия в диэлектрическом кристалле под влиянием деформации электронных оболочек и относительного смещения атомов и ионов, в результате которого на противоположных поверхностях кристалла выступают электрические заряды разных знаков.

Количество электричества, возникающего при деформации пьезоэлектрика, пропорционально силе, вызывающей деформацию

$$q = k \cdot F.$$

Коэффициент пропорциональности  $k$ , называемый пьезомодулем, показывает, какое количество электричества  $q$  в кулонах возникает на электродах пьезоэлектрика при деформации его силой  $F$ , равной 1 Н.

Если на противоположные стороны пьезоэлектрического кристалла поместить электроды, то при приложении к ним разности потенциалов наблюдается деформация кристалла. Это явление называется *обратным пьезоэлектрическим эффектом*.

Для проведения опытов, демонстрирующих явление пьезоэффекта, удобно использовать зажигалку для газовой плиты. Полностью разбирать ее не следует; достаточно снять с нее металлический наконечник и прикрепить проводники к выводам 1 и 2 от блока пьезоэлементов (рис. 42).

**Демонстрация прямого пьезоэффекта.** Для демонстрации прямого пьезоэффекта один вывод от зажигалки соединяют с корпусом демонстрационного электрометра, а другой вывод — со стержнем электрометра. При плавном нажатии на клавишу зажигалки стрелка электрометра отклоняется. Для оценки напряжения, развиваемого пьезозажигалкой, необходимо знать, что цена деления шкалы электрометра примерно 300 В. Поскольку при сильном нажатии на клавишу стрелка электрометра выходит за пределы шкалы, измерить максимальное значение напряжения на выходе пьезозажигалки с помощью электрометра не удастся.

**Эффектная демонстрация прямого пьезоэффекта — зажигание лампы дневного света от пьезозажигалки.** Для этого из схемы лампы удаляют стартер, один из выводов пьезозажигалки соединяют с одним из электродов лампы, а другой вывод зажигалки — с проводом, намотанным на стеклянную поверхность лампы. Лампа включается в сеть, но не зажигается,

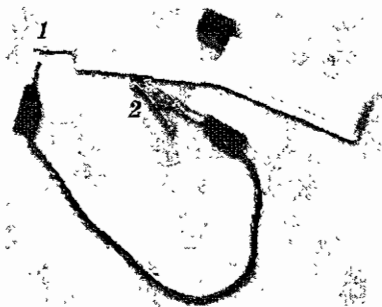


Рис. 42

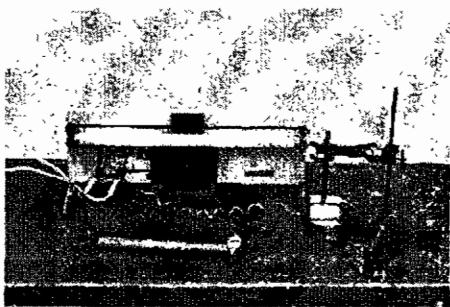


Рис. 43

поскольку потенциал зажигания ее при холодных электродах составляет около 1000 В. Лампа зажигается при нажатии на клавишу пьезозажигалки, так как развиваемая пьезозажигалкой разность потенциалов порядка десяти киловольт вызывает ионизацию разреженной ртутно-аргоновой смеси. В результате создаются условия для возникновения самостоятельного разряда. На рис. 43 показан аналогичный опыт с зажиганием лампы дневного света ударом по пьезоэлементу.

**Демонстрация обратного пьезоэффекта.** Если выводы от пьезозажигалки подсоединить к входу 5000 Ом звукового генератора ГЗШ-63, то в диапазоне частот 600–800 Гц можно услышать звучание пьезозажигалки, т. е. наблюдать явление обратного пьезоэффекта. Указанный диапазон близок к собственной частоте колебаний пьезоблока зажигалки. Звук усиливается, если зажигалку положить на стол. Обратный пьезоэффект широко используется в технике для получения звука и ультразвука.

Приступая к практической работе с зажигалкой полезно вскрыть одну зажигалку и продемонстрировать ее внутреннее устройство. В пьезозажигалке для газовых плит применяется разборный блок из двух пьезоэлементов, расположенных в пластмассовом цилиндре. Он легко отделяется от ударного устройства. Пьезоэлементы соединены параллельно (рис. 44). Однако необходимо иметь в виду, что зажигалку очень легко



Рис. 44

разобрать (с нее нужно лишь снять металлический наконечник и отвинтить два винта), но собрать ее значительно труднее. Поэтому спокойно разбирать зажигалку для демонстрации ее внутреннего устройства можно лишь в том случае, если у вас имеется еще одна неразобранная зажигалка для проведения опытов.

Основная задача занятия — измерение максимального напряжения между электродами зажигалки. Уже на стадии выполнения демонстрационных опытов выясняется, что прямое измерение с помощью электрометра выполнить невозможно, так как электрометр «зашкаливает». И здесь перед учениками открывается возможность для творческого поиска метода измерений высоких напряжений.

Самый простой метод подсказан в пособии для учащихся. Меняя расстояние  $d$  между шарами разрядника, к которым присоединены выводы от зажигалки, нужно подобрать наибольшее значение этого расстояния, при котором разряд еще происходит. По измеренному расстоянию  $d$  и известному значению напряженности  $E$  электрического поля, при котором происходит самостоятельный электрический разряд в воздухе, находится искомое значение напряжения:

$$U = E \cdot d.$$

Поскольку речь идет лишь о приблизительной оценке напряжения, не обязательно использовать в опыте шаровой разрядник. Вполне удовлетворительный результат можно получить, наблюдая разряд между закругленным концом соединительного проводника и выводом зажигалки, как это показано на рис. 42. Например, при максимальном расстоянии пробойного промежутка 3 мм напряжение на выходе зажигалки приблизительно равно

$$U = 3 \cdot 10^6 \text{ В/м} \cdot 3 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 9 \cdot 10^3 \text{ В}.$$

Какие еще методы могут предложить учащиеся? Они могут предложить использование дополнительного сопротивления к вольтметру или делителя напряжения из двух резисторов или двух конденсаторов. Попытки реализации этих методов на практике в данном случае окончатся неудачей. Для понимания причины этих неудач можно предложить ученикам следующую задачу.

**Задача.** Вычислите электрическую емкость пьезоэлемента от зажигалки газовой плиты. Длина пьезоэлемента 15 мм, диаметр 6 мм. Диэлектрическая проницаемость диэлектрика

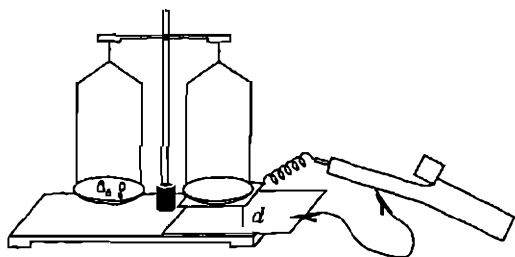


Рис. 45

$\varepsilon \approx 1000$ . Так как два пьезоэлемента соединены параллельно, площадь электродов нужно удвоить.

Вычисления дают следующий результат:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \cdot 2 \frac{\pi D^2}{4}}{d} = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1000 \cdot 3,14 \cdot (6 \cdot 10^{-3})^2}{2 \cdot 15 \cdot 10^{-3}} \text{ Ф} \approx$$

$$\approx 33 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} = 33 \text{ пФ}$$

Таким образом, пьезоэлемент зажигалки представляет собой конденсатор электроемкостью менее 100 пФ. Если в физическом кабинете имеется прибор для измерения электрической емкости, можно измерить емкость пьезоэлемента. Конденсатор такой малой емкости даже через резистор с очень большим электрическим сопротивлением разряжается за очень короткое время. Если учащиеся знают, что время разрядки конденсатора по порядку величины равно произведению его электроемкости  $C$  на электрическое сопротивление  $R$ , то они смогут оценить время разрядки  $\tau$ . Для случая  $R = 10^7$  Ом получаем:

$$\tau \approx RC = 10^7 \cdot 33 \cdot 10^{-12} \text{ с} \approx 3 \cdot 10^{-4} \text{ с}.$$

Время разрядки пьезоэлемента даже при очень большом сопротивлении цепи измеряется десятитысячными долями секунды. Электрические токи, протекающие столь кратковременно, не может зарегистрировать не только стрелочный вольтметр, но и электронный мультиметр.

Еще один метод измерения высокого напряжения на выходе зажигалки может быть основан на использовании обычных весов. Для этого к дну одной из чашек весов нужно приклеить квадрат из металлической фольги и через спираль из очень тонкой проволоки (для изготовления спирали можно использовать одну проволоку из многожильного провода) соединить его с одним контактом зажигалки (рис. 45). Под чашку весов

с приклеенным квадратом из фольги нужно положить металлическую пластину и соединить ее со вторым контактом зажигалки. Пластина и квадрат из фольги образуют плоский воздушный конденсатор. Чашки весов уравниваются с помощью грузов, расстояние  $d$  между обкладками конденсатора устанавливается равным  $\approx 1$  см.

При нажатии на клавишу зажигалки возникает сила  $F$  электростатического притяжения между пластинами и весы выходят из равновесия. Добавляя гири на другую чашку весов, можно измерить максимальное значение силы  $F = mg$  притяжения между пластинами и вычислить напряжение. В одном из опытов были получены такие результаты:  $S = 10^{-2}$  м<sup>2</sup>,  $d = 10^{-2}$  м,  $m = 3 \cdot 10^{-3}$  кг:

$$F = qE = \frac{qU}{d} = \frac{CU^2}{d} = \frac{\epsilon_0 S U^2}{d^2}, \quad U = d \sqrt{\frac{F}{\epsilon_0 S}} = d \sqrt{\frac{mg}{\epsilon_0 S}},$$

$$U \approx 10^{-2} \sqrt{\frac{3 \cdot 10^{-3} \cdot 9,8}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{-2}}} \text{ В} \approx 6 \cdot 10^3 \text{ В.}$$

## § 20. Бытовые источники света

**Изучение принципа работы люминесцентной лампы.** Изучение принципа работы люминесцентной лампы должно идти по двум направлениям — практическому и теоретическому. Первое связано с выяснением способа включения лампы и важных для практики особенностей ее светового излучения. Второе — с выяснением физических процессов в лампе и особенностей спектра ее излучения.

При наблюдении спектров лампы накаливания и люминесцентной лампы нужно обратить внимание учащихся на главное их отличие: спектр лампы накаливания сплошной, а спектр люминесцентной лампы имеет яркие линии излучения на фоне слабого сплошного спектра излучения. При этом линии излучения довольно широкие и размытые.

Если в группе обнаружатся учащиеся, склонные к углубленному изучению физических явлений в люминесцентной лампе, им можно предложить следующую задачу: определите, атомы какого химического элемента являются источниками наблюдаемого линейчатого спектра.

Для решения этой задачи необходимо достаточно точно измерить длины волн спектральных линий с помощью дифрак-



ционной решетки или лазерного диска, затем воспользоваться таблицей наиболее ярких спектральных линий химических элементов (приложение Д учебного пособия) и определить химический элемент, которому принадлежат наблюдаемые спектральные линии. Эта работа подробно описана в главе 3 учебного пособия.

При изучении этой темы можно использовать статью одного из создателей люминесцентных ламп Валентина Александровича Фабриканта «Физика люминесцентных ламп». Эта статья была опубликована в 1980 г., и сейчас ее довольно трудно отыскать, поэтому ниже приводятся выдержки из нее. В статье сочетаются глубина научного рассмотрения физических проблем и мастерство популяризации научных достижений.

В.А.Фабрикант  
**ФИЗИКА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП**

... И свет, и жар...

*В. В. Маяковский*

Мы так привыкли к электрическому освещению, что порой не ценим его должным образом и забываем его историю. Первой появилась электрическая лампа накаливания.

«Вынимает

паршивую

запаянную склянь.

«Это, — говорит, —

электрическая лампа»...

Вижу —

склянка.

В склянке —

волос.

Но, между прочим,

не из бороды и не из усов...

Сверху

из склянки

и свет,

и жар —

солнце,

ей-богу, солнце!»

— так писал Маяковский в стихотворении «Горящий волос». Поэт прав, указывая, что «из склянки и свет, и жар», но,

как и положено поэтам, он преувеличивает, сравнивая лампу накаливания с Солнцем. Между светом лампы накаливания и солнечным светом имеются очень важные различия. Прежде всего, свет лампы накаливания гораздо желтее солнечного света. Кроме того, в излучении лампы накаливания «жар» гораздо сильнее по отношению к «свету», чем в излучении Солнца. Оба отличия вызваны одной и той же причиной: температура нити («волоса») лампы накаливания ( $3000^{\circ}\text{C}$ ) примерно в 2 раза ниже температуры поверхности Солнца ( $6000^{\circ}\text{C}$ ).

Перейдя от поэзии к цифрам, мы натолкнемся на интересный парадокс. Лампа накаливания представляет собой почти идеальный преобразователь электрической энергии в энергию излучения (с коэффициентом полезного действия близким к единице) и вместе с тем лампа накаливания — очень неэкономичный источник света. Как же такое возможно?

Оказывается, все дело в том, что человеческий глаз реагирует не на любое излучение, а только на узкий участок спектра электромагнитных волн с длинами волн от 0,4 до 0,8 мкм (от фиолетовых до красных лучей) (рис. 46). Только такое излучение является светом в точном смысле этого слова.

На рис. 47 показан баланс энергии современной лампы накаливания. Мы видим, что, хотя лампа накаливания превращает в излучение 86% подводимой к ней электроэнергии, только

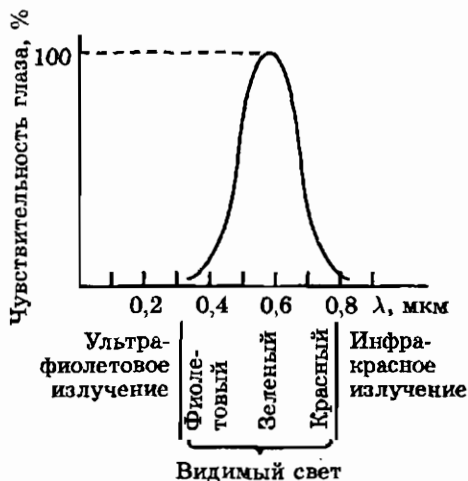


Рис. 47. Баланс энергии в лампе накаливания

12% — излучение света; 74% — инфракрасное излучение; 14% — тепловые потери через вводы и держатели и через газ

Рис. 46. Кривая чувствительности глаза человека

12% превращается в видимый свет. В невидимое тепловое излучение (инфракрасные лучи), т. е. в «жар» по Маяковскому, превращается 74%! Как источник лучистого «жара» лампа накаливания близка к идеалу. Это было учтено, и сейчас на производстве широко применяют быструю сушку окрашенных изделий (например, корпусов автомобилей) с помощью инфракрасных лучей, испускаемых лампами накаливания.

**Холодный свет.** Недостатки лампы накаливания как источника видимого света заставили ученых искать новые источники света, более экономичные в смысле преобразования электрической энергии в световую и дающие свет, более близкий к солнечному по цветовым свойствам. Таким образом, задача состояла как в увеличении световой отдачи, так и в улучшении качества света.

У С. И. Вавилова возникла идея использовать в этих целях явление холодного свечения, называемое люминесценцией. Если Солнце или лампа накаливания представляют тепловые источники, в которых излучение возникает за счет нагрева до высокой температуры, то свечение люминофора (люминесцирующего тела) не связано, как правило, с его нагревом.

Нас будут интересовать так называемые фотолюминофоры, свечение которых вызывается облучением их светом от внешнего источника. Фотолюминофоры преобразуют излучение с одними длинами волн в излучения с другими длинами волн. Многие органические красители (например, оранжевая краска родамин) обладают яркой люминесценцией под действием дневного света.

Современное учение о фотолюминесценции многим обязано С. И. Вавилову. В частности, С. И. Вавилов показал, что люминофоры — как преобразователи энергии излучения — могут обладать очень высоким коэффициентом полезного действия. Это свойство, очевидно, очень важно для практического применения люминофоров.

**Принцип действия люминесцентной лампы.** Казалось бы, можно улучшить характеристики лампы накаливания, нанеся на стенки ее колбы слой люминофора и превратив с помощью фотолюминесценции инфракрасное излучение раскаленной нити в видимый свет. К сожалению, такой путь нереален. Существует закон (так называемое правило Стокса), согласно которому люминофоры, как правило, преобразуют более короткие

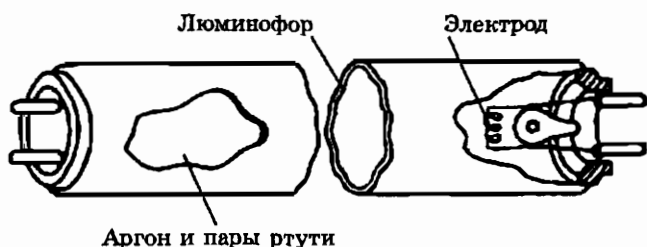


Рис. 48. Разрез люминесцентной лампы

волны в более длинные, а длины волн инфракрасных лучей всегда больше, чем длины волн видимого света (более 0,8 мкм).

Следовательно, для возбуждения свечения во всем диапазоне видимой части спектра необходимо использовать ультрафиолетовое излучение, обладающее меньшими длинами волн (менее 0,4 мкм). Тогда задача распадается на две: 1) отыскание экономичного источника ультрафиолетового излучения; 2) создание люминофора, эффективно преобразующего ультрафиолетовое излучение в видимый свет (при этом нельзя забывать о цветовых свойствах видимого света). Исследования показали, что подходящим источником ультрафиолетового излучения является электрический разряд в парах ртути.

Правда, состав излучения ртутного разряда очень сильно зависит от давления паров.

При высоком давлении (равном или превышающем атмосферное давление  $10^5$  Па) преобладает длинноволновое ультрафиолетовое излучение ( $\lambda \geq 0,3$  мкм). Кроме него возникает также видимое излучение, состоящее из желтых, зеленых и синих лучей. Так происходит, в частности, в ртутных кварцевых лампах, применяемых для медицинских целей. Свет этих ламп имеет мертвящий сине-зеленый оттенок, объясняемый составом видимого излучения ртутного разряда. Превратив с помощью люминофора ультрафиолетовое излучение в красное, можно частично смягчить недостатки цветовых свойств света ртутных ламп высокого давления и использовать эти лампы для уличного и частично для промышленного освещения.

При низком давлении ртутных паров основную роль играет коротковолновое ультрафиолетовое излучение ( $\lambda \approx 0,25$  мкм), а видимое излучение очень слабое. Такой разряд в сочетании с люминофорами может обеспечить высокие цветовые свойства видимого света. Именно так и устроены так называемые

люминесцентные лампы (рис. 48). Основным источником видимого света в люминесцентной лампе служит люминофор, который наносится на внутреннюю поверхность стеклянной колбы лампы. Оптимальное давление паров ртути равно примерно 1,33 Па. По причинам, которые станут ясны позднее, в колбе кроме паров ртути содержится также инертный газ аргон при давлении 5,32 Па.

В люминесцентной лампе происходят два последовательных преобразования энергии. Сначала подводимая электроэнергия в парах ртути превращается в энергию коротковолнового ультрафиолетового излучения (около 60%), затем энергия этого излучения в люминофоре превращается в энергию видимого излучения (свет).

Рассмотрим по отдельности, как возникает ультрафиолетовое излучение и как оно преобразуется в видимый свет.

**Механизм генерации излучения в газовом разряде.** Как уже говорилось, источником ультрафиолетового излучения в люминесцентной лампе является электрический разряд в ртутных парах при низком давлении. Электроны, вырвавшиеся с катода и разогнанные электрическим полем, встретив на своем пути атомы ртути, испытывают с ними соударения.

Характер соударений, оказывается, зависит от энергии электронов. Если энергия электрона меньше 4,9 эВ, соударение его с атомом ртути носит упругий характер — кинетическая энергия электрона практически не изменяется, а изменяется лишь направление его движения. При энергии, равной (или превышающей) 4,9 эВ, соударение электрона с атомом ртути становится неупругим — электрон отдает всю (или почти всю) свою энергию атому ртути. Это одно из проявлений квантовых свойств атомов.

Согласно квантовым представлениям каждый атом может обладать лишь определенными запасами энергии, или, как говорят, он может находиться лишь на вполне определенных энергетических уровнях. Следовательно, и принимать атом может лишь определенные порции энергии. Так, для атома ртути такой минимальной порцией является энергия 4,9 эВ. Меньшую энергию атом ртути не принимает (проявляется его «квантовая гордость»). Что же происходит с атомами дальше?

На рис. 49 изображена очень грубая схема энергетических уровней атома ртути. В результате неупругого столкновения с

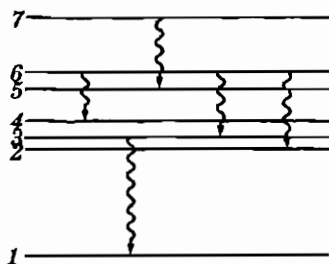


Рис. 49. Схема энергетических уровней атома ртути

Переход  $3 \rightarrow 1$  дает ультрафиолетовую линию с длиной волны  $0,25 \text{ мкм}$ ; переход  $6 \rightarrow 2$  дает фиолетовую линию с длиной волны  $0,40 \text{ мкм}$ ; переход  $6 \rightarrow 3$  дает синюю линию с длиной волны  $0,45 \text{ мкм}$ ; переход  $6 \rightarrow 4$  дает зеленую линию с длиной волны  $0,55 \text{ мкм}$ ; переход  $7 \rightarrow 5$  дает желтую линию с длиной волны  $0,58 \text{ мкм}$

электронем атом переходит в возбужденное состояние, соответствующее энергетическому уровню 3, «живет» на этом уровне примерно  $10^{-7}$  с и возвращается обратно на уровень 1.

Заметим, что атомы аргона, хотя их число превышает число атомов ртути в сотни раз, совершенно не возбуждаются. Связано это с тем, что минимальная энергия возбуждения атомов аргона значительно выше, чем у атомов ртути.

Возникает вопрос: почему для генерации излучения с длиной волны  $0,25 \text{ мкм}$  выгодно использовать низкое давление ртутных паров? Ведь с увеличением давления растет число атомов ртути и как будто должно расти число неупругих столкновений электронов с атомами. Однако это не так. Рассмотрим более подробно судьбу возбужденного атома и испускаемого им фотона.

Жизнь возбужденного атома чревата опасностью. При столкновениях с другими частицами (электронами, атомами) или со стенками колбы атом может перейти в нормальное (невозбужденное) состояние. Такие безызлучательные (тушащие) переходы бесполезны с точки зрения генерации излучения. Очевидно, что с ростом давления число безызлучательных переходов растет. Этому же способствует явление «пленения» излучения, связанное со своеобразной фотонной «эстафетой». Фотон, испущенный возбужденным атомом в объеме газа, как правило, не вылетает сразу наружу. Его перехватывает какой-либо нормальный атом и переходит при этом в возбужденное состояние. Через  $10^{-7}$  с этот атом возвращается в нормаль-

ное состояние, испуская новый фотон, который может быть поглощен другим нормальным атомом, и так далее. В среднем происходит несколько сот актов переизлучения фотонов. При каждом акте меняется направление полета фотонов, что делает их путь в газе зигзагообразным. Это, естественно, увеличивает вероятность безызлучательных переходов, которые могут происходить только во время «остановок» фотонов в атомах. Ясно, что число «остановок» растет с ростом концентрации атомов, т. е. с ростом давления газа.

**Механизм преобразования излучения в люминофоре.** Преобразование невидимого ультрафиолетового излучения в видимый свет происходит в люминофоре. Характер свечения люминофора определяется его составом.

В современных люминесцентных лампах чаще всего применяются галофосфаты кальция. Это сложные соединения, сходные с апатитами [ $3\text{Ca}(\text{PO}_4)_2\text{CaF}_2$ ], в которых часть атомов фтора заменена атомами хлора и, главное, в которые введены активаторы. *Активаторами* называют атомы примесей, вызывающие свечение люминофора. Концентрация атомов активатора очень невелика — порядка процента, иногда даже долей процента, но без активатора люминофор мертв и свечения не дает.

В качестве активаторов в галофосфаты вводятся одновременно атомы сурьмы и марганца. В кристалле галофосфата эти атомы превращаются в ионы. Поглотив ультрафиолетовое излучение, ионы возбуждаются, а возвращаясь в исходное нормальное состояние, высвечивают поглощенную энергию в виде света. При этом в спектре излучения такого люминофора наблюдаются две широкие полосы, соответствующие излучению ионов сурьмы и марганца. Широкие полосы возникают за счет воздействия на ионы активаторов атомов окружающей среды, прежде всего атомов хлора, без этого они испускали бы узкие линии. Часть ионов сурьмы, возбужденных в результате поглощения ультрафиолетового излучения, передают свою энергию ионам марганца, побуждая их к свечению. Варьируя концентрацию активаторов и содержание хлора в люминофоре, можно в широких пределах изменять спектральный состав свечения.

Надо откровенно сказать, что далеко не все детали процесса преобразования излучения в люминофорах типа галофосфатов

уже выяснены. Однако следует помнить замечание известного математика О. Хевисайда: «Стану ли я отказываться от своего обеда только потому, что я не полностью понимаю процесс пищеварения?».

В последнее время для повышения световой отдачи люминесцентных ламп все шире стали применять люминофоры, активированные редкоземельными элементами (такими как европий, тербий, церий). Спектральные полосы излучения ионов редкоземельных элементов довольно узки, поэтому для заполнения видимого спектра приходится применять смесь из двух или даже трех люминофоров. Высокая цена редкоземельных элементов и усложненная технология нанесения смеси люминофоров приводят к повышению стоимости ламп, но считается, что повышение световой отдачи ламп с лихвой компенсирует эти недостатки.

Журнал «Квант», № 3, 1980 г.



# Физический практикум

Основной целью физического практикума на элективных занятиях должно быть удовлетворение индивидуальных интересов учащихся. Школьники выбирают один и тот же элективный курс, руководствуясь нередко совершенно различными мотивами. Из тех, кто выбирает какой-то элективный курс по физике, одни интересуются техническими приложениями физики, другие склонны к проведению самостоятельных исследований, третьи просто хотят более основательно подготовиться в выпускному экзамену, четвертые ищут возможности проявить свои способности, самоутвердиться. При выполнении всеми учениками одинаковых экспериментальных работ трудно удовлетворить их индивидуальные интересы.

Физический практикум содержит разнообразные экспериментальные задания. Рекомендуется предоставлять ученикам свободу выбора заданий и не ограничивать время на их выполнение. Тем школьникам, которые не стремятся глубоко изучать какую-то избранную проблему физики, но хотят познакомиться со всеми работами практикума, следует предоставить эту возможность, не требуя полных письменных отчетов по каждой работе, а ограничиться лишь обсуждением полученных результатов. Учащимся, которые хотят испытать свои силы на физических олимпиадах, полезно предложить экспериментальные задачи прошлых российских и международных олимпиад.

Ученикам, имеющим склонность к углубленным самостоятельным занятиям, можно предложить тему самостоятельного экспериментального исследования, требующую систематической работы на протяжении многих недель или месяцев. При успешном завершении такая работа может быть представлена на конкурс или доложена на конференции школьников.

Предлагаемые в настоящем практикуме лабораторные работы и экспериментальные задания ни в коем случае не исчерпывают всего разнообразия заданий по их типам и конкретному

содержанию, это лишь примеры возможного содержания физического практикума. Описания других лабораторных работ и экспериментальных заданий можно найти в книгах из приведенного списка литературы.

Ниже даны рекомендации и указания учителю по некоторым работам практикума.

### Лабораторная работа 23

#### Исследование явления термоэлектронной эмиссии

Казалось бы, для постановки этой работы рационально использовать вакуумный диод, как это делалось в сравнительно недалеком прошлом. Но согласно требованиям техники безопасности на открытых контактах школьного лабораторного оборудования не разрешается применение напряжений более 12 В. Это создает определенные трудности при постановке указанной лабораторной работы. Высокая эмиссионная способность оксидных катодов вакуумных диодов, которые можно было бы использовать для исследования термоэлектронной эмиссии, не дает возможности получать участки насыщения на их вольтамперных характеристиках при низких анодных напряжениях. Нужны анодные напряжения более 100 В.

Это затруднение можно преодолеть, если вместо вакуумного диода использовать автомобильную лампочку, одна из двух нитей которой перегорела. В крайнем случае одну из двух нитей (лучше более тонкую) можно пережечь подачей повышенного напряжения 25–30 В от источника тока ВС-24. Держатель перегоревшей нити будет служить анодом, а оставшаяся вольфрамовая нить — катодом. Катоды из чистых металлов позволяют получать участки насыщения анодного тока при низких анодных напряжениях.

Следует иметь в виду, что сила анодного тока таких самодельных диодов зависит от того, в каком месте перегорела нить, и от расстояния от остатков перегоревшей нити до катода. Два из четырех держателей нитей в лампе 21/6 Вт имеют общий контакт и соединены с поверхностью цоколя. Встречаются лампы с двумя нитями на трех держателях. У таких ламп на цоколь замкнут общий держатель.

Лампу желательно расположить на панельке с тремя клеммами с обозначениями «А», «К», но можно обойтись и без этого: припаять к контактам лампы три провода, а саму лампу закрепить в лапке штатива. При пайке контактов можно применять

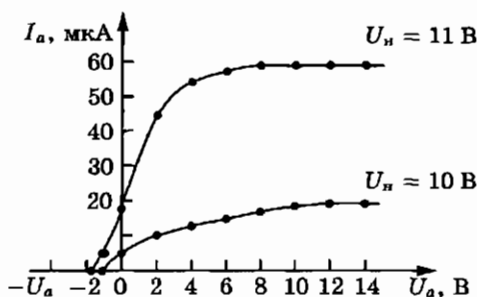


Рис. 50

в качестве флюса только канифоль. Применение травленной соляной кислоты может уменьшить сопротивление изоляции между выводами лампы и микроамперметр будет показывать «анодный ток» даже при отсутствии накала катода.

В качестве источника тока накала удобен выпрямитель ВС-4-12. В цепь накала нужно включить реостат лабораторный 10 Ом для плавной регулировки тока накала. В качестве источника анодного напряжения удобно воспользоваться источником питания ИЭПП, имеющим на панели вольтметр на 15 В и плавную регулировку выходного напряжения.

Необходимо учесть, что стабильное значение анодного тока в лампах устанавливается более чем через 3–5 мин после включения накала. Это вызвано очень резкой, экспоненциальной зависимостью термоэмиссионного тока от температуры.

Основная часть задания — снятие вольтамперных анодных характеристик. На рисунке 50 показаны анодные характеристики, полученные при двух различных напряжениях накала.

При определении скорости самых быстрых термоэлектронов в одном из опытов учащимися были получены следующие результаты: при  $U_n = 12$  В найдено, что  $U_3 = 1$  В и

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1 \text{ В}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}}} = 5,9 \cdot 10^5 \text{ м/с}$$

### Лабораторная работа 24

#### Измерение работы выхода электрона

В практикумах по физике для выполнения этой лабораторной работы обычно предлагается измерить задерживающий потенциал  $U_3$  методом компенсации. В таком варианте работа

имеет два недостатка: во-первых, наличие в цепи источника тока и чувствительного гальванометра при неправильно собранной цепи, небрежности или случайном соприкосновении проводников может привести к выходу из строя гальванометра. Во-вторых, у некоторых учащихся складывается мнение, что фотоэффект наблюдается «не сам по себе», не самостоятельно, а только при наличии напряжения.

Этих недостатков лишен вариант определения работы выхода электрона методом зарядки конденсатора. Здесь не нужен источник тока. Конденсатор, соединенный параллельно с освещаемым фотоэлементом, заряжается до задерживающего напряжения. Зная емкость конденсатора  $C$  и измерив заряд  $q$  конденсатора, можно вычислить значение задерживающего напряжения

$$U_3 = \frac{q}{C}$$

и найти затем работу выхода электрона:

$$A = h\nu - eU_3.$$

Измерения заряда  $q$  конденсатора можно выполнить баллистическим методом с использованием гальванометра (см. с. 62). Для этой цели можно использовать гальванометры М273/9, М1032-М1. Для удобства отсчета полезно либо зашунтировать гальванометр М1032-М1 критическим сопротивлением  $\approx 100$  Ом, либо закорачивать его выводы ключом для установки долго колеблющегося «зайчика» в нулевом положении.

Из-за малых значений фототока необходимо использовать конденсаторы с большим сопротивлением, например типа К-73-11, ФТ-1 или МГБП-1.

Время зарядки конденсатора фототоком зависит от освещенности катода и емкости конденсатора. Оптимальное время зарядки можно определить путем последовательного увеличения времени освещения 1, 3, 5 и т. д. минут до тех пор, пока отбросы стрелки гальванометра перестанут увеличиваться. В наших опытах при использовании конденсатора емкости 3,3 мкФ оптимальное время было  $\approx 3$  мин.

Следует учесть, что анод фотоэлемента тоже освещается и из него могут выбиваться электроны, особенно при использовании синего или фиолетового светофильтров. Эти электроны создают ток, направление которого противоположно направлению тока электронов с катода, что влияет на результаты измерений. Чтобы предотвратить попадание света на анод,

нужно прозрачную часть баллона фотоэлемента напротив анода заклеить небольшим кружочком из черной бумаги или изолен-ты, создающим тень на аноде.

В одном из опытов были получены следующие результаты: с фотоэлементом СЦВ-4, конденсатором К-73-11 (60 В; 3,3 мкФ), светофильтром СС-2 ( $\lambda = 420$  нм,  $\nu = 7,15 \cdot 10^{14}$  Гц), гальванометром М273/9 с ценой деления  $1,4 \cdot 10^{-7}$  Кл при освещении в течение 3 мин получен отброс  $N = 15$  дел.

Тогда:

$$q = KN = 1,4 \cdot 10^{-7} \cdot 15 = 2,1 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$$

$$U_a = \frac{q}{C} = \frac{2,1 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}}{3,3 \cdot 10^{-6} \text{ мкФ}} = 0,64 \text{ В}$$

$$A = h\nu - eU_a =$$

$$= 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ (Дж} \cdot \text{с)} \cdot 7,15 \cdot 10^{14} \text{ (с}^{-1}\text{)} - 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ (Кл)} \cdot 0,64 \text{ (В)} =$$

$$= 3,7 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 2,3 \text{ эВ}$$

### Лабораторная работа 25

#### Исследование свойств лазерного излучения

В школьных учебниках обычно описывается принцип действия и устройство рубинового или гелий—неонового лазера. Этого на наш взгляд вполне достаточно, тем более что временные рамки школьной программы не позволяют расширить круг вопросов, связанных с устройством и применением лазеров других типов.

Но при изучении «лазерной» темы следует обязательно подчеркнуть, что принцип действия всех лазеров одинаков: накачкой создается инверсная населенность в активной среде, усиление и генерация света происходят вследствие индуцированного излучения перпендикулярно двум параллельным зеркалам. Отсюда одинаковы и основные свойства лазерного излучения: монохроматичность и поляризованность, поскольку излучение индуцированное, узкая направленность, так как многократно пройти активную среду и усилиться может только свет, идущий перпендикулярно зеркалам. Эти свойства предлагается исследовать в лабораторной работе 25. Ее можно выполнить с любым лазером. Но наиболее доступны каждой школе лазерная указка или лазерный брелок.

Учащимся нужно объяснить устройство лазерного светодиода, т. е. инжекционного полупроводникового лазера. Све-

одиод — это полупроводниковый диод, включенный в пропускном направлении. Электроны и дырки движутся через  $p$ — $n$ -переход навстречу друг другу, в результате их рекомбинации выделяется энергия, затраченная ранее на создание свободных электронов и дырок. Обычно энергия выделяется в виде тепла, а в ряде случаев в виде света. Так работает светодиод.

При работе светодиода происходит инжекция (впрыскивание) электронов в  $p$ -область и дырок в  $n$ -область. Полупроводниковый лазер — это светодиод с очень высоким уровнем инжекции, приводящей к созданию вблизи  $p$ — $n$ -перехода инверсной населенности — необходимого условия для работы лазера.

В первых полупроводниковых лазерах, созданных в 1963 г. академиком Б. М. Вулом, плотность инжекционного тока составляла  $\approx 10^5$  А/см<sup>2</sup>. Если бы такой лазерный светодиод не был расположен в жидком азоте, он бы просто испарился. Необходимость применять азотное охлаждение снимала главное преимущество полупроводниковых лазеров — их миниатюрность.

Благодаря работам лауреата Нобелевской премии Ж. И. Алферава, использовавшего не обычный  $p$ — $n$ -переход, а структуру из трех и более слоев различных полупроводников, удалось создать миниатюрные гетеропереходные инжекционные лазеры, не нуждающиеся в специальном охлаждении. Одним из таких лазеров является лазерная указка, устройство которой показано в книге для учащихся.

При использовании лазерной указки как источника света для лабораторных работ нужно зафиксировать кнопку выключателя пластмассовым кольцом. Это освободит руку от необходимости постоянно держать кнопку нажатой. Лазерная указка может быть закреплена в лапке штатива так, чтобы лапка нажимала на кнопку. Тогда надобность в пластмассовом кольце отпадает.

При измерении длины волны лазерного света ни в коем случае нельзя использовать школьный прибор для измерения световой волны, так как при выполнении измерений свет лазера будет направлен в глаз экспериментатора, что запрещено инструкцией по пользованию. Луч лазера нужно направить через дифракционную решетку на экран, расположенный от решетки на расстоянии 0,5–2 м.

## Лабораторная работа 26

## Исследование линейчатого спектра излучения

При постановке этой работы физического практикума нужно обратить внимание на тот факт, что при кажущейся простоте она в действительности требует высокого уровня экспериментальных навыков и использования высококачественной дифракционной решетки. Оценим, например, какая точность измерений требуется для того, чтобы по спектру излучения достоверно узнать гелий. Обратимся для этого к таблице наиболее интенсивных спектральных линий химических элементов в приложении Д учебного пособия.

Таблица показывает, что рядом с линией гелия 728 нм находится линия неона 725 нм, линии гелия и неона 668 нм практически совпадают, рядом с линией гелия 660 нм находится линия неона 656 нм, рядом с линией гелия 492 нм находится линия ртути с почти такой же длиной волны и линия неона 485 нм и так далее. Мы видим, что для уверенного различения линий разных химических элементов необходимо измерять длины световых волн с абсолютной погрешностью менее 1 нм, то есть с относительной погрешностью около 0,1%. Со школьными приборами такая точность измерений недостижима, но измерить длины волн спектральных линий с погрешностью не более 1% можно.

Возможные способы повышения точности измерения световой волны в эксперименте с дифракционной решеткой полезно обсудить с учащимися. Для этого нужно посмотреть, от чего зависит граница относительной погрешности измерения световой волны. Из формулы (20) в учебном пособии следует, что граница относительной погрешности измерения световой волны равна:

$$\varepsilon_{\lambda} = \varepsilon_d + \varepsilon_{\sin \varphi}.$$

Если период решетки известен достаточно точно, граница относительной погрешности измерения световой волны примерно равна границе погрешности измерения синуса угла  $\varphi$ . Так как удобнее измерять катеты  $a$  и  $L$ , то можно сначала определить тангенс угла  $\varphi$ , а затем по нему вычислить синус угла. При вычислении тангенса угла  $\varphi$  граница относительной погрешности измерения световой волны примерно равна сумме границ относительных погрешностей измерений расстояния  $L$  от решетки до экрана и расстояния  $a$  от нулевого максимума до спектральной линии:

$$\varepsilon_{\lambda} = \varepsilon_L + \varepsilon_a.$$

Если мы хотим измерить каждое расстояние  $L$  и  $a$  с погрешностью не более 0,5%, то при абсолютной погрешности измерения расстояния  $a$ , равной  $\pm 2$  мм (более точные измерения в данном эксперименте едва ли возможны), требуются значения расстояния  $a$  не менее 40 см, а при абсолютной погрешности измерения расстояния  $L$ , равной 0,5 см, требуется расстояние  $L$  не менее 1 м. При этом нужно использовать решетку, имеющую 500–600 штрихов на миллиметр и дающую достаточно большие значения угла  $\varphi$ .

### Лабораторная работа 27

#### Определение периода полураспада естественного радиоактивного изотопа

Эксперимент по определению периода полураспада долгоживущего естественного радиоактивного изотопа может быть поставлен в том случае, если школьная лаборатория располагает радиометром с торцовым счетчиком Гейгера—Мюллера. С таким счетчиком возможны достаточно точные измерения активности  $\beta$ -излучающих образцов.

Учителю, прежде всего, нужно самому осознать, что радиоактивность — это естественный природный процесс, который не может быть отменен или запрещен кем-либо, несмотря на то, что радиоактивные излучения могут наносить вред человеку. А для того чтобы, по возможности, избегать вредных воздействий ионизирующей радиации, нужно знать свойства радиоактивных излучений и уметь их регистрировать.

Радиоактивный изотоп калия  $^{40}\text{K}$  для эксперимента выбран не случайно: это фактически единственный радиоактивный изотоп, с которым можно работать в школе. Изотоп калия  $^{40}\text{K}$  — естественный радиоактивный изотоп. В 1 г природного калия за одну минуту происходит около 2000 распадов ядер изотопа  $^{40}\text{K}$ . Калий содержится в земной коре, в почве, в любых растениях и тканях животных, в продуктах питания. В 1 кг пшеничного хлеба содержится 1–1,5 г калия, в теле человека массой 70 кг содержится примерно 140 г калия.

Для проведения предлагаемого исследования требуется всего несколько граммов соли калия. Радиоактивность исследуемых образцов не будет превышать радиоактивности 1 кг хлеба, что составляет менее 0,5% естественной радиоактивности тела человека. Препараты калия такой активности не представляют никакой дополнительной опасности для здоровья человека, выполняющего эксперимент.



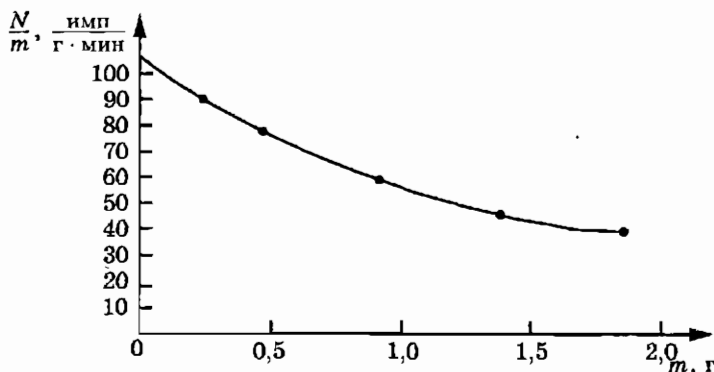


Рис. 51

В описании эксперимента в пособии для учащихся сказано о необходимости учета поглощения части  $\beta$ -частиц в самом образце, если образец имеет значительную толщину. Эффект самопоглощения излучения в образце можно учесть, выполнив серию измерений с постепенным уменьшением толщины образца. Вычисляя удельную активность вещества для последовательных значений толщины слоя исследуемого материала, можно экстраполировать полученные результаты к значению толщины, стремящемуся к нулю.

Приведем пример результатов, полученных в эксперименте:

1. Измерение фона установки

$$t = 15 \text{ мин}, \quad N_{\Phi} = \frac{280}{15} \frac{\text{имп}}{\text{мин}} \approx 18,7 \frac{\text{имп}}{\text{мин}}$$

2. Измерения скорости счета при различных значениях массы образца соли KCl (время каждого измерения 15 мин)

$m$ , г	0,23	0,46	0,92	1,39	1,85
$N_1$ , имп/мин	39,3	54,4	72,4	80,6	89,7
$N = N_1 - N_0$ , имп/мин	20,6	35,7	53,7	61,9	71,0
$\frac{N}{m}$ , имп/(мин·г)	89,6	77,6	58,4	44,5	38,4

График на рис. 51, построенный по результатам измерений, показывает, что при уменьшении толщины образца до нуля, т. е. при отсутствии поглощения  $\beta$ -излучения в самом образце, скорость счета импульсов  $N$  от 1 г соли составляла бы примерно 105 имп/мин.

3. Определение  $\beta$ -активности ( $A_{\beta}$ ) образца массой 1 г

Расстояние  $h$  от препарата до окошка счетчика в эксперименте равно 1,4 см, радиус  $r$  окошка счетчика 1,25 см.

Отсюда поправка  $\omega$  на телесный угол равна:

$$\omega = 0,5 \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1,25}{1,4}\right)^2}} \right) \approx 0,127.$$

Следовательно,  $\beta$ -активность образца равна

$$A_{\beta} = \frac{N}{\omega t},$$

$$A_{\beta} = \frac{105}{0,127 \cdot 60} \text{ Бк} \approx 13,8 \text{ Бк}.$$

#### 4. Определение полной активности образца

По схеме распада калия (рис. 68 в учебном пособии) на долю  $\beta$ -распада приходится 89% от общего числа распадов. Случаи электронного захвата счетчиком Гейгера—Мюллера практически не регистрируются, так как его эффективность при регистрации  $\gamma$ -излучения на порядок ниже, чем при регистрации  $\beta$ -излучения.

Поэтому полная активность препарата соли KCl массой 1 г равна:

$$A = \frac{A_{\beta}}{0,89},$$

$$A = \frac{13,8}{0,89} \text{ Бк} \approx 15,5 \text{ Бк}.$$

#### 5. Определение количества атомов изотопа $^{40}\text{K}$ в препарате

Найдем массу  $x$  калия в 1 г соли KCl.

$$1 \text{ г} - 39 + 35,5,$$

$$x \text{ г} - 39, \quad x = \frac{1 \cdot 39}{74,5} \text{ г} \approx 0,5235 \text{ г}.$$

Найдем массу  $m$  изотопа калия  $^{40}\text{K}$  в 1 г соли KCl:

$$m = x \cdot 1,19 \cdot 10^{-4} \text{ г} = 0,5235 \cdot 1,19 \cdot 10^{-4} \text{ г} = 6,23 \cdot 10^{-8} \text{ кг}.$$

Найдем число  $n$  ядер изотопа калия  $^{40}\text{K}$  в препарате:

$$n = \nu N_A = \frac{m}{M} N_A,$$

где  $\nu$  — количество вещества,  $M$  — молярная масса,

$$n = \frac{6,23 \cdot 10^{-8}}{40 \cdot 10^{-3}} \cdot 6 \cdot 10^{23} \approx 9,34 \cdot 10^{17}.$$

6. Определение периода полураспада  $T$  изотопа калия  $^{40}\text{K}$ .

$$T = \frac{n \ln 2}{A}.$$

$$T = \frac{9,34 \cdot 10^{17} \cdot 0,693}{15,5} \text{ с} \approx 4,18 \cdot 10^{16} \text{ с} \approx 1,3 \cdot 10^9 \text{ лет}.$$

Экспериментальное задание 1

### Изготовление модели газового термометра

Для изготовления и испытания модели газового термометра с воздухом в качестве рабочего тела потребуется следующее оборудование: полиэтиленовая трубка длиной 2–3 м, стеклянная колба объемом 100–250 см<sup>3</sup>, стеклянный стакан таких размеров, чтобы колба могла быть полностью погружена в него, резиновая пробка с отверстием, стеклянная трубка, штатив с двумя держателями, барометр, термометр, измерительная лента.

Необходимые для эксперимента трубка и измерительная лента имеются в наборе «Изотерма». Для исследования зависимости давления воздуха от температуры при постоянном объеме можно использовать установку (рис. 52), состоящую из стеклянной колбы 1 с резиновой пробкой 2 и водяного манометра 3. Водяной манометр изготовлен из полиэтиленовой трубки,

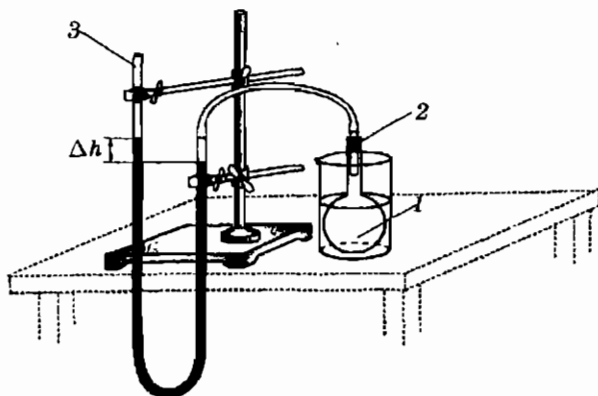


Рис. 52

один конец которой открыт, другой соединен с колбой. Трубка заполнена водой. Если уровни воды в двух вертикальных коленах манометра одинаковы, то давление воздуха в колбе равно атмосферному давлению. При повышении давления в колбе на  $\Delta p$  уровень воды в левом колене повышется на  $\Delta h$  относительно уровня воды в правом колене. Величины  $\Delta p$  и  $\Delta h$  связаны уравнением

$$\Delta p = \rho g \Delta h,$$

где  $\rho$  — плотность воды,  $g$  — ускорение свободного падения,  $\Delta h$  — разность уровней воды в коленах манометра. Полное давление  $p$  воздуха в колбе при этом равно

$$p = p_0 + \Delta p = p_0 + \rho g \Delta h,$$

где  $p_0$  — атмосферное давление.

Для того чтобы объем воздуха при изменениях температуры оставался постоянным, нужно поднимать или опускать левое колено манометра до тех пор, пока уровень воды в правом колене не возвратится в исходное положение.

#### *Порядок выполнения работы*

1. Определите атмосферное давление воздуха  $p_1$  по показаниям барометра. Определите температуру воздуха  $t_1$ .
2. Соедините водяной манометр с колбой и отметьте начальное положение воды в правом колене манометра при одинаковом уровне воды в левом и правом коленах манометра.
3. Поместите колбу в стакан со льдом. По мере охлаждения воздуха в колбе опускайте левое колено манометра, поддерживая уровень воды в правом колене неизменным. Когда изменение давления в сосуде прекратится, измерьте разность уровней воды  $\Delta h_0$  в правом и левом коленах манометра и температуру  $t_0$  в стакане. Вычислите давление воздуха  $p_0$  при температуре  $t_0$

$$p_0 = p_1 - \rho g \Delta h_0.$$

4. Освободите стакан от льда и налейте в него горячую воду при температуре  $t_2$  около  $60^\circ\text{C}$ . Поддерживая объем воздуха в колбе постоянным, определите давление  $p_2$  при температуре  $t_2$

$$p_2 = p_1 + \rho g \Delta h_2.$$

5. Замените воду в стакане на более горячую с температурой  $t_3 \approx 90^\circ\text{C}$  и измерьте давление воздуха  $p_3$  при этой температуре.

Результаты изменений и вычислений запишите в отчетную таблицу.

*Отчетная таблица*

$t, ^\circ\text{C}$	$t_0$	$t_1$	$t_2$	$t_3$
$p, \text{кПа}$				

- Постройте график зависимости давления  $p$  воздуха при постоянном объеме от температуры  $t$  по шкале Цельсия.
- Объясните, как можно пользоваться этим прибором для измерения температуры.

### Экспериментальное задание 2 Опыт с радиометром Крукса

Цель работы — развитие способностей учащихся к самостоятельному анализу результатов эксперимента, применению теоретических знаний для объяснения новых опытных фактов.

Первая естественная гипотеза для объяснения результатов опыта — предположение о том, что вращение «мельнички» вызывается давлением света, неодинаково действующим на более светлые и более темные стороны пластин. Нужно отметить, что эта гипотеза заслуживает обсуждения. Но наблюдаемые силы действия на крылышки оказываются примерно в 100 000 раз больше силы светового давления. Кроме того, нужно обсудить вопрос об ожидаемом направлении вращения. Так как при отражении света от светлой стороны крылышку передается в два раза больший импульс, чем при поглощении света его черной стороной, в случае действия светового давления вращение «мельнички» должно происходить в направлении, противоположном наблюдаемому.

Что же еще есть внутри стеклянной колбы и может действовать по-разному на темную и светлую стороны крылышек? Внутри стеклянной колбы есть разреженный воздух. Темная сторона крылышка нагревается светом сильнее, от более горячей стороны молекулы газа отражаются с большими скоростями и передают им больший импульс.

### Экспериментальное задание 3 Исследование параметров «черного ящика» на постоянном токе

Исследование «черного ящика» — это экспериментальная задача, при выполнении которой учащиеся должны уметь са-

мостоятельно планировать исследование, принимать необходимые меры предосторожности, чтобы не повредить исследуемый объект, делать обоснованные выводы по результатам эксперимента. На этом задании проверяется умение определять электрические параметры приборов на основе исследования их вольтамперных характеристик, а также умение оценивать границы погрешностей измерений с помощью электроизмерительных приборов и представлять вольтамперные характеристики на графиках.

В качестве исследуемого элемента в «черный ящик» могут быть помещены различные элементы электрических цепей постоянного тока: лампа электрического фонаря, полупроводниковый терморезистор, полупроводниковый диод, конденсатор, гальванический источник тока. В задании должны быть указаны максимальные допустимые значения силы тока и напряжения.

Для успешного выполнения заданий по определению электрических параметров «черных ящиков» важно составить оптимальный план проведения исследования. Если учащиеся при первой встрече с «черным ящиком» испытывают серьезные затруднения, можно сначала совместно обсудить общие подходы к планированию исследования и наметить, например, следующую последовательность проведения измерений.

Первый шаг — проверка предположения, нет ли в «черном ящике» источника ЭДС. Если при подключении вольтметра обнаруживается источник ЭДС, то нужно исследовать зависимость силы тока в цепи от сопротивления  $R$  на внешнем ее участке и определить основные параметры — ЭДС и внутреннее сопротивление.

Если экспериментом установлено, что внутри «черного ящика» источник ЭДС отсутствует, далее можно измерить его электрическое сопротивление  $R$  с помощью омметра. При постоянном показании омметра цепь можно охарактеризовать определенным значением электрического сопротивления. Если же при подключении омметра происходит кратковременное отклонение его стрелки и затем плавное возвращение ее к делению шкалы «∞», то можно сделать вывод о наличии в «черном ящике» последовательно включенного электрического конденсатора.

Следующий шаг — исследование зависимости сопротивления  $R$  от направления тока. Если при изменении полярности подаваемого напряжения сила тока через «черный ящик»

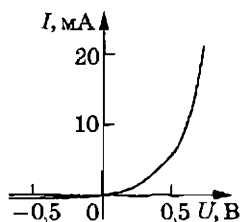


Рис. 53

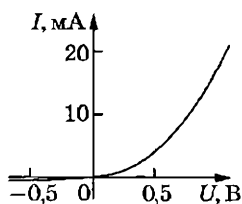


Рис. 54

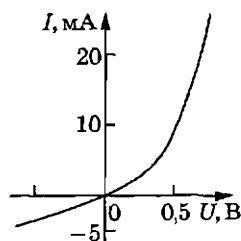


Рис. 55

не изменяется, то можно сделать вывод, что в цепи нет последовательно включенного полупроводникового прибора с  $p-n$ -переходом. Если же сила тока в цепи существенно меняется при изменении направления тока, можно сделать вывод о наличии последовательно включенного диода.

На физических олимпиадах часто предлагаются и комбинации из двух или трех элементов в одном черном ящике. Например, диод с последовательно или параллельно включенным резистором, или два диода и один резистор. В случае такой сложной цепи в задании даются некоторые дополнительные сведения.

Например, задача формулируется следующим образом:

*В трех «черных ящиках» находятся электрические схемы, каждая из которых состоит из одного или двух элементов. Всего использовано три одинаковых диода и два разных резистора. Определите электрические сопротивления резисторов.*

При подготовке этой задачи в один «черный ящик» помещается диод, в другом диод включается последовательно с резистором, имеющим электрическое сопротивление около 100 Ом, в третьем диод включается параллельно с резистором с электрическим сопротивлением около 200 Ом.

Для определения электрического сопротивления резисторов, входящих в схемы двух «черных ящиков», нужно исследовать зависимость силы тока от напряжения. Результаты исследования представлены графиками на рис. 53–55. Все три графика показывают зависимость силы тока от полярности напряжения, приложенного к выводам «черного ящика».

Следовательно, в каждом «черном ящике» имеется по одному диоду. Так как использовано только два резистора, в одном из «ящиков» находится только один диод, а в двух других — по одному диоду и резистору.

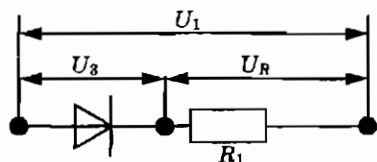


Рис. 56

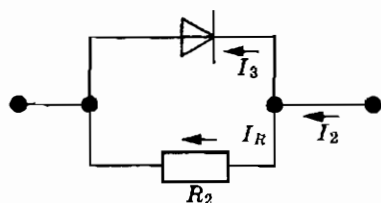


Рис. 57

Резистор с диодом могут быть включены последовательно (рис. 56) или параллельно (рис. 57). В первом случае практически не изменится обратная ветвь характеристики диода, но будет происходить ограничение прямого тока диода, сила тока через диод в прямом направлении не будет быстро возрастать. Во втором случае при обратном включении диода сила тока будет значительно больше силы тока при включении одного диода, прямая ветвь характеристики диода мало изменится.

Из графиков на рис. 53, 54 и 55 видно, что при малых значениях обратного тока наибольшими значениями прямого тока характеризуется первый «черный ящик» (рис. 53). Значит, в нем находится только диод. Обратная ветвь вольтамперной характеристики на рис. 55 отличается от обратной ветви характеристики одного диода (рис. 53) увеличением значений силы тока при тех же значениях напряжения. Следовательно, в этом случае резистор включен параллельно диоду.

Прямая ветвь вольтамперной характеристики на рис. 54 отличается от прямой ветви характеристики диода (рис. 53) уменьшением значения силы тока при тех же значениях напряжения. Следовательно, резистор в этом случае включен последовательно с диодом.

По обратным ветвям вольтамперных характеристик диода и диода с параллельно включенным резистором можно определить электрическое сопротивление резистора  $R_2$ . При напряжении  $U$  сила тока  $I_2$  через «черный ящик» по схеме на рис. 57 равна сумме силы тока  $I_3$  через диод (равна силе тока  $I$  через «черный ящик» с одним диодом при том же напряжении) и силы тока  $I_R$  через резистор  $R_2$ :

$$I_2 = I_3 + I_R, \quad I_R = I_2 - I_3, \quad I_R = \frac{U}{R_2}, \quad R_2 = \frac{U}{I_2 - I_3}.$$

Если  $I_3 \ll I_2$  то  $R_2 \approx \frac{U}{I_2}$ .

Значение сопротивления  $R_1$  можно определить, используя соотношение между значениями напряжения на диоде и рези-



сторы  $U_1$  и напряжения на диоде  $U_3$  при одинаковых значениях силы тока  $I$ :

$$U_1 = U_3 + U_R = U_3 + R_1 I, \quad R_1 = \frac{U_1 - U_3}{I} = \frac{U_R}{I}.$$

Вместо вычисления большого числа значений  $R_1$  и нахождения их среднего арифметического можно выполнить операцию вычитания значений напряжения  $U_3$  из значений напряжения

$U_1$  на графике и построить график  $I_R(U)$ . При построении графика  $I_R(U)$ , являющегося прямой, проходящей через начало координат, происходит усреднение результатов измерений. Эта прямая проводится среди точек, соответствующих значениям  $I_R$  таким образом, чтобы количество экспериментальных точек по разные стороны от прямой было примерно одинаковым.

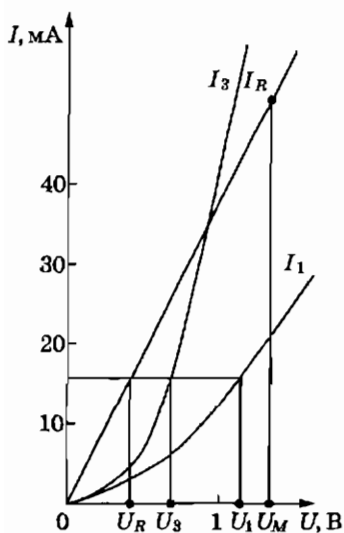


Рис. 58

После построения графиков  $I_3(U)$  и  $I_1(U)$  в одной системе координат каждая точка находится путем измерения абсцисс  $U_3$  и  $U_1$ , соответствующих данному значению ординаты  $I$ , и нанесения на график точки с ординатой  $I$  и абсциссой  $U_R = U_1 - U_3$  (рис. 58).

Электрическое сопротивление резистора  $R_1$  находится как отношение напряжения на резисторе к силе тока:

$$R_1 = \frac{U_R}{I}.$$

Значения  $U_R$  и  $I$  целесообразно взять как координаты максимально удаленной от начала координат точки прямой.

Для знакомства с системой оценки решений на физических олимпиадах можно предложить учащимся произвести самооценку результатов исследования «черных ящиков» с тремя диодами и двумя резисторами по следующей шкале.

#### Возможный вариант оценки решения

1. Определение схем включения диодов и резисторов 2 б.
2. Определение электрических сопротивлений резисторов  $R_1$  и  $R_2$  по результатам единичных измерений 2 б.

- |   |      |
|---|------|
| 3. Построение графиков $I(U)$ вольтамперных характеристик                                 | 3 б. |
| 4. Определение электрического сопротивления $R_1$ по графику вольтамперной характеристики | 1 б. |
| 5. Определение электрического сопротивления $R_2$ по графику                              | 1 б. |
| 6. Оценка границ погрешностей измерений   | 1 б. |

Если в «черном ящике» находится электролитический конденсатор емкостью 500–2000 мкФ, определить его емкость можно с помощью вольтметра с высоким значением внутреннего сопротивления (или микроамперметра) и резистора с таким значением электрического сопротивления  $R$ , при котором постоянная времени  $RC$ -цепи, составленной из этого резистора и исследуемого конденсатора, составляла бы 50–100 с.

Если зарядить конденсатор емкостью  $C$  до напряжения  $U_0$  и затем осуществить процесс разряда конденсатора через резистор с электрическим сопротивлением  $R$  (рис. 59), то напряжение  $U$  на конденсаторе будет убывать со временем  $t$  по закону:

$$U = U_0 e^{-\frac{t}{RC}}.$$

Из уравнения следует, что через интервал времени  $T = RC$ , называемый постоянной времени  $RC$ -цепи, после начала процесса разряда напряжение на конденсаторе уменьшится в  $e$  раз, где  $e \approx 2,72$ .

Для определения электрической емкости конденсатора следует зарядить его до напряжения  $U_0$  и измерить время  $T$ , за которое при разряде через резистор  $R$  напряжение на конденсаторе уменьшится до значения  $U_T = \frac{U_0}{2,72}$ .

Резистор нужно подобрать в предварительных опытах с таким значением электрического сопротивления, чтобы время  $T$  разряда конденсатора составляло несколько десятков секунд.

При проведении эксперимента с использованием вольтметра необходимо убедиться, что его внутреннее сопротивление значительно больше электрического сопротивления резистора  $R$ . В противном случае нужно учитывать влияние сопротивления вольтметра на процесс разряда конденсатора.

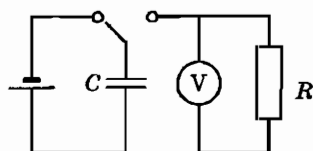


Рис. 59

По известному значению электрического сопротивления  $R$  цепи и измеренному значению времени  $T$  вычисляется значение емкости конденсатора:

$$C = \frac{T}{R}.$$

#### Экспериментальное задание 4

#### Исследование параметров «черного ящика» на переменном токе

В качестве исследуемого элемента электрической цепи переменного тока в «черный ящик» могут быть помещены резистор, конденсатор (но не электролитический!), катушка и различные комбинации из этих элементов цепи. В задании должны быть указаны максимальные допустимые значения силы тока и напряжения, исследуемый диапазон частот переменного напряжения. Для указания исследуемого диапазона частот учителю нужно выяснить, в каком диапазоне частот могут успешно применяться электроизмерительные приборы, которыми будут пользоваться школьники.

Для определения электрических параметров схемы в «черном ящике» его выводы подключают к выходу генератора переменного тока, параллельно включают вольтметр переменного тока и последовательно — миллиамперметр переменного тока (рис. 60).

По результатам измерений силы тока  $I$  в цепи при постоянной амплитуде колебаний напряжения  $U$  строится график зависимости силы тока от частоты переменного тока. Если график зависимости силы тока от частоты при постоянной амплитуде колебаний напряжения имеет вид прямой, параллельной оси абсцисс (рис. 61), то он показывает, что полное электрическое сопротивление участка цепи в «черном ящике» не зависит от частоты. Это значит, что в «черном ящике» находится резистор с чисто активным сопротивлением.

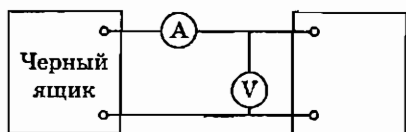


Рис. 60

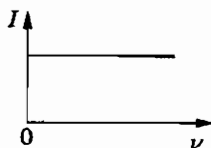


Рис. 61

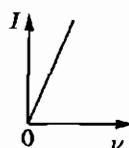


Рис. 62

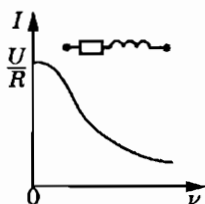


Рис. 63

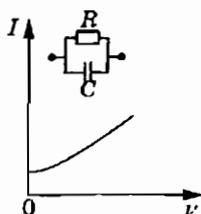


Рис. 64

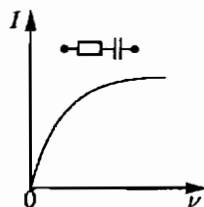


Рис. 65

График с линейным возрастанием силы тока при увеличении частоты (рис. 62) показывает, что полное электрическое сопротивление участка цепи линейно убывает с увеличением частоты. Такая зависимость может наблюдаться в том случае, если в «черном ящике» находится конденсатор, так как емкостное сопротивление конденсатора в цепи переменного тока определяется выражением:

$$X_C = \frac{1}{\omega C}.$$

На рисунках 63–65 представлен общий вид графиков зависимости  $I(\nu)$  для электрических цепей, состоящих из двух элементов. График на рис. 63 показывает, что на низких частотах полное сопротивление «черного ящика» практически не зависит от частоты. Следовательно, на низких частотах он может быть представлен как резистор. На высоких частотах сила тока через «черный ящик» значительно меньше, чем на низких частотах, полное сопротивление увеличивается с возрастанием частоты. Такая зависимость характерна для индуктивного сопротивления:

$$X_L = \omega L.$$

Следовательно, эквивалентная электрическая схема «черного ящика» может быть представлена в виде активного сопротивления  $R$  и катушки индуктивностью  $L$ , включенных последовательно.

График на рис. 64 соответствует «черному ящику» с параллельно соединенными конденсатором и резистором. Активное сопротивление резистора  $R$  в этом случае можно определить по участку кривой на низких частотах, емкость конденсатора — по участку кривой на высоких частотах. График на рис. 65 соответствует «черному ящику» с последовательно соединенными конденсатором и резистором. Электрическую емкость конденсатора можно определить по значениям силы тока  $I$  в

цепи и напряжения  $U$  на участке линейного возрастания силы тока с частотой:

$$I = \frac{U}{X_C} \approx U\omega C, \quad C = \frac{I}{2\pi\nu U}.$$

Электрическое сопротивление резистора можно найти по значению силы тока  $I$  и напряжению  $U$  при таком значении частоты, когда емкостное сопротивление конденсатора  $X_C$  пренебрежимо мало по сравнению с активным сопротивлением резистора (горизонтальный участок кривой на рис. 65).

Убывание силы тока с увеличением частоты, прохождение через минимум и возрастание при дальнейшем увеличении частоты происходит в цепи из параллельно соединенных конденсатора, катушки и резистора (рис. 66). Полное сопротивление такой цепи переменному току определяется формулой:

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}}$$

Согласно этой формуле при  $\nu \rightarrow 0$  сопротивление  $Z$  тоже стремится к нулю и сила тока должна возрастать бесконечно. Однако, поскольку в действительности любая катушка обладает активным сопротивлением, реальная зависимость имеет вид графика на рис. 66.

Активное сопротивление  $R$  можно найти по значениям напряжения  $U$  и силы тока  $I$  в резонансе:  $\omega = \omega_0$ ,  $X_C = X_L$ ,  $Z \approx R$ ,  $R \approx \frac{U}{I}$ .

На высоких частотах можно считать, что  $X_L \gg R \gg X_C$ ,  $Z \approx X_C$ ,

$$\frac{1}{2\pi\nu C} = \frac{U}{I}, \quad C = \frac{I}{2\pi\nu U}.$$

Индуктивность катушки можно найти по условию резонанса:  $\nu = \nu_0$ ,  $X_C = X_L$ ,

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}, \quad L = \frac{1}{\omega_0^2 C} = \frac{1}{4\pi^2\nu_0^2 C}.$$

Для электрической цепи из последовательно включенных конденсатора, катушки и резистора характерно возрастание силы тока в цепи при увеличении частоты с достижением максимального значения при некотором значении частоты  $\nu_0$  и затем убывание силы тока с возрастанием частоты (рис. 67).

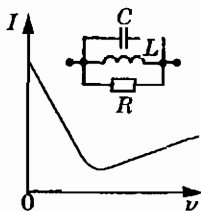


Рис. 66

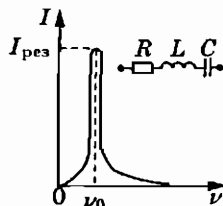


Рис. 67

Полное сопротивление такой цепи на переменном токе определяется выражением:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}.$$

Активное сопротивление  $R$  цепи можно найти по значению напряжения  $U$  и силы тока  $I$  при условии резонанса. Емкость  $C$  конденсатора можно найти по значениям напряжения  $U$  и силы тока  $I$  в цепи на низких частотах при условии  $X_C \gg R \gg X_L$ , когда полное сопротивление  $Z$  цепи можно считать равным емкостному сопротивлению конденсатора:

$$Z \approx X_C = \frac{1}{2\pi\nu C}, \quad I = \frac{U}{Z} = 2\pi\nu C U, \quad C = \frac{I}{2\pi\nu U}.$$

Индуктивность  $L$  катушки можно найти по условию резонанса:

$$X_L = X_C, \quad \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}, \quad L = \frac{1}{\omega_0^2 C} = \frac{1}{4\pi^2\nu_0^2 C}.$$

### Экспериментальное задание 5

#### Изготовление модели автомата пожарной сигнализации

Повышению интереса учащихся к физике способствует успешное применение полученных знаний на практике при выполнении заданий по разработке действующих моделей приборов и установок. Особый интерес у школьников вызывают разнообразные автоматические устройства. До предложения конкретных заданий конструкторского типа полезно обсудить общие принципы устройства и действия автоматов.

Название «автомат» произошло от греческого слова *automatos* — самодействующий. Автоматом называют устройство, выполняющее по заданной программе операции получения,

преобразования, передачи и распределения энергии, материалов и информации без непосредственного участия человека.

Обсуждение проблемы можно начать с постановки вопроса: назовите автоматы, с которыми вы встречаетесь в повседневной жизни. С помощью наводящих вопросов следует обратить внимание учеников на автоматы на квартирном электрическом щите, защищающем электропроводку от перегрузки, в электрическом утюге, в электрической печи, в кондиционере, на входной двери с электрическим кодовым замком, на бензозаправочной станции, автоматы открывания дверей, банковские автоматы, работающие с кредитными карточками, автоматы пожарной сигнализации и пожаротушения.

Выяснив принципы работы всех названных автоматических устройств, нужно выделить их основные общие элементы. Цель применения автомата — либо сигнализация о каком-то событии, либо управление каким-то процессом в случае какого-то события. Так, для автомата охранной сигнализации автомобиля «событием» является приближение к автомобилю человека или какого-то предмета.

Чтобы автомат подал сигнал или выполнил необходимое действие в ответ на «событие», нужно прежде всего обнаружить это «событие». Элемент автоматического устройства, регистрирующий «событие» по вызываемым им физическим явлениям и преобразующий этот сигнал, называется датчиком. Датчик вырабатывает сигнал для управляющего устройства, а управляющее устройство приводит в действие исполнительное устройство.

Называть задания, доступные для выполнения школьниками в условиях кабинета физики, заданиями конструкторского типа можно лишь весьма условно. Уровень технической подготовки учащихся и оснащённость кабинета физики инструментами и материалами в большинстве случаев обеспечивают возможность лишь сборки и испытания действующих моделей приборов и установок из готовых деталей. Однако на самом деле это не такой уж серьёзный недостаток, поскольку в творческих заданиях физического практикума основное внимание следует уделять исследованиям физических характеристик элементов разрабатываемой установки и поиску путей их использования при решении поставленной практической задачи.

Экспериментальное задание по изготовлению модели автомата пожарной сигнализации можно предложить в том случае, если учитель найдёт герконовый датчик пожарной сигнализации. При выборе учеником этого задания первым шагом

должно быть теоретическое знакомство с принципом действия геркона, включая понятие о ферромагнитной точке Кюри, и экспериментальное определение температуры срабатывания ферромагнитного герконового сигнализатора.

До экспериментов по нагреванию герконового датчика целесообразно сначала познакомиться с принципом действия геркона в более простом опыте, вызывая срабатывание геркона приближением к нему магнита. Для такого эксперимента можно использовать герконовые датчики и магниты электронного измерителя времени из комплекта «Лаборатория L-микро» по механике.

Для определения температуры срабатывания герконового сигнализатора собирается цепь из последовательно включенных геркона, источника тока и электрической лампочки как сигнализатора. Датчик пожарного извещателя на герконе и кончик термометра на  $100^{\circ}\text{C}$  располагаются вблизи поверхности лабораторной электрической плитки. Если контакты до опыта были замкнуты, то лампочка, когда срабатывает сигнализация, погаснет. Нужно записать значение температуры, при которой это произошло, и сравнить результат с ее паспортным значением  $70^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ .

При отчете можно предложить учащимся контрольные вопросы:

- Как устроен геркон?
- Почему баллончик геркона заполнен инертным газом, а электрические контакты позолочены?
- Что такое точка Кюри ферромагнетиков?
- Каков принцип действия геркона?
- Каковы достоинства герконов?
- Как устроен магнитный пожарный сигнализатор на герконе?

### Экспериментальное задание 6

#### Расчет и испытание модели автомата для регулирования температуры

Самый простой способ поддержания постоянной температуры в каком-то объеме известен сегодня каждому ребенку: если холодно, то нужно включить электрический нагреватель, для понижения температуры нужно использовать холодильник или кондиционер. Следовательно, нужно лишь придумать автомат, включающий и выключающий электрический нагреватель при достижении заданных значений температуры. Задание на



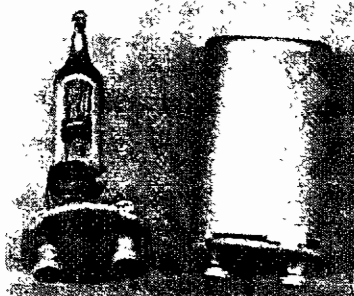


Рис. 68

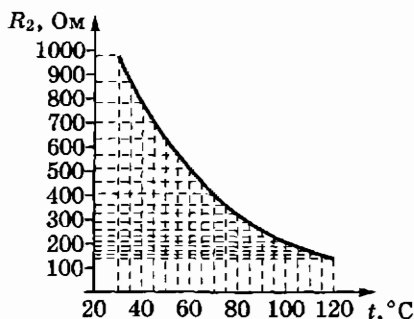


Рис. 69

проектирование и изготовление автоматического устройства, способного поддерживать постоянной температуру в некотором объеме, можно начать с обсуждения проблемы выбора датчика температуры, способного управлять работой электрического нагревателя или холодильника.

Кандидатами на роль датчиков изменений температуры могут быть биметаллические пластины и полупроводниковые терморезисторы. Выбор датчика во многом обусловлен возможностями кабинета физики.

Для изготовления нагревателя можно использовать автомобильную электрическую лампочку на 12 В мощностью 20 Вт или лампу от осветителя для теневой проекции. Лампа и датчик помещаются в коробку из толстого картона, пластмассы или оргстекла небольших размеров, чтобы нагревание происходило быстрее. Ориентировочные размеры коробки 40 × 50 × 70 мм.

Ученикам, для которых задача конструирования биметаллического реле окажется сложной, можно предложить уже собранное реле и дать задание испытать его работу в устройстве термостата. Или дать биметаллическое реле из стартера лампы дневного света для испытания его в качестве сигнализатора достижения заданной температуры.

Это реле срабатывает при неудобной для нас температуре 250–300 °С. Чтобы температуру срабатывания понизить до 40–70 °С, нужно уменьшить зазор в бипластине реле (рис. 68). Для этого придется разрушить стеклянный баллон (что категорически нельзя поручать школьникам!). Уменьшить зазор нужно пинцетом до расстояния ≈ 0,5 мм.

При выборе в качестве датчика полупроводникового терморезистора для расчета сигнализатора или термостата нужно знать зависимость его сопротивления от температуры. Поэтому

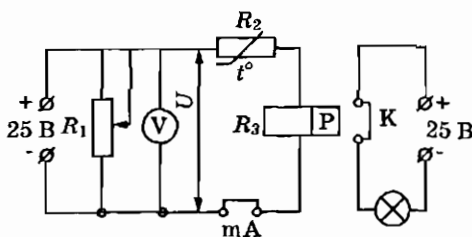


Рис. 70

учащимся нужно сначала отградуировать терморезистор, измерив его сопротивление при различных температурах, и построить график зависимости сопротивления от температуры. Пример градуировочной кривой для терморезистора представлен на рис. 69. После построения градуировочной кривой можно использовать терморезистор как электрический термометр. Для устройства термостата потребуются электромагнитные реле и знание их основных параметров: сопротивлений обмотки, токов срабатывания и отпускания.

Сопротивление обмотки измеряется омметром, а токи срабатывания и отпускания можно либо найти в справочнике, либо определить на опыте. Действие терморезисторного реле основано на том, что при изменении температуры изменяется электрическое сопротивление терморезистора, что вызывает изменение проходящего по нему тока.

Если последовательно с терморезистором  $R_2$  включить обмотку  $R_3$  электромагнитного реле (рис. 70), то изменение силы тока может вызвать срабатывание реле. Если, например, при высокой температуре контакты  $K$  реле были разомкнуты и нагреватель был отключен, при понижении температуры сопротивление терморезистора  $R_2$  уменьшается, сила тока через обмотку реле увеличивается, реле срабатывает и происходит включение нагревателя.

Разумеется, такая схема температурной сигнализации работает только в том случае, если интервал изменения тока в цепи терморезистора перекрывает значение тока срабатывания реле. В связи с этим не любая пара терморезистор — реле будет работоспособной.

При выборе пары следует учесть следующие моменты.

1. Электрическое сопротивление терморезистора при комнатной температуре должно быть значительно больше электрического сопротивления обмотки реле. В противном случае

изменение сопротивления терморезистора слабо скажется на изменении тока в цепи.

2. Ток срабатывания реле не должен быть больше предельно допустимого тока через терморезистор. Этот ток находится из предельно допустимой мощности рассеяния  $W$  и сопротивления терморезистора  $R_T$  из выражения  $W = I^2 R_T$ .
3. Не следует перегружать контакты реле включением в исполнительную цепь мощных потребителей. Для малогабаритных реле в качестве светового сигнала и нагревателя годится лампочка 12В, 10Вт, а для звукового сигнала можно использовать слаботочный электрический звонок.

Учащимся, для которых определение тока срабатывания реле и подбор работоспособной пары терморезистор—реле окажется сложной задачей, можно выдать подобранную пару и сообщить ток срабатывания реле.

Напряжение  $U$  срабатывания для заданной температуры определяется сопротивлением терморезистора  $R_T$  при заданной температуре (находится из графика градуировки) и сопротивлением  $R$  обмотки реле:

$$U = I_{\text{ср}}(R_T + R).$$

Если исполнительная цепь имеет нормально замкнутые контакты, как на рис. 70, и включенная в эту цепь лампочка расположена в коробке под терморезистором, то по достижении заданной температуры (а значит и тока срабатывания) реле разомкнет контакты и выключит лампочку-нагреватель. Температура в коробке начнет понижаться, сопротивление терморезистора увеличиваться, а сила тока в обмотке реле уменьшаться. Это вызовет срабатывание реле, лампочка-нагреватель включится, температура начнет повышаться и т. д.

В результате таких периодических выключений и включений нагревателя температура в коробке будет колебаться вблизи заданного значения. Учащиеся при испытании термостата должны убедиться в этом, сняв зависимость температуры в коробке (термостате) от времени.

### Экспериментальное задание 7

#### Исследование радиоактивной загрязненности

Вместо рекомендаций по постановке этого задания ниже приводится в качестве примера отчет о выполнении такого задания двумя школьницами в 2003 г. Результаты исследования были доложены на XII Всероссийской научно-методической

конференции «Университетская гимназия» в Санкт-Петербурге и авторы были награждены дипломом. Это пример того, что могут делать школьники на элективных занятиях по физике, если им предоставить необходимые условия для самостоятельной экспериментальной работы.

### **Возможность обнаружения радиоактивной загрязненности продуктов питания**

Пельменева Анна, Охулкова Татьяна  
ЭСОШ № 82 им. Ф. И. Дубовицкого, г. Черноголовка

В повседневной жизни актуальным является вопрос о вреде, который наносит радиоактивное излучение людям. Мы решили проверить экспериментально, можно ли с помощью простейшего дозиметра со счетчиком Гейгера—Мюллера обнаружить такое радиоактивное загрязнение, которое находится у границы предельно допустимого для поступления в организм человека с продуктами питания.

Счетчик Гейгера—Мюллера — один из важнейших приборов для автоматической регистрации ядерных излучений. Принцип его работы заключается в том, что когда частица попадает в корпус счетчика, возникает разряд и образуется импульс напряжения, который подается в регистрирующее устройство. На экране радиометра высвечивается количество зарегистрированных частиц (рис. 71).



Рис. 71

Как же оценить чувствительность дозиметра? Сделать это, исходя из теоретических рассуждений, очень сложно: придется учитывать то, что далеко не все частицы, образующиеся при распаде радиоактивного изотопа, попадут в прибор. Во-первых, большая часть излучения поглощается самим продуктом, во-вторых, нужно учесть поглощение частиц в воздухе и стенке счетчика, и, наконец, то, что некоторые частицы пролетят мимо прибора и не каждая из попавших в корпус счетчика будет зафиксирована. Чтобы избежать этой проблемы, мы просто создадим модель с известным содержанием радиоактивного изотопа и узнаем, можем ли мы, пользуясь этим прибором, заметить повышенную по сравнению с естественным фоном радиацию или она окажется в пределах границ погрешностей измерений. Естественный фон облучения создают космические лучи, радиоактивные породы земной коры и стены здания.

Рассмотрим один из самых опасных радиоактивных изотопов, которые попадают в организм человека с пищей, — изотоп стронция  $^{90}\text{Sr}$ . Поскольку стронций по своим химическим свойствам похож на кальций, то он осаждается в костях человека и длительное время не выводится из организма. Если полагать, что радиоактивный стронций поступает ежедневно с продуктами питания, то, согласно «Нормам радиационной безопасности» для населения категории Б (ограниченной части населения), его поступление через органы пищеварения в сутки не должно превышать по активности

$$A \approx 9 \cdot 10^{-4} \text{ мкКи} \approx 9 \cdot 10^{-10} \cdot 3,7 \cdot 10^{10} \text{ расп/с} \approx \\ \approx 33,3 \text{ расп/с} \approx 2000 \text{ расп/мин.}$$

Естественно, что для измерений мы не можем использовать радиоактивный изотоп стронция, поэтому для опыта придется заменить его каким-нибудь другим элементом, причем взять такую массу этого элемента, в которой будет происходить столько же распадов в секунду, сколько происходит в предельно допустимом количестве стронция  $^{90}\text{Sr}$ .

Энергетические характеристики  $\beta$ -излучения радиоактивных изотопов стронция  $^{90}\text{Sr}$  и калия  $^{40}\text{K}$  близки по значению, а значит, попавшие в корпус счетчика  $\beta$ -частицы с одинаковой вероятностью будут вызывать разряд и фиксироваться (рис. 72). Следовательно, мы можем заменить изотоп  $^{90}\text{Sr}$  на изотоп  $^{40}\text{K}$  при измерениях.

Как уже говорилось выше, для модельного эксперимента нам нужно добиться равной активности при использовании

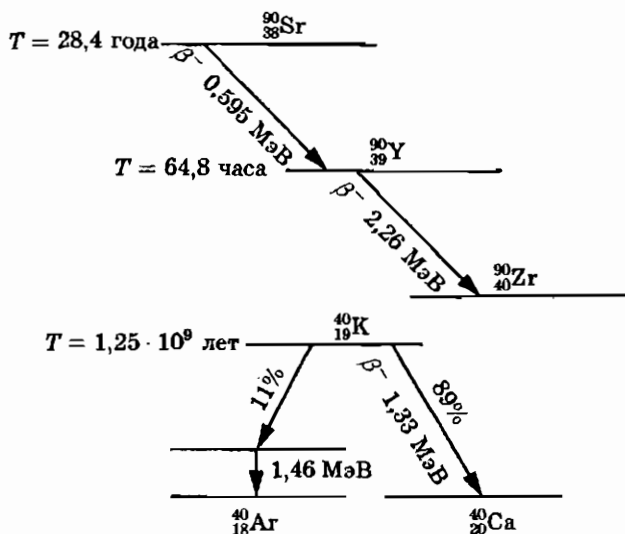


Рис. 72

различных веществ:

$$A(^{90}\text{Sr}) = A(^{40}\text{K}),$$

где  $A$  — это активность изотопа, которая измеряется в распадах в секунду.

Посчитаем, какая масса изотопа  $^{40}\text{K}$  будет иметь такую же активность, как и опасная доза  $^{90}\text{Sr}$ , т. е.  $\approx 2000$  расп./мин.

#### Определение эквивалентного количества КСl

Для эксперимента мы взяли хлорид калия. Найдем массу КСl, обладающего активностью 2000 расп./мин.

Найдем количество ядер  $^{40}\text{K}$  согласно закону радиоактивного распада.

Закон радиоактивного распада:

$$A = \frac{\ln 2 \cdot N}{T} \Rightarrow N = \frac{A \cdot T}{\ln 2},$$

где  $N$  — количество ядер,  $T$  — период полураспада,  $T(^{40}\text{K}) = 1,25$  млрд лет  $= 6,57 \cdot 10^{14}$  мин.

$$N(^{40}\text{K}) = \frac{2000 \cdot 6,57 \cdot 10^{14}}{0,693}, \quad N(^{40}\text{K}) \approx 1,9 \cdot 10^{18} \text{ ядер.}$$

Учитывая, что в природном калии содержится 0,012% радиоактивного изотопа  $^{40}\text{K}$ , вычисляем массу калия, которую

Таблица

Полученные значения активности для образцов различной массы.

	Чистый KCl	Масса образца, г				Фон
		10	17,5	25	50	
Активность $A$ , имп/мин	130,7	58,0	50,2	46,5	37,9	35,9
$\sigma_A$ , имп/мин	11,0	5,4	7,5	8,1	5,1	5,5
% поглощения образцом	(0)	76,7	84,9	88,8	97,9	(100)

нужно взять для измерений. Она оказывается равна примерно 1,02 г. Мы использовали соль KCl. Посчитаем нужную массу этой соли. Она примерно равна 2 г.

Теперь обратите внимание на пункт 3 плана эксперимента: так как большая часть излучения поглощается самими продуктами и не фиксируется счетчиком, то для создания модели, похожей на продукт, мы смешали KCl с тестом. Максимально приближая счетчик к модели, мы измерили радиацию тел массами 10, 17,5, 25 и 50 г, в каждом из которых содержалось примерно 2 г KCl. Для каждого тела мы проводили по 10 измерений.

Мы построили график зависимости активности образца (зарегистрированной скорости счета от образца) от его массы (рис. 73), выделив естественный фон и указав границы погрешности.

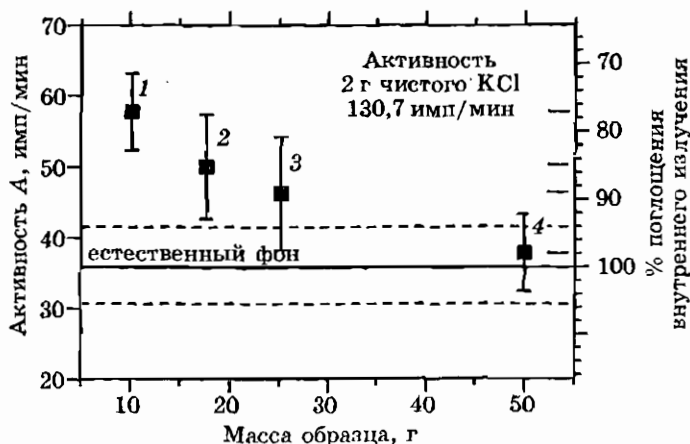


Рис. 73

Обратим внимание на то, как считались погрешности для графика. Есть два вида погрешностей: статистическая и систематическая. В нашей работе статистическая погрешность возникла из-за случайного характера радиоактивного распада. Вы видите формулу, по которой мы ее считали: среднее квадратичное отклонение равно корню из суммы квадратов отклонений, разделенному на количество измерений минус 1. Систематическая же ошибка одинаково входит как в измерение фона, так и в измерения активности модельных образцов. Для цели работы важна разница между измеряемой активностью и фоном. Следовательно, систематическая ошибка могла возникнуть только из-за того, что при измерении радиации моделей часть естественного фона облучения поглощается тестом. Но дополнительно проделанные измерения показали, что тесто без примеси КСl не влияет на показания счетчика при измерении фона.

Из графика мы видим, что для тел массами 25 и 50 г (точки 3 и 4) могут быть зафиксированы такие значения активности, которые входят в зону погрешности естественного фона. Поэтому нельзя уверенно сказать, что в этих образцах находится повышенное содержание радиоактивных изотопов. А точку 2 можно считать пограничной, т. е. если предельно допустимое количество радиоактивных изотопов содержится в продукте, масса которого больше 17,5 г, то радиоактивность не может быть обнаружена, а если масса продукта меньше 17,5 г, то это возможно, что и подтверждает точка 1, которая лежит гораздо выше уровня естественного фона.

При измерении радиоактивности пищевых продуктов в повседневной жизни нужно обратить внимание на то, что уровень естественного фона радиации может сильно колебаться. Активность внешнего облучения зависит от типа пород земной коры в данной местности, от материалов, из которых построено здание. Наибольшей радиоактивностью обладают гранитные породы и стены каменных зданий, наименьшей — стены деревянных зданий. Показания счетчика значительно изменяются даже при переходе с одного этажа дома на другой (чем ближе мы находимся к земле, тем больше облучение). Измеренная нами разница показаний превысила 12 имп/мин. Из этого следует, что перед измерением радиоактивности продукта необходимо знать значение естественного фона радиации, что значительно затруднит использование дозиметра в магазинах и на рынке.



Как вы уже видели, статистическая погрешность уменьшается с увеличением количества измерений, поэтому если бы в нашем опыте было сделано больше 10 измерений для каждой точки графика, то пограничная масса получилась бы больше 17,5 грамм.

Итак, мы пришли к выводу, что обнаружить предельно допустимое содержание изотопа стронция  $^{90}\text{Sr}$  в продуктах питания простым приближением к ним радиометра со счетчиком Гейгера—Мюллера практически невозможно. Необходимо, во-первых, делать большое количество измерений для уменьшения погрешности, во-вторых, необходимо знать среднее значение внешнего облучения, а в-третьих, очень большая доля излучения поглощается самими тестируемыми продуктами. В последнем утверждении можно убедиться, проделав опыт с поверхностным загрязнением и измерив радиацию  $\text{KCl}$  отдельно. Обратите внимание, что зарегистрированная скорость счета от образца  $\text{KCl}$  равна примерно 130 имп/мин. Не трудно посчитать, какую долю составляет поглощенное излучение от 130 имп. Можно составить таблицу, из которой видно, что для тела массой 10 г доля поглощенного излучения равна 88%, для 50 г она составит уже 98%.

#### *Ход эксперимента*

1. Измеряем естественный фон излучения с помощью счетчика Гейгера—Мюллера.
2. Берем такую массу  $\text{KCl}$ , при которой  $A(^{40}\text{K}) = A(^{90}\text{Sr})$ .
3. Изготавливаем 4 модели из теста, в каждую из которых добавляем нужную массу  $\text{KCl}$  (2 г).
4. Измеряем радиацию от моделей.
5. Рассчитываем ошибки и сравниваем зоны погрешностей естественного фона и моделей.

#### *Статистическая погрешность*

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n}, \quad \sigma_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{A} - A_i)^2}{n-1}},$$

где  $A_i$  — измеряемая активность,  $\bar{A}$  — среднее значение активности,  $\sigma_A$  — среднее квадратичное отклонение (ошибка) для  $A$ ,  $n$  — количество измерений активности для одного образца ( $n = 10$ ).

# Программа элективного курса «Измерения физических величин» (70 часов)

## Объяснительная записка

**Цель курса** — предоставить учащимся возможность удовлетворить индивидуальный интерес к изучению практических приложений физики в процессе познавательной и творческой деятельности при проведении самостоятельных экспериментов и исследований.

**Основная задача курса** — помочь ученику в обоснованном выборе профиля дальнейшего обучения. На элективных занятиях учащийся познакомится с такими видами деятельности, которые занимают ведущее место во многих инженерных и технических профессиях, связанных с практическими применениями физики. Опыт самостоятельного выполнения сначала простых физических экспериментов, затем заданий исследовательского и конструкторского типа позволит ученику либо убедиться в правильности своего предварительного выбора, либо изменить его и испытать способности на каком-то ином направлении.

Содержание курса выстроено по принципу от простого к сложному и проведет школьников от приобретения новых умений и навыков к их творческому применению.

Девизы, помещенные в подзаголовках к разделам курса, отражают их направленность и уровень сложности материала.

Использование лекционной формы проведения теоретических занятий целесообразно лишь на нескольких занятиях при формировании группы и выяснении характера интересов и способностей учащихся.

На теоретических занятиях первого уровня (девиз «Учимся измерять!») рассматриваются методы измерения физических величин, устройство и принцип действия измерительных при-

боров, способы обработки и представления результатов измерений. На практических занятиях при выполнении лабораторных работ ученики приобретут навыки планирования физического эксперимента в соответствии с поставленной задачей, научатся выбирать рациональный метод измерений, выполнять эксперимент и обрабатывать его результаты.

Выполнение практических и экспериментальных заданий второго уровня (девиз «Измеряем самостоятельно!») позволит учащимся применить приобретенные навыки в нестандартной обстановке, стать компетентными во многих практических вопросах. Развитию способностей самостоятельно приобретать знания, критически оценивать полученную информацию, излагать свою точку зрения, выслушивать другие мнения и конструктивно обсуждать их способствуют семинарские занятия. Каждому участнику семинарского занятия предоставляется возможность выступить в роли докладчика или содокладчика, референта или консультанта.

Девиз третьего уровня, нацеленного на совершенствование практических умений и развитие творческих подходов к делу, — «Исследуем, изобретаем, конструируем, моделируем!». На этом уровне ученикам предстоит выполнить лабораторные работы физического практикума, посвященные исследованиям некоторых процессов и явлений в физике, испытать свои силы при выполнении индивидуальных экспериментальных и конструкторских заданий, работая настолько самостоятельно, насколько они пожелают и смогут.

В завершение этого этапа учащиеся могут представить результаты своих исследований, например, на классном или школьном конкурсе творческих работ.

Таким образом, основными видами деятельности школьников на занятиях по элективному курсу являются самостоятельная работа в физической лаборатории и выполнение простых экспериментальных заданий по интересам в домашних условиях. На эти виды работ предполагается выделить не менее 70% учебного времени.

Все виды практических заданий рассчитаны на использование типового оборудования кабинета физики и могут выполняться всеми учащимися группы в форме лабораторных работ или в качестве индивидуальных экспериментальных заданий для учащихся по их выбору.

Учебное пособие может быть полезным для учеников при решении задач, встречающихся в повседневной жизни людей:

правильно измерить температуру, измерить артериальное кровяное давления, проверить исправность электроприборов. Мы хотим показать учащимся, что они могут стать компетентными во многих практических вопросах уже сейчас. Предлагаемые задачи простые, но для их решения необходимо творческое применение знаний. На основе знакомства с устройством и принципами действия физических измерительных приборов, приобретения самостоятельного опыта их использования у школьников вырабатывается чувство уверенности в своих способностях успешно взаимодействовать с предметами окружающего мира и разнообразными техническими устройствами.

Элективный курс направлен на воспитание чувства уверенности в своих силах и способностях при использовании разнообразных приборов и устройств в повседневной жизни, а также на развитие интереса к анализу привычных явлений. Желание понять, разобраться в сущности явлений, в устройстве вещей, которые служат человеку всю его жизнь, неминуемо потребует дополнительных знаний, подтолкнет к самообразованию, человек будет наблюдать, думать, читать, совершенствоваться и изобретать — ему будет интересно жить!

И, наконец, замечание относительно объема курса. Авторы сознательно включили в программу курса избыточный материал, чтобы учитель мог творчески отнестись к выбору материала в соответствии с уровнем подготовленности учеников и их интересами, наличием оборудования в кабинете физики и в соответствии с собственными интересами.

## Основное содержание курса

### Глава 1. Методы измерения физических величин. 28 ч

*Первый уровень: учимся измерять!*

Основные и производные физические величины и их измерения. Единицы и эталоны единиц физических величин. Абсолютные и относительные погрешности прямых измерений. Измерительные приборы, инструменты, меры. Инструментальные и отсчетные погрешности. Классы приборов. Границы систематических погрешностей и способы их оценки. Случайные погрешности измерений и оценка их границ.

Этапы планирования и выполнения эксперимента. Меры предосторожности при проведении эксперимента. Учет влияния измерительных приборов на исследуемый процесс. Выбор

метода измерений и измерительных приборов. Способы контроля результатов измерений. Запись результатов измерений. Таблицы и графики. Обработка результатов измерений. Обсуждение и представление полученных результатов.

Измерения времени. Методы измерения тепловых величин. Методы измерения электрических величин. Методы измерения магнитных величин. Методы измерения световых величин. Методы измерения в атомной и ядерной физике.

#### **Лабораторные работы**

1. Измерение длины с помощью масштабной линейки и микрометра.
2. Оценка границ погрешности при измерениях силы тока.
3. Измерения электрического сопротивления с помощью омметра.
4. Исследование полупроводникового диода.
5. Измерение коэффициента трения.
6. Изучение движения системы связанных тел.
7. Исследование зависимости силы тока от напряжения на концах нити электрической лампы.
8. Исследование зависимости периода колебаний маятника от его массы, амплитуды колебаний и длины.
9. Измерение времени реакции человека на световой сигнал.
10. Измерение удельной теплоты плавления льда.
11. Измерения электрических величин с помощью цифрового мультиметра.
12. Измерение индукции магнитного поля постоянного магнита.
13. Измерение освещенности при помощи фотоэлемента.
14. Регистрация ядерных излучений.

### **Глава 2. Физические измерения в повседневной жизни. 12 ч.**

*Второй уровень: переходим к самостоятельным измерениям!*

Измерения температуры в быту. Влажность воздуха и способы ее измерения. Исследования работы сердца. Источники электрического напряжения вокруг нас. Бытовые электроприборы. Бытовые источники света.

#### **Лабораторные работы**

15. Исследование зависимости показаний термометра от внешних условий.
16. Измерение влажности воздуха.

17. Измерение артериального кровяного давления.
18. Изучение принципа работы пьезоэлектрической зажигалки.
19. Изучение принципа работы люминесцентной лампы.  
*Экскурсия в диагностические кабинеты поликлиники или больницы. 2 ч.*

### Глава 3. Физический практикум. 22 ч.

*Третий уровень: исследуем, изобретаем, конструируем, моделируем!*

#### **Лабораторные работы**

20. Измерение кинетической энергии тела.
21. Измерение индуктивности катушки.
22. Измерение амплитуды и периода электрических колебаний с помощью электронного осциллографа.
23. Исследование явления термоэлектронной эмиссии.
24. Измерение работы выхода электрона.
25. Исследование свойств лазерного излучения.
26. Исследование линейчатого спектра излучения.
27. Определение периода полураспада естественного радиоактивного изотопа.

#### **Экспериментальные задания**

Экспериментальное задание 1. Изготовление модели газового термометра.

Экспериментальное задание 2. Опыт с радиометром Крукса.

Экспериментальное задание 3. Исследование параметров «черного ящика» на постоянном токе.

Экспериментальное задание 4. Исследование параметров «черного ящика» на переменном токе.

Экспериментальное задание 5. Изготовление модели автомата пожарной сигнализации.

Экспериментальное задание 6. Расчет и испытание модели автомата для регулирования температуры.

Экспериментальное задание 7. Исследование радиоактивной загрязненности.

*Резерв времени. 6 ч.*

## Организация и проведение аттестации учеников

Элективные занятия по данной программе проводятся для удовлетворения индивидуальных интересов учащихся к изучению практических приложений физики и для помощи в выборе профиля дальнейшего обучения. Поэтому нет нужды систематически контролировать и оценивать знания учеников. Однако учителю следует отмечать их достижения и тем самым поощрять к дальнейшим занятиям.

Особенностям элективных занятий наиболее соответствует зачетная форма оценки. Зачет по выполненной лабораторной работе целесообразно выставлять по представленному письменному отчету, в котором кратко описаны условия эксперимента, в систематизированном виде представлены результаты измерений и сделаны выводы.

По результатам выполнения творческих экспериментальных заданий кроме письменных отчетов полезно практиковать сообщения на общем занятии группы с демонстрацией выполненных экспериментов и изготовленных приборов. Для подведения общих итогов занятий всей группы возможно проведение конкурса творческих работ. На этом конкурсе учащиеся смогут не только продемонстрировать экспериментальную установку в действии, но и рассказать о ее оригинальности и возможностях, отдать свое творение на суд зрителей. Здесь приобретает большое значение умение оформить свой доклад графиками, таблицами, кратко и эмоционально рассказать о самом главном. На общешкольных конкурсах могут быть представлены, например, работы биологов, химиков, литераторов. В этом случае появляется возможность увидеть и оценить свой труд и себя на фоне других интересных работ и таких же увлеченных людей.

Итоговый зачет ученику по всему элективному курсу можно выставлять, например, по таким критериям: 1) выполнение не менее половины лабораторных работ; 2) выполнение не менее одного экспериментального задания исследовательского или конструкторского типа; 3) активное участие в подготовке и проведении семинаров, дискуссий, конкурсов.

Предлагаемые критерии оценки достижений учащихся могут служить лишь ориентиром, но не являются обязательными. На основе своего опыта учитель может устанавливать иные критерии.

## Аннотированный список литературы

1. Кабардин О. Ф., Орлов В. А. Экспериментальные задания по физике. 9–11 классы. Учебное пособие для учащихся общеобразовательных учреждений. — М.: Вербум-М, 2001.

В пособии, ориентированном на развитие творческих способностей школьников, представлена система экспериментальных заданий различной сложности. Большинство заданий рассчитано на использование очень простых приборов и оборудования, поэтому пособие можно рекомендовать для организации самостоятельной экспериментальной работы. В первой части книги даны теоретические сведения об измерениях физических величин и погрешностях измерений, выборе метода измерения и измерительных приборов, анализе и оценке результатов эксперимента. Во второй части книги даны описания 22 экспериментальных задач, для решения которых достаточно знаний по физике в пределах базового курса, но эти знания требуется применить в незнакомой ситуации, проявить творческий подход. Задания третьей части книги позволяют учащимся провести самостоятельно небольшие экспериментальные исследования.

2. Физический практикум для классов с углубленным изучением физики: 10–11 кл./Ю. И. Дик, О. Ф. Кабардин, В. А. Орлов и др.; под ред. Ю. И. Дика, О. Ф. Кабардина. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Просвещение, 2002.

В книге предлагаются описания лабораторных работ физического практикума для 10–11 классов средней школы. Содержание практикума ориентировано на учащихся профильных классов, в которых физика является одним из профилирующих предметов. По многим темам лабораторные работы представлены в нескольких вариантах. Варианты отличаются как по уровню сложности, так и по используемому оборудованию. Это дает возможность учителю выбрать из нескольких предложенных вариантов такой, который соответствует задачам данного элективного курса, оборудованию физического кабинета, интересам и уровню подготовки учащихся. Описания лабораторных работ предваряет теоретическая глава «Измерения физических величин и оценка погрешностей измерений».

3. Бутырский Г. А., Сауров Ю. А. Экспериментальные задачи по физике: 10–11 кл. общеобразоват. учреждений: Книга для учителя. — М.: Просвещение, 1998.



Книга содержит экспериментальные задачи и методические указания по курсу физики старших классов средней школы. Для их выполнения могут быть использованы школьное оборудование, бытовая техника и простейшие самодельные приборы. В пособии приведено 260 экспериментальных задач и задач-наблюдений.

4. Всероссийские олимпиады по физике. 1992—2001 / Под ред. С. М. Козела, В. П. Слободянина. — М.: Вербум-М, 2002.

В книгу вошли материалы Всероссийских олимпиад школьников за 10 лет. Это условия и решения теоретических и экспериментальных заданий двух последних этапов олимпиад (окружного и заключительного). Пособие адресовано учащимся 9–11 классов.

5. Эрик Роджерс. Физика для любознательных. Т. 1. Материя, движение, сила. / Под ред Л. А. Арцимовича. — М.: Мир, 1969.

Автор поставил перед собой цель изложить основы физики на элементарном уровне, сделав это так, чтобы читатель невольно чувствовал себя участником процесса открытия и формулирования фундаментальных законов природы. Существенную роль при этом играет исторический фон. Цель книги — заставить читателя думать, раскрыть перед ним внутренний механизм развития науки. Книга является ценным пособием для преподавателей физики в школах, ее могут с пользой изучать любознательные школьники старших классов.

6. Физика, ч. 1. Вселенная / Пер. с англ. под ред. А. С. Ахматова. — М.: Наука, 1973.

Книга является полезным дополнением к существующим учебникам по физике. Она рассчитана на широкий круг читателей (учащихся средних школ, студентов техникумов, лиц, занимающихся самообразованием) и представляет большой интерес для преподавателей физики. «Вселенная» — это обширное введение в физику, главное содержание книги — основы кинематики и атомно-молекулярной теории строения вещества с элементами кинетической теории газов. В книге рассматриваются фундаментальные понятия и методы измерений времени, пространства и материи, даны первые представления о возможных ошибках при измерениях, о приближенных вычислениях, о регистрации измерений и некоторых современных средствах измерений.

---

Победитель конкурса по созданию учебной литературы  
нового поколения для средней школы,  
проводимого НФПК - Национальным фондом подготовки кадров  
и Министерством образования Российской Федерации

ISBN 5-94774-147-4



9 785947 741476