ИЗБРАННЫЕ ГЛАВЫ КУРСА ФИЗИКИ

Учебное пособие для самостоятельной работы и лабораторных занятий

Самара
Самарский государственный технический университет
2019

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИЗБРАННЫЕ ГЛАВЫ КУРСА ФИЗИКИ

Учебное пособие для самостоятельной работы и лабораторных занятий

Самара
Самарский государственный технический университет
2019

Издается по решению учёного совета СамГТУ (протокол № 8 от 28.03.2019 г.)

УДК 53(075.8)
ББК 22.3я73

Бухман Н.С.

Избранные главы курса физики [Электронный ресурс]**:** учеб. пособие для самостоятельной работы и лабораторных занятий / Н.С. Бухман, Л.М. Бухман, А.В. Пашин, А.В. Куликова, Е.И. Киселева, А.М. Гурьянов; под ред. Н.С. Бухмана и А.В. Пашина. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2019. – 1 электрон. опт. диск.

ISBN 978-5-7964-2239-7

Предназначено для студентов технических специальностей очной и заочной форм обучения.

Каждое описание снабжено подробным и хорошо иллюстрированным теоретическим введением и может использоваться как непосредственно в лабораторном практикуме, так и в самостоятельной работе студентов. Материал может быть полезен для самостоятельного изучения разделов курса физики, вынесенных на самостоятельное изучение, а также для использования при подготовке студентов к лабораторным работам по курсу «Физика» и при выполнении этих лабораторных работ.

Рисунки и фотографии принадлежат авторам, за исключением портретов известных физиков, заимствованных из Википедии (http://commons.wikimedia.org) в качестве общественного достояния. Основная часть фотографий установок сделана проф. Н.С. Бухманом и доц. А.В. Пашиным.

Минимальные системные требования:
Windows XP, MS Office, Adobe Acrobat Reader

ISBN 978-5-7964-2239-7

© Авторы, 2019
© Самарский государственный технический университет, 2019

ПРЕДИСЛОВИЕ

Поскольку физика является основой современной научной картины мира, курс физики традиционно считается обязательным элементом высшего образования в технических специальностях вузов.

К сожалению, постоянное снижение количества лекционных часов, отводимых учебными планами на изучение курса физики, приводит к тому, что многие важные в теоретическом и прикладном отношении разделы курса физики на лекционных занятиях только упоминаются с рекомендацией «изучить самостоятельно». Формально такое требование лектора совершенно обоснованно, потому что не менее половины официальной трудоемкости дисциплины составляет именно самостоятельная внеаудиторная работа студентов. Тем не менее самостоятельное изучение того или иного вопроса по многотомному учебнику физики без конкретной и понятной студенту цели (прочитать то-то и то-то, сделать то-то и то-то, записать то-то и то-то, посчитать то-то и то-то) и без постоянного контроля со стороны преподавателя вряд ли способно привести к положительным результатам.

Вывод очевиден – необходимо создать учебное пособие для самостоятельной работы студентов, где были бы представлены конкретные разделы курса физики, изучение которых полностью или частично вынесено в раздел «самостоятельная работа». Это учебное пособие должно содержать не только подробное теоретическое изложение соответствующих тем, но и конкретные задания для студентов, а также вопросы по темам, к ответам на которые студент должен подготовиться самостоятельно и которые обязательно должны быть заданы преподавателем при проверке качества усвоения материала. Именно такое пособие и предлагается вниманию читателя.

Материал состоит из введения («Ошибки измерений. Абсолютные и относительные ошибки» (Н.С. Бухман)) и 19 глав, посвященных избранным вопросам курса физики:

«Корпускулярная и континуальная картина мира. Магдебургские полушария и воздушный колокол» (Н.С. Бухман и Л.М. Бухман),

«Свободное падение тел. Трубка Ньютона» (Н.С. Бухман и Л.М. Бухман), «Изучение затухающих колебаний» (Н.С. Бухман и Л.М. Бухман), «Магнетизм, рамка Эрстеда и великие объединения» (Н.С. Бухман и Л.М. Бухман), «Геометрическая оптика. Телескоп» (Н.С. Бухман и Л.М. Бухман), «Геометрическая оптика. Микроскоп» (Н.С. Бухман и Л.М. Бухман), «Поляризация света. Спин микрочастицы» (Н.С. Бухман и Л.М. Бухман), «Интерференция. Кольца Ньютона» (Н.С. Бухман и Л.М. Бухман), «Дифракция. Дифракционная решетка» (Н.С. Бухман и Л.М. Бухман), «Законы сохранения. Изучение столкновения тел» (А.М. Гурьянов), «Динамика вращательного движения» (Н.С. Бухман), «Модуль кручения тела. Определение модуля кручения с помощью крутильного маятника» (А.В. Куликова), «Модуль сдвига. Определения модуля сдвига на крутильном маятнике» (Е.И. Киселева), «Молекулярное строение вещества. Определение средней длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул воздуха» (А.В. Куликова), «Внутреннее трение. Определение вязкости жидкости методом Стокса» (Н.С. Бухман), «Равноускоренное движение. Определение ускорения свободного падения» (А.В. Пашин), «Абсолютная и относительная влажность. Определение относительной влажности воздуха» (Н.С. Бухман), «Зависимость сопротивления проводников от температуры. Определение температурного коэффициента сопротивления» (А.В. Пашин), «Магнитное поле Земли. Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли» (А.В. Пашин), а также приложения «Как измерять штангенциркулем и микрометром?» (Е.И. Киселева).

Каждая глава посвящена изучению какого-либо раздела физики, причем это изучение начинается с подробного изложения истории и теоретических основ соответствующей физической проблемы, ее практического значения и заканчивается описанием конкретной лабораторной работы, при выполнении которой студенту предстоит проверить на практике имеющуюся теорию. Поэтому в названии каждой главы упомянут и номер лабораторной работы, которую, возможно[1], придется

[1] «Возможно» – потому что читать книгу можно и без выполнения лабораторной работы.

выполнить студенту. Смысловая нагрузка у этих «исторически сложившихся» номеров точно такая же, как у номеров маршруток и автобусов, то есть никакая – это просто цифровой идентификатор соответствующей установки в лаборатории филиала СамГТУ в г. Белебее.

Поэтому данное учебное пособие следует использовать не только и не столько как практикум и пособие для самостоятельной работы, но и как сборник избранных лекций по наиболее важным в теоретическом и практическом отношении разделам курса физики.

Принятая в филиале СамГТУ в г. Белебее система выполнения лабораторных работ, при которой имеет место чередование занятий («изучение теоретической части работы + собеседование с преподавателем» – «выполнение лабораторной работы + ее сдача») позволяет студенту тщательно изучить теоретическую часть работы перед ее выполнением, что делает выполнение лабораторной работы осознанным и полезным. Поэтому каждая глава пособия снабжена подробным, развернутым и иллюстрированным теоретическим введением, обязательно содержащим историческую часть, а также списком вопросов для контроля и самоконтроля.

Такой подход позволяет наполнить конкретным содержанием понятие «самостоятельная работа студентов», на которую, как известно, ГОСом отводится примерно половина учебного времени. Ритмичный характер лабораторного практикума позволяет преподавателю практически непрерывно (раз в две недели) контролировать добросовестность и успешность самостоятельной работы студентов и при необходимости своевременно корректировать ее интенсивность. Студенты же после «растянутой» на весь семестр сдачи разделов курса, вынесенных на самостоятельное изучение, «автоматически» оказываются изучившими значительную часть курса физики под «практическим» углом зрения, что существенно облегчает их жизнь во время сессии.

Студенты должны понимать, что в данном пособии рассмотрены лишь некоторые, избранные вопросы общего курса физики. Целостное, последовательное и систематическое изложение курса физики приведено в ряде курсов, наиболее удачными из которых для наших

студентов мы считаем курсы [1-4]. Дополнительные сведения об изучаемых вопросах курса физики можно подчерпнуть в учебных пособиях [5-8].

Авторы считают, что в процессе освоения лабораторного практикума по физике обучающиеся должны не только практически ознакомиться с основными физическими законами и явлениями, но и научиться грамотно осуществлять измерения и правильно обрабатывать их результаты. Поэтому особенностью данного пособия является систематическое применение общепринятых методов статистической обработки результатов проведенных измерений.

При написании пособия использовалась информация из Википедии (http://ru.wikipedia.org), Большой советской энциклопедии (3-е изд., М., 1969-1978), Большой энциклопедии Кирилла и Мефодия (2006) и Энциклопедического словаря Брокгауза и Эфрона (СПб, 1890-1907).

ВВЕДЕНИЕ
ОШИБКИ ИЗМЕРЕНИЙ. АБСОЛЮТНЫЕ И ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ОШИБКИ

Измерением называется нахождение отношения (отношение – в смысле «дробь») между некоторой величиной и другой величиной, которая принята за единицу измерения. Например, если в результате взвешивания курицы выяснилось, что ее масса равна 1,56 кг, то это означает, что ее масса в 1,56 раз больше, чем масса эталона килограмма, хранящегося в Международном бюро мер и весов (расположенном в г. Севр близ Парижа) и представляющего собой некий вполне конкретный цилиндр диаметром и высотой 39,17 мм из платино-иридиевого сплава (90 % платины, 10 % иридия). В точности ли в 1,56 раз? Нет, конечно. Ведь любое измерение осуществляется с некоторой неточностью (погрешностью), которая называется **ошибкой измерения**. При любом измерении (даже абсолютно безошибочном) имеет место некоторая ошибка измерения. Полностью устранить ее невозможно – ее можно только оценить для того, чтобы знать величину возможного отклонения истинного значения измеренной физической величины от полученного в результате измерения.

Разумеется, ошибку измерения можно уменьшить, улучшив метод измерения или заменив измерительный прибор на более точный (и, естественно, более дорогой). Надо ли это делать – вопрос практический, потому что повышение точности измерений – недешевое удовольствие; в каждой реальной задаче обычно ограничиваются теми приборами и методами измерений, которые обеспечивают достаточную точность (во-первых) и требуют минимальных расходов на измерение (во-вторых).

Различают абсолютную и относительную ошибку измерения.

Абсолютная ошибка – это просто отклонение истинного значения измеряемой физической величины от измеренного значения. Если, например, мы уверены, что истинное значение массы вышеупомянутой курицы отличается от измеренного не более чем на 20 г, то

абсолютная ошибка измерения равна 20 г = 0,02 кг и результат нашего измерения может быть записан как $(1{,}56 \pm 0{,}02)$ кг. Эта запись означает, что, по нашему мнению, наиболее вероятным значением массы является 1,56 кг, а величина абсолютной ошибки, вероятно, не превосходит 0,02 кг, то есть истинное значение массы курицы наверняка находится в интервале от 1,56-0,02=1,54 кг до 1,56+0,02=1,58 кг.

Относительной ошибкой измерения величины x называется отношение абсолютной ошибки измерения Δx к измеренному значению $\bar{x}$:

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{\bar{x}}. \qquad (1)$$

Поскольку физическая величина и абсолютная ошибка ее измерения измеряются в одних и тех же единицах, относительная ошибка измерения – безразмерная величина. Она измеряется «ни в чем» (как любят говорить студенты), или в долях, или (если умножить долю на 100 %) – в процентах.

Какой ошибкой удобнее пользоваться – абсолютной или относительной? Разумеется, обеими, при необходимости переходя от одной к другой с помощью простых формул

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{\bar{x}}, \ \Delta x = \varepsilon_x \bar{x}. \qquad (2)$$

В нашем примере с курицей $m = (1{,}56 \pm 0{,}02)$ кг; $\bar{m} = 1{,}56$ кг, $\Delta m = 0{,}02$ кг, $\varepsilon_m = 0{,}02/1{,}56 \approx 0{,}012820512 \approx 0{,}01$=1 %.

Округление

В предыдущей строке мы встретились с округлением, которое неизбежно сопровождает любые физические и технические расчеты. При округлении, как и в любом другом деле, следует руководствоваться здравым смыслом – лишнее отбрасывать, нужное – оставлять. Пусть, например, кто-нибудь сообщил вам, что масса курицы – $m = (1{,}5642 \pm 0{,}0231)$ кг. Разумна ли эта запись? Нет, конечно. Ведь если вы наверняка ошиблись (как сами же пишете) примерно на 0,0231 кг

(то есть на 23,1 г), то писать наиболее вероятное значение в виде 1,5642 кг = 1564,2 г (то есть не только с граммами, но и с десятыми долями граммов) по меньшей мере странно – вы все равно на самом деле не знаете, четверка стоит после шестерки в 1,5642 или, например, единица, и уж тем более не знаете, что стоит после четверки. Зачем же писать явную «липу» и замусоривать сознание читателя, сообщая о Ваших результатах? Конечно же, следует округлить наиболее вероятное значение измеряемой величины с учетом ошибки измерения – до 1,56 кг. А уж если вы округлили наиболее вероятное значение до сотых, следует также округлить и оценку ошибки измерения, записав ответ в виде $m = (1{,}56 \pm 0{,}02)$ кг. Следует ли округлять дальше, например, до $m = (1{,}6 \pm 0{,}0)$ кг? Конечно, нет – ведь при этом вы не только полностью потеряете оценку ошибки измерения, но и потеряете сотые в Вашем результате. А если Ваши измерения действительно имеют точность 0,02 кг, то просто «по-тупому» терять (методом округления) сотые доли килограмма, добытые вами «потом и кровью» в результате тщательных, трудоемких и, возможно, дорогостоящих измерений – недопустимо.

Важно иметь в виду, что этой же «стратегией округления» руководствуетесь не только вы, но и все прочие грамотные «измерители». Поэтому по характеру производимых ими округлений обычно можно судить о точности их результатов даже в том случае, когда в явном виде эта точность по каким-то причинам не указана. Если кто-нибудь указал, что $m = 1{,}56$ кг, то (при условии, что этот измеритель грамотен) ясно, что ошибка его измерений меньше, чем 0,1 кг (ведь в случае ошибки 0,1 кг он записал бы $m = 1{,}6$ кг и не пудрил бы вам мозги сотыми долями килограмма, за которые он все равно «не отвечает»), и больше, чем 0,001 кг (ведь в случае ошибки 0,001 кг он не стал бы своими руками огрублять свои же «родные» результаты и записал бы что-нибудь типа $m = 1{,}563$ кг).

Поэтому в физике и технике (в отличие от математики) 1,56 кг, 1,560 кг и 1,5600 кг – это разные вещи. Запись «1,56 кг» означает «примерно между 1,55 и 1,57 кг», запись «1,560 кг» означает «при-

мерно между 1,559 и 1,561 кг», а запись «1,5600 кг» означает «примерно между 1,5599 и 1,5601 кг». Разница существенная. Помните об этом, когда сдаете преподавателю результат типа «0,1 А» вместо «0,10 А» на том основании, что «там же все равно ноль». Запись типа «0,1 А» означает «от 0 до 0,2 А», то есть в переводе на русский «если там есть какой-нибудь ток (а может, и нет его вовсе), то он меньше 0,2 А». Ясно, что измерениям с такой «точностью» самое место в мусорной урне...

Классификация ошибок

По характеру возникновения и проявления ошибки делятся на **систематические, случайные и промахи** (рис. 1).

Рис. 1. Классификация ошибок

Систематическими ошибками называются ошибки, которые при повторном измерении сохраняют свой знак и величину. Эти ошибки связаны с несовершенством используемых приборов или методов измерения.

Ясно, например, что при изготовлении амперметра на заводе его реальные параметры неизбежно отклоняются от «запроектированных» и он показывает не совсем то, что должен бы, то есть имеется некоторая приборная погрешность, своя у каждого отдельного ам-

перметра. Например, при токе 0,264 Ампера он показывает 0, 266 А, а при токе 0, 327 А – 0,329 А. Следует ли считать такой прибор неисправным и можно ли им пользоваться? Конечно, можно, если разница между истинным и измеренным значением силы тока в 0,02 А для Ваших целей несущественна. Просто нужно иметь в виду, что систематическая ошибка Ваших измерений силы тока – 0,02 А. Ну, а если такая точность вас не устраивает, то следует купить более точный (и раз в 10 более дорогой) прибор и пользоваться им.

Итак, систематическую ошибку прибора можно уменьшить, только заменив прибор более точным. Экспериментально оценить систематическую ошибку данного прибора можно, сравнив этот прибор с более точным (это называется «поверка приборов»). Для того чтобы «теоретически» оценить систематическую ошибку прибора, следует обратиться к заводской документации на этот прибор – в ней она обязательно указана. А если документации нет? На помощь, как всегда, приходит здравый смысл и изложенные выше правила округления. Пусть, например, некий амперметр (по заводскому стандарту) имеет приборную погрешность 0,1 А. Как вы думаете, приличный завод станет снабжать этот прибор шкалой с делениями 0,01 А? Нет, конечно – ведь это было бы явным надувательством и самодискредитацией торговой марки. Потребитель таких «шуток» не прощает. А станет ли приличный завод ограничиваться делениями в 1 А (без десятых)? Тоже нет – ведь если прибор «тянет» десятые доли Ампера, то не снабдить его шкалой, по которой их можно прочитать – явные «деньги на ветер». Те же самые соображения применимы и к цифровым приборам, показания которых считываются с дисплея. Поэтому оценить номинальную систематическую погрешность прибора можно, просто внимательно на него поглядев и посмотрев, что он вам «показывает». Если прибор «показывает» 10,2 А, то он наверняка не «чувствует» сотых долей Ампера и наверняка измеряет (по крайней мере, в исправном состоянии) десятые доли Ампера, то есть его систематическая ошибка – примерно 0,1 А.

Случайные ошибки – это ошибки, величина и знак которых изменяются от измерения к измерению. В среднем они равны нулю. Убедиться в наличии случайных ошибок в данном измерении можно, проводя его несколько раз (без изменения условий эксперимента). Если мы все время будем получать одно и то же значение – случайных ошибок нет. Если же мы каждый раз будем получать новое значение – случайные ошибки присутствуют. Случайные ошибки можно уменьшить (теоретически – до нуля), а также оценить их величину путем проведения многократных измерений с последующим усреднением результатов. Как это делать – целая наука (называется она «математическая статистика»), и некоторые результаты этой науки описаны в следующем пункте.

Грубые ошибки (промахи) возникают тогда, когда при измерениях действительно совершена ошибка (не в смысле погрешности измерений, а в смысле именно ошибки, которую допускать не следовало бы). Например, если вы при измерении силы тока измерили силу тока не в том участке цепи, в котором собирались. Или если при измерении веса тела случайно оперлись на весы. Ясно, что результаты измерений, проведенных с грубыми ошибками, должны быть исключены из обработки. Заметить грубые ошибки в результатах уже проведенных измерений можно в случае, когда они настолько «выбиваются» из общего ряда, что верить им «ну никак нельзя». Например, если в результате измерений диаметр шкива (на глаз – «сантиметр, ну, может, два») оказался равен 15 см.

В любом реальном измерении имеется и случайная, и систематическая ошибка. В принципе, учитывать надо и ту, и другую. Это делается по формуле

$$\Delta x_{\text{сумм}} = \sqrt{\Delta x_{\text{случ}}^2 + \Delta x_{\text{сист}}^2}\,. \qquad (3)$$

«Просто сложение» при суммировании ошибок применять не следует потому, что независимые друг от друга ошибки могут не только прибавляться друг к другу, но и вычитаться, причем сказать

заранее, что произойдет в данном конкретном случае, невозможно. Формула (3) как раз и учитывает «в среднем» это обстоятельство. Впрочем, на практике формула (3) применяется редко, потому что ошибки не столько «вычисляются», сколько «оцениваются», то есть вычисляются «ну очень приближенно». А в этом случае мы не сильно ошибемся, взяв в качестве суммарной ошибки просто максимальную из случайной и систематической ошибки. Если заранее ясно (преподавателям), что в данном измерении доминирует систематическая ошибка, то в описании лабораторной работы вам предложат вычислить именно ее; если же основной ошибкой является случайная – вас попросят провести измерения многократно (для оценки случайной ошибки это необходимо) и оценить случайную ошибку. Как это делать – описано в следующем пункте.

Оценка случайных ошибок измерения

Для понимания «смысла происходящего» нам придется познакомиться с некоторыми понятиями теории вероятности. Эта математическая наука имеет дело с «возможными» событиями, то есть с событиями, которые могут произойти, а могут и не произойти. Например, при бросании монеты («испытании») она может упасть вверх «орлом» или «решкой» – любое из этих событий может произойти, а может и не произойти.

Частотой события в серии испытаний называется доля испытаний, в которых произошло это событие. Если, например, в серии из 10 бросаний монеты «орел» выпал 6 раз, то частота выпадения орла в данной серии испытаний равна 6/10=0,6.

Вероятностью события называется его «теоретическая» частота, то есть предел, к которому стремится частота этого события при неограниченном увеличении числа испытаний в серии (**частотное определение вероятности**) или, другими словами, «средняя» частота этого события. Все знают, что «в среднем» «орел» будет выпадать в половине случаев и вероятность выпадения «орла» при бросании монеты равна 0,5 (=50 %).

При измерении любой физической величины x на результат измерения оказывает влияние большое количество слабых неконтролируемых факторов (напряжение в сети в момент измерения не точно 220 В, птичка пролетела, кнопку нажали рановато немного, на первом этаже дверью хлопнули, ветер подул, пылинка села на весы, луч солнца упал на установку и так далее). Все вместе эти факторы оказывают влияние на результат измерений – в итоге результат каждого отдельного измерения под номером $i = 1,2,...,n$ $(x_1, x_2, x_3,.., x_n)$ оказывается случайным числом и при каждом отдельном измерении мы получаем новое значение одной и той же физической величины.

Ясно, что в результате случайной ошибки примерно половина наших результатов будет «с перелетом», а половина – «с недолетом» и для уменьшения влияния случайной ошибки следует просто усреднить результаты всех измерений, то есть найти так называемое «**эмпирическое среднее**» измеренных значений:

$$\overline{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \,. \tag{4}$$

Существенно, что эмпирическое среднее серии измерений – тоже случайное число, и оно тоже будет отличаться от истинного значения измеряемой величины. Ведь ясно, что после второй серии таких же измерений второе «эмпирическое среднее» будет другим, после третьей серии – опять другим и так далее.

Для оценки отклонения эмпирического среднего серии измерений от истинного значения измеряемой величины используют так называемую «исправленную стандартную ошибку эмпирического среднего». Эта величина рассчитывается по формуле

$$s_{\overline{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n} \Delta x_i^2} \,, \tag{5}$$

где $\Delta x_i = x_i - \overline{x}$ отклонение каждого отдельного измерения от их общего эмпирического среднего. Часто исправленную стандартную

ошибку эмпирического среднего называют просто стандартной ошибкой. Пример расчета случайной ошибки в серии из пяти измерений приведен в табл. 1.

Таблица 1

Пример расчета случайной ошибки измерения

Номер измерения	Значения отдельных измерений	Эмпирическое среднее для серии измерений	Отклонение отдельных результатов от эмпирического среднего	Стандартная ошибка	Полуширина доверительного интервала при уровне доверия 68 %
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
1	9,2	9,76	0,56	0,18	0,20
2	10,1		0,34		
3	10,2		0,44		
4	9,7		0,06		
5	9,6		0,16		

В этой таблице в первом столбце приведены номера проведенных измерений (их было пять), во втором – полученные при измерении значения. В третьем столбце приведено эмпирическое среднее:

$$9{,}76=(9{,}2+10{,}1+10{,}2+9{,}7+9{,}6)/5.$$

В четвертом – отклонения отдельных измерений от эмпирического среднего:

$$0{,}56=|9{,}2-9{,}76|;\ 0{,}34=|10{,}1-9{,}76|;\ 0{,}44=|10{,}2-9{,}76|;\ 0{,}06=|9{,}7-9{,}76|;$$
$$0{,}16=|9{,}6-9{,}76|.$$

В пятом – исправленное среднеквадратичное отклонение эмпирического среднего:

$$0{,}18=\sqrt{\frac{0{,}56^2+0{,}34^2+0{,}44^2+0{,}06^2+0{,}16^2}{5(5-1)}}.$$

Окончательный ответ (после разумного округления[2]) может быть записан в виде $x = 9{,}8 \pm 0{,}2$.

Что это означает? Это означает, что наивероятнейшим значением измеренной величины мы считаем число 9,8, а вероятным значением ошибки измерения – число 0,2. Другими словами, мы считаем, что истинное значение измеряемой физической величины находится в интервале от 9,6 до 10,0.

Может ли истинное значение измеряемой величины находиться вне этого интервала? Увы, может – случайность есть случайность. Конечно, при бросании монеты пять «орлов» подряд выпадают редко, но все же иногда выпадают (в среднем в 1 из 64 случаев). Десять «орлов» подряд выпадают еще реже, но иногда случается и такое (в среднем в 1 из 1024 случаев). Поэтому иногда (правда, не очень часто) реальная ошибка измерения может быть и больше стандартной. Чтобы навести порядок с этими «иногда», «часто» и «редко», в математической статистике введены понятия «доверительная вероятность» и «доверительный интервал».

Доверительным интервалом называется интервал возможных значений измеряемой величины, в который истинное значение этой величины попадает с некоторой вероятностью, именуемой **доверительной вероятностью (она же – «уровень доверия»)**. Пусть, например, доверительный интервал для величины x есть (9,6;10,0) (или, что то же самое, $x = 9{,}8 \pm 0{,}2$), а соответствующая доверительная вероятность – 0,61=61 %. Это означает, что с вероятностью 0,61 (в среднем в 61 случае из 100) истинное значение величины находится в этом интервале, а с вероятностью 0,39 (в среднем в 39 случаях из 100) – «вылезает» из него влево или вправо. Если вы считаете, что ошибаться 4 раза из 10 – это для вас чересчур много, то вам необхо-

[2] Обратите внимание – в промежуточных вычислениях мы округляли до сотых; окончательное округление (до десятых) проведено в самом конце. Это делается для того, чтобы «не париться» еще и с ошибками округления и быть уверенными в том, что они пренебрежимо малы по сравнению с ошибками измерения.

димо увеличить доверительную вероятность. Правда, доверительный интервал при этом тоже увеличится и Ваш прогноз по поводу истинного значения измеряемой величины станет не только более надежен, но и менее конкретен. В данном конкретном случае расширение доверительного интервала в два раза (до (9,4;10,2), $x = 9{,}8 \pm 0{,}4$) приведет к росту доверительной вероятности до 0,86=86 % и уменьшению вероятности ошибки до 0,14=14 %. Теперь вы будете давать более туманный прогноз, но зато и ошибаться будете реже (в среднем в 14 случаях из 100). Нужно ли вам это? Дело ваше – математическая статистика за вас на этот вопрос ответить просто не может. Главное заключается в том, что снизить вероятность ошибки до нуля (при фиксированном количестве измерений!) можно только одним способом – расширить доверительный интервал до бесконечности[3]. На практике обычно (в зависимости от «цены ошибки») используют несколько общеупотребительных уровней доверия: 50 %, 68 %, 95 % и 99 %. Мы будем пользоваться наиболее употребительной доверительной вероятностью[4] 68 %.

Полуширина доверительного интервала может быть найдена по формуле

$$\Delta x = s_{\bar{x}} t_{p,n-1}, \tag{6}$$

где $s_{\bar{x}}$ – стандартная ошибка для эмпирического среднего (по формуле (5)), а $t_{p,k}$ – так называемые критические точки распределения Стьюдента с доверительной вероятностью p и числом степеней свободы k. Эти критические точки (для доверительных вероятностей 68 %, 95 % и 99 %) приведены в табл. 2.

---

[3] На эту тему есть две пословицы – «Попал пальцем в небо» и «Не ошибается только тот, кто ничего не делает» – обе о доверительной вероятности в 100 %.

[4] Большие доверительные вероятности (и более широкие доверительные интервалы) используются в тех случаях, когда «цена ошибки» достаточно высока и ошибаться очень не хочется. К сожалению, совсем не ошибаться невозможно в принципе.

Нетрудно заметить, что при «нашей» доверительной вероятности 68 % полуширина доверительного интервала с ростом количества измерений n приближается к стандартной ошибке – при n=3 отличие составляет около 30 %, а уже при n=6 – всего 10 %, что с учетом округления несущественно. Поэтому при n>6 можно пользоваться приближенной формулой $\Delta x \approx s_{\bar{x}}$.

Таблица 2

Критические точки распределения Стьюдента $t_{p,n-1}$ при заданном количестве измерений n=2,3,...,10,∞ для заданной доверительной вероятности p=68 %, p=95 % и p=99 %, а также доверительная вероятность для доверительного интервала $(\bar{x} - s_{\bar{x}}, \bar{x} + s_{\bar{x}})$

n	$p = 0{,}68$	$p = 0{,}95$	$p = 0{,}99$	Доверительная вероятность для доверительного интервала $(\bar{x} - s_{\bar{x}}, \bar{x} + s_{\bar{x}})$
2	1,818993	12,7062	636,6192	0,5
3	1,311578	4,302653	31,59905	0,577350269
4	1,188929	3,182446	12,92398	0,608997781
5	1,134397	2,776445	8,610302	0,626099034
6	1,103668	2,570582	6,868827	0,636782532
7	1,083976	2,446912	5,958816	0,644082316
8	1,070287	2,364624	5,407883	0,649383337
9	1,060224	2,306004	5,041305	0,653406493
10	1,052515	2,262157	4,780913	0,656563604
∞	$0{,}994458 \approx 1$	$1{,}959964 \approx 2$	$3{,}290527 \approx 3$	0,682689

Есть и еще одно дополнительное соображение – ведь можно «зафиксировать» не доверительную вероятность, а доверительный интервал – например, принять за доверительный интервал $(\bar{x} - s_{\bar{x}}, \bar{x} + s_{\bar{x}})$. В этом случае доверительная вероятность при небольшом количестве измерений будет ниже, чем при большом, но не намного (см. последний столбец табл. 2). Она изменяется всего от 50 % (при n=2) до 68 % (при бесконечном n). Поэтому на практике с

критическими точками распределения Стьюдента «возятся» не так уж часто – чаще просто указывают «стандартную ошибку» $s_{\bar{x}}$ и оставляют всю эту «возню» всем желающим – тем более что по стандартной ошибке каждый желающий может сосчитать доверительную вероятность для любого доверительного интервала или доверительный интервал для любой доверительной вероятности.

Впрочем, к вам это облегчение не относится – вам при n<6 (то есть практически всегда – ни в одной работе нашего практикума не предполагается проведение десятикратных измерений одного и того же) полагается считать случайную ошибку по формуле (7). Теперь мы можем, наконец, заполнить последний (шестой) столбец табл. 1. У нас стандартная ошибка равна 0,18 (см. столбец 5 табл. 1), критическая точка распределения Стьюдента $t_{0,68;5-1}$=1,13 (табл. 2). Следовательно, полуширина доверительного интервала при уровне доверия 68 % $\Delta x = s_{\bar{x}} \times t_{p,n-1}$=0,20. Окончательный ответ после округления $x = 9{,}8 \pm 0{,}2$, как и следовало ожидать, не изменился ☺.

В заключение обсудим еще один важный вопрос: можно ли уменьшить ошибку случайных измерений без изменения методов измерения? Оказывается, можно, причем (в принципе) до нуля. Чтобы понять, как это возможно, посмотрим внимательно, что происходит в формуле (5) с ростом количества измерений. Пусть, например, количество измерений (n) увеличилось в 10 раз. В этом случае числитель дроби под знаком радикала увеличится примерно в 10 раз (слагаемых будет в 10 раз больше, а знаменатель – примерно в 100 раз (при больших n имеем $n(n-1) \approx n^2$). В результате дробь под знаком радикала уменьшится примерно в 10 раз, а стандартная ошибка – в $\sqrt{10} \approx 3$ раза. Таким образом, увеличение количества измерений в k раз сужает доверительный интервал (при той же самой доверительной вероятности) в $\sqrt{k}$ раз. Поэтому в принципе случайную ошибку можно сделать сколь угодно малой – достаточно только запастись терпением и повторять измерения снова, снова и снова. Впрочем, на практике этим пользуются

нечасто – обычно не так уж много желающих для уменьшения ошибки в 10 раз увеличивать количество измерений в 100 раз, а для уменьшения ошибки в 100 раз – увеличивать количество измерений в 10000 раз. Обычно (при подозрении на наличие случайной ошибки) измерения проводят 3–5 раз – не для повышения точности, а просто для того, чтобы эту случайную ошибку оценить.

Ошибки косвенных измерений

До сих пор речь шла о так называемых **прямых** измерениях, когда мы непосредственно измеряли именно ту физическую величину, которая нас интересовала. Но очень часто интересующая нас физическая величина находится не «измерением», а «по формуле», в которую подставляются измеренные значения. Например, для измерения ускорения свободного падения надо измерить время падения t, высоту падения h и затем воспользоваться формулой $g = \frac{2h}{t^2}$. Такие измерения называются **косвенными**.

В общем случае речь идет о следующей задаче.

Имеется функциональная зависимость $y = f(x_1, x_2, ..., x_n)$, причем ошибки измерения величин $x_1, x_2, ..., x_n$ равны $\Delta x_1, \Delta x_2, ..., \Delta x_n$. Требуется найти ошибку измерения величины y.

Для решения этой задачи можно воспользоваться формулой конечных приращений (которая вам уже известна или скоро будет известна из математики[5])

$$\Delta y = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)\Delta x_1 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)\Delta x_2 + ... + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)\Delta x_n \qquad (7)$$

[5] Напомним, что $\frac{\partial f}{\partial x_1}$ – это так называемая частная производная по переменной x_1, которая отличается от обычной только тем, что при дифференцировании по x_1 все остальные переменные считаются постоянными (то есть параметрами).

и случайностью сочетания разных знаков ошибок $\Delta x_1, \Delta x_2, ..., \Delta x_n$. В результате имеем (как и в формуле (3))

$$\Delta y = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)\Delta x_1\right]^2 + \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)\Delta x_2\right]^2 + ... + \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)\Delta x_n\right]^2}. \qquad (8)$$

Выглядит эта формула, конечно, страшновато, но на самом деле ничего страшного в ней нет. Для примера применим ее к формуле для расчета ускорения свободного падения по высоте и времени падения:

$$g = \frac{2h}{t^2}. \qquad (9)$$

В данном случае вместо y у нас g, вместо $x_1 - h$, вместо $x_2 - t$, вместо $y = f(x_1, x_2, ..., x_n)$ $g = \frac{2h}{t^2}$. Имеем $\frac{\partial g}{\partial h} = \frac{2}{t^2}$, $\frac{\partial g}{\partial t} = -\frac{4h}{t^3}$ и

$$\Delta g = \sqrt{\left[\left(\frac{2}{t^2}\right)\Delta h\right]^2 + \left[\left(-\frac{4h}{t^3}\right)\Delta t\right]^2}. \qquad (10)$$

Если, например, наш грузик падал с высоты 1 м (h=1 м) 0,47 секунд (t=0,47) и если погрешность измерения высоты у вас 0,5 см (Δh=0,005 м), а погрешность измерения времени 0,01 сек (Δt=0,01 сек), то по формуле (9) g=9,88, а по формуле (10) Δg=0,44. Окончательный результат: $g = (9{,}9 \pm 0{,}4)$ м/с^2.

Для наиболее распространенных случаев общую формулу (8) можно упростить. Пусть, например, интересующая нас величина получается путем суммирования измеряемых величин с некоторыми коэффициентами:

$$y = a_1 x_1 + a_2 x_2 + ... + a_n x_n. \qquad (11)$$

Тогда $\frac{\partial f}{\partial x_i} = a_i$ и

$$\Delta y = \sqrt{[a_1 \Delta x_1]^2 + [a_2 \Delta x_2]^2 + ... + [a_n \Delta x_n]^2}. \qquad (12)$$

В случае «просто суммирования»

$$y = x_1 + x_2 + ... + x_n; \tag{13}$$

$$\Delta y = \sqrt{[\Delta x_1]^2 + [\Delta x_2]^2 + ... + [\Delta x_n]^2} \tag{14}$$

абсолютная ошибка суммы равна квадратному корню из суммы квадратов абсолютной ошибки слагаемых.

Если же интересующая нас величина получается путем перемножения константы и степеней измеряемых величин

$$y = Ax_1^{k_1} x_2^{k_2} ... x_n^{k_n}, \tag{15}$$

то применение формулы (8) (после упрощения и введения вместо абсолютных ошибок относительных) дает

$$\varepsilon_y = \sqrt{[k_1\varepsilon_{x_1}]^2 + [k_2\varepsilon_{x_2}]^2 + ... + [k_n\varepsilon_{x_n}]^2}. \tag{16}$$

Использование в формуле (16) относительных погрешностей вместо абсолютных связано с тем, что в этом виде формула выглядит особенно просто. Рекомендуем вам запомнить эту формулу, потому что ее, честно говоря, вам хватит на все лабораторные работы нашего практикума – на практике что-нибудь сложнее формулы (16) встречается редко.

Для примера применим ее (16) к уже использованной формуле для расчета ускорения свободного падения по высоте и времени падения (9) $g = \frac{2h}{t^2}$.

В данном случае вместо y у нас g, вместо x_1 – h, вместо x_2 – t, $A = 2$, $g = \frac{2h}{t^2} = 2h^1t^{-2}$, то есть k_1=1, k_2=-2.

Тогда

$$\varepsilon_g = \sqrt{[k_1\varepsilon_h]^2 + [k_2\varepsilon_t]^2} = \sqrt{[\varepsilon_h]^2 + [2\varepsilon_t]^2}. \tag{17}$$

Пусть по-прежнему высота падения грузика 1 м (h=1 м), время падения 0,45 секунд (t=0,45) и абсолютная погрешность измерения высоты 0,5 см (Δh=0,005 м, относительная погрешность ε_h =0,005/1=0,005), а погрешность измерения времени 0,01 сек (Δt=0,01 сек, относительная погрешность ε_t =0,01/0,45=0,022). Тогда по формуле (9) g=9,88, а по формуле (17) $\varepsilon_g = \sqrt{0{,}005^2 + (2 \times 0{,}022)^2} \approx 0{,}044$. Тогда $\Delta g = 9{,}88 \times 0{,}044 \approx 0{,}043$. Окончательный результат: $g = (9{,}9 \pm 0{,}4)$ м/с^2. Конечно же, он совпадает с результатом, полученным непосредственно по формуле (10), но вычисления гораздо проще.

1. КОРПУСКУЛЯРНАЯ И КОНТИНУАЛЬНАЯ КАРТИНА МИРА. МАГДЕБУРГСКИЕ ПОЛУШАРИЯ И ВОЗДУШНЫЙ КОЛОКОЛ

Основы теории

Материал данной главы пригодится вам при выполнении **экспериментального задания № 1-0 [6,7].** Это экспериментальное задание является прекрасной экспериментальной иллюстрацией изложенного в настоящей главе теоретического материала.

История борьбы корпускулярных и континуальных представлений о природе вещества уходит своими корнями в глубь тысячелетий. Первые дискуссии на эту тему вели, вероятно, еще древнегреческие философы. Так, например, великий древнегреческий философ Аристотель (и великое множество его последователей) считали, что пустоты нет, потому что она немыслима. А есть только бесконечно делимое (то есть непрерывное) вещество, в чем и состоит смысл **континуального (полевого) подхода** к теории строения материи.

А не менее великий древнегреческий философ Демокрит (а также его предшественник Левкипп и последователи Эпикур и Тит Лукреций Кар) считали, что нет ничего, кроме атомов и пустоты. Потому что представить себе возможность движения без пустоты невозможно. По их мнению, в нашем мире нет ничего, кроме атомов и пустоты, в чем и состоит смысл **корпускулярного подхода** к теории строения материи.

Мы теперь знаем, что более правильной точки зрения придерживался все-таки Демокрит, ведь вещество действительно состоит из атомов. Можно считать, что Демокрит предвосхитил корпускулярную картину мира. Поэтому в его последователи можно зачислить не только Эпикура и Тита Лукреция Кара, но даже и сэра Исаака Ньютона собственной персоной. Правда, сэр Исаак гипотез не измышлял (как он сам неоднократно и весьма категорически заявлял), но на деле очень умело пользовался понятием пустоты и корпускул в духе Демокрита.

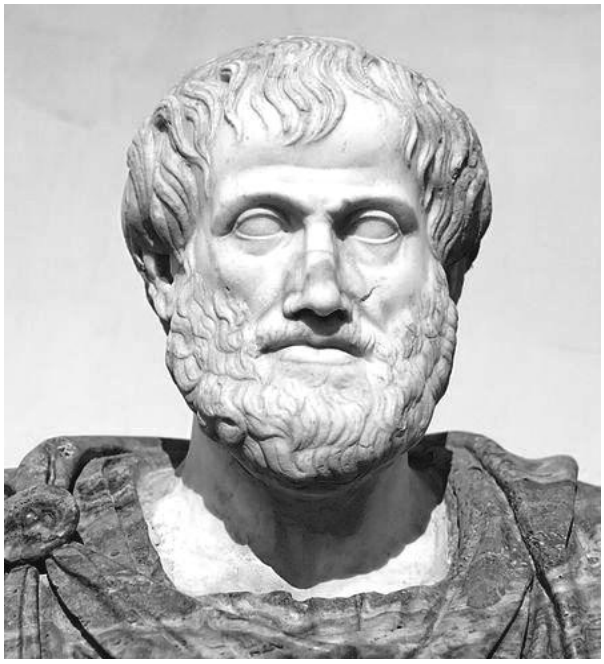


Рис. 1.1. Аристотель. Древнеримская копия древнегреческой скульптуры

Рис. 1.2. Демокрит. Каноническое изображение[6]

Не следует слишком строго судить и Аристотеля, ведь при желании всегда можно считать, что он предвосхитил более прогрессивную, чем корпускулярная, полевую (континуальную) картину мира. Поэтому его последователями можно считать не только средневековых схоластов, но даже и таких титанов мысли, как Майкла Фарадея и Джеймса Клерка Максвелла.

А если вспомнить про еще более прогрессивный и вполне современный **корпускулярно-волновой дуализм**[7], то станет ясно, что правы были оба.

---

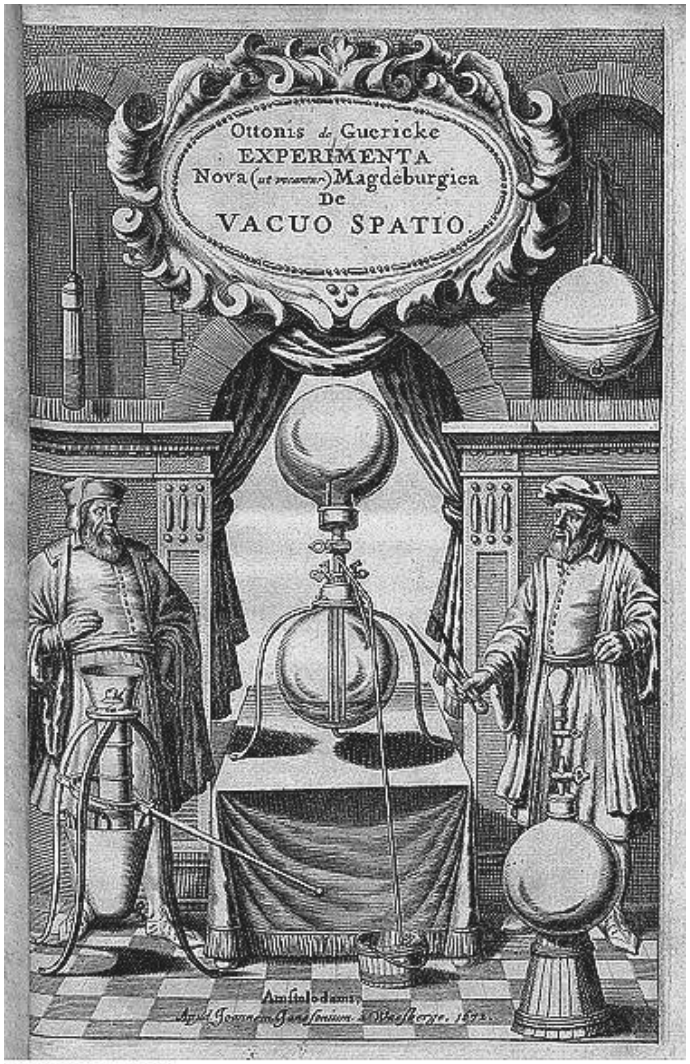
[6] «Каноническое» означает «официальное». Вряд ли оно имеет отношение к реальной внешности изображаемого.

[7] **Корпускулярно-волновой дуализм** – общепринятое ныне воззрение о двойственности (дуалистичности) природы любой частицы, которая одновременно является и частицей, и волной.

Рис. 1.3. Отто фон Герике

Тем не менее споры о возможности или невозможности пустоты продолжались очень долго – ведь от того, какая из этих точек зрения правильная, зависит ответ на фундаментальный вопрос о дискретном (корпускулярном) или непрерывном (континуальном) строении всего нашего мира. Свою лепту в доказательство возможности пустоты внес и известный немецкий естествоиспытатель, политик и дипломат Отто фон Герике (Guericke).

Стремясь доказать существование вакуума, Герике в 1650 году изобрёл **воздушный насос** (рис. 1.4). В ряде опытов он доказал существование давления воздуха (опыт с **«магдебургскими полушариями»**, рис. 1.5), установил его упругость, весомость, способность поддерживать горение, проводить звук, наличие в воздухе паров воды. Герике впервые (в 1660 году) построил **водяной барометр** и использовал его для предсказания погоды.



Quelle: Deutsche Fotothek

Рис. 1.4. Титульный лист книги Герике.
Воздушный насос – в левом нижнем углу

Наиболее известен опыт Герике с так называемыми «магдебургскими полушариями». В эксперименте использовались два медных полушария около 14 дюймов (35,5 см) в диаметре, полые внутри и прижатые друг к другу. Из собранной сферы выкачивался воздух, и полушария удерживались в прижатом друг к другу состоянии давлением внешней атмосферы.

В 1654 г. в Регенсбурге фон Герике продемонстрировал эксперимент рейхстагу в присутствии императора Фердинанда III. После выкачивания из сферы воздуха 16 лошадей (по 8 с каждой стороны) не смогли разорвать полушария. В 1656 г. Герике повторял эксперимент в Магдебурге, а 1663 г. – в Берлине с 24 лошадьми. Оригинальные (то есть «те самые») полушария хранятся в Немецком музее в Мюнхене.

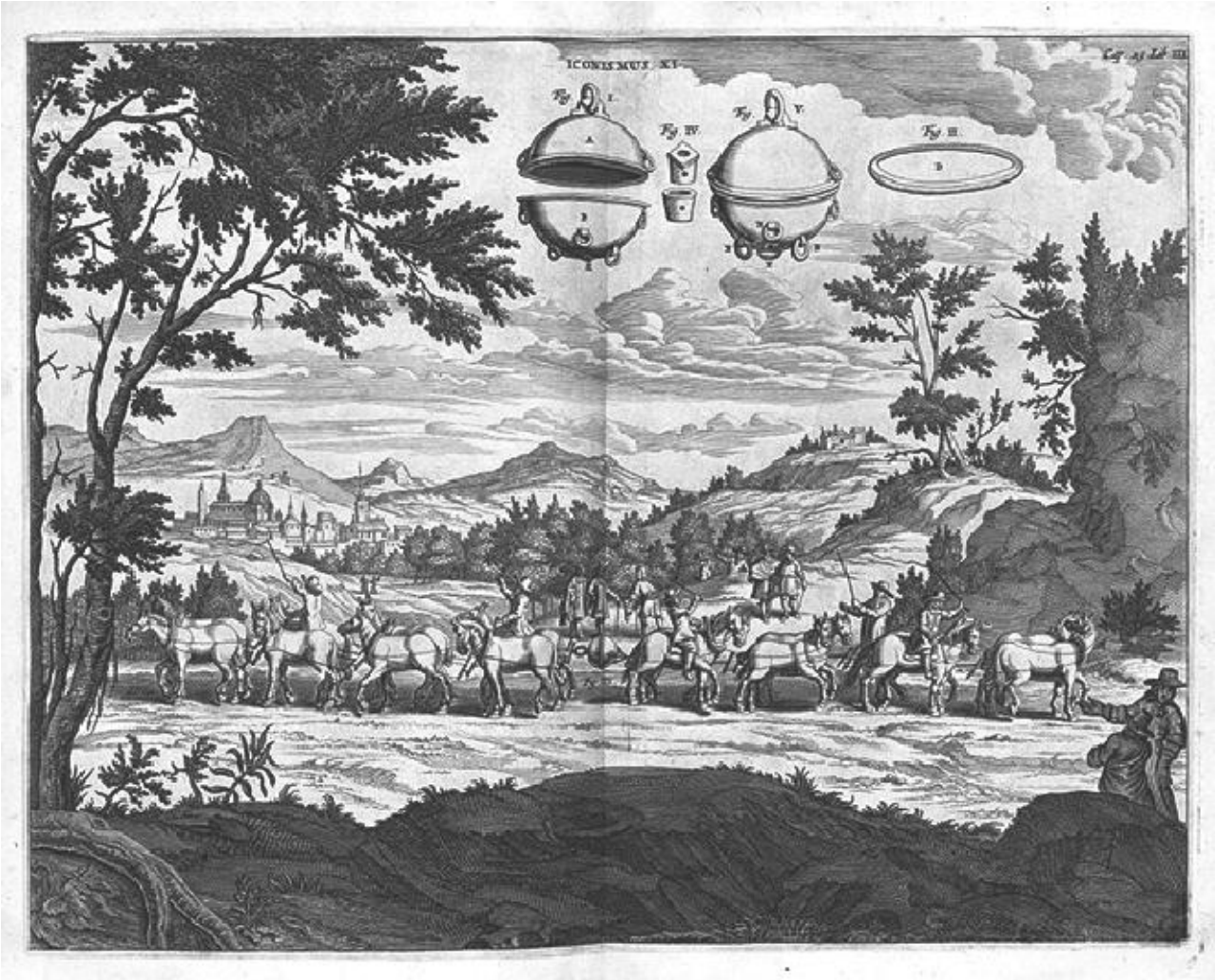


Рис. 1.5. Рисунок Гаспара Шотта «Магдебургские полушария»

Именно этот исторический эксперимент вам и предстоит провести (упражнение 1). Вы можете (с полным основанием) считать, что экспериментально проверяете правомерность атомистической гипотезы строения вещества и опровергаете самого Аристотеля, ведь он же считал пустоту невозможной. Кроме того, вам придется воспроизвести опыт Герике с воздушным колоколом (упражнение 2) и убедиться, что звук, в отличие от света, в вакууме не распространяется. И, наконец, вам придется заняться «кипячением холодной воды» (упражнение 3) и убедиться в том, что кипение зависит не только от температуры, но и от внешнего давления – в вакууме, например, жидкость просто «невозможна»: она просто кипит до тех пор, пока не испарится или не замерзнет и превратится в твердое тело.

Упражнение 1. Магдебургские полушария

Описание установки

В нашем опыте используются два небольших притертых чугунных полушария (1 и 2, рис. 1.6), между которыми (для большей герметичности) имеется резиновая прокладка (3). Одно из полушарий снабжено впускным патрубком с краном (7), который постоянно находится в открытом состоянии. Патрубок соединен гибкой трубкой с воздушным насосом (4), который предназначен для выкачивания воздуха из внутренней части полушарий. На гибкой трубке закреплён отводной патрубок (медный тройник (5)), на конце которого имеется кран (6) для открывания или закрывания трубы.

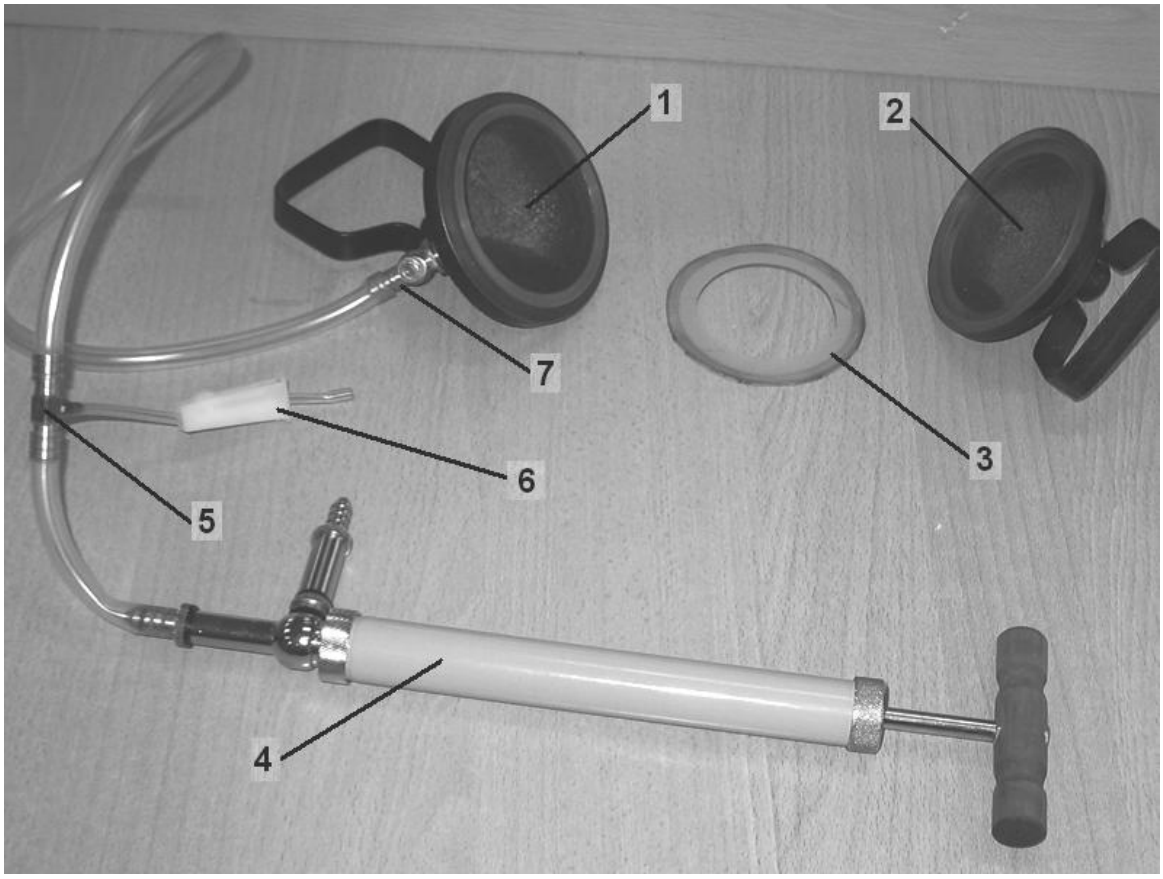


Рис. 1.6. Общий вид установки:

1 – первое полушарие, 2 – второе полушарие, 3 – резиновая прокладка, 4 – насос, 5 – тройник, 6 – кран, который должен быть закрыт при откачивании воздуха, 7 – впускной патрубок с краном

При закрытом кране (6) внутренний объем сферы изолирован от внешней атмосферы и давление в этом объеме может быть меньше внешнего. В этом случае внешнее атмосферное давление плотно

прижимает друг к другу магдебургские полушария и их невозможно оторвать друг от друга, даже если как следует потянуть за приделанные к полушариям ручки.

При открытом кране (6) внутренний объем сферы сообщается с атмосферой, и потому давление внутри сферы равно атмосферному. Коль скоро внутреннее давление уравновешивает внешнее, полушария легко разъединяются руками. Впрочем, их и разъединять не приходится – сами распадаются.

Порядок выполнения работы

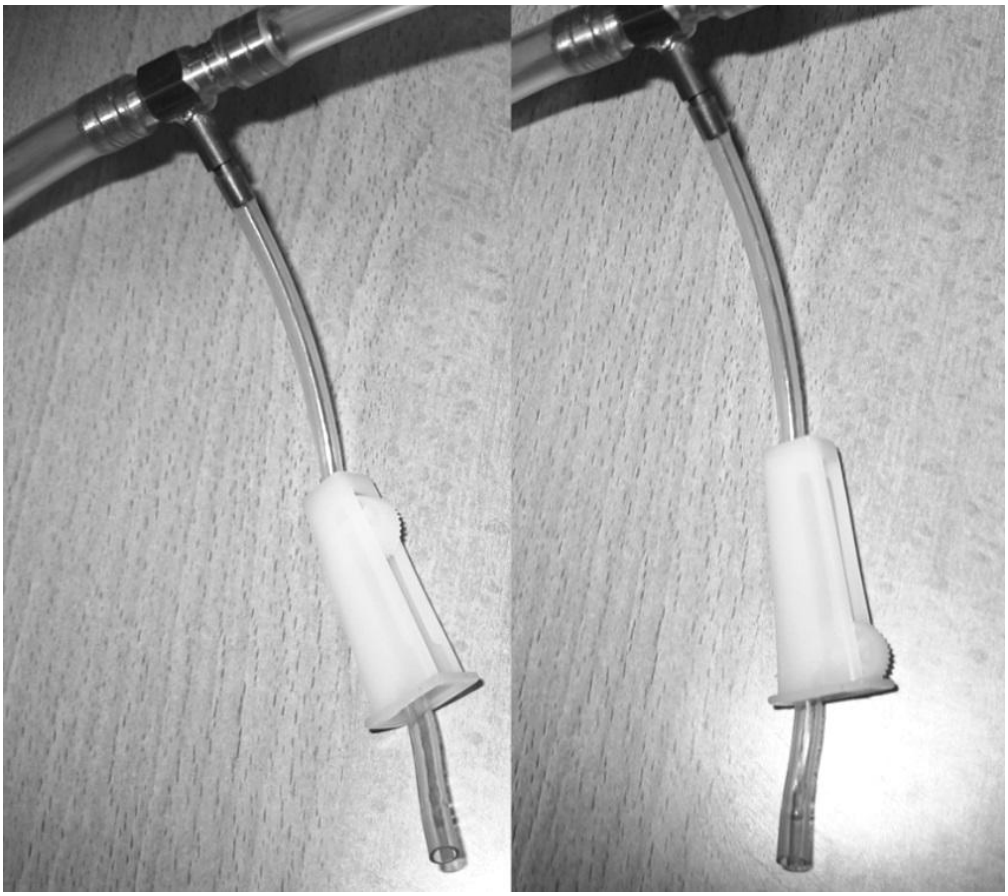


Рис. 1.7. Кран патрубка закрыт (слева) или открыт (справа)

1. Закройте кран патрубка (рис. 1.7).
2. Плотно приставьте друг к другу полушария, аккуратно вложив в пазы резиновую прокладку (рис. 1.8).
3. Откачайте воздух из внутреннего пространства полушарий (50 полных качаний вполне хватит).

4. Шестнадцати лошадей у нас нет. Поэтому сами потяните за приделанные к полушариям ручки. Убедитесь, что разорвать полушария не удается.

5. Положите соединенные полушария на стол так, чтобы при разъединении они никуда не свалились.

6. Откройте кран патрубка. Услышьте шипение.

7. Посмотрите, как разделяются полушария.

8. Подумайте, почему они это сделали.

Рис. 1.8. Именно так следует класть полушария при откачивании воздуха

Упражнение 2. Воздушный колокол со звонком

Описание установки

В нашем опыте используется стеклянный колокол на пластмассовом диске. Между колоколом и диском для большей герметичности имеется резиновая прокладка (рис. 1.9). Под колоколом размещен электрический звонок, работающий от батарейки. Колокол вместе с

подставкой образует герметическую систему, соединенную с внешним пространством только через воздушный кран. Патрубок крана соединен гибкой трубкой с воздушным насосом Камовского, который предназначен для выкачивания воздуха из-под колокола.

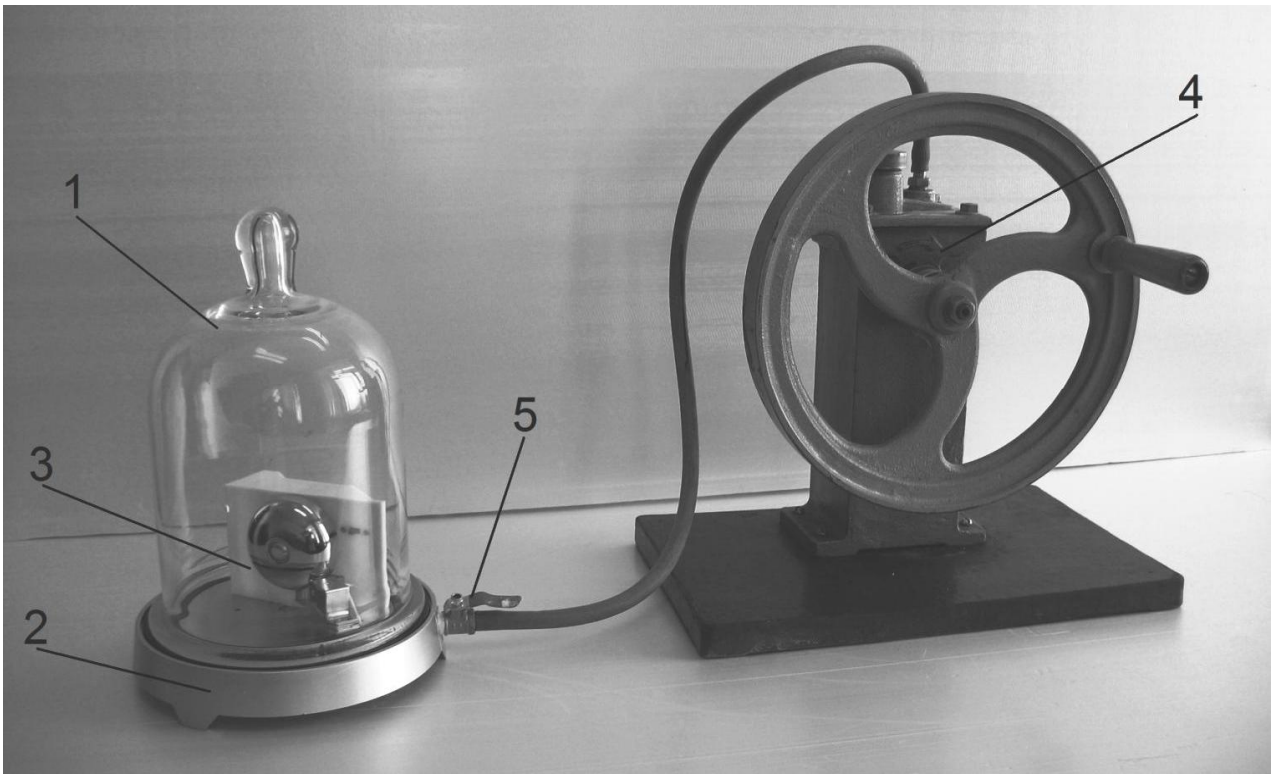


Рис. 1.9. Общий вид установки. Стеклянный колокол со звонком и насос Камовского с ручным приводом:
1 – колокол, 2 – подставка, 3 – звонок, 4 – насос Камовского, 5 – воздушный кран (в открытом положении ручка направлена вдоль крана, в закрытом – поперек)

В обычном состоянии давление воздуха под колоколом равно атмосферному и воздух имеет нормальную плотность. В этом случае звук от звонка хорошо слышен (ведь звук распространяется в воздухе) и колокол легко приподнимается над подставкой, ведь внутри и снаружи давление одинаково.

Но если воздух из-под колокола откачан, то звук от звонка практически не слышен (ведь звук распространяется в воздухе, а его плотность под колоколом мала). В этом случае внешнее атмосферное давление плотно прижимает стеклянный колокол к основанию и просто так колокол не приподнимешь. Чтобы откачать воздух из-под ко-

локола, достаточно хорошенько покрутить маховик насоса Камовского по часовой стрелке при открытом воздушном кране, когда внутренний объем колокола соединен с насосом.

Смысл опыта – убедиться (вслед за Отто фон Герике) в том, что **звук (в отличие от света) в пустоте не распространяется**. Для этого следует включить звонок (заранее: потом это сделать невозможно), разместить его под колоколом и откачать воздух из-под колокола. После откачивания плотность воздуха под колоколом будет весьма мала. Поскольку звук в вакууме не распространяется, звонок не будет слышен. Если же впустить воздух внутрь колокола, плотность воздуха под колоколом возрастет и звук станет гораздо сильнее.

Порядок выполнения работы

1. Включите звонок (рис. 1.9).
2. Разместите звенящий звонок под колоколом.
3. Наденьте воздушный шланг, идущий от насоса Камовского, на воздушный кран колокола.
4. Откройте кран патрубка (рис. 1.9).
5. Откачайте воздух из-под колокола. Для этого покрутите по часовой стрелке ручку насоса Камовского. Двухсот оборотов будет вполне достаточно. Закройте воздушный кран.
6. Отсоедините воздушный шланг от воздушного крана.
7. Попробуйте чуть-чуть приподнять воздушный колокол над подставкой. Получилось или нет? Если колокол удалось приподнять над подставкой, то воздух из-под колокола откачать не удалось и все следует повторить снова. Вдруг получится... А если не удалось, то это означает, что воздух из-под колокола откачан – по крайней мере, частично. Можно двигаться дальше. Поставьте колокол на место.
8. Послушайте звонок. Звук должен отсутствовать. Если вы все-таки что-то слышали, то это означает, что вы плохо откачали воздух или косо поставили колокол, или мало покрутили ручку, или еще что не так сделали. В этом случае вы должны подозвать преподавателя и все переделать (мне очень, очень жаль).

9. Откройте воздушный кран. Звук звонка станет слышен.

10. Поднимите колокол над подставкой и выключите звонок.

11. Подумайте, почему звук звонка в разреженном воздухе был такой слабый. Распространяется ли звук в вакууме?

12. Потускнело ли изображение звонка в разреженном воздухе? Распространяется ли свет в вакууме?

Упражнение 3. Холодный кипяток

Описание установки

Опыт проводится с тем же самым воздушным колоколом, только вместо звонка под колоколом размещается бутылочка с водой (рис. 1.10, 1.11).

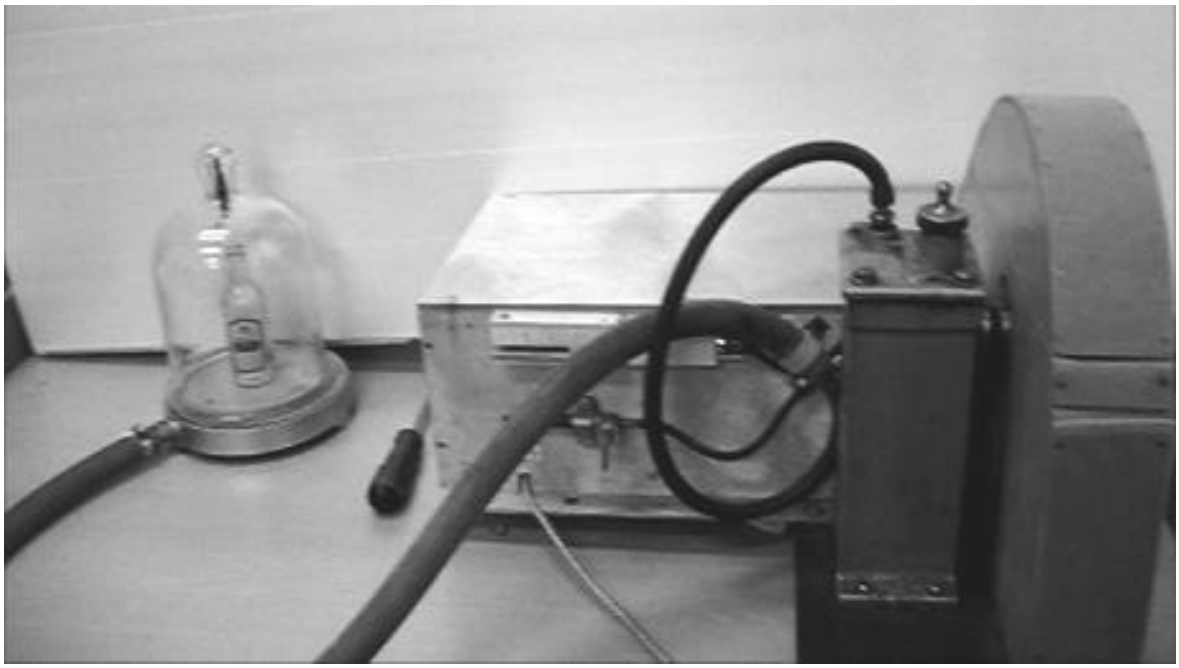


Рис. 1.10. Общий вид установки. Стеклянный колокол с бутылочкой и насос Камовского с электроприводом

Все знают, что кипяток горячий (формально можно сказать по-другому: все знают, что температура кипящей воды составляет около 100 ^{0}С). Но это только при атмосферном давлении. Ведь на самом деле вода (да и любая другая жидкость) закипает не тогда, когда «ее нагреют», а тогда, когда давление ее насыщенного пара сравняется с наружным давлением. Для того чтобы это произошло, следует **либо**

поднять давление насыщенного пара (а для этого – нагреть воду, ведь давление насыщенного пара резко растет с ростом температуры), **либо** снизить внешнее давление (либо сделать и то, и другое). Получается, что вода кипит или при достаточном нагреве, или при достаточно низком внешнем давлении. Поэтому **с уменьшением внешнего давления температура кипения воды снижается** и при достаточно низком давлении вода кипит даже при комнатной температуре.

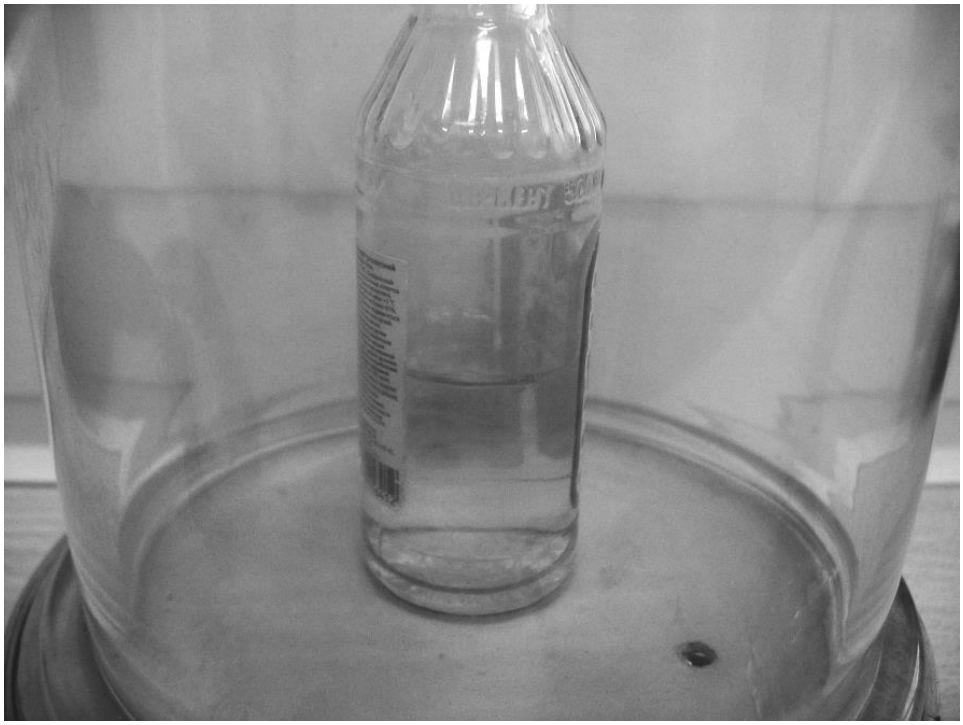


Рис. 1.11. Бутылочка с водой под стеклянным колпаком

В обычном состоянии давление воздуха под колоколом равно атмосферному и температура кипения воды составляет около 100 ^{0}С. Но если воздух из-под колокола практически откачан, то вода может кипеть и при комнатной температуре. В этом вам и предстоит убедиться.

Порядок выполнения работы

1. Разместите бутылочку с водой (комнатной температуры) под колоколом.
2. Наденьте воздушный шланг, идущий от насоса Камовского, на воздушный кран колокола.
3. Откройте кран патрубка (рис. 1.10).

4. Приступите к откачиванию воздуха из-под колокола. Продолжайте откачивание до тех пор, пока вода не закипит.

5. Прекратите откачивание. Снимите воздушный шланг с воздушного крана колокола. Потрогайте бутылочку с водой и убедитесь в том, что она по-прежнему холодна.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается корпускулярный подход к теории строения материи?

2. В чем заключается полевой подход к теории строения материи?

3. Некоторые путешественники рассказывают, что в горах невозможно даже толком сварить яйца: кипятишь их, кипятишь, а они сырые, и все тут. Как вы думаете, это правда или россказни?

4. Охарактеризуйте корпускулярный подход к теории строения вещества. Какие аргументы вы можете привести в пользу корпускулярного подхода? А какие аргументы против этого подхода?

5. Охарактеризуйте атомистический подход к теории строения вещества. Какие аргументы вы можете привести в пользу атомистического подхода? А какие аргументы против этого подхода?

6. Охарактеризуйте континуальный подход к теории строения вещества. Какие аргументы вы можете привести в пользу этого подхода? А какие аргументы против этого подхода?

7. Охарактеризуйте полевой подход к теории строения вещества. Какие аргументы вы можете привести в пользу этого подхода? А какие аргументы против этого подхода?

8. Чем отличается атомистический подход к теории строения вещества от корпускулярного?

9. Чем отличается континуальный подход к теории строения вещества от полевого?

10. Какая картина мира правильнее – корпускулярная или полевая?

11. Сформулируйте основное утверждение корпускулярно-волнового дуализма.

12. Считал ли Отто фон Герике возможной пустоту? Каким образом он доказывал свою точку зрения?

13. Может ли распространяться звук в пустоте? Можно ли это доказать экспериментально?

14. Может ли распространяться звук в воздухе? Можно ли это доказать экспериментально?

15. Может ли распространяться звук в воде? Можно ли это доказать экспериментально?

16. Может ли распространяться звук в камне? Можно ли это доказать экспериментально?

17. Может ли распространяться звук в металле? Можно ли это доказать экспериментально?

18. Может ли распространяться свет в пустоте? Можно ли это доказать экспериментально?

19. Может ли распространяться свет в воздухе? Можно ли это доказать экспериментально?

20. Может ли распространяться свет в воде? Можно ли это доказать экспериментально?

21. Может ли распространяться свет в металле? Можно ли это доказать экспериментально?

22. Может ли распространяться свет в камне? Можно ли это доказать экспериментально?

23. Как атмосферное давление изменяется при подъеме в горы? Почему?

24. Некоторые путешественники рассказывают, что в горах невозможно даже толком сварить яйца: кипятишь их, кипятишь, а они сырые, и все тут. Как вы думаете, это правда или россказни?

25. Возможно ли существование жидкой воды на Марсе? Не знаете? Google вам в помощь! Узнавайте. Интернет изобретен не затем, чтобы в World of Tanks играть!

26. Возможно ли существование жидкой воды на Луне? Не знаете? Google вам в помощь! Узнавайте. Интернет изобретен не затем, чтобы в World of Tanks играть!

27. Возможно ли существование жидкой воды на Венере? Не знаете? Google вам в помощь! Узнавайте. Интернет изобретен не затем, чтобы в World of Tanks играть!

28. В каких единицах измеряется давление в системе СИ? Не знаете? Google вам в помощь! Узнавайте. Интернет изобретен не затем, чтобы в World of Tanks играть!

29. Что такое «миллиметр ртутного столба»? Как он связан с паскалем? Не знаете? Google вам в помощь! Узнавайте. Интернет изобретен не затем, чтобы в World of Tanks играть!

30. Что такое «миллиметр ртутного столба»? Как он связан с физической атмосферой? Не знаете? Google вам в помощь! Узнавайте. Интернет изобретен не затем, чтобы в World of Tanks играть!

31. Что такое «миллиметр ртутного столба»? Как он связан с технической атмосферой? Не знаете? Google вам в помощь! Узнавайте. Интернет изобретен не затем, чтобы в World of Tanks играть!

32. Вы кипятите чистую воду в открытой кастрюле. Как изменяется ее температура с ходом времени? Не знаете сами – проведите поиск в интернете.

33. Вы кипятите соленую воду в открытой кастрюле. Как изменяется ее температура с ходом времени? Не знаете сами – проведите поиск в интернете.

34. Почему при изготовлении окрошки при добавлении соли в квас он «закипает»? Не знаете сами – проведите поиск в интернете.

2. СВОБОДНОЕ ПАДЕНИЕ ТЕЛ. ТРУБКА НЬЮТОНА

Основы теории

Материал данной главы пригодится вам при выполнении **экспериментального задания № 2-0 [6,7].** Это задание является прекрасной экспериментальной иллюстрацией изложенного в настоящей главе теоретического материала.

Вопрос о скорости движения свободно падающего тела имеет очень давнюю историю. Одним из первых ученых, изучавших его на научной основе, был еще великий древнегреческий философ Аристотель (рис. 1.1). Он внимательно посмотрел вокруг себя, подумал и понял, что все вещи имеют свое естественное место и в этом естественном месте (и только в нем) способны пребывать неограниченно долго без чьего-либо постороннего вмешательства. Так, например, в подлунном мире (буквально, то есть на поверхности Земли и немного выше, но ниже Луны) естественным местом всех вещей является именно лежание на земле, а естественным состоянием – покой. Поэтому все камни мирно лежат на земле, пока их кто-нибудь их не поднимет. А если их кто-нибудь поднимет, то они находятся над землей только до тех пор, пока их не отпустят. А как только отпустят, так они быстренько летят назад на землю – на свое естественное место.

Насколько быстро летят вниз разные предметы? Тоже «легко понять». Ведь все видели, как быстро летит вниз тяжелый камень – гораздо быстрее легкого перышка. И вообще все, кто держал в руках тяжелые и легкие предметы, прекрасно знают, что тяжелый камень тянется к земле гораздо сильнее легкого камешка, а легкий камешек – гораздо сильнее перышка. Значит, и вниз тяжелый булыжник полетит гораздо быстрее, чем перышко. Так Аристотель постановил, записал и отправился исследовать другие вопросы, которых ему с избытком хватило до конца жизни.

Так и думали все ученые еще очень-очень долго. Потому что Аристотель действительно был великим ученым и действительно очень часто оказывался совершенно прав. Да и Церковь (римско-

католическая) его учение в конце концов «ассимилировала», приняла и защищала «как свое». Мы с вами, конечно, так уже не думаем. Ошибка Аристотеля заключается в том, что он не понимал двух вещей – принципа инерции и влияния силы сопротивления среды. Ясно, что большой булыжник притягивается к Земле сильнее, чем маленький, но ведь и инерционность у него больше. Так что (если не учитывать силу сопротивления воздуха) получается «так на так»: в десять раз больше сила притяжения, и во столько же раз больше инерционность (инертная масса). Если же учесть силу сопротивления воздуха, то следует иметь в виду, что она зависит от размеров и плотности тела, а потому для пушинки играет гораздо большую роль, чем для пушечного ядра. Поэтому пушинку эта сила сопротивления тормозит гораздо сильнее, чем пушечное ядро, и потому в конечном итоге (в воздухе) пушечное ядро летит вниз гораздо быстрее пушинки.

Первым засомневался в правильности рассуждений Аристотеля великий итальянский ученый Галилео Галилей (рис. 2.1).

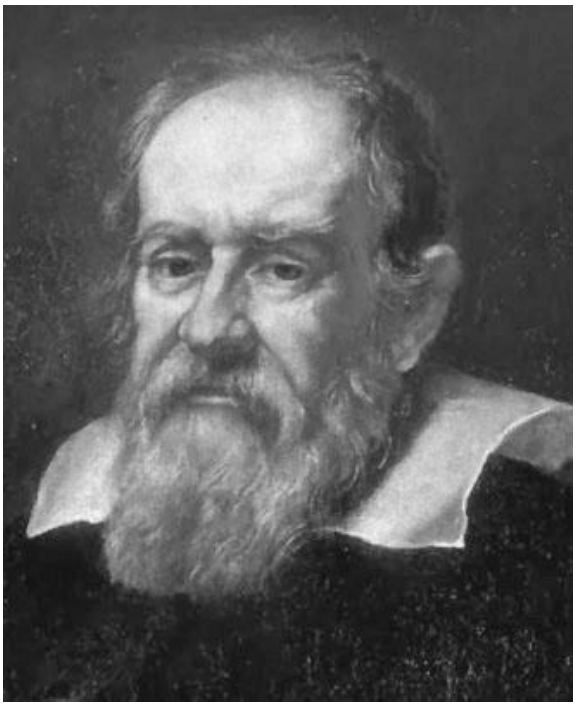


Рис. 2.1. Галилео Галилей

Он был **основоположником экспериментального метода в естествознании** и (в отличие от Аристотеля) сознательно экспериментировал. Кроме того, в рациональном методе познания (то есть в

умелом думании) был «подкован» не хуже Аристотеля. Он придумал следующий **мысленный эксперимент**. Пусть у нас есть два пушечных ядра. Пусть каждое из них летит вниз с одинаковой скоростью v. Если соединить их цепью, то «объединенный предмет» станет в два раза тяжелее и (по Аристотелю) должен бы лететь вниз в два раза быстрее. Но тогда возникает вопрос: с чего это каждое отдельное пушечное ядро полетит вниз быстрее, если его не тянут за цепочку? Значит, тянут. Тогда самый страшный вопрос: какое ядро какое тянет? Они же одинаковые. Значит, в рассуждениях Аристотеля что-то не так. И Галилей решил обратиться к высшему судье – опыту.

Он забрался на Пизанскую башню (рис. 2.2) и сбросил оттуда не перо и камень (что такое сила сопротивления воздуха, он уже понимал), а ядро и мушкетную пулю. Конечно, мушкетная пуля гораздо легче ядра, но сила сопротивления воздуха для них обоих (при падении с Пизанской башни) пренебрежимо мала. И оба предмета упали практически одновременно.

Рис. 2.2. Пизанская башня

Так был осуществлен один из самых красивых экспериментов в истории. И один из самых глубоких. Ведь мы теперь понимаем (в отличие от самого Галилея), что одновременность падения разных предметов напрямую связана с равенством гравитационной массы (которую притягивает Земля) и инертной массы (которая сопротивляется разгону тела). Если бы инертная масса тел не совпадала с их гравитационной массой, то разные тела падали бы с разным ускорением и, разумеется, с разной скоростью.

Так что на самом деле Галилей, сам того не зная, добросовестно проверял принцип эквивалентности инертной и гравитационной массы (или, если угодно, принцип эквивалентности сил тяготения и инерции) – одно из основных положений **общей теории относительности**, которую часто называют также теорией гравитации Эйнштейна (рис. 2.3).

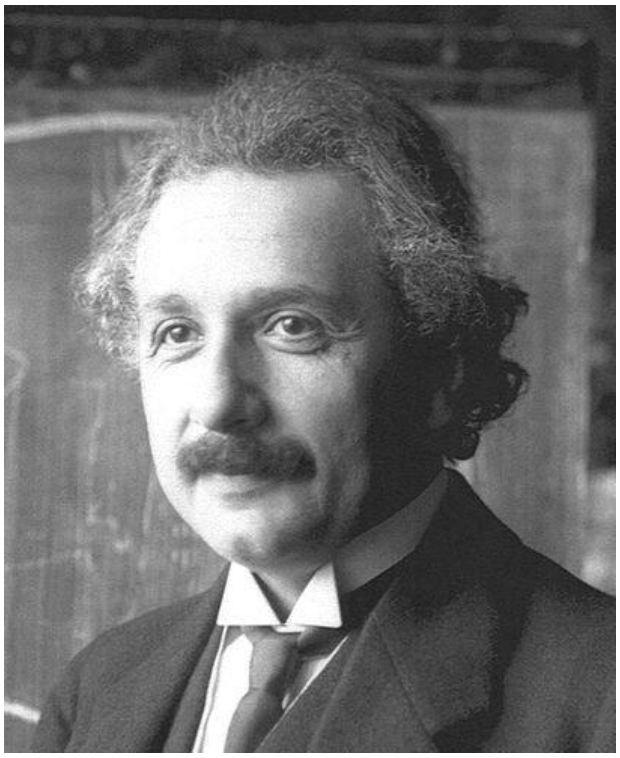


Рис. 2.3. Альберт Эйнштейн

Принцип эквивалентности утверждает, что инертная и гравитационная масса любого тела совпадают или (что то же самое) что силу тяжести невозможно отличить от силы инерции по ее проявлениям.

Конечно, сам Галилей не понимал, что проверял. Первым осознал удивительность эксперимента Галилея другой титан мысли – сэр

Исаак Ньютон (рис. 2.4). Он удивился и проверил равенство инертной и гравитационной массы еще раз – по независимости периода качания маятников от материала, из которого они изготовлены. Результат оказался положительным.

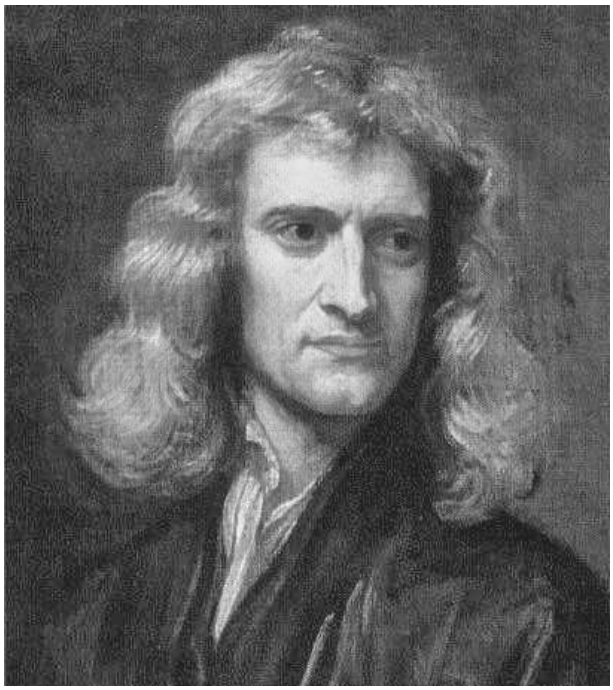


Рис. 2.4. Исаак Ньютон

Тот же Исаак Ньютон закрыл и «последнюю брешь» в эксперименте Галилея – провел прямое сравнение скорости падения именно птичьего пера и кусочка металла при отсутствии силы сопротивления воздуха. Сам Галилей сделать это не мог, ведь для уничтожения силы сопротивления воздуха нужен вакуум (может, и не совсем полный, но все же вакуум). У Галилея вакуума не было. А у Ньютона – уже был. Он откачал воздух из длинной толстостенной стеклянной трубки и проследил за падением в этой трубке птичьего пера и кусочка металла. Как и следовало ожидать, перо в вакууме падало так же быстро, как и металл.

Именно эти два исторических опыта (опыт Галилея по бросанию шаров с Пизанской башни и опыт с трубкой Ньютона) вам и предстоит воспроизвести. Вы можете заодно считать, что вы проверяете и принцип эквивалентности, то есть экспериментальную основу общей теории относительности.

Описание установки

В нашем опыте используется (рис. 2.5) длинная толстостенная (чтобы не раздавило воздухом) стеклянная трубка (1), снабженная впускным патрубком с краном (2), который может быть открыт или закрыт. Патрубок соединен гибкой резиновой трубкой (4) с воздушным насосом (3) (насос Камовского), который предназначен для выкачивания воздуха из внутренней части трубки. Чтобы выкачать воздух из стеклянной трубки, необходимо повертеть по часовой стрелке маховик (7). Резиновая трубка надета на патрубок не очень плотно, так что при желании ее можно снять и тем самым отсоединить трубку Ньютона от насоса.

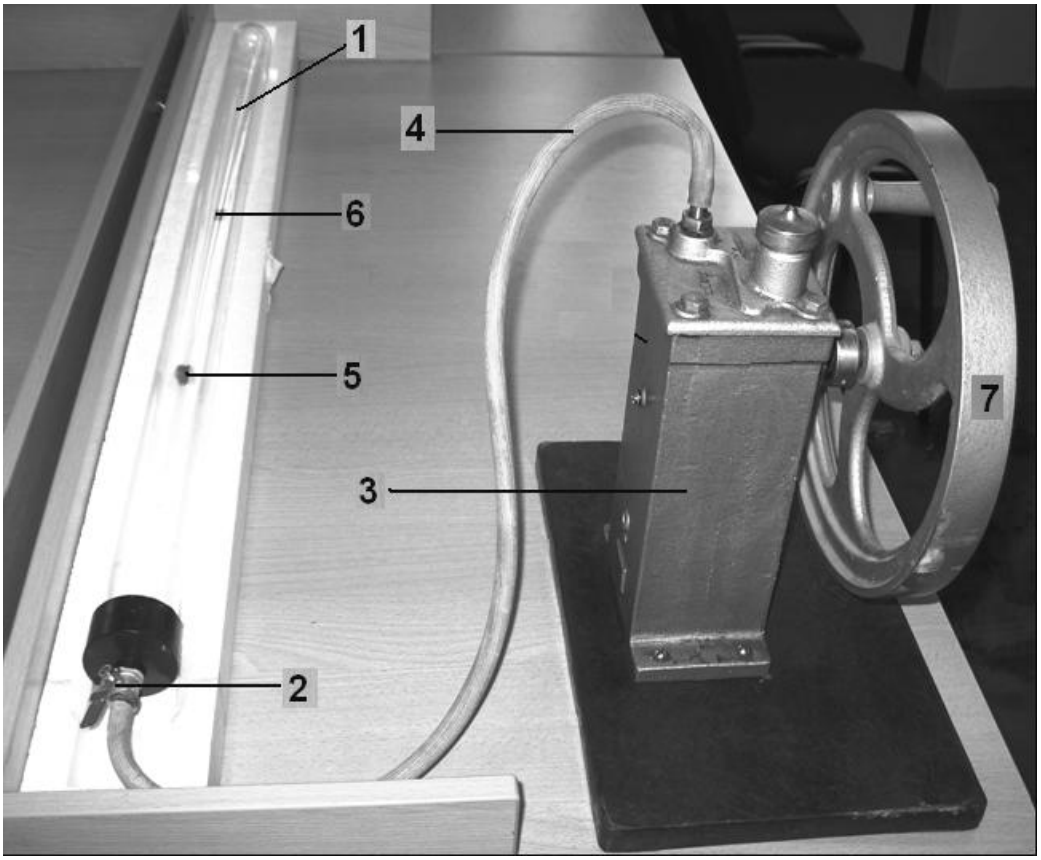


Рис. 2.5. Трубка Ньютона (1), впускной патрубок с краном (2), насос Камовского (3), резиновая трубка для откачивания воздуха (4), перышко (5), металлическая пластинка (6), маховик, который надо вращать для откачивания воздуха (7)

Таким образом, внутри трубки может быть либо вакуум (если воздух из внутреннего объема откачали и закрыли впускной кран), либо воздух (если впускной кран открыли, рис. 2.6).

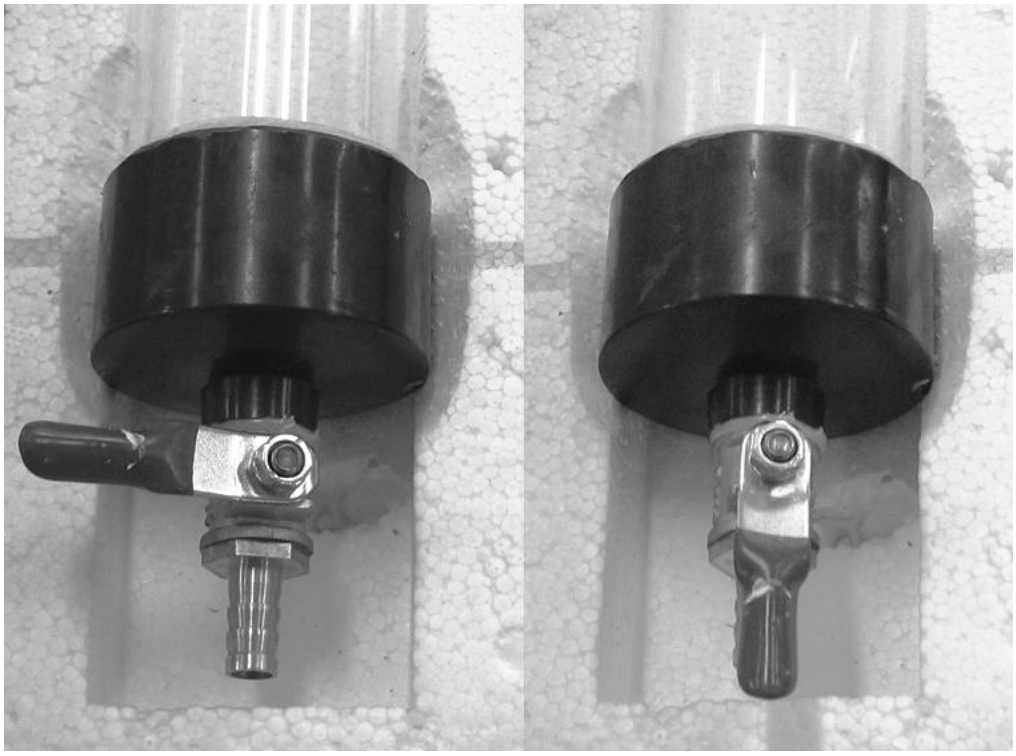


Рис. 2.6. Кран закрыт (слева) или открыт (справа)

Для того чтобы проследить за опытом Ньютона, внутри трубки заранее имеется два предмета – кусочек металла (6) и птичье перышко (5). Если перевернуть трубку, то оба предмета начнут падать вдоль трубы, и легко заметить, кто из них падает быстрее.

Порядок выполнения работы

1. Сначала воспроизведите опыт Галилея. Пизанской башни у нас, к сожалению, нет, но мы прекрасно обойдемся и без нее. Возьмите стул, закрепленный за лабораторной работой № 2 (это наш самый крепкий и надежный стул) и встаньте на него. Постарайтесь не свалиться.

2. В кулаке правой руки зажмите две монеты – пятирублевую и пятидесятикопеечную. Вытяните руку и отпустите монеты. Одновременно ли они стукнулись о пол?

3. Одновременно? Поздравляю: вы **лично** проверили принцип эквивалентности. Ведь монеты отличаются не только размером и массой, но и материалом, из которого они сделаны. Более того – вы превзошли всех догалилеевских натурфилософов, потому что вы (в отличие от них) понимаете, что есть вопросы, для решения которых

следует не напрягать и перенапрягать свое несчастное «серое вещество» и не устраивать диспуты и потасовки с оппонентами, а просто «задать вопрос природе» – поставить эксперимент.

4. Теперь займитесь воспроизведением опыта Ньютона. Для этого, не вытаскивая стеклянную трубку из пенопластового футляра, откройте кран патрубка (поз. 2 на рис. 2.5).

5. Вращая маховик (7) по часовой стрелке, откачайте воздух из внутреннего пространства стеклянной трубки (1) (100 оборотов маховика вполне хватит). Перед откачиванием обязательно проверьте, что перо лежит в противоположном от крана конце трубки. Иначе его может затянуть в насос, и придется насос чинить (вам, разумеется, – кому же еще).

6. Закройте впускной кран (2) трубки Ньютона (1). Теперь в трубке будет вакуум до тех пор, пока вы вновь не впустите туда воздух.

7. Отсоедините резиновую трубку (4) от впускного патрубка трубки Ньютона (1). Теперь трубка Ньютона ничем не связана с насосом и ее можно без проблем вытаскивать из пенопластового футляра и переворачивать. **Но вам делать это категорически запрещено по соображениям безопасности. Вам можно только смотреть, как это делает лаборант.**

8. **Поэтому позовите лаборанта или преподавателя.** Пусть лаборант возьмет трубку и повернет ее вертикально, а потом быстро, но аккуратно перевернет. Пронаблюдайте за падением перышка и металлической пластинки. Сравните скорости их падения в вакууме.

9. Пусть лаборант положит трубку назад в пенопластовый футляр. Теперь вы можете продолжать сами.

10. Откройте впускной кран (2). При этом раздастся «ш-ш-ш» и воздух войдет во внутреннюю часть трубки. Теперь вакуума внутри нет, а есть обычный воздух при атмосферном давлении. Поэтому вы можете вновь достать трубку из пенопластового футляра и теперь уже сами вновь проделать пункт 5:

- отойти от стола,
- повернуть трубку вертикально,

- быстро, но аккуратно перевернуть,
- пронаблюдать за скоростью падения перышка и металлической пластинки, но теперь уже в воздухе.

11. Сравните скорости падения перышка и кусочка металла в воздухе. Чем ситуация отличается от случая вакуума и почему?

12. Положите трубку на место (в пенопластовый футляр). Проследите, чтобы перо лежало подальше от крана, а то его засосет в насос следующий студент.

Контрольные вопросы

1. Что такое мысленный эксперимент? Кто первый применил мысленный эксперимент?
2. Почему Галилей усомнился в выводах Аристотеля о падении тел?
3. Как Галилей исследовал падение тел?
4. Что такое эксперимент?
5. Кто такой Ньютон?
6. Когда и где жил Ньютон?
7. Какие открытия сделал Ньютон?
8. В чем смысл опыта Ньютона с трубкой Ньютона? Зачем был нужен этот опыт?
9. Кто такой Эйнштейн?
10. Когда и где жил Эйнштейн?
11. Какие открытия сделал Эйнштейн?
12. Кто создал общую теорию относительности?
13. Сформулируйте принцип эквивалентности.
14. Кто первым сформулировал принцип эквивалентности?
15. Кто первым проверил принцип эквивалентности экспериментально?
16. Как Галилей проверял принцип эквивалентности?
17. Как Ньютон проверял принцип эквивалентности?
18. Как Эйнштейн проверял принцип эквивалентности?

19. В каких единицах измеряется ускорение свободного падения на Земле? Не знаете сами – проведите поиск в интернете.

20. В каких единицах измеряется ускорение свободного падения на Луне? Чему оно равно? Не знаете сами – проведите поиск в интернете.

21. В каких единицах измеряется ускорение свободного падения на Марсе? Чему оно равно? Не знаете сами – проведите поиск в интернете.

22. В каких единицах измеряется ускорение свободного падения на Венере? Чему оно равно? Не знаете сами – проведите поиск в интернете.

23. В каких единицах измеряется ускорение свободного падения на Юпитере? Чему оно равно? Не знаете сами – проведите поиск в интернете.

24. В каких единицах измеряется ускорение свободного падения на Солнце? Чему оно равно? Не знаете сами – проведите поиск в интернете.

25. Есть ли ускорение свободного падения в межпланетном пространстве? Почему вы так думаете?

26. Есть ли ускорение свободного падения в невесомости? Почему вы так думаете?

27. Что падает быстрее – перышко или кирпич? Почему вы так думаете?

28. Что падает быстрее – кирпич или половинка кирпича? Почему вы так думаете?

29. Почему Галилей не провел опыт с трубкой Ньютона? Что ему мешало?

3. ИЗУЧЕНИЕ ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ

Основы теории

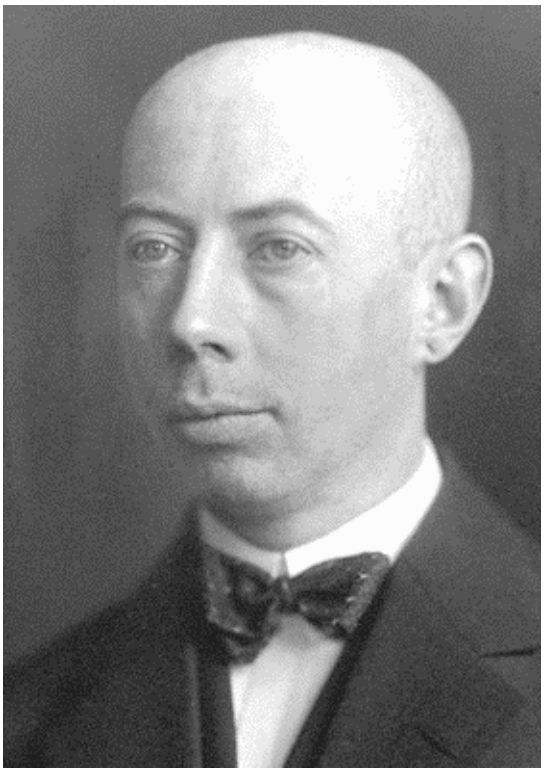


Рис. 3.1. Генрих Рудольф **Герц**

Материал данной главы пригодится вам при выполнении **экспериментального задания № 3-0 [6.7,8].** Это экспериментальное задание является прекрасной экспериментальной иллюстрацией изложенного в настоящей главе теоретического материала.

Колебательным движением называется любое периодическое (или квазипериодическое) движение, при котором физическая (или не физическая) система вновь и вновь возвращается (или почти возвращается) в исходное состояние и все повторяется снова, снова и снова. Колебаться может что угодно – люстра в соборе, напряжение в сети переменного тока, количество зайцев в лесу, цена энергоносителей и так далее.

Основной характеристикой любых колебаний является их **период** T, то есть время одного полного колебания, и **частота** ν, то есть количество колебаний в единицу времени. Разумеется, период колебаний измеряется в секундах, а частота – в 1/сек, то есть в Герцах; Герц – это и есть, по определению, 1/сек). Фото Генриха Рудольфа Герца представ-

лено на рис. 3.1. Пусть, например, за 10 секунд произошло 20 колебаний. Тогда период этих колебаний равен 10 сек/20=0,5 сек, а частота – 20/10 сек=2 Гц. Уже из этого примера видно, что период и частота колебаний обратно пропорциональны друг другу: $T = 1/\nu$, $\nu = 1/T$.

Следующей по важности характеристикой колебательного процесса является его **амплитуда**, то есть набольшее уклонение периодически изменяющейся физической величины от своего среднего значения. Амплитуда всегда измеряется в тех же самых единицах, что и эта самая физическая величина: если речь идет о колебаниях маятника, то в метрах, если о колебаниях количества зайцев – в штуках, а если о колебаниях цены нефти – то в долларах за баррель.

Первыми исследователями колебательного движения были Галилео Галилей (рис. 2.1) и Христиан Гюйгенс (рис. 3.2).

Рис. 3.2. Христиан Гюйгенс

Именно Галилео Галилей открыл **изохронность малых колебаний,** то есть независимость их периода от амплитуды колебаний. Сделал он это (по слухам) во время посещения мессы: посещать храм он (как добрый католик) был обязан, а слушать проповеди ему (как образованному человеку) быстро надоело. Поэтому он со скуки смотрел за колебаниями люстр в церкви и подметил важную особенность: чем больше амплитуда качаний люстры, тем быстрее она двигается. В результате «чуть-чуть» качающаяся и медленно двигающаяся люстра успевает качнуться в точности за такое же время, что и «сильно» качающаяся и быстро двигающаяся люстра. Изохронность малых колебаний – это их фундаментальное свойство; для колебаний значительной амплитуды (нелинейных колебаний) изохронность места не имеет.

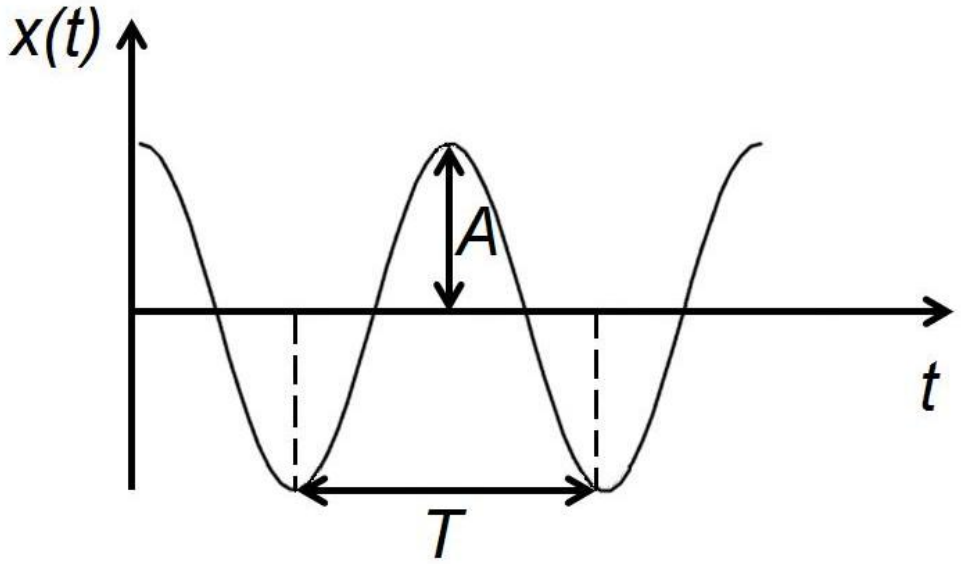


Рис. 3.3. Временная зависимость незатухающего
(то есть строго периодического) колебательного процесса.
$x(t)$ – колеблющаяся величина в зависимости от времени t,
A – амплитуда колебаний, T – их период

У Гюйгенса – свои заслуги. Именно он первым (в 1657 г.) сконструировал часы с маятником и в изданной в 1673 г. монографии «Маятниковые часы» исследовал колебания маятника. Любопытно, что свои часы Гюйгенс создал уже после смерти Галилея, который измерял время с помощью собственного пульса – больше просто нечем было.

Временная зависимость незатухающих (то есть строго периодических) гармонических колебаний имеет вид

$$x(t) = A\cos\left(2\pi\frac{t}{T} + \varphi\right) = A\cos(2\pi\nu t + \varphi) = A\cos(\omega t + \varphi), \qquad (3.1)$$

где A – амплитуда колебаний, T – их период, ν – их частота, $\omega = 2\pi\nu$ – так называемая **циклическая частота**[8], а φ – фаза колебаний. Графически эта зависимость изображена на рис. 3.3.

Следует, впрочем, иметь в виду, что строго периодический колебательный процесс – идеализация хотя бы потому, что он не имеет ни

[8] Циклическая частота – это угловая скорость вращательного движения с заданной частотой. То есть если тело совершает 10 оборотов в секунду (то есть частота его вращения – 10 Гц), то за эту секунду оно поворачивается на угол $10 \times 2\pi = 62{,}8$ радиан (то есть циклическая частота его вращения – 62,8 рад/с).

начала, ни конца. Реальные колебательные процессы, протекающие без внешней энергетической «поддержки», всегда затухают: их амплитуда уменьшается во времени по экспоненциальному закону:

$$x(t) = A(t)\cos\left(2\pi\frac{t}{T}+\varphi\right) = A(t)\cos(2\pi\nu t+\varphi) = A(t)\cos(\omega t+\varphi), \quad (3.2)$$

$$A(t) = A_0\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) = A\exp(-\beta t). \quad (3.3)$$

В этих формулах A_0 – начальная амплитуда колебаний, τ – так называемое **время затухания колебаний**, то есть время, в течение которого амплитуда колебаний уменьшается в e раз ($e \approx 2{,}7$ – так называемое основание натуральных логарифмов), а обратная времени затухания величина $\beta = 1/\tau$ называется **коэффициентом затухания** и измеряется в 1/сек. Графически эта зависимость изображена на рис. 3.4.

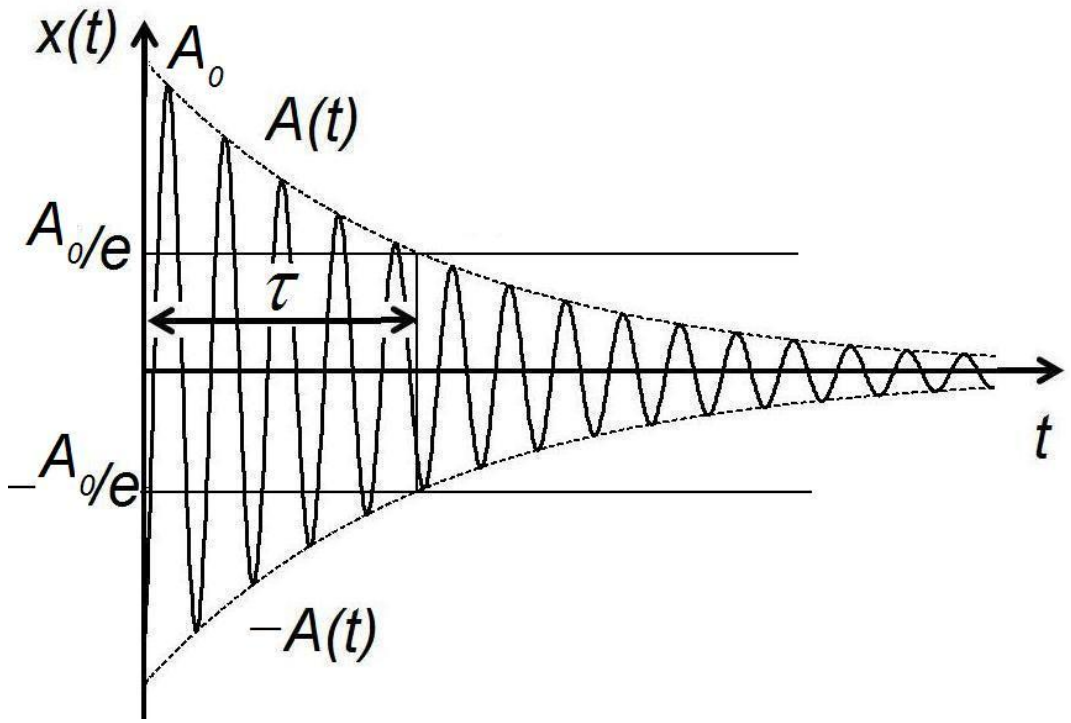


Рис. 3.4. Временная зависимость затухающего колебательного процесса.
$x(t)$ – колеблющаяся величина в зависимости от времени t,
$A(t)$ – уменьшающаяся с ходом времени амплитуда колебаний,
– начальная амплитуда колебаний, τ – время затухания колебаний

Разумеется, окончательно затухающие колебания (в соответствии с предыдущей формулой) не затухнут никогда. Но их существенное уменьшение (почти в три раза по амплитуде и примерно в 9 раз по энергии) произойдет за время затухания колебаний τ. Поэтому если качели после спрыгивания качающегося качались «минуты две», то время затухания этих колебаний равно «где-то 120 секунд», а коэффициент затухания «примерно равен» 1/120 1/сек.

Для характеристики затухания колебаний часто используют и другие параметры – так называемый логарифмический декремент затухающих колебаний и добротность колебательной системы.

Логарифмическим декрементом колебаний δ по определению называется натуральный логарифм отношения двух последовательных амплитуд колебания (рис. 3.6):

$$\delta = \ln\frac{A_1}{A_2} = \ln\frac{A(t)}{A(t+T)} = \ln\frac{A_0\exp(-\beta t)}{A_0\exp(-\beta(t+T))} = \\ = \ln\exp(\beta T) = \beta T = \frac{T}{\tau}. \qquad (3.4)$$

Из формулы (3.4) видно, что логарифмический декремент имеет очень простой смысл: обратная величина логарифмического декремента равна отношению времени затухания колебаний к их периоду, то есть равна количеству колебаний, которые произойдут «по инерции» до их затухания после прекращения внешнего воздействия (результатом которого, разумеется, и являются колебания).

Таким образом, если качели после спрыгивания качающегося качнулись «раз пятьдесят», то логарифмический декремент этих колебаний «примерно 1/50». Очень удобно. Но это еще не все. Если колебания затухают слабо (а иначе их не очень-то можно считать колебаниями), то уменьшение амплитуды за один период (рис. 3.6) невелико в сравнении с амплитудой, то есть $\Delta A = A_1 - A_2 << A_2$. Тогда с использованием известной вам из курса математики формулы

$\ln(1+x) \approx x$ нетрудно получить приближенную формулу для логарифмического декремента:

$$\delta = \ln\frac{A_1}{A_2} = \ln\frac{A_2 + \Delta A}{A_2} = \ln\left(1 + \frac{\Delta A}{A}\right) \approx \frac{\Delta A}{A}. \qquad (3.5)$$

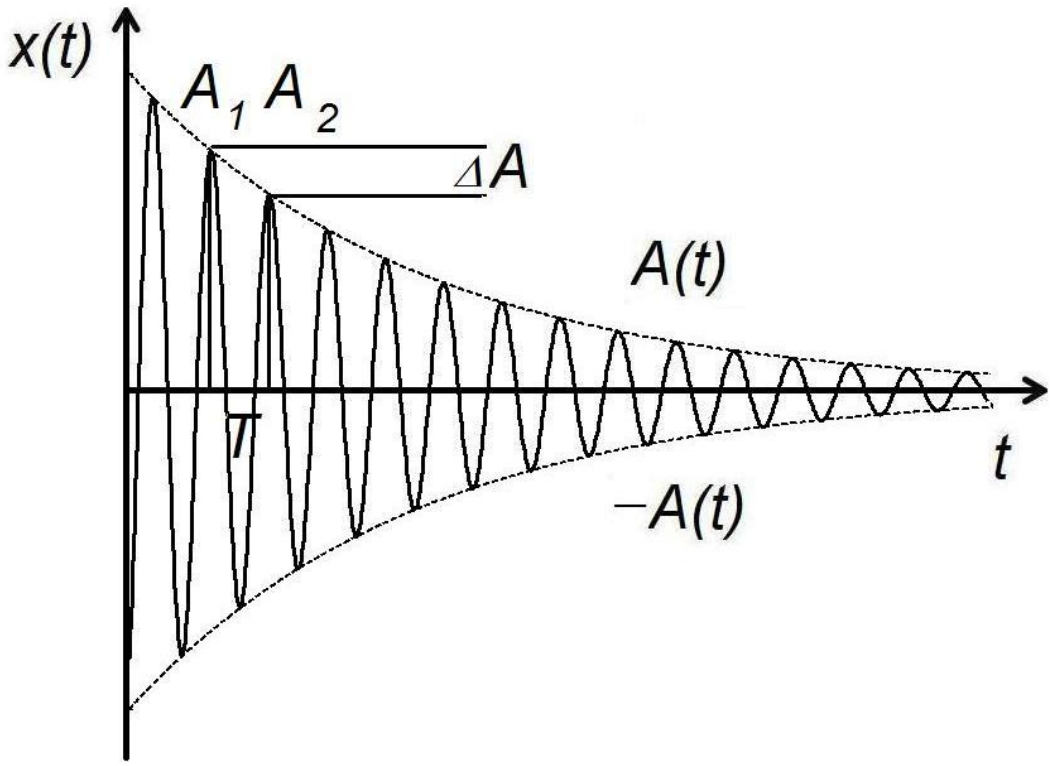


Рис. 3.5. Временная зависимость затухающего колебательного процесса.
$x(t)$ – колеблющаяся величина в зависимости от времени t,
$A(t)$ – уменьшающаяся с ходом времени амплитуда колебаний,
A_1 и $A(t)$ – две последовательные амплитуды колебания,
отстоящие друг от друга на один период $A(t)$,
$\Delta A = A_1 - A_2$ – уменьшение амплитуды колебаний за один период

Таким образом, логарифмический декремент имеет и второй, не менее простой и приятный смысл: это просто относительное уменьшение амплитуды колебаний за 1 период. То есть если следующее отклонение качелей на 2 % меньше предыдущего (то есть составляет от него 98 % или 0,98), то логарифмический декремент равен примерно 1/50 и качели качнутся «раз пятьдесят», прежде чем успокоятся.

Добротностью колебательной системы по определению называется безразмерная величина $Q = \frac{\pi}{\delta} = \pi \frac{\tau}{T}$, которая отличается от «количества колебаний по инерции» только коэффициентом $\pi \approx 3$. Поэтому если качели после конца раскачивания качнулись «раз пятьдесят», то добротность этой колебательной системы равна примерно 150.

Как можно измерить период, частоту, время затухания и логарифмический декремент затухающих колебаний?

Для измерения периода и частоты достаточно измерить время t_n некоторого количества n (например, 50) колебаний. После этого найти период несложно по формуле

$$T = \frac{t_n}{n}, \tag{3.6}$$

а частоту – по формуле

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{n}{t_n}. \tag{3.7}$$

Для измерения времени затухания в принципе можно просто измерить время, за которое амплитуда колебаний уменьшится в e раз. Но на практике гораздо удобнее измерять время двукратного уменьшения амплитуды колебаний $t_{1/2}$. Для того чтобы выяснить, как это время связано со временем затухания, следует заметить, что

$$A(t_{1/2}) = A_0 \exp\left(\frac{t_{1/2}}{\tau}\right) = \frac{A_0}{2}. \tag{3.8}$$

Отсюда нетрудно получить $\exp\left(-\frac{t_{1/2}}{\tau}\right) = \frac{1}{2}$, или после логарифмирования: $\frac{t_{1/2}}{\tau} = \ln 2$. Отсюда окончательно получаем расчетную формулу:

$$\tau = \frac{t_{1/2}}{\ln 2} \approx 1{,}4427 \times t_{1/2}. \tag{3.9}$$

Для измерения логарифмического декремента в принципе достаточно было бы сосчитать количество колебаний, за которое амплитуда колебаний уменьшилась в e раз, и разделить 1 на это количество. Но на практике гораздо удобнее считать количество колебаний, после которого амплитуда колебаний уменьшилась в два раза: $n_{1/2}$. Как через эту величину выразить логарифмический декремент? Для этого надо учесть, что

$$n_{1/2} = \frac{t_{1/2}}{T} = \frac{\tau \ln 2}{T} = \frac{\ln 2}{\delta}. \qquad (3.10)$$

Отсюда имеем расчетную формулу:

$$\delta = \frac{\ln 2}{n_{1/2}} \approx \frac{0{,}6931}{n_{1/2}}. \qquad (3.11)$$

Описание установки

Установка для выполнения работы выглядит очень просто (рис. 3.6).

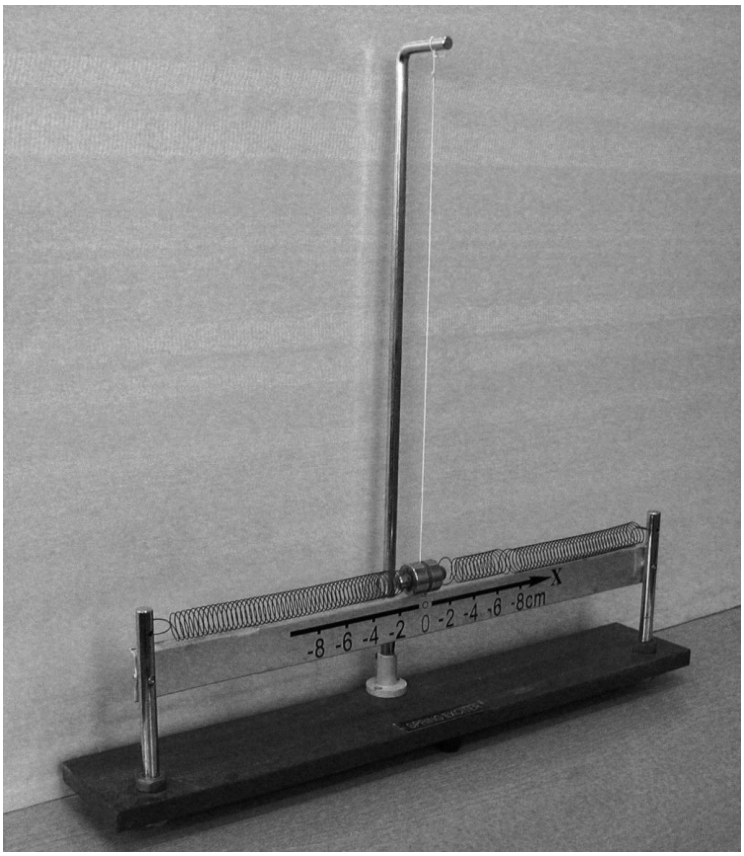


Рис. 3.6. Гравитационно-пружинный маятник

Основной ее частью является металлический грузик, привязанный к нитке и одновременно – к двум пружинам. За грузиком укреплена линейка (рис. 3.7), позволяющая измерять отклонение грузика от положения равновесия, обозначенного на шкале как 0. Ясно, что при отклонении грузика от положения равновесия возникает возвращающая сила как со стороны деформированных пружинок, так и со стороны силы тяжести. Таким образом, наш маятник является гибридом «обычного» (то есть гравитационного) и пружинного.

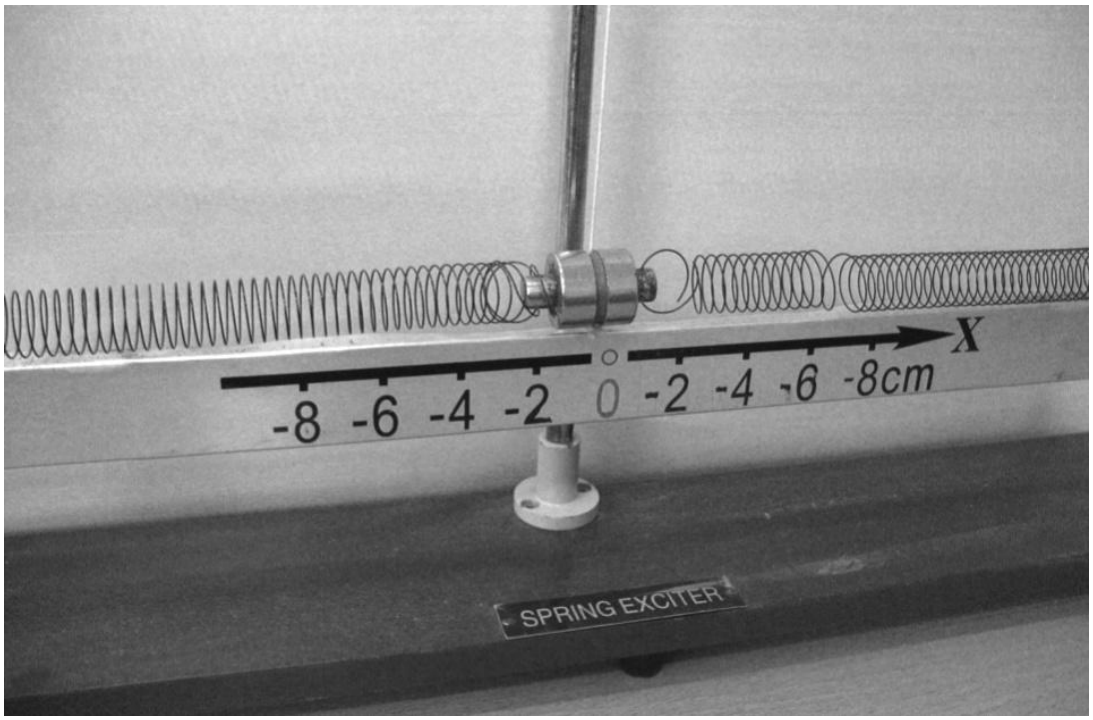


Рис. 3.7. Линейка для измерения отклонения груза от положения равновесия

Рис. 3.8. Крутильный маятник

Порядок выполнения работы. Измерения и расчеты

Таблица 3.1

Измерение периода колебаний

№	t_{50},сек	T, сек	$\overline{T}$, сек	ΔT_i, сек	s_T, сек	$\Delta\overline{T}$, сек
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
1						
2						
3						
3						
5						

Вам необходимо найти период колебаний, время затухания, коэффициент затухания и логарифмический декремент затухающих колебаний маятника.

Измерение периода колебаний

1. Для отыскания периода колебаний немного (сантиметра на 4) отклоните грузик от положения равновесия и измерьте (с помощью секундомера из вашего мобильника) время 50 полных колебаний t_{50} . Проделайте это пять раз и запишите полученные результаты во второй столбец табл. 3.1. Экспериментальная работа по измерению периода колебаний на этом закончена, далее начинается обсчет полученных результатов. При обсчете мы будем пренебрегать систематической ошибкой проделанных измерений по сравнению со случайной ошибкой, то есть будем учитывать только случайную ошибку.

2. Для каждого измерения по формуле

$$T = t_{50} / 50 \tag{3.12}$$

найдите период колебаний и запишите соответствующий результат в третий столбец табл. 3.1.

3. По формуле

$$\overline{T} = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5}{5} \tag{3.13}$$

найдите эмпирическое среднее для периода колебаний. Запишите этот результат в 4-й столбец табл. 3.1. Это значение – одно, оно «общее» для всех проделанных вами измерений.

4. По формуле

$$\Delta T_i = \left| T_i - \overline{T} \right|, \quad \text{где i} = 1,2,3,4,5; \tag{3.14}$$

найдите отклонение каждого отдельного измерения от эмпирического среднего и запишите полученные результаты в 5-й столбец табл. 3.1.

5. По формуле

$$s_T = \sqrt{\frac{(\Delta T_1)^2 + (\Delta T_2)^2 + (\Delta T_3)^2 + (\Delta T_4)^2 + (\Delta T_5)^2}{20}} \tag{3.15}$$

найдите стандартную ошибку для периода колебаний и запишите это значение в шестой столбец табл. 3.1.

6. По формуле

$$\Delta T = 1{,}134 s_T \tag{3.16}$$

найдите полуширину доверительного интервала для периода колебаний при доверительной вероятности 68 % (1,134 – коэффициент Стьюдента при количестве измерений 5 и доверительной вероятности 0,68, см. табл. 2 введения). Запишите это значение в 7-й столбец табл. 3.1.

7. Запишите окончательный результат измерения периода колебаний в виде $T = \overline{T} \pm \Delta T$, проведя разумное округление полученных значений.

Измерение частоты колебаний

1. В принципе, частоту можно измерить и независимо, но проще воспользоваться уже измеренным значением периода и формулой $\nu = 1/T$. В этом случае измерение частоты является косвенным (см. введение), и для оценки ошибки измерения частоты следует использовать ошибку измерения периода и приведенную во введении формулу для ошибки косвенных измерений.

2. Для наиболее вероятного значения частоты имеем $\overline{\nu} = 1/\overline{T}$. Рассчитайте по этой формуле измеренную частоту.

3. В данном случае $\nu = T^{-1}$, поэтому (см. формулу (17) введения) для относительной ошибки измерения частоты имеем $\varepsilon_\nu = \varepsilon_T$, то есть $\dfrac{\Delta\nu}{\overline{\nu}} = \dfrac{\Delta T}{\overline{T}}$, откуда $\Delta\nu = \dfrac{\Delta T}{\overline{T}}\overline{\nu}$. Рассчитайте по этой формуле ошибку измерения частоты.

4. Запишите окончательный результат измерения частоты колебаний в виде $\nu = \overline{\nu} \pm \Delta\nu$, проведя разумное округление полученных значений.

Измерение логарифмического декремента колебаний

1. Для отыскания логарифмического декремента затухающих колебаний достаточно отклонить грузик на некоторую заранее выбранную величину (например, на 4 см) и сосчитать количество колебаний

$n_{1/2}$, после которого амплитуда уменьшится в два раза (то есть станет равна 2 см). Поскольку грузик двигается достаточно быстро и уследить за ним тяжело, рекомендуется «сузить поле зрения» – свернуть ладонь трубочкой и наставить эту «подзорную трубу» на нужное деление – так легче «засечь» нужный момент.

Проделайте это пять раз, и запишите полученные результаты во второй столбец табл. 3.2. Экспериментальная работа по измерению логарифмического декремента колебаний на этом закончена, далее начинается обсчет полученных результатов.

Таблица 3.2

Измерение логарифмического декремента колебаний

№	$n_{1/2}$	δ	$\overline{\delta}$	$\Delta\delta_i$	s_δ	$\Delta\overline{\delta}$
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
1.						
2.						
3.						
3.						
5.						

2. Для каждого измерения по формуле

$$\delta = \frac{\ln 2}{n_{1/2}} \approx \frac{0{,}6931}{n_{1/2}}, \tag{3.17}$$

найдите логарифмический декремент колебаний и запишите соответствующий результат в третий столбец табл. 3.2.

3. По формуле

$$\overline{\delta} = \frac{\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 + \delta_5}{5} \tag{3.18}$$

для эмпирического среднего найдите эмпирическое среднее для логарифмического декремента колебаний. Запишите этот результат в 4-й столбец табл. 3.2. Это значение – одно, оно «общее» для всех проделанных вами измерений.

3. По формуле

$$\Delta\delta_i = \left|\delta_i - \overline{\delta}\right|, \quad где \quad i = 1,2,3,4,5; \tag{3.19}$$

найдите отклонение каждого отдельного измерения от эмпирического среднего и запишите полученные результаты в 5-й столбец табл. 3.2.

5. По формуле

$$s_\delta = \sqrt{\frac{(\Delta\delta_1)^2 + (\Delta\delta_2)^2 + (\Delta\delta_3)^2 + (\Delta\delta_4)^2 + (\Delta\delta_5)^2}{20}} \tag{3.20}$$

найдите стандартную ошибку для логарифмического декремента колебаний и запишите это значение в 6-й столбец табл. 3.2.

6. По формуле

$$\Delta\delta = 1{,}134 s_\delta \tag{3.21}$$

найдите полуширину доверительного интервала для логарифмического декремента колебаний при доверительной вероятности 68 % (1,134 – коэффициент Стьюдента при количестве измерений 5 и доверительной вероятности 0,68, см. табл. 2 введения). Запишите это значение в 7-й столбец табл. 3.2.

7. Запишите окончательный результат измерения логарифмического декремента колебаний в виде $\delta = \overline{\delta} \pm \Delta\delta$, проведя разумное округление полученных значений.

Измерение коэффициента затухания колебаний

1. В принципе, коэффициент затухания можно измерить и независимо, но проще воспользоваться уже измеренным значением периода и логарифмического декремента и формулой (3.4) $\beta = \dfrac{\delta}{T}$. В этом случае измерение коэффициента затухания является косвенным (см. введение) и для оценки ошибки его измерения следует использовать ошибку измерения периода, логарифмического декремента и приведенную во введении формулу для ошибки косвенных измерений (17).

2. Для наиболее вероятного значения коэффициента затухания имеем $\overline{\beta} = \dfrac{\overline{\delta}}{\overline{T}}$. Рассчитайте по этой формуле измеренный коэффициент затухания.

3. В данном случае $\beta = \dfrac{\delta}{T} = \delta^1 T^{-1}$, поэтому (см. формулу (17) введения) $\varepsilon_\beta = \sqrt{\varepsilon_\delta^2 + \varepsilon_T^2}$, где $\varepsilon_\delta = \dfrac{\Delta\delta}{\overline{\delta}}$, $\varepsilon_T = \dfrac{\Delta T}{\overline{T}}$. Рассчитайте по этой формуле относительную ошибку измерения коэффициента затухания, а затем (по формуле $\Delta\beta = \varepsilon_\beta \overline{\beta}$) и его абсолютную ошибку.

Измерение времени затухания колебаний

1. В принципе, время затухания можно измерить и независимо, но проще воспользоваться уже измеренным значением коэффициента затухания и формулой (3.4) $\tau = \dfrac{1}{\beta}$. В этом случае измерение времени затухания является косвенным (см. введение) и для оценки ошибки его измерения следует использовать ошибку измерения коэффициента затухания и приведенную во введении формулу для ошибки косвенных измерений (17).

2. Для наиболее вероятного значения времени затухания имеем $\overline{\tau} = \dfrac{1}{\overline{\beta}}$. Рассчитайте по этой формуле измеренное время затухания.

3. В данном случае $\tau = \dfrac{1}{\beta} = \beta^{-1}$, поэтому $\varepsilon_\tau = \varepsilon_\beta = \dfrac{\Delta\beta}{\overline{\beta}}$. Рассчитайте по этой формуле относительную ошибку измерения времени затухания, а затем (по формуле $\Delta\tau = \varepsilon_\tau \overline{\tau}$) и его абсолютную ошибку.

3. Запишите окончательный результат измерения времени затухания колебаний в виде $\tau = \overline{\tau} \pm \Delta\tau$, проведя разумное округление полученных значений.

5. Запишите окончательный ответ – период, частоту, логарифмический декремент, время затухания и коэффициент затухания колебаний.

Контрольные вопросы

1. Пусть некоторая колебательная система (например, флагшток, или качели, или мост, или газовая труба) выведена из положения равновесия каким-либо внешним воздействием (например, в него врезалась пролетающая мимо ворона, или пнул проходящий мимо негативно настроенный гражданин, или задел проплывающий мимо теплоход, или на объект свалилась сосулька с крыши). Ясно, что эта колебательная система начнет совершать затухающие колебания. Ясно, что эти затухающие колебания со временем «практически прекратятся». Предположим, что возникшие колебания будут продолжаться примерно полторы минуты и что за это время система успеет совершить примерно 50 колебаний. Оцените (разумеется, приближенно или даже «очень приближенно»), чему в этом случае будут равны:

А) период колебаний;

Б) частота колебаний;

В) циклическая частота колебаний;

Г) время затухания колебаний;

Д) коэффициент затухания колебаний;

Е) логарифмический декремент этих колебаний;

Ж) можете ли вы сказать, на сколько процентов будет уменьшаться амплитуда колебаний при каждом следующем покачивании системы?

З) Пусть, например, амплитуда пятого качания была равна 10 см. Какой примерно будет амплитуда десятого качания? А амплитуда пятнадцатого качания?

Указание: При решении задачи не пользуйтесь точными формулами (это бессмысленно, потому что все равно у вас нет точных данных), а используйте простые оценочные соотношения, приведенные выше.

2. Пусть некоторая колебательная система (например, флагшток, или качели, или мост, или газовая труба) выведена из положения равновесия каким-либо внешним воздействием (например, в него врезалась пролетающая мимо ворона, или пнул проходящий мимо нега-

тивно настроенный гражданин, или задел проплывающий мимо теплоход, или на объект свалилась сосулька с крыши). Ясно, что эта колебательная система начнет совершать затухающие колебания. Ясно, что эти затухающие колебания со временем «практически прекратятся». Предположим, что возникшие колебания будут продолжаться примерно 2,5 минуты и что за это время система успеет совершить примерно 50 колебаний. Оцените (разумеется, приближенно или даже «очень приближенно»), чему в этом случае будут равны:

А) период колебаний;

Б) частота колебаний;

В) циклическая частота колебаний;

Г) время затухания колебаний;

Д) коэффициент затухания колебаний;

Е) логарифмический декремент этих колебаний;

Ж) можете ли вы сказать, на сколько процентов будет уменьшаться амплитуда колебаний при каждом следующем покачивании системы?

З) пусть, например, амплитуда пятого качания была равна 15 см. Какой примерно будет амплитуда десятого качания? А амплитуда пятнадцатого качания?

Указание: при решении задачи не пользуйтесь точными формулами (это бессмысленно, потому что все равно у вас нет точных данных), а используйте простые оценочные соотношения, приведенные выше.

3. Пусть некоторая колебательная система (например, флагшток, или качели, или мост, или газовая труба) выведена из положения равновесия каким-либо внешним воздействием (например, в него врезалась пролетающая мимо ворона, или пнул проходящий мимо негативно настроенный гражданин, или задел проплывающий мимо теплоход, или на объект свалилась сосулька с крыши). Ясно, что эта колебательная система начнет совершать затухающие колебания. Ясно, что эти затухающие колебания со временем «практически прекратятся». Предположим, что возникшие колебания будут продолжаться

примерно три минуты и что за это время система успеет совершить примерно 50 колебаний. Оцените (разумеется, приближенно или даже «очень приближенно»), чему в этом случае будут равны:

А) период колебаний;

Б) частота колебаний;

В) циклическая частота колебаний;

Г) время затухания колебаний;

Д) коэффициент затухания колебаний;

Е) логарифмический декремент этих колебаний;

Ж) можете ли вы сказать, на сколько процентов будет уменьшаться амплитуда колебаний при каждом следующем покачивании системы?

З) пусть, например, амплитуда пятого качания была равна 20 см. Какой примерно будет амплитуда десятого качания? А амплитуда пятнадцатого качания?

Указание: при решении задачи не пользуйтесь точными формулами (это бессмысленно, потому что все равно у вас нет точных данных), а используйте простые оценочные соотношения, приведенные выше.

4. Пусть некоторая колебательная система (например, флагшток, или качели, или мост, или газовая труба) выведена из положения равновесия каким-либо внешним воздействием (например, в него врезалась пролетающая мимо ворона, или пнул проходящий мимо негативно настроенный гражданин, или задел проплывающий мимо теплоход, или на объект свалилась сосулька с крыши). Ясно, что эта колебательная система начнет совершать затухающие колебания. Ясно, что эти затухающие колебания со временем «практически прекратятся». Предположим, что возникшие колебания будут продолжаться примерно четыре минуты и что за это время система успеет совершить примерно 50 колебаний. Оцените (разумеется, приближенно или даже «очень приближенно»), чему в этом случае будут равны:

А) период колебаний;

Б) частота колебаний;

В) циклическая частота колебаний;

Г) время затухания колебаний;

Д) коэффициент затухания колебаний;

Е) логарифмический декремент этих колебаний;

Ж) можете ли вы сказать, на сколько процентов будет уменьшаться амплитуда колебаний при каждом следующем покачивании системы?

З) пусть, например, амплитуда пятого качания была равна 25 см. Какой примерно будет амплитуда десятого качания? А амплитуда пятнадцатого качания?

Указание: при решении задачи не пользуйтесь точными формулами (это бессмысленно, потому что все равно у вас нет точных данных), а используйте простые оценочные соотношения, приведенные выше.

5. Пусть некоторая колебательная система (например, флагшток, или качели, или мост, или газовая труба) выведена из положения равновесия каким-либо внешним воздействием (например, в него врезалась пролетающая мимо ворона, или пнул проходящий мимо негативно настроенный гражданин, или задел проплывающий мимо теплоход, или на объект свалилась сосулька с крыши). Ясно, что эта колебательная система начнет совершать затухающие колебания. Ясно, что эти затухающие колебания со временем «практически прекратятся». Предположим, что возникшие колебания будут продолжаться примерно пять минут и что за это время система успеет совершить примерно 50 колебаний. Оцените (разумеется, приближенно или даже «очень приближенно»), чему в этом случае будут равны:

А) период колебаний;

Б) частота колебаний;

В) циклическая частота колебаний;

Г) время затухания колебаний;

Д) коэффициент затухания колебаний;

Е) логарифмический декремент этих колебаний;

Ж) можете ли вы сказать, на сколько процентов будет уменьшаться амплитуда колебаний при каждом следующем покачивании системы?

З) пусть, например, амплитуда пятого качания была равна 5 см. Какой примерно будет амплитуда десятого качания? А амплитуда пятнадцатого качания?

Указание: при решении задачи не пользуйтесь точными формулами (это бессмысленно, потому что все равно у вас нет точных данных), а используйте простые оценочные соотношения, приведенные выше.

6. Пусть некоторая колебательная система (например, флагшток, или качели, или мост, или газовая труба) выведена из положения равновесия каким-либо внешним воздействием (например, в него врезалась пролетающая мимо ворона, или пнул проходящий мимо негативно настроенный гражданин, или задел проплывающий мимо теплоход, или на объект свалилась сосулька с крыши). Ясно, что эта колебательная система начнет совершать затухающие колебания. Ясно, что эти затухающие колебания со временем «практически прекратятся». Предположим, что возникшие колебания будут продолжаться примерно полторы минуты и что за это время система успеет совершить примерно 50 колебаний. Оцените (разумеется, приближенно или даже «очень приближенно»), чему в этом случае будут равны:

А) период колебаний;

Б) частота колебаний;

В) циклическая частота колебаний;

Г) время затухания колебаний;

Д) коэффициент затухания колебаний;

Е) логарифмический декремент этих колебаний;

Ж) можете ли вы сказать, на сколько процентов будет уменьшаться амплитуда колебаний при каждом следующем покачивании системы?

З) пусть, например, амплитуда пятого качания была равна 10 см. Какой примерно будет амплитуда десятого качания? А амплитуда пятнадцатого качания?

Указание: при решении задачи не пользуйтесь точными формулами (это бессмысленно, потому что все равно у вас нет точных данных), а используйте простые оценочные соотношения, приведенные выше.

7. Пусть некоторая колебательная система (например, флагшток, или качели, или мост, или газовая труба) выведена из положения равновесия каким-либо внешним воздействием (например, в него врезалась пролетающая мимо ворона, или пнул проходящий мимо негативно настроенный гражданин, или задел проплывающий мимо теплоход, или на объект свалилась сосулька с крыши). Ясно, что эта колебательная система начнет совершать затухающие колебания. Ясно, что эти затухающие колебания со временем «практически прекратятся». Предположим, что возникшие колебания будут продолжаться примерно 2,5 минуты и что за это время система успеет совершить примерно 50 колебаний. Оцените (разумеется, приближенно или даже «очень приближенно»), чему в этом случае будут равны:

А) период колебаний;

Б) частота колебаний;

В) циклическая частота колебаний;

Г) время затухания колебаний;

Д) коэффициент затухания колебаний;

Е) логарифмический декремент этих колебаний;

Ж) можете ли вы сказать, на сколько процентов будет уменьшаться амплитуда колебаний при каждом следующем покачивании системы?

З) пусть, например, амплитуда пятого качания была равна 15 см. Какой примерно будет амплитуда десятого качания? А амплитуда пятнадцатого качания?

Указание: при решении задачи не пользуйтесь точными формулами (это бессмысленно, потому что все равно у вас нет точных данных), а используйте простые оценочные соотношения, приведенные выше.

8. Пусть некоторая колебательная система (например, флагшток, или качели, или мост, или газовая труба) выведена из положения равновесия каким-либо внешним воздействием (например, в него врезалась пролетающая мимо ворона, или пнул проходящий мимо негативно настроенный гражданин, или задел проплывающий мимо теп-

лоход, или на объект свалилась сосулька с крыши). Ясно, что эта колебательная система начнет совершать затухающие колебания. Ясно, что эти затухающие колебания со временем «практически прекратятся». Предположим, что возникшие колебания будут продолжаться примерно 3 минуты и что за это время система успеет совершить примерно 50 колебаний. Оцените (разумеется, приближенно или даже «очень приближенно»), чему в этом случае будут равны:

А) период колебаний;

Б) частота колебаний;

В) циклическая частота колебаний;

Г) время затухания колебаний;

Д) коэффициент затухания колебаний;

Е) логарифмический декремент этих колебаний;

Ж) можете ли вы сказать, на сколько процентов будет уменьшаться амплитуда колебаний при каждом следующем покачивании системы?

З) пусть, например, амплитуда пятого качания была равна 20 см. Какой примерно будет амплитуда десятого качания? А амплитуда пятнадцатого качания?

Указание: при решении задачи не пользуйтесь точными формулами (это бессмысленно, потому что все равно у вас нет точных данных), а используйте простые оценочные соотношения, приведенные выше.

9. Пусть некоторая колебательная система (например, флагшток, или качели, или мост, или газовая труба) выведена из положения равновесия каким-либо внешним воздействием (например, в него врезалась пролетающая мимо ворона, или пнул проходящий мимо негативно настроенный гражданин, или задел проплывающий мимо теплоход, или на объект свалилась сосулька с крыши). Ясно, что эта колебательная система начнет совершать затухающие колебания. Ясно, что эти затухающие колебания со временем «практически прекратятся». Предположим, что возникшие колебания будут продолжаться примерно четыре минуты и что за это время система успеет совер-

шить примерно 50 колебаний. Оцените (разумеется, приближенно или даже «очень приближенно»), чему в этом случае будут равны:

А) период колебаний;

Б) частота колебаний;

В) циклическая частота колебаний;

Г) время затухания колебаний;

Д) коэффициент затухания колебаний;

Е) логарифмический декремент этих колебаний;

Ж) можете ли вы сказать, на сколько процентов будет уменьшаться амплитуда колебаний при каждом следующем покачивании системы?

З) пусть, например, амплитуда пятого качания была равна 25 см. Какой примерно будет амплитуда десятого качания? А амплитуда пятнадцатого качания?

Указание: при решении задачи не пользуйтесь точными формулами (это бессмысленно, потому что все равно у вас нет точных данных), а используйте простые оценочные соотношения, приведенные выше.

10. Пусть некоторая колебательная система (например, флагшток, или качели, или мост, или газовая труба) выведена из положения равновесия каким-либо внешним воздействием (например, в него врезалась пролетающая мимо ворона, или пнул проходящий мимо негативно настроенный гражданин, или задел проплывающий мимо теплоход, или на объект свалилась сосулька с крыши). Ясно, что эта колебательная система начнет совершать затухающие колебания. Ясно, что эти затухающие колебания со временем «практически прекратятся». Предположим, что возникшие колебания будут продолжаться примерно пять минут и что за это время система успеет совершить примерно 50 колебаний. Оцените (разумеется, приближенно или даже «очень приближенно»), чему в этом случае будут равны:

А) период колебаний;

Б) частота колебаний;

В) циклическая частота колебаний;

Г) время затухания колебаний;

Д) коэффициент затухания колебаний;

Е) логарифмический декремент этих колебаний;

Ж) можете ли вы сказать, на сколько процентов будет уменьшаться амплитуда колебаний при каждом следующем покачивании системы?

З) пусть, например, амплитуда пятого качания была равна 5 см. Какой примерно будет амплитуда десятого качания? А амплитуда пятнадцатого качания?

Указание: при решении задачи не пользуйтесь точными формулами (это бессмысленно, потому что все равно у вас нет точных данных), а используйте простые оценочные соотношения, приведенные выше.

11. Пусть некоторая колебательная система (например, флагшток, или качели, или мост, или газовая труба) выведена из положения равновесия каким-либо внешним воздействием (например, в него врезалась пролетающая мимо ворона, или пнул проходящий мимо негативно настроенный гражданин, или задел проплывающий мимо теплоход, или на объект свалилась сосулька с крыши). Ясно, что эта колебательная система начнет совершать затухающие колебания. Ясно, что эти затухающие колебания со временем «практически прекратятся». Предположим, что возникшие колебания будут продолжаться примерно полторы минуты и что за это время система успеет совершить примерно 70 колебаний. Оцените (разумеется, приближенно или даже «очень приближенно»), чему в этом случае будут равны:

А) период колебаний;

Б) частота колебаний;

В) циклическая частота колебаний;

Г) время затухания колебаний;

Д) коэффициент затухания колебаний;

Е) логарифмический декремент этих колебаний;

Ж) можете ли вы сказать, на сколько процентов будет уменьшаться амплитуда колебаний при каждом следующем покачивании системы?

З) пусть, например, амплитуда пятого качания была равна 10 см. Какой примерно будет амплитуда десятого качания? А амплитуда пятнадцатого качания?

Указание: при решении задачи не пользуйтесь точными формулами (это бессмысленно, потому что все равно у вас нет точных данных), а используйте простые оценочные соотношения, приведенные выше.

12. Пусть некоторая колебательная система (например, флагшток, или качели, или мост, или газовая труба) выведена из положения равновесия каким-либо внешним воздействием (например, в него врезалась пролетающая мимо ворона, или пнул проходящий мимо негативно настроенный гражданин, или задел проплывающий мимо теплоход, или на объект свалилась сосулька с крыши). Ясно, что эта колебательная система начнет совершать затухающие колебания. Ясно, что эти затухающие колебания со временем «практически прекратятся». Предположим, что возникшие колебания будут продолжаться примерно 2,5 минуты и что за это время система успеет совершить примерно 70 колебаний. Оцените (разумеется, приближенно или даже «очень приближенно»), чему в этом случае будут равны:

А) период колебаний;

Б) частота колебаний;

В) циклическая частота колебаний;

Г) время затухания колебаний;

Д) коэффициент затухания колебаний;

Е) логарифмический декремент этих колебаний;

Ж) можете ли вы сказать, на сколько процентов будет уменьшаться амплитуда колебаний при каждом следующем покачивании системы?

З) пусть, например, амплитуда пятого качания была равна 15 см. Какой примерно будет амплитуда десятого качания? А амплитуда пятнадцатого качания?

Указание: при решении задачи не пользуйтесь точными формулами (это бессмысленно, потому что все равно у вас нет точных данных), а используйте простые оценочные соотношения, приведенные выше.

13. Пусть некоторая колебательная система (например, флагшток, или качели, или мост, или газовая труба) выведена из положения равновесия каким-либо внешним воздействием (например, в него врезалась пролетающая мимо ворона, или пнул проходящий мимо негативно настроенный гражданин, или задел проплывающий мимо теплоход, или на объект свалилась сосулька с крыши). Ясно, что эта колебательная система начнет совершать затухающие колебания. Ясно, что эти затухающие колебания со временем «практически прекратятся». Предположим, что возникшие колебания будут продолжаться примерно три минуты и что за это время система успеет совершить примерно 70 колебаний. Оцените (разумеется, приближенно или даже «очень приближенно»), чему в этом случае будут равны:

А) период колебаний;

Б) частота колебаний;

В) циклическая частота колебаний;

Г) время затухания колебаний;

Д) коэффициент затухания колебаний;

Е) логарифмический декремент этих колебаний;

Ж) можете ли вы сказать, на сколько процентов будет уменьшаться амплитуда колебаний при каждом следующем покачивании системы?

З) пусть, например, амплитуда пятого качания была равна 20 см. Какой примерно будет амплитуда десятого качания? А амплитуда пятнадцатого качания?

Указание: при решении задачи не пользуйтесь точными формулами (это бессмысленно, потому что все равно у вас нет точных данных), а используйте простые оценочные соотношения, приведенные выше.

14. Пусть некоторая колебательная система (например, флагшток, или качели, или мост, или газовая труба) выведена из положения равновесия каким-либо внешним воздействием (например, в него врезалась пролетающая мимо ворона, или пнул проходящий мимо негативно настроенный гражданин, или задел проплывающий мимо теп-

лоход, или на объект свалилась сосулька с крыши). Ясно, что эта колебательная система начнет совершать затухающие колебания. Ясно, что эти затухающие колебания со временем «практически прекратятся». Предположим, что возникшие колебания будут продолжаться примерно четыре минуты и что за это время система успеет совершить примерно 70 колебаний. Оцените (разумеется, приближенно или даже «очень приближенно»), чему в этом случае будут равны:

А) период колебаний;

Б) частота колебаний;

В) циклическая частота колебаний;

Г) время затухания колебаний;

Д) коэффициент затухания колебаний;

Е) логарифмический декремент этих колебаний;

Ж) можете ли вы сказать, на сколько процентов будет уменьшаться амплитуда колебаний при каждом следующем покачивании системы?

З) пусть, например, амплитуда пятого качания была равна 25 см. Какой примерно будет амплитуда десятого качания? А амплитуда пятнадцатого качания?

Указание: при решении задачи не пользуйтесь точными формулами (это бессмысленно, потому что все равно у вас нет точных данных), а используйте простые оценочные соотношения, приведенные выше.

15. Пусть некоторая колебательная система (например, флагшток, или качели, или мост, или газовая труба) выведена из положения равновесия каким-либо внешним воздействием (например, в него врезалась пролетающая мимо ворона, или пнул проходящий мимо негативно настроенный гражданин, или задел проплывающий мимо теплоход, или на объект свалилась сосулька с крыши). Ясно, что эта колебательная система начнет совершать затухающие колебания. Ясно, что эти затухающие колебания со временем «практически прекратятся». Предположим, что возникшие колебания будут продолжаться примерно пять минут и что за это время система успеет совершить

примерно 70 колебаний. Оцените (разумеется, приближенно или даже «очень приближенно»), чему в этом случае будут равны:

А) период колебаний;

Б) частота колебаний;

В) циклическая частота колебаний;

Г) время затухания колебаний;

Д) коэффициент затухания колебаний;

Е) логарифмический декремент этих колебаний;

Ж) можете ли вы сказать, на сколько процентов будет уменьшаться амплитуда колебаний при каждом следующем покачивании системы?

З) пусть, например, амплитуда пятого качания была равна 5 см. Какой примерно будет амплитуда десятого качания? А амплитуда пятнадцатого качания?

Указание: при решении задачи не пользуйтесь точными формулами (это бессмысленно, потому что все равно у вас нет точных данных), а используйте простые оценочные соотношения, приведенные выше.

16. Пусть некоторая колебательная система (например, флагшток, или качели, или мост, или газовая труба) выведена из положения равновесия каким-либо внешним воздействием (например, в него врезалась пролетающая мимо ворона, или пнул проходящий мимо негативно настроенный гражданин, или задел проплывающий мимо теплоход, или на объект свалилась сосулька с крыши). Ясно, что эта колебательная система начнет совершать затухающие колебания. Ясно, что эти затухающие колебания со временем «практически прекратятся». Предположим, что возникшие колебания будут продолжаться примерно полторы минуты и что за это время система успеет совершить примерно 100 колебаний. Оцените (разумеется, приближенно или даже «очень приближенно»), чему в этом случае будут равны:

А) период колебаний;

Б) частота колебаний;

В) циклическая частота колебаний;

Г) время затухания колебаний;

Д) коэффициент затухания колебаний;

Е) логарифмический декремент этих колебаний;

Ж) можете ли вы сказать, на сколько процентов будет уменьшаться амплитуда колебаний при каждом следующем покачивании системы?

З) Пусть, например, амплитуда пятого качания была равна 10 см. Какой примерно будет амплитуда десятого качания? А амплитуда пятнадцатого качания?

Указание: при решении задачи не пользуйтесь точными формулами (это бессмысленно, потому что все равно у вас нет точных данных), а используйте простые оценочные соотношения, приведенные выше.

17. Пусть некоторая колебательная система (например, флагшток, или качели, или мост, или газовая труба) выведена из положения равновесия каким-либо внешним воздействием (например, в него врезалась пролетающая мимо ворона, или пнул проходящий мимо негативно настроенный гражданин, или задел проплывающий мимо теплоход, или на объект свалилась сосулька с крыши). Ясно, что эта колебательная система начнет совершать затухающие колебания. Ясно, что эти затухающие колебания со временем «практически прекратятся». Предположим, что возникшие колебания будут продолжаться примерно 2,5 минуты и что за это время система успеет совершить примерно 100 колебаний. Оцените (разумеется, приближенно или даже «очень приближенно»), чему в этом случае будут равны:

А) период колебаний;

Б) частота колебаний;

В) циклическая частота колебаний;

Г) время затухания колебаний;

Д) коэффициент затухания колебаний;

Е) логарифмический декремент этих колебаний;

Ж) можете ли вы сказать, на сколько процентов будет уменьшаться амплитуда колебаний при каждом следующем покачивании системы?

З) пусть, например, амплитуда пятого качания была равна 15 см. Какой примерно будет амплитуда десятого качания? А амплитуда пятнадцатого качания?

Указание: при решении задачи не пользуйтесь точными формулами (это бессмысленно, потому что все равно у вас нет точных данных), а используйте простые оценочные соотношения, приведенные выше.

18. Пусть некоторая колебательная система (например, флагшток, или качели, или мост, или газовая труба) выведена из положения равновесия каким-либо внешним воздействием (например, в него врезалась пролетающая мимо ворона, или пнул проходящий мимо негативно настроенный гражданин, или задел проплывающий мимо теплоход, или на объект свалилась сосулька с крыши). Ясно, что эта колебательная система начнет совершать затухающие колебания. Ясно, что эти затухающие колебания со временем «практически прекратятся». Предположим, что возникшие колебания будут продолжаться примерно три минуты и что за это время система успеет совершить примерно 100 колебаний. Оцените (разумеется, приближенно или даже «очень приближенно»), чему в этом случае будут равны:

А) период колебаний;

Б) частота колебаний;

В) циклическая частота колебаний;

Г) время затухания колебаний;

Д) коэффициент затухания колебаний;

Е) логарифмический декремент этих колебаний;

Ж) можете ли вы сказать, на сколько процентов будет уменьшаться амплитуда колебаний при каждом следующем покачивании системы?

З) пусть, например, амплитуда пятого качания была равна 20 см. Какой примерно будет амплитуда десятого качания? А амплитуда пятнадцатого качания?

Указание: при решении задачи не пользуйтесь точными формулами (это бессмысленно, потому что все равно у вас нет точных данных), а используйте простые оценочные соотношения, приведенные выше.

19. Пусть некоторая колебательная система (например, флагшток, или качели, или мост, или газовая труба) выведена из положения равновесия каким-либо внешним воздействием (например, в него врезалась пролетающая мимо ворона, или пнул проходящий мимо негативно настроенный гражданин, или задел проплывающий мимо теплоход, или на объект свалилась сосулька с крыши). Ясно, что эта колебательная система начнет совершать затухающие колебания. Ясно, что эти затухающие колебания со временем «практически прекратятся». Предположим, что возникшие колебания будут продолжаться примерно четыре минуты и что за это время система успеет совершить примерно 100 колебаний. Оцените (разумеется, приближенно или даже «очень приближенно»), чему в этом случае будут равны:

А) период колебаний;

Б) частота колебаний;

В) циклическая частота колебаний;

Г) время затухания колебаний;

Д) коэффициент затухания колебаний;

Е) логарифмический декремент этих колебаний;

Ж) можете ли вы сказать, на сколько процентов будет уменьшаться амплитуда колебаний при каждом следующем покачивании системы?

З) пусть, например, амплитуда пятого качания была равна 25 см. Какой примерно будет амплитуда десятого качания? А амплитуда пятнадцатого качания?

Указание: при решении задачи не пользуйтесь точными формулами (это бессмысленно, потому что все равно у вас нет точных данных), а используйте простые оценочные соотношения, приведенные выше.

20. Пусть некоторая колебательная система (например, флагшток, или качели, или мост, или газовая труба) выведена из положения равновесия каким-либо внешним воздействием (например, в него врезалась пролетающая мимо ворона, или пнул проходящий мимо негативно настроенный гражданин, или задел проплывающий мимо теп-

лоход, или на объект свалилась сосулька с крыши). Ясно, что эта колебательная система начнет совершать затухающие колебания. Ясно, что эти затухающие колебания со временем «практически прекратятся». Предположим, что возникшие колебания будут продолжаться примерно пять минут и что за это время система успеет совершить примерно 100 колебаний. Оцените (разумеется, приближенно или даже «очень приближенно»), чему в этом случае будут равны:

А) период колебаний;

Б) частота колебаний;

В) циклическая частота колебаний;

Г) время затухания колебаний;

Д) коэффициент затухания колебаний;

Е) логарифмический декремент этих колебаний;

Ж) можете ли вы сказать, на сколько процентов будет уменьшаться амплитуда колебаний при каждом следующем покачивании системы?

З) пусть, например, амплитуда пятого качания была равна 5 см. Какой примерно будет амплитуда десятого качания? А амплитуда пятнадцатого качания?

Указание: при решении задачи не пользуйтесь точными формулами (это бессмысленно, потому что все равно у вас нет точных данных), а используйте простые оценочные соотношения, приведенные выше.

21. Пусть некоторая колебательная система (например, флагшток, или качели, или мост, или газовая труба) выведена из положения равновесия каким-либо внешним воздействием (например, в него врезалась пролетающая мимо ворона, или пнул проходящий мимо негативно настроенный гражданин, или задел проплывающий мимо теплоход, или на объект свалилась сосулька с крыши). Ясно, что эта колебательная система начнет совершать затухающие колебания. Ясно, что эти затухающие колебания со временем «практически прекратятся». Предположим, что возникшие колебания будут продолжаться примерно полторы минуты и что за это время система успеет совер-

шить примерно 160 колебаний. Оцените (разумеется, приближенно или даже «очень приближенно»), чему в этом случае будут равны:

А) период колебаний;

Б) частота колебаний;

В) циклическая частота колебаний;

Г) время затухания колебаний;

Д) коэффициент затухания колебаний;

Е) логарифмический декремент этих колебаний;

Ж) можете ли вы сказать, на сколько процентов будет уменьшаться амплитуда колебаний при каждом следующем покачивании системы?

З) пусть, например, амплитуда пятого качания была равна 10 см. Какой примерно будет амплитуда десятого качания? А амплитуда пятнадцатого качания?

Указание: при решении задачи не пользуйтесь точными формулами (это бессмысленно, потому что все равно у вас нет точных данных), а используйте простые оценочные соотношения, приведенные выше.

22. Пусть некоторая колебательная система (например, флагшток, или качели, или мост, или газовая труба) выведена из положения равновесия каким-либо внешним воздействием (например, в него врезалась пролетающая мимо ворона, или пнул проходящий мимо негативно настроенный гражданин, или задел проплывающий мимо теплоход, или на объект свалилась сосулька с крыши). Ясно, что эта колебательная система начнет совершать затухающие колебания. Ясно, что эти затухающие колебания со временем «практически прекратятся». Предположим, что возникшие колебания будут продолжаться примерно 2,5 минуты и что за это время система успеет совершить примерно 160 колебаний. Оцените (разумеется, приближенно или даже «очень приближенно»), чему в этом случае будут равны:

А) период колебаний;

Б) частота колебаний;

В) циклическая частота колебаний;

Г) время затухания колебаний;

Д) коэффициент затухания колебаний;

Е) логарифмический декремент этих колебаний;

Ж) можете ли вы сказать, на сколько процентов будет уменьшаться амплитуда колебаний при каждом следующем покачивании системы?

З) пусть, например, амплитуда пятого качания была равна 15 см. Какой примерно будет амплитуда десятого качания? А амплитуда пятнадцатого качания?

Указание: при решении задачи не пользуйтесь точными формулами (это бессмысленно, потому что все равно у вас нет точных данных), а используйте простые оценочные соотношения, приведенные выше.

23. Пусть некоторая колебательная система (например, флагшток, или качели, или мост, или газовая труба) выведена из положения равновесия каким-либо внешним воздействием (например, в него врезалась пролетающая мимо ворона, или пнул проходящий мимо негативно настроенный гражданин, или задел проплывающий мимо теплоход, или на объект свалилась сосулька с крыши). Ясно, что эта колебательная система начнет совершать затухающие колебания. Ясно, что эти затухающие колебания со временем «практически прекратятся». Предположим, что возникшие колебания будут продолжаться примерно три минуты и что за это время система успеет совершить примерно 160 колебаний. Оцените (разумеется, приближенно или даже «очень приближенно»), чему в этом случае будут равны:

А) период колебаний;

Б) частота колебаний;

В) циклическая частота колебаний;

Г) время затухания колебаний;

Д) коэффициент затухания колебаний;

Е) логарифмический декремент этих колебаний;

Ж) можете ли вы сказать, на сколько процентов будет уменьшаться амплитуда колебаний при каждом следующем покачивании системы?

З) пусть, например, амплитуда пятого качания была равна 20 см. Какой примерно будет амплитуда десятого качания? А амплитуда пятнадцатого качания?

Указание: при решении задачи не пользуйтесь точными формулами (это бессмысленно, потому что все равно у вас нет точных данных), а используйте простые оценочные соотношения, приведенные выше.

24. Пусть некоторая колебательная система (например, флагшток, или качели, или мост, или газовая труба) выведена из положения равновесия каким-либо внешним воздействием (например, в него врезалась пролетающая мимо ворона, или пнул проходящий мимо негативно настроенный гражданин, или задел проплывающий мимо теплоход, или на объект свалилась сосулька с крыши). Ясно, что эта колебательная система начнет совершать затухающие колебания. Ясно, что эти затухающие колебания со временем «практически прекратятся». Предположим, что возникшие колебания будут продолжаться примерно четыре минуты и что за это время система успеет совершить примерно 160 колебаний. Оцените (разумеется, приближенно или даже «очень приближенно»), чему в этом случае будут равны:

А) период колебаний;

Б) частота колебаний;

В) циклическая частота колебаний;

Г) время затухания колебаний;

Д) коэффициент затухания колебаний;

Е) логарифмический декремент этих колебаний;

Ж) можете ли вы сказать, на сколько процентов будет уменьшаться амплитуда колебаний при каждом следующем покачивании системы?

З) пусть, например, амплитуда пятого качания была равна 25 см. Какой примерно будет амплитуда десятого качания? А амплитуда пятнадцатого качания?

Указание: при решении задачи не пользуйтесь точными формулами (это бессмысленно, потому что все равно у вас нет точных данных), а используйте простые оценочные соотношения, приведенные выше.

25. Пусть некоторая колебательная система (например, флагшток, или качели, или мост, или газовая труба) выведена из положения равновесия каким-либо внешним воздействием (например, в него врезалась пролетающая мимо ворона, или пнул проходящий мимо негативно настроенный гражданин, или задел проплывающий мимо теплоход, или на объект свалилась сосулька с крыши). Ясно, что эта колебательная система начнет совершать затухающие колебания. Ясно, что эти затухающие колебания со временем «практически прекратятся». Предположим, что возникшие колебания будут продолжаться примерно пять5 минут и что за это время система успеет совершить примерно 160 колебаний. Оцените (разумеется, приближенно или даже «очень приближенно»), чему в этом случае будут равны:

А) период колебаний;

Б) частота колебаний;

В) циклическая частота колебаний;

Г) время затухания колебаний;

Д) коэффициент затухания колебаний;

Е) логарифмический декремент этих колебаний;

Ж) можете ли вы сказать, на сколько процентов будет уменьшаться амплитуда колебаний при каждом следующем покачивании системы?

З) пусть, например, амплитуда пятого качания была равна 5 см. Какой примерно будет амплитуда десятого качания? А амплитуда пятнадцатого качания?

Указание: при решении задачи не пользуйтесь точными формулами (это бессмысленно, потому что все равно у вас нет точных данных), а используйте простые оценочные соотношения, приведенные выше.

26. Пусть некоторая колебательная система (например, флагшток, или качели, или мост, или газовая труба) выведена из положения равновесия каким-либо внешним воздействием (например, в него врезалась пролетающая мимо ворона, или пнул проходящий мимо негативно настроенный гражданин, или задел проплывающий мимо теп-

лоход, или на объект свалилась сосулька с крыши). Ясно, что эта колебательная система начнет совершать затухающие колебания. Ясно, что эти затухающие колебания со временем «практически прекратятся». Предположим, что возникшие колебания будут продолжаться примерно полторы минуты и что за это время система успеет совершить примерно 200 колебаний. Оцените (разумеется, приближенно или даже «очень приближенно»), чему в этом случае будут равны:

А) период колебаний;

Б) частота колебаний;

В) циклическая частота колебаний;

Г) время затухания колебаний;

Д) коэффициент затухания колебаний;

Е) логарифмический декремент этих колебаний;

Ж) можете ли вы сказать, на сколько процентов будет уменьшаться амплитуда колебаний при каждом следующем покачивании системы?

З) пусть, например, амплитуда пятого качания была равна 10 см. Какой примерно будет амплитуда десятого качания? А амплитуда пятнадцатого качания?

Указание: при решении задачи не пользуйтесь точными формулами (это бессмысленно, потому что все равно у вас нет точных данных), а используйте простые оценочные соотношения, приведенные выше.

27. Пусть некоторая колебательная система (например, флагшток, или качели, или мост, или газовая труба) выведена из положения равновесия каким-либо внешним воздействием (например, в него врезалась пролетающая мимо ворона, или пнул проходящий мимо негативно настроенный гражданин, или задел проплывающий мимо теплоход, или на объект свалилась сосулька с крыши). Ясно, что эта колебательная система начнет совершать затухающие колебания. Ясно, что эти затухающие колебания со временем «практически прекратятся». Предположим, что возникшие колебания будут продолжаться примерно 2,5 минуты и что за это время система успеет совершить

примерно 200 колебаний. Оцените (разумеется, приближенно или даже «очень приближенно»), чему в этом случае будут равны:

А) период колебаний;

Б) частота колебаний;

В) циклическая частота колебаний;

Г) время затухания колебаний;

Д) коэффициент затухания колебаний;

Е) логарифмический декремент этих колебаний;

Ж) можете ли вы сказать, на сколько процентов будет уменьшаться амплитуда колебаний при каждом следующем покачивании системы?

З) пусть, например, амплитуда пятого качания была равна 15 см. Какой примерно будет амплитуда десятого качания? А амплитуда пятнадцатого качания?

Указание: при решении задачи не пользуйтесь точными формулами (это бессмысленно, потому что все равно у вас нет точных данных), а используйте простые оценочные соотношения, приведенные выше.

28. Пусть некоторая колебательная система (например, флагшток, или качели, или мост, или газовая труба) выведена из положения равновесия каким-либо внешним воздействием (например, в него врезалась пролетающая мимо ворона, или пнул проходящий мимо негативно настроенный гражданин, или задел проплывающий мимо теплоход, или на объект свалилась сосулька с крыши). Ясно, что эта колебательная система начнет совершать затухающие колебания. Ясно, что эти затухающие колебания со временем «практически прекратятся». Предположим, что возникшие колебания будут продолжаться примерно три минуты и что за это время система успеет совершить примерно 200 колебаний. Оцените (разумеется, приближенно или даже «очень приближенно»), чему в этом случае будут равны:

А) период колебаний;

Б) частота колебаний;

В) циклическая частота колебаний;

Г) время затухания колебаний;

Д) коэффициент затухания колебаний;

Е) логарифмический декремент этих колебаний;

Ж) можете ли вы сказать, на сколько процентов будет уменьшаться амплитуда колебаний при каждом следующем покачивании системы?

З) пусть, например, амплитуда пятого качания была равна 20 см. Какой примерно будет амплитуда десятого качания? А амплитуда пятнадцатого качания?

Указание: при решении задачи не пользуйтесь точными формулами (это бессмысленно, потому что все равно у вас нет точных данных), а используйте простые оценочные соотношения, приведенные выше.

29. Пусть некоторая колебательная система (например, флагшток, или качели, или мост, или газовая труба) выведена из положения равновесия каким-либо внешним воздействием (например, в него врезалась пролетающая мимо ворона, или пнул проходящий мимо негативно настроенный гражданин, или задел проплывающий мимо теплоход, или на объект свалилась сосулька с крыши). Ясно, что эта колебательная система начнет совершать затухающие колебания. Ясно, что эти затухающие колебания со временем «практически прекратятся». Предположим, что возникшие колебания будут продолжаться примерно четыре минуты и что за это время система успеет совершить примерно 200 колебаний. Оцените (разумеется, приближенно или даже «очень приближенно»), чему в этом случае будут равны:

А) период колебаний;

Б) частота колебаний;

В) циклическая частота колебаний;

Г) время затухания колебаний;

Д) коэффициент затухания колебаний;

Е) логарифмический декремент этих колебаний;

Ж) можете ли вы сказать, на сколько процентов будет уменьшаться амплитуда колебаний при каждом следующем покачивании системы?

З) пусть, например, амплитуда пятого качания была равна 25 см. Какой примерно будет амплитуда десятого качания? А амплитуда пятнадцатого качания?

Указание: при решении задачи не пользуйтесь точными формулами (это бессмысленно, потому что все равно у вас нет точных данных), а используйте простые оценочные соотношения, приведенные выше.

30. Пусть некоторая колебательная система (например, флагшток, или качели, или мост, или газовая труба) выведена из положения равновесия каким-либо внешним воздействием (например, в него врезалась пролетающая мимо ворона, или пнул проходящий мимо негативно настроенный гражданин, или задел проплывающий мимо теплоход, или на объект свалилась сосулька с крыши). Ясно, что эта колебательная система начнет совершать затухающие колебания. Ясно, что эти затухающие колебания со временем «практически прекратятся». Предположим, что возникшие колебания будут продолжаться примерно пять минут и что за это время система успеет совершить примерно 200 колебаний. Оцените (разумеется, приближенно или даже «очень приближенно»), чему в этом случае будут равны:

А) период колебаний;

Б) частота колебаний;

В) циклическая частота колебаний;

Г) время затухания колебаний;

Д) коэффициент затухания колебаний;

Е) логарифмический декремент этих колебаний;

Ж) можете ли вы сказать, на сколько процентов будет уменьшаться амплитуда колебаний при каждом следующем покачивании системы?

З) пусть, например, амплитуда пятого качания была равна 5 см. Какой примерно будет амплитуда десятого качания? А амплитуда пятнадцатого качания?

Указание: при решении задачи не пользуйтесь точными формулами (это бессмысленно, потому что все равно у вас нет точных данных), а используйте простые оценочные соотношения, приведенные выше.

4. МАГНЕТИЗМ, РАМКА ЭРСТЕДА И ВЕЛИКИЕ ОБЪЕДИНЕНИЯ

Основы теории

Материал данной главы пригодится вам при выполнении **экспериментального задания № 4-0 [6,7].** Это экспериментальное задание является прекрасной экспериментальной иллюстрацией изложенного в настоящей главе теоретического материала.

Электричество и магнетизм известны людям с древнейших времен. Уже древние греки знали, что если потереть кусочек янтаря (а янтарь по-гречески – «электрон») о шерсть, то после этой нехитрой процедуры он начинает притягивать к себе мелкий мусор – волосинки, ниточки и так далее. Вы, конечно, знаете, что это происходит потому, что при трении происходит «электризация трением»[9], смысл которой сводится к переходу части электрического заряда с янтаря на шерсть и в результате которой и янтарь, и шерсть (прежде электронейтральные) оказываются электрически заряженными зарядами противоположного знака (янтарь – отрицательно, а шерсть – положительно).

Те же самые древние греки знали и о магнетизме. Слово «магнит» происходит от названия города Магнезия в Малой Азии, из которого привозили природные магниты – магнитный железняк. Первым, кто письменно описал электрические и магнитные явления, был, вероятно, великий древнегреческий философ Фалес Милетский. Он жил в седьмом веке до нашей эры в городе Милет (греческая колония в Малой Азии) и был одним из основателей древнегреческой (а стало быть, и нашей с вами) науки и философии.

Практическое применение у «древнегреческого» электричества отсутствовало (если не считать практическим применением гибель людей и животных в результате ударов молнии, каковая, впрочем, не связывалась с янтарем, а относилась к деятельности богов-громовержцев[10]).

---

[9] Трение тут, конечно, ни при чем: оно просто обеспечивает хороший контакт янтаря с шерстью на большой поверхности.

[10] Зевс у греков, Юпитер у римлян, Перун у славян и так далее.

Магнетизм же уже в древности имел очень важное практическое применение – **компас**. Компас изобрели китайцы. Уже в III веке до нашей эры китайский философ Хэнь Фэй-цзы описал компас в виде тщательно отполированного шарообразного куска магнита с выступом-указателем. Этот магнит устанавливался на гладкой пластинке, которой он касался только в одной точке. Поэтому магнит мог свободно поворачиваться в любую сторону. Он это и делал, попутно указывая выступом-стрелкой на юг. В XI веке нашей эры (всего-навсего через полторы тысячи лет) китайцы усовершенствовали конструкцию компаса, придумав «плавающий компас» – кусочек магнита, прикрепленный к деревянной рыбке, плавающей в сосуде с водой. Такая конструкция обеспечивала еще меньшее трение и, соответственно, большую точность. В XI веке многие китайские корабли были укомплектованы плавающими компасами – это позволяло капитанам точно держать курс в открытом море без помощи звезд и более того – независимо от наличия или отсутствия облаков (и звезд, разумеется) на небе. Китайские ученые даже знали о магнитном склонении: они понимали, что стрелка магнита указывает не точно на южный географический полюс, а немного в сторону, и умели вычислять магнитное склонение для разных районов Китая.

В XII веке арабские моряки переняли компас у китайских, а в XIII веке – итальянские у арабских. Чуть позже компас появился у прочих европейцев – испанцев, португальцев, французов. Самыми последними к этому новшеству присоединились немцы и англичане. Компас произвел настоящую революцию в мореплавании. Именно появление компаса позволило кораблям уверенно ориентироваться в открытом море, а не жаться к берегам во избежание страшной участи – безвозвратно потеряться в океане. Без компаса не состоялось бы и открытие Америки: никто просто не отважился бы отплыть от берега на расстояние нескольких месяцев плавания.

Только в конце XVI века английский ученый Уильям Гильберт (рис. 4.1) обнаружил, что электризации трением подвержен не только янтарь, но и многие другие вещества, например стекло, потертое о шелк. Тот же Гильберт впервые изготовил примитивный электроскоп

и ввел сам термин «электризация». А вот существования двух типов электрического заряда Гильберт не открыл. Это сделал французский физик Шарль Франсуа Дюфе лет через 100 после Гильберта – в 1733 году. Еще через 15 лет (в 1748 году) великий американский государственный деятель, просветитель и ученый Бенджамин Франклин[11] (рис. 4.2) назвал один вид электрического заряда положительным, а другой – отрицательным.

Рис. 4.1. Уильям Гильберт, впервые предложивший термин «электризация»

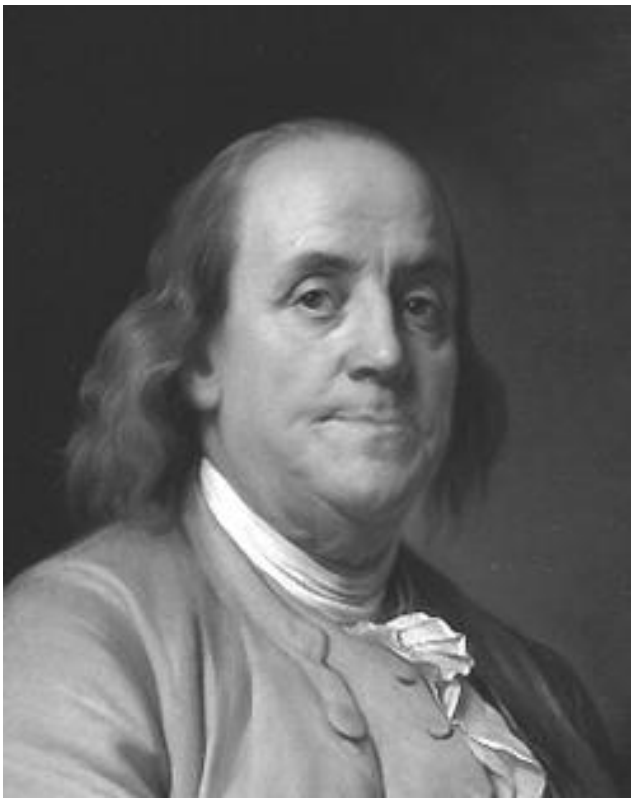


Рис. 4.2. Бенджамин Франклин. Великий американский политический и государственный деятель, просветитель и ученый

Дальше развитие теории электричества и теории магнетизма (именно так – по отдельности) пошло гораздо быстрее. Так, уже в 1785 году Шарль Огюстен Кулон (рис. 4.3) открыл закон Кулона для взаимодействия точечных электрических зарядов (и еще один – точно такой

[11] Франклин Бенджамин (Benjamin Franklin) (17 января 1705, Бостон — 17 апреля 1790, Филадельфия) – американский государственный деятель, главное украшение современной стодолларовой купюры США.

же «закон обратных квадратов» – для взаимодействия точечных магнитных зарядов, в роли которых выступали острые концы намагниченных спиц). Формальная аналогия между электростатикой и магнитостатикой свидетельствовала о сходном характере этих явлений, но не более того. Магнетизм и электричество считались независимыми друг от друга, хотя и сходными явлениями. Никто не мог похвастаться тем, что ему удалось с помощью магнетизма получить электричество или с помощью электричества – магнетизм. Первым получил «магнетизм из электричества» Х.Х. Эрстед (рис. 4.4) в 1820 году, а «электричество из магнетизма» – Майкл Фарадей (рис. 4.5) в 1831 году.

Рис. 4.3. Шарль Огюстен Кулон – открыватель двух законов Кулона

Рис. 4.4. Ханс Христиан Эрстед – открыватель магнитного действия тока. Нарисован с магнитной стрелкой

Открытие Эрстедом магнитного действия электрического тока в 1820 году произвело большое впечатление на современников. Смысл этого открытия состоял в том, что электрический ток создает вокруг себя магнитное поле. Удивительно, но этого до Эрстеда никто не замечал. Да и сам Эрстед заметил это явление случайно – во время проведения

лекционной демонстрации рядом с проводом оказалась магнитная стрелка и кто-то заметил, что при включении тока она качнулась.

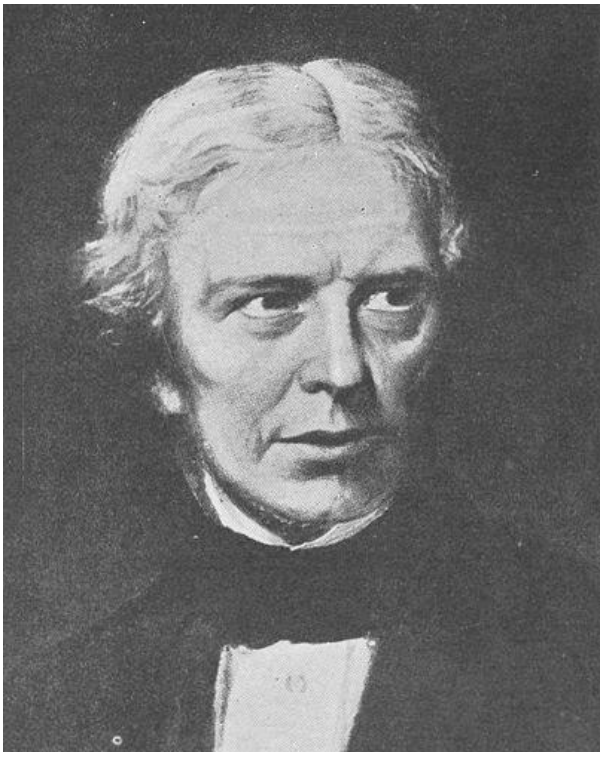


Рис. 4.5. Майкл Фарадей, открывший закон электромагнитной индукции Фарадея

Важность открытия Эрстеда заключалась в том, что два типа физических явлений, дотоле считавшихся совершенно независимыми друг от друга, оказались просто двумя сторонами одного и того же – электромагнитного – взаимодействия тел. По существу, это было первым из «великих объединений», каждое из которых составляет веху в развитии физики и сводится к увеличению степени простоты и глубины наших представлений об окружающем мире. Именно открытия Эрстеда (магнитное действие электрического тока) и Фарадея (создание электрического поля переменным магнитным полем) можно рассматривать как **первое** (по времени) **из «великих объединений» – объединение электричества и магнетизма.**

Вторым «великим объединением» было открытие общефизического закона сохранения энергии для тепловых и механических явлений (он же первое начало термодинамики), установленного в период с 1840 по 1850 год Ю.Р. Майером, Д.П. Джоулем и Г.Л. Гельмгольцем.

Третьим «великим объединением» является вывод Джеймса Клерка Максвелла (рис. 4.6) о том, что свет – это электромагнитная волна. Этот вывод Максвелл сделал в 1864 году, когда выяснилось, что следствием четырех уравнений Максвелла является вывод о существовании электромагнитных волн, скорость которых оказалась в точности совпадающей со скоростью света в вакууме. Это было «великое объединение» электромагнетизма и оптики.

Рис. 4.6. Джеймс Клерк Максвелл
– объединитель оптики и электромагнетизма

Четвертым и пока что последним из «великих объединений» является создание теории электрослабого взаимодействия, имевшее место в 60-х годах XX века. Эта теория была создана трудами С. Вайнберга, Ш. Глэшоу и А. Салама. Смысл ее состоит в том, что считавшиеся дотоле независимыми электромагнитное и слабое взаимодействие на самом деле являются просто разными проявлениями единого – электрослабого взаимодействия.

Вы ведь знаете, что в природе существует всего **4 типа фундаментальных взаимодействий: гравитационное, электромагнитное, сильное и слабое**? Так ведь это, строго говоря, теперь уже неверно. После открытия Вайнберга, Глэшоу и Салама фундаментальных взаимодействий в природе всего три – гравитационное, **электрослабое** и сильное.

Пятым «великим объединением» можно считать ожидающееся в ближайшие 10-20 лет создание единой теории электрослабого и сильного взаимодействия. Контуры этой теории уже наметились, и существует мнение о том, что ее создание неизбежно в ближайшем будущем. Эта теория объединит воедино электрослабое и сильное взаимодействие. Как будет называться это объединенное взаимодействие, пока неизвестно. Но после создания этой теории в природе останется только два фундаментальных взаимодействия – гравитационное и еще одно (объединенное «электрослабосильное» взаимодействие).

Шестым «великим объединением», может быть, будет являться создание объединенной теории гравитации и всех остальных взаимодействий. Это «великое объединение» пока что только мыслится «в далекой исторической перспективе». Но название для соответствующей теории уже есть – это теория супергравитации (или суперсимметрии – кому что больше нравится). Пока что существует по меньшей мере несколько теорий суперсимметрии, каждая из которых не в состоянии «свести концы с концами», то есть объяснить наблюдаемые свойства всех четырех фундаментальных взаимодействий без логических противоречий и противоречий с экспериментом.

Чтобы вы не запутались, все эти «великие объединения» сведены в приведенную ниже табл. 4.1:

Таблица 4.1

Номер объединения	**Что с чем объединилось**	**Кто это сделал**	**Когда это случилось**
1	Электричество и магнетизм	Эрстед и Фарадей	1820-1831
2	Теплота и механика	Майер, Джоуль, Гельмгольц	1840-1850
3	Электромагнетизм и оптика	Максвелл	1864
4	Электромагнитное и слабое взаимодействие	Вайнберг, Глэшоу, Салам	1960-1970
5	Электрослабое и сильное взаимодействие	?	?
6	Все четыре фундаментальных взаимодействия, включая гравитацию	???	???

В данной лабораторной работе вам предстоит убедиться в том, что электрический ток действительно создает магнитное поле, то есть проверить открытие Эрстеда. Опыт этот прост, но очень важен: как-никак, первое из великих объединений – это не шутка. И оно ничем не хуже и не менее важно, чем создание теории суперсимметрии.

Описание установки

Установка для выполнения работы выглядит очень просто (рис. 4.7). Основной ее частью является, разумеется, обычный компас (рис. 4.8), то есть магнитная стрелка в коробочке с прозрачным верхом, свободно (практически без трения[12]) вращающаяся на вертикальной оси и указывающая направление на южный магнитный полюс (красный конец) и северный магнитный полюс (синий конец). Впрочем, сказанное справедливо только в случае отсутствия вблизи стрелки какого-либо иного магнитного поля, кроме магнитного поля Земли, потому что магнитная стрелка – это просто линейный магнит, который знать ничего не знает о севере и юге и в состоянии равновесия направлен вдоль внешнего магнитного поля, откуда бы это внешнее поле ни бралось – от Земли, от ближайшего трансформатора или от намагниченного напильника (подложенного злодеями вблизи корабельного компаса с целью запутать пятнадцатилетнего капитана[13]). Если этим внешним магнитным полем будет магнитное поле Земли, то он будет указывать на север и юг. Поэтому второй основной частью нашей установки является катушка с проводом, в середине которой и размещен компас. Если по этому проводу пропускать электрический ток, то он будет создавать вблизи компаса некоторое дополнительное (по отношению к земному) магнитное поле и направление стрелки компаса изменится. Это изменение направления и будет доказательством того, что Эрстед был прав и постоянный электрический ток действительно создает постоянное магнитное поле.

[12] Но не совсем: если бы трения совсем не было, то стрелка никогда бы не останавливалась вблизи от положения равновесия – так бы вечно и качалась.

[13] Впрочем, сейчас никто не читает Жюль Верна. А жаль…

Поскольку ток сам по себе через нашу катушку не потечет, то третьей (и последней) частью нашей установки является регулируемый источник постоянного тока, снабженный ручкой регулировки силы тока и амперметром для его измерения.

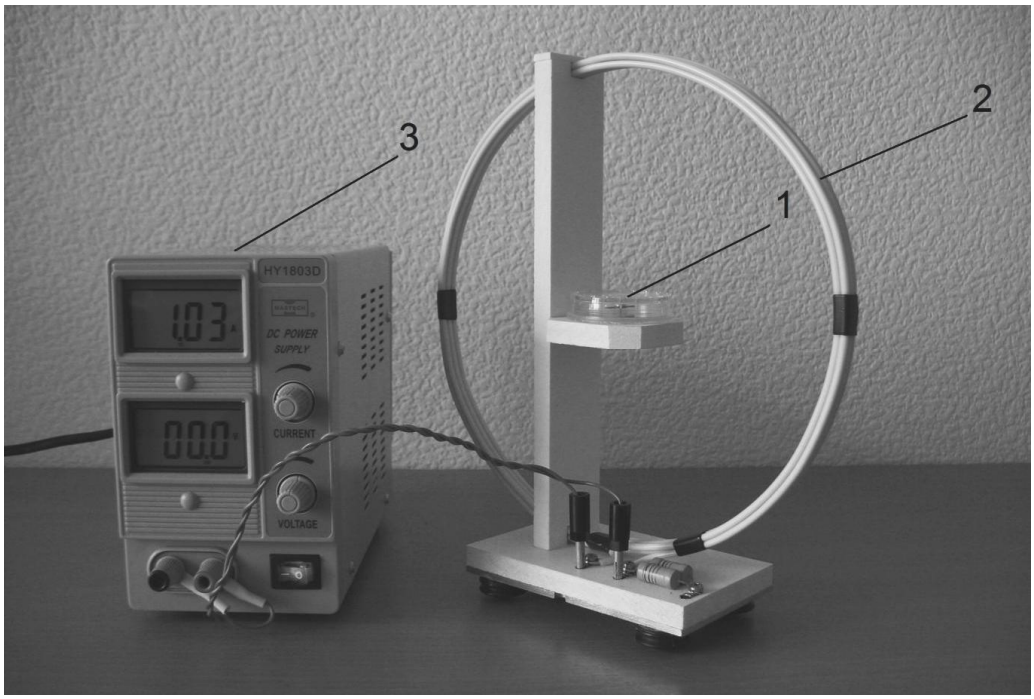


Рис. 4.7. Установка для проверки магнитного действия электрического тока:
1 – компас, 2 – рамка (с током), 3 – источник питания

Рис. 4.8. Компас. В данный момент магнитное поле в центре рамки направлено под углом 60^0 к плоскости рамки. Цена деления шкалы – 5^0

Порядок выполнения работы. Измерения и расчеты

Прежде чем писать, что вам надо сделать, отметим, **чего вам делать не надо**.

Вам категорически запрещено следующее:

А. Увеличивать силу тока в цепи свыше 2,5 А.

Б. Забывать выключать источник постоянного тока после проведения измерений.

В. Сдвигать катушку с места и изменять ее ориентацию. Как лаборант поставил – так пусть и стоит. Если случайно сдвинули – позовите лаборанта или преподавателя, они поправят.

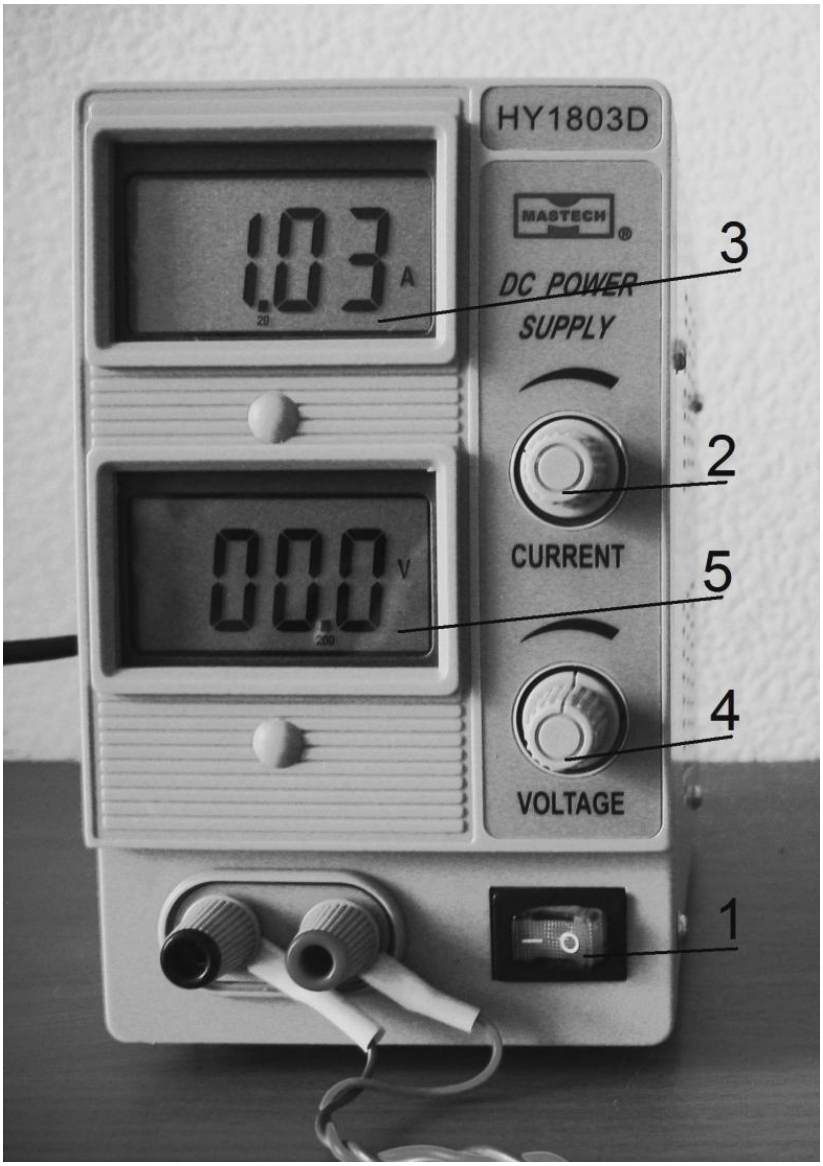


Рис. 4.9. Передняя панель источника питания:

1 – выключатель; 2 – ручка регулировки силы тока; 3 – величина силы тока в цепи; 4 – ручка регулировки напряжения; 5 – величина напряжения

Вы должны сделать следующее:

1. Запишите в таблицу угол отклонения стрелки компаса (рис. 4.8) при выключенном источнике тока.

2. Проверьте, что ручка регулировки напряжения на источнике питания (рис. 4.9) стоит в среднем положении (как на рисунке; риской вверх). Если это не так, позовите лаборанта, пусть поставит ее как надо.

3. Поверните рукоятку регулировки силы тока на источнике тока (рис. 4.9) в крайнее левое положение (против часовой стрелки) и после этого включите источник тока с помощью выключателя клавишного типа (расположенного на его передней панели, см. рис. 4.9). Посмотрите на амперметр и убедитесь в двух вещах: во-первых, сила тока должна быть равна нулю, и, во-вторых, магнитная стрелка не должна изменить свое положение. Если этого не произошло, позовите преподавателя, пусть он вас поругает за то, что вы даже включить источник тока правильно не можете.

4. Осторожно и очень медленно поворачивая рукоятку регулировки силы тока по часовой стрелке и следя за показаниями амперметра, добейтесь силы тока в цепи примерно 0,2 А. Именно примерно: сойдет и 0,17 А, и 0,26 А. Не надо добиваться точно 0,20 А. Подождите некоторое время, пока магнитная стрелка успокоится, и после этого запишите в табл. 4.2 значение силы тока в цепи и значение угла отклонения магнитной стрелки.

5. Увеличьте силу тока в цепи примерно до 0,4 А и запишите в эту таблицу новую силу тока и соответствующий угол отклонения магнитной стрелки.

6. Проделайте то же самое для силы тока примерно 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,4, 1,6, 1,8 и 2.0 А. Результаты запишите в таблицу.

7. Уменьшите силу тока в цепи до нуля (повернув ручку регулировки силы тока против часовой стрелки до упора) и выключите источник постоянного тока (выключателем клавишного типа на его передней панели). Не забудьте это сделать!

8. Постройте график зависимости угла отклонения магнитной стрелки от нулевого деления шкалы от силы тока в цепи. **Если вы не умеете строить графики,** подойдите к преподавателю и попросите помочь.

9. Подумайте, что происходит с углом отклонения при увеличении силы тока в цепи и почему. Как направлено магнитное поле катушки с током в ее середине? Запишите свои выводы в конспект.

10. Покажите конспект преподавателю.

Таблица 4.2

Зависимость угла отклонения магнитной стрелки от силы тока

Сила тока (А)	Угол отклонения магнитной стрелки, градусы	Сила тока (А)	Угол отклонения магнитной стрелки, градусы

Контрольные вопросы

1. Сколько всего различных фундаментальных взаимодействий известно в природе? Перечислите их.

2. Какие физические явления связаны с гравитационным взаимодействием? Как изменился бы наш мир, если бы гравитационное взаимодействие внезапно «выключилось»?

3. Какое влияние гравитационное взаимодействие оказывает на строение атомного ядра? Что изменится в атомном ядре, если гравитационное взаимодействие внезапно «выключится»?

4. Какое влияние гравитационное взаимодействие оказывает на строение атома? Что изменится в атоме, если гравитационное взаимодействие внезапно «выключится»?

5. Какое влияние гравитационное взаимодействие оказывает на строение молекулы? Что изменится в молекуле, если гравитационное взаимодействие внезапно «выключится»?

6. Какое влияние гравитационное взаимодействие оказывает на форму планет? Что изменится, если гравитационное взаимодействие внезапно «выключится»?

7. Какое влияние гравитационное взаимодействие оказывает на форму звезд? Что изменится, если гравитационное взаимодействие внезапно «выключится»?

8. Какое влияние гравитационное взаимодействие оказывает на Солнечную систему? Что изменится, если гравитационное взаимодействие внезапно «выключится»?

9. Какое влияние гравитационное взаимодействие оказывает на Галактику? Что изменится, если гравитационное взаимодействие внезапно «выключится»?

10. Какие физические явления связаны с гравитационным взаимодействием? Как изменился бы наш мир, если бы электромагнитное взаимодействие внезапно «выключилось»?

11. Какое влияние электромагнитное взаимодействие оказывает на строение атомного ядра? Что изменится в атомном ядре, если электромагнитное взаимодействие внезапно «выключится»?

12. Какое влияние электромагнитное взаимодействие оказывает на строение атома? Что изменится в атоме, если электромагнитное взаимодействие внезапно «выключится»?

13. Какое влияние электромагнитное взаимодействие оказывает на строение молекулы? Что изменится в молекуле, если электромагнитное взаимодействие внезапно «выключится»?

14. Какое влияние электромагнитное взаимодействие оказывает на форму планет? Что изменится, если электромагнитное взаимодействие внезапно «выключится»?

15. Какое влияние электромагнитное взаимодействие оказывает на форму звезд? Что изменится, если электромагнитное взаимодействие внезапно «выключится»?

16. Какое влияние электромагнитное взаимодействие оказывает на Солнечную систему? Что изменится, если электромагнитное взаимодействие внезапно «выключится»?

17. Какое влияние электромагнитное взаимодействие оказывает на Галактику? Что изменится, если электромагнитное взаимодействие внезапно «выключится»?

18. Какие физические явления связаны с гравитационным взаимодействием? Как изменился бы наш мир, если бы слабое взаимодействие внезапно «выключилось»?

19. Какое влияние слабое взаимодействие оказывает на строение атомного ядра? Что изменится в атомном ядре, если слабое взаимодействие внезапно «выключится»?

20. Какое влияние слабое взаимодействие оказывает на строение атома? Что изменится в атоме, если слабое взаимодействие внезапно «выключится»?

21. Какое влияние слабое взаимодействие оказывает на строение молекулы? Что изменится в молекуле, если слабое взаимодействие внезапно «выключится»?

22. Какое влияние слабое взаимодействие оказывает на форму планет? Что изменится, если слабое взаимодействие внезапно «выключится»?

23. Какое влияние слабое взаимодействие оказывает на форму звезд? Что изменится, если слабое взаимодействие внезапно «выключится»?

24. Какое влияние слабое взаимодействие оказывает на Солнечную систему? Что изменится, если слабое взаимодействие внезапно «выключится»?

25. Какое влияние слабое взаимодействие оказывает на Галактику? Что изменится, если слабое взаимодействие внезапно «выключится»?

26. Какие физические явления связаны с гравитационным взаимодействием? Как изменился бы наш мир, если бы сильное взаимодействие внезапно «выключилось»?

27. Какое влияние сильное взаимодействие оказывает на строение атомного ядра? Что изменится в атомном ядре, если сильное взаимодействие внезапно «выключится»?

28. Какое влияние сильное взаимодействие оказывает на строение атома? Что изменится в атоме, если сильное взаимодействие внезапно «выключится»?

29. Какое влияние сильное взаимодействие оказывает на строение молекулы? Что изменится в молекуле, если сильное взаимодействие внезапно «выключится»?

30. Какое влияние сильное взаимодействие оказывает на форму планет? Что изменится, если сильное взаимодействие внезапно «выключится»?

31. Какое влияние сильное взаимодействие оказывает на форму звезд? Что изменится, если сильное взаимодействие внезапно «выключится»?

32. Какое влияние сильное взаимодействие оказывает на Солнечную систему? Что изменится, если сильное взаимодействие внезапно «выключится»?

33. Какое влияние сильное взаимодействие оказывает на Галактику? Что изменится, если сильное взаимодействие внезапно «выключится»?

5. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА. ТЕЛЕСКОП

Основы теории

Материал данной главы пригодится вам при выполнении **экспериментального задания № 5-0 [6,7].** Это экспериментальное задание является прекрасной экспериментальной иллюстрацией изложенного в настоящей главе теоретического материала.

Геометрическая оптика в настоящее время является одним из разделов оптики, оптика – одним из разделов теории электромагнитных волн, теория электромагнитных волн – одним из разделов классической электродинамики, а электродинамика – одним из разделов физики.

Рис. 5.1. Великий древнегреческий математик Евклид

Но исторический ход развития науки вовсе не обязательно совпадает с ее современной логической структурой. Поэтому исторически геометрическая оптика возникла гораздо раньше всех перечисленных выше разделов физики: уже в III веке до нашей эры великий древнегреческий математик Евклид (рис. 5.1) писал трактаты и по геометрии, и по оптике (разумеется, геометрической: другой тогда просто не было).

Четыре основные закона геометрической оптики вам знакомы еще со средней школы: это закон прямолинейного распространения

светового луча в однородной среде (1), закон независимости световых пучков (2), закон отражения света от гладкой поверхности (3) и закон преломления света на границе двух прозрачных сред (4).

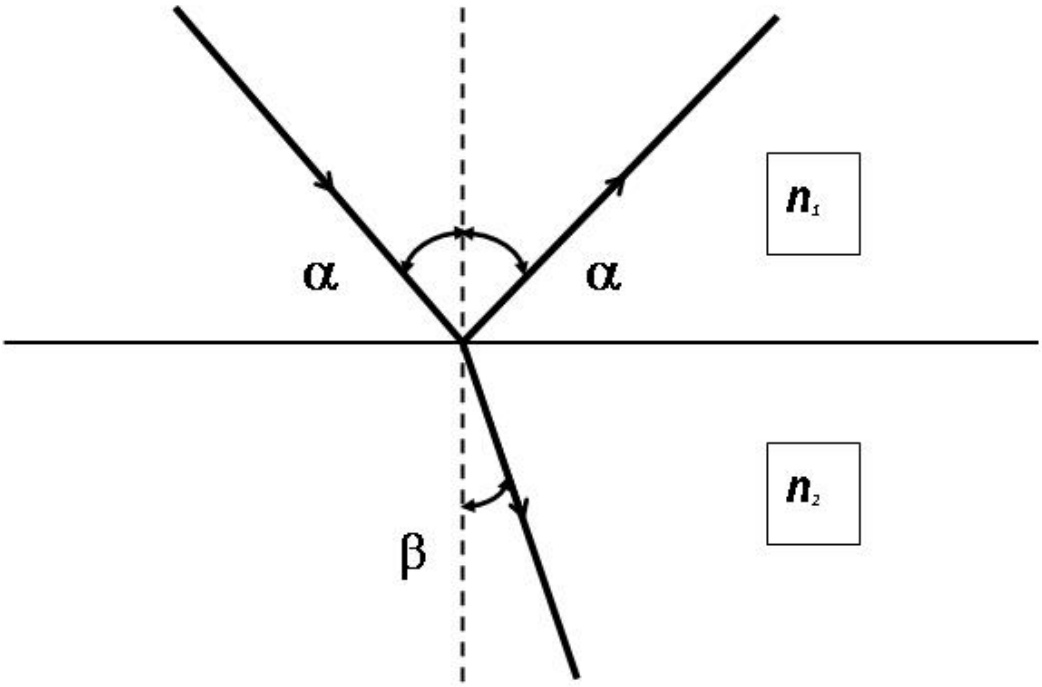


Рис. 5.2. Закон отражения и преломления

Закон прямолинейного распространения светового луча гласит, что в однородной среде световой луч распространяется по прямой линии. Этот закон упоминается уже в сочинении Евклида по оптике (III век до нашей эры) и, вероятно, был известен еще раньше. Опытным доказательством этого закона может служить наблюдение над резкими тенями, которые дает точечный источник света или известный опыт с камерой-обскурой. Весьма вероятно, что само понятие прямой возникло именно из наблюдений над световыми лучами, а не наоборот.

Закон независимости световых пучков утверждает, что пересечение световых лучей не оказывает никакого воздействия на их дальнейшее распространение, в отличие, например, от пересечения двух струй воды из шлангов. В современной интерпретации этот закон можно считать следствием принципа суперпозиции для электромагнитного поля.

Законы отражения и преломления гласят, что при отражении от плоской границы раздела двух сред падающий, отраженный и преломленный световые лучи лежат в одной плоскости друг с другом и с перпендикуляром, восстановленным к границе раздела сред в точке отражения, причем угол падения равен углу отражения, а синус угла падения относится к синусу угла преломления как показатели преломления среды, в которую проникает световой луч, и среды, из которой он проникает – $\sin\alpha/\sin\beta = n_2/n_1$ (рис. 5.2).

Закон отражения также упоминается уже в «Оптике» Евклида (III век до н.э.) – очевидно, он был известен еще раньше.

Закон же преломления по сравнению с первыми тремя – сущий «младенец». Само явление преломления света, конечно, было известно очень давно: о нем упоминает уже великий древнегреческий философ Аристотель (рис. 1.1) в IV веке до нашей эры. Очень серьезная попытка установить количественную форму закона преломления была предпринята в 120 году н. э. великим древнегреческим астрономом Птолемеем. Птолемей (он же – Птоломей) Клавдий родился около 90 года н. э., а умер около 160 года н. э. Он разработал математическую теорию движения планет вокруг неподвижной Земли, позволявшую предвычислять их положение на небе. Вместе с теорией движения Солнца и Луны она составила так называемую **птолемееву систему мира**. Эта система мира (**геоцентрическая**) верой и правдой служила человечеству почти полторы тысячи лет – вплоть до появления в XVI веке **гелиоцентрической системы мира Коперника**. Система Птолемея изложена в его главном труде «Альмагест» – энциклопедии астрономических знаний древних. В «Альмагесте» приведены также сведения по прямолинейной и сферической тригонометрии, впервые дано решение ряда математических задач. Впрочем, Птолемей занимался не только астрономией – в области оптики он исследовал преломление и рефракцию света, в труде «География» дал свод географических сведений античного мира.

Птолемей провел серию весьма точных по тем временам измерений углов падения и преломления, но пришел к неверному выводу о том, что постоянной величиной при преломлении света на границе

раздела двух сред является не отношение их синусов (см. выше), а отношение самих углов. Дело в том, что измерения Птолемея относились к малым углам падения, а для малых углов α, как известно, справедливо соотношение $\sin\alpha \approx \alpha$. Поэтому вместо отношения синусов у него получилось отношение самих углов – $\alpha / \beta = n_2 / n_1$. Ошибку Птолемея заметил (всего лет эдак через 900, около 1000 года нашей эры) арабский оптик Альгазен. Впрочем, как ее исправить, Альгазен не догадался. Правильное выражение для закона преломления (которым мы пользуемся и сейчас) дал только нидерландский астроном и математик Снеллиус и только в XVII веке (через каких-нибудь семь веков после Альгазена). Соответствующее сочинение Снеллиуса осталось неопубликованным, и первым опубликовал этот закон Рене Декарт (рис. 5.3) – великий французский философ, математик и физик – в своей книге «Диоптрика» в 1637 году (через несколько лет после смерти Снеллиуса). Был ли знаком Декарт с исследованиями Снеллиуса – неизвестно.

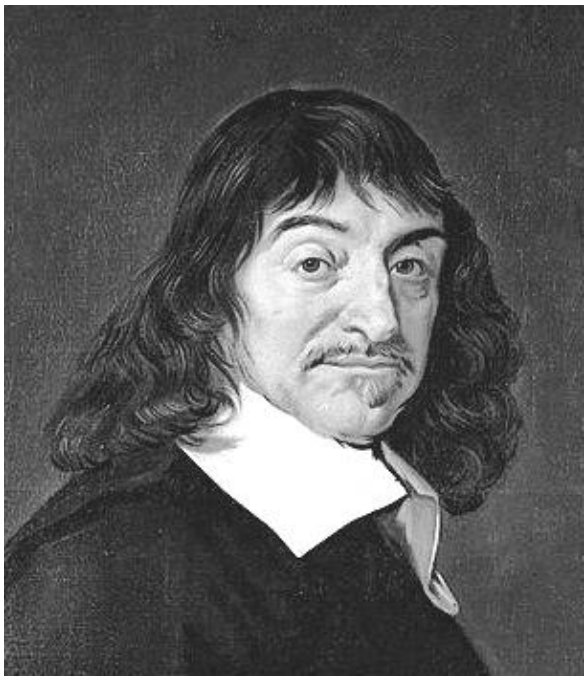


Рис. 5.3. Рене Декарт

Новый этап в развитии геометрической оптики начался с появлением линз и изготовленных с их помощью оптических приборов – **луп, подзорных труб и микроскопов**. Кто и когда изготовил первую

в истории человечества линзу, авторам неизвестно. Вероятно, что чечевицеобразные куски стекла (приготовленного искусственно или природного – обсидиана) использовались «испокон веков». Но первые микроскопы и подзорные трубы (и то, и другое – комбинация двух линз) появились уже в XVI веке в Нидерландах и Италии. Делали их мастера, изготавливавшие очковые стекла.

А первый настоящий телескоп изготовил Галилео Галилей – великий итальянский физик. Он не только усовершенствовал уже имевшиеся к тому времени подзорные трубы, но и – самое главное – догадался направить подзорную трубу на ночное небо. Так появился **первый телескоп**. В 1609 году Галилей создал свой первый телескоп, обеспечивавший примерно 3-кратное увеличение[14]. Работа телескопа демонстрировалась с башни св. Марка в Венеции и пользовалась большим успехом. Поэтому вскоре Галилей построил более мощный телескоп с увеличением в 32 раза[15]. Наблюдения, произведённые с его помощью, разрушили господствовавшие в то время представления Аристотеля о совершенстве небесных тел: поверхность Луны оказалась покрытой горами и изрытой кратерами. У Юпитера Галилей открыл четыре спутника, которые он назвал «звездами Медичи» – из житейских соображений, чтобы польстить «большому боссу» – флорентийскому герцогу Козимо Медичи (Медичи – «те самые», знаменитые отравители).

На небе «появилось» множество новых звёзд, Млечный Путь распался на отдельные звёзды. Свои астрономические наблюдения Галилей описал в сочинении «Звёздный вестник» (1610-1611), которое произвело ошеломляющее впечатление на современников. Про-

[14] Примерно как у современного театрального бинокля. Забавно, что современные театральные бинокли обычно и сейчас изготавливают по «галилееву» рецепту: собирающая линза в качестве объектива и рассеивающая в качестве окуляра.

[15] Это уже серьезно. Современный средний полевой бинокль обеспечивает восьмикратное увеличение, морской – двенадцатикратное или двадцатикратное. Так что такие подзорные трубы, как вторая труба Галилея, и сейчас называют телескопами – для школьников, разумеется.

тивники обвиняли Галилея в том, что всё виденное им – оптический обман или просто заявляли, что его наблюдения противоречат Аристотелю, а потому ошибочны. Известен анекдот об одном иезуите, который на предложение Галилея просто глянуть в телескоп и убедиться в правоте Галилея гордо ответствовал: «Даже не хочу смотреть!» – и остался при своем мнении о том, что гор на Луне нет и быть не может, потому что их там не может быть никогда. С помощью телескопа Галилей открыл фазы Венеры, пятна на Солнце и его вращение вокруг своей оси.

Устроен телескоп Галилея был очень просто, но для того чтобы разобраться в его схеме, придется вспомнить кое-какие сведения о тонкой линзе и параксиальных световых лучах из школьной физики.

Линзой называется прозрачное тело, ограниченное с двух сторон сегментами сферы. Если линза в центре толще, чем по краям, то она называется собирающей, а если, наоборот, в центре она тоньше, чем на краях, то рассеивающей. Тонкой линзой называется линза, толщина которой мала в сравнении с ее диаметром. Любая линза имеет **главную оптическую ось**, проходящую через середину линзы (ее центр) перпендикулярно ее плоскости (рис. 5.4). **Параксиальным лучом** называется луч, идущий вблизи оптической оси линзы под малым углом к этой оси.

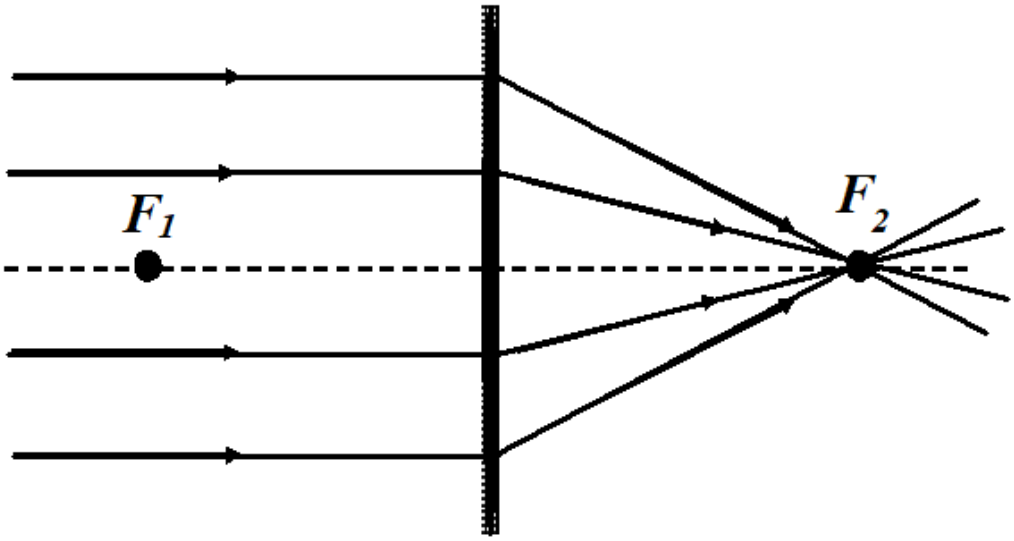


Рис. 5.4. Пучок лучей, падающих на собирающую линзу параллельно главной оптической оси, пересекается в точке, именуемой главным фокусом. Главная оптическая ось обозначена штриховой линией

Главное свойство линзы состоит в том, что все параксиальные лучи, падающие на линзу параллельно главной оптической оси, пересекаются в одной точке, расположенной на оптической оси и именуемой **главным фокусом линзы** (рис. 5.4). И наоборот, все лучи, пересекающие главный фокус, после преломления в линзе идут параллельно ее главной оптической оси (рис. 5.5). Расстояние от линзы до ее главных фокусов (переднего и заднего, $\boldsymbol{F_1}$ и $\boldsymbol{F_2}$), называется фокусным расстоянием линзы. Третий важный факт – все параксиальные лучи, пересекающие центр линзы, не преломляются (рис. 5.6).

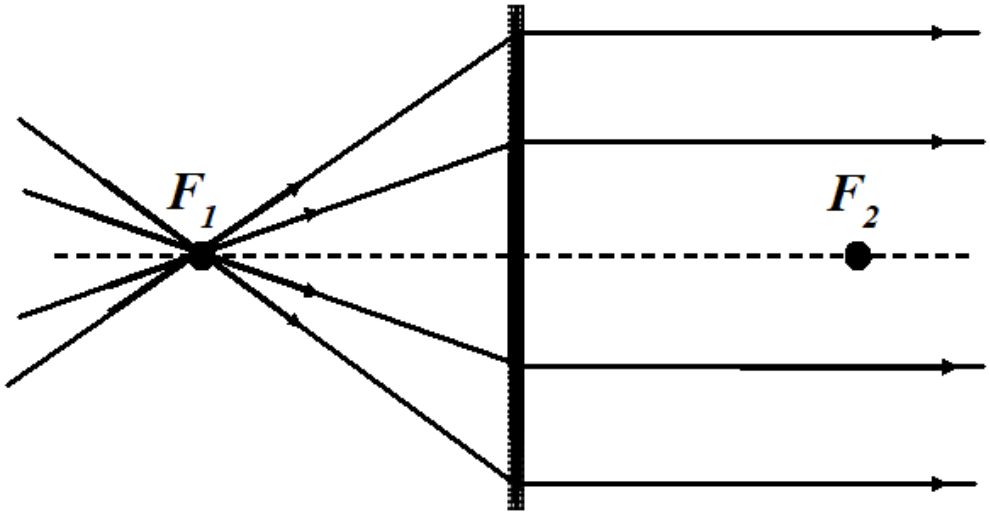


Рис. 5.5. Лучи, проходящие через главный фокус собирающей линзы, после преломления в линзе распространяются параллельно главной оптической оси линзы

Любая прямая, пересекающая центр линзы, но не перпендикулярная ее плоскости, тоже называется оптической осью линзы – только не главной, а **побочной**. Все параксиальные лучи, падающие на линзу параллельно побочной оптической оси, пересекаются в одной точке, расположенной на этой оптической оси и именуемой фокальной точкой (или побочным фокусом) (рис. 5.7). Все фокальные точки вместе называются фокальной поверхностью. В параксиальном приближении фокальная поверхность – это плоскость, проходящая через главный фокус перпендикулярно главной оптической оси.

Приведенных выше сведений достаточно для того, чтобы построить ход лучей в любой линзе и понять работу любой оптической системы, в частности телескопа (рис. 5.8). **Телескопом** (или подзорной

трубой) называется оптическая система, предназначенная для наблюдения за удаленными объектами. Обычно подзорная труба состоит из двух линз – передней (**объектив**) и задней (**окуляр**), причем задняя фокальная плоскость объектива совпадает с передней фокальной плоскостью окуляра.

Поскольку объекты удалены, исходящие от них лучи, попадающие в оптическую систему под некоторым углом α, практически параллельны и потому пересекаются в фокальной плоскости объектива. Но в этом случае они одновременно пересекаются и в фокальной плоскости окуляра, потому после преломления в окуляре опять идут параллельно друг другу, как и раньше. Но угол между направлением лучей и главной оптической осью теперь другой – β. Поэтому наблюдателю кажется, что предмет по-прежнему расположен в бесконечности (то есть далеко), но «стал гораздо больше» – в α/β раз. Эта величина и является увеличением подзорной трубы. Из геометрических соображений (и из параксиальности всех рассматриваемых лучей) следует, что $\alpha/\beta = F/f$, где F – фокусное расстояние объектива, а f – фокусное расстояние окуляра. Итак, увеличение подзорной трубы (а телескоп – это очень хорошая подзорная труба, предназначенная для наблюдения за звездным небом) равно отношению фокусных расстояний его объектива и окуляра.

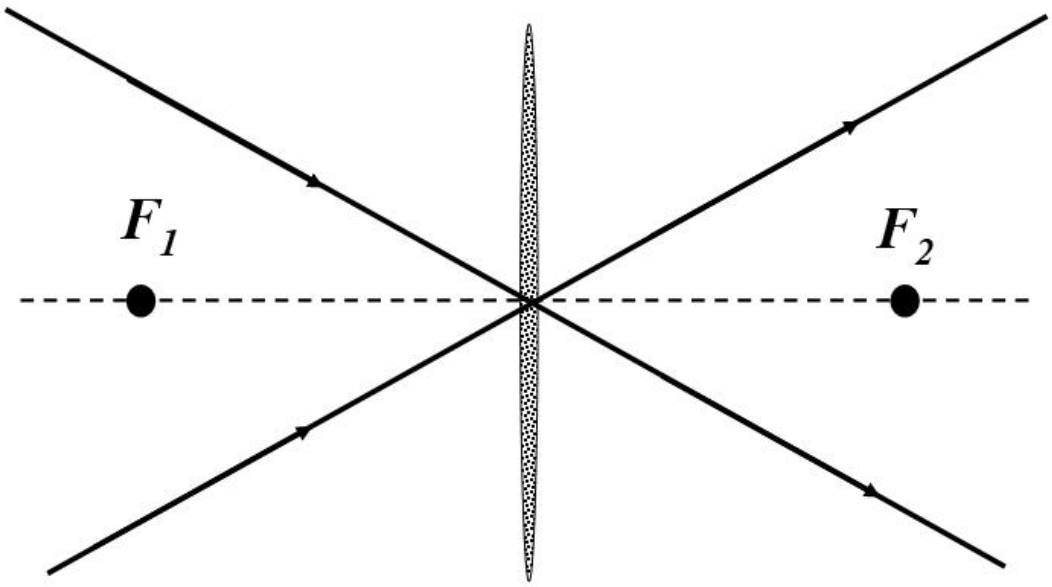


Рис. 5.6. Лучи, проходящие через центр собирающей линзы, после преломления в линзе распространяются как раньше – без изменения направления

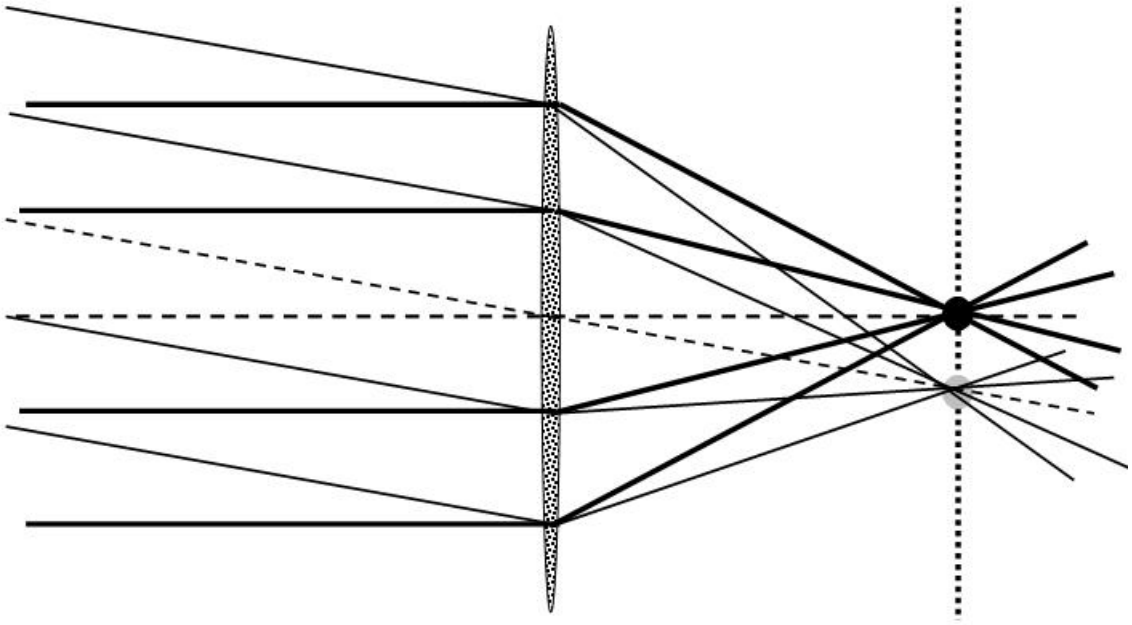


Рис. 5.7. Пучок лучей, падающих на собирающую линзу параллельно побочной оптической оси, пересекается в точке, именуемой фокальной точкой (серые линии). Все фокальные точки вместе образуют фокальную плоскость (обозначена пунктиром)

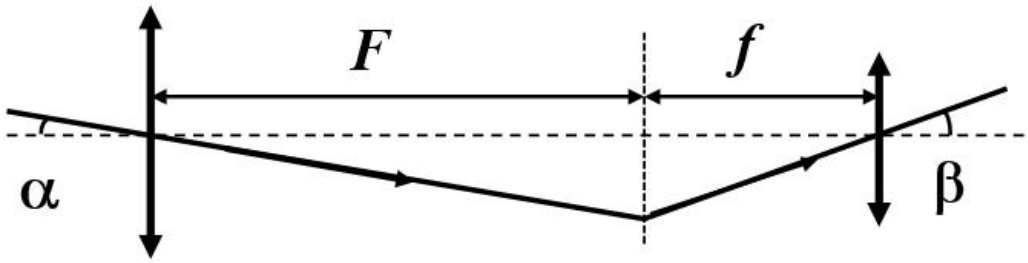


Рис. 5.8. Ход лучей в трубе Кеплера. Вместо схематического изображения разреза линзы (как на предыдущем рисунке) использован общепринятый значок – отрезок со стрелками на концах. Если стрелки смотрят друг от друга, значит линза собирающая, а если друг к другу (рис. 5.11) – то рассеивающая

Теперь следует честно признаться, что мы описали не тот телескоп, который использовал Галилей (**труба Галилея**), а тот (**труба Кеплера**), который немного позже придумал другой великий астроном – Иоганн Кеплер (рис. 5.9). Телескоп Галилея состоит не из двух собирающих линз, как труба Кеплера, а из одной собирающей линзы (объектив) и одной рассеивающей линзы (окуляр). Рассеивающая линза отклоняет лучи не к оптической оси (как собирающая), а от нее

(рис. 5.10). Поэтому в фокусе у нее собираются не сами лучи, прошедшие через линзу, а их продолжения – говорят, что у нее мнимые фокусы. В остальном рассеивающая линза ведет себя как собирающая и мнимый фокус ведет себя ничем не хуже «настоящего»: все свойства «настоящей» линзы остаются на месте. Схема телескопа Галилея приведена на рис. 5.11. В нем по-прежнему задняя фокальная плоскость объектива совпадает с фокальной плоскостью окуляра – только не с передней, как в трубе Кеплера, а с задней. И увеличение по-прежнему оказывается равно отношению фокусных расстояний объектива и окуляра.

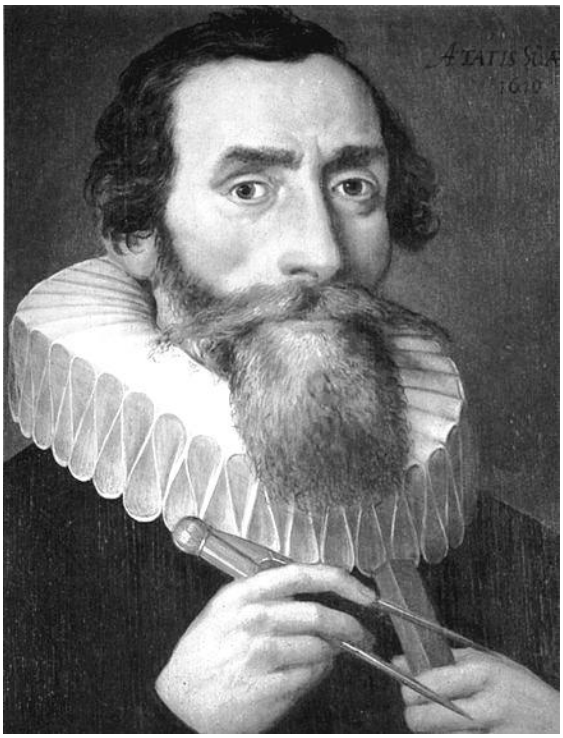


Рис. 5.9. Иоганн Кеплер

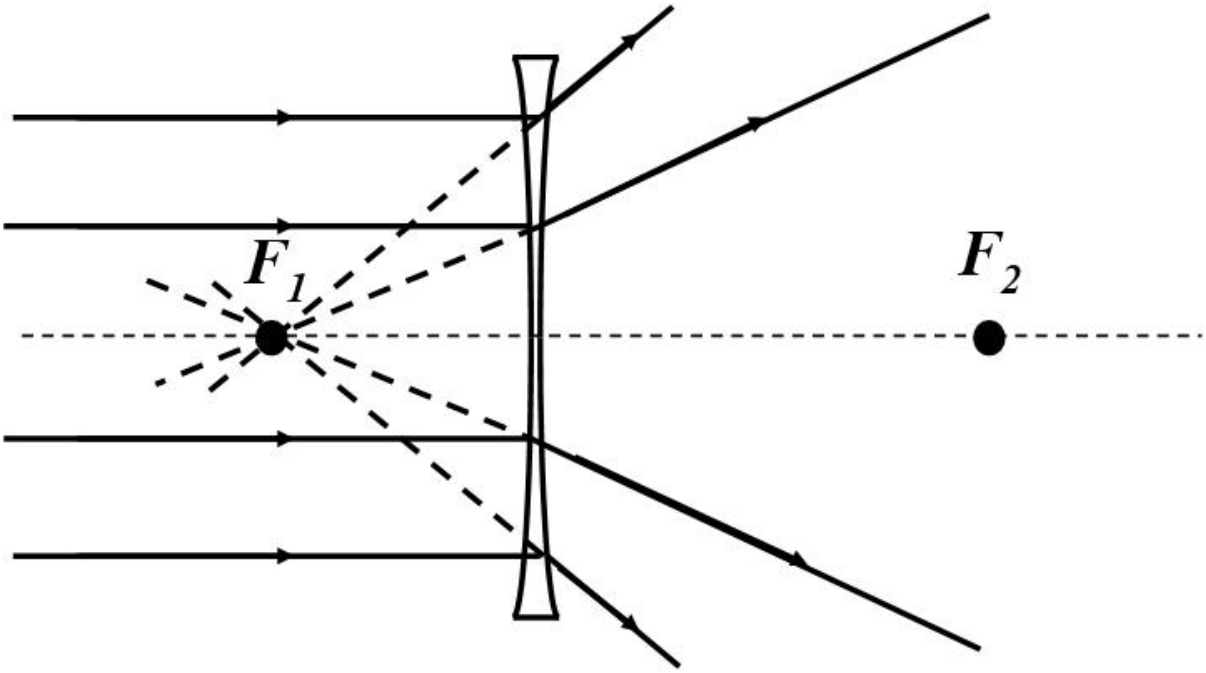


Рис. 5.10. Продолжения пучка лучей, падающих на рассеивающую линзу параллельно главной оптической оси, пересекаются в точке, именуемой главным фокусом (мнимым). Главная оптическая ось обозначена штриховой линией

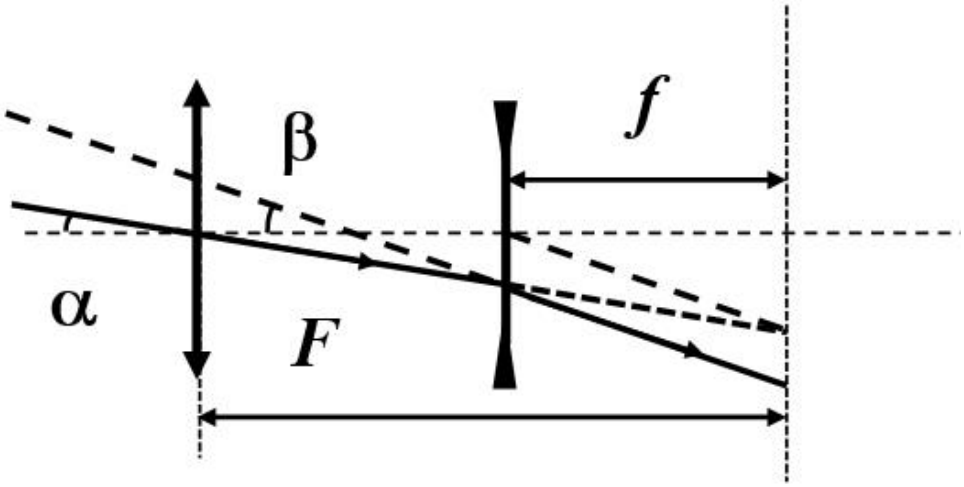


Рис. 5.11. Ход лучей в трубе Галилея

Какая же труба лучше – Галилея или Кеплера? Каждая хороша по-своему, и обе используются до сих пор. Одно из достоинств трубы Галилея – то, что она, в отличие от трубы Кеплера, не переворачивает изображение. Действительно, сравните рис. 5.8 (труба Кеплера) и 5.11 (труба Галилея). На обоих рисунках исходный луч приходит «сверху». В трубе Галилея (рис. 5.11) он и из трубы выходит в этом же направлении. В ней верх остается верхом, а низ – низом. В трубе Кеплера (рис. 5.8) луч из трубы выходит «вверх» – в результате верх и низ в трубе Кеплера меняются местами и мы видим перевернутое изображение. Для астрономических наблюдений это не беда: в космосе верха и низа нет[16], а вот при наблюдениях на Земле приходится так или иначе переворачивать изображение еще раз, чтобы все «встало на свои места». Обычно для этого используется оборачивающая призма (рис. 5.12; обратите внимание: после отражения левый луч стал правым и наоборот). Второе важное достоинство трубы Галилея – маленькая длина. Из сравнения рис. 5.8 и 5.11 видно, что при одном и том же увеличении (при одних и тех же фокусных расстояниях объектива и окуляра) труба Галилея короче трубы Кеплера (длина трубы Кеплера равна $F+f$, а длина трубы Галилея – $F-f$). Впрочем, при аст-

[16] Впрочем, местами меняются не только верх и низ, а «право» и «лево». А это при ручной наводке на объект очень неприятно даже при проведении астрономических наблюдений.

рономических наблюдениях используются «серьезные» увеличения, поэтому фокусное расстояние объектива ***F*** гораздо больше фокусного расстояния окуляра ***f*** и эта разница несущественна. Зато поле зрения у трубы Кеплера при прочих равных условиях больше поля зрения трубы Галилея и в трубе Кеплера есть где поставить перекрестие для точного визирования направления трубы. Оно ставится в общей фокальной плоскости объектива и окуляра и прекрасно видно в окуляр (как в лупу). В трубе Галилея такого места просто нет – луп из рассеивающих линз не бывает.

Что же мы имеем? Труба Галилея при прочих равных условиях проще, компактнее и, увы, хуже трубы Кеплера. Поэтому в наше время эта схема используется в театральных биноклях (с увеличением в 2-4 раза). А схема Кеплера используется во всех остальных случаях (при наземных наблюдениях обычно с оборачивающей призмой, при астрономических – без нее).

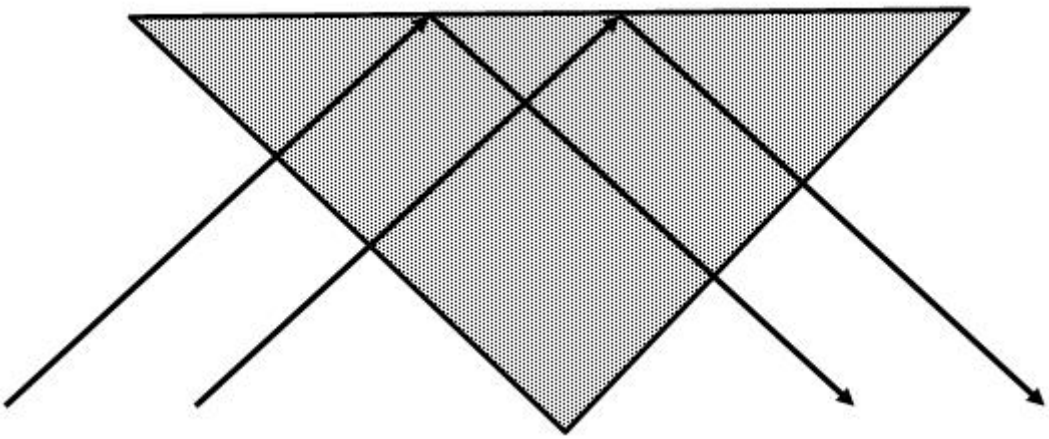


Рис. 5.12. Оборачивающая призма

Обсудим теперь вопрос о том, «что такое хорошо и что такое плохо», другими словами, какой телескоп следует считать хорошим, а какой – плохим. Поскольку основная задача любого телескопа – увеличивать изображение, кажется, что ответ на этот вопрос очень прост: чем больше увеличение, тем лучше. А большое увеличение обеспечить очень просто: надо взять объектив с как можно большим фокусным расстоянием и окуляр с возможно меньшим, и все будет в порядке.

На самом деле это не так. Чтобы понять, в чем дело, сравните три изображения на рис. 5.13. Все они – одно и то же изображение при разном увеличении («тупо» увеличить изображение на компьютере очень просто: достаточно выделить фрагмент и «потянуть» мышкой за уголок). Дало ли нам дополнительную информацию первое увеличение, то есть переход от левого треугольника к среднему? Я считаю, что дало: стало видно, что на самом деле наш треугольник состоит из черных квадратиков (пикселей). А дало ли дополнительную информацию второе увеличение размеров, то есть переход от среднего треугольника к правому? Нет – правый треугольник раза в два больше среднего, но «лучше ли он виден»? Нет, не лучше. Абсолютно все детали изображения, которые мы видим на правом треугольнике, мы видим и на среднем. Это и не удивительно: правый треугольник получен из левого путем «тупого» увеличения его размера на компьютере, поэтому в нем нет ни капли дополнительной информации. Теперь ясно, что ценность «картинки» не в ее размерах, а в количестве информации, содержащейся в этой картинке. Количество же информации определяется числом пикселей, то есть количеством точек в нашей картинке, которые мы способны разглядеть по отдельности. А количество пикселей зависит не только от размеров картинки, но и от их «плотности», то есть от расстояния между пикселями.

Вот мы и пришли к понятию предельного углового разрешения телескопа. **Угловым разрешением** называется минимальное угловое расстояние между точками, которые еще не слились друг с другом и которые еще можно разглядеть по отдельности. По существу **угловое разрешение телескопа** – это просто минимальный угловой размер деталей, которые еще можно разглядеть в этот телескоп. Ясно, что чем меньше предельное угловое разрешение, тем лучше телескоп. Поэтому мерой качества телескопа обычно считается его **разрешающая способность**, характеризуемая обратной величиной его предельного углового разрешения. Чем выше разрешающая способность телескопа, тем он лучше. Человеческий глаз (очень хороший и очень здоровый), например, имеет разрешение около 1/40 градуса. Способ-

ность телескопа к увеличению углового размера изображения в ***n*** раз *без ухудшения его качества* действительно приводит к увеличению разрешающей способности системы «телескоп + глаз» в ***n*** раз. Но это – только для идеального телескопа с бесконечно хорошим (то есть равным нулю) предельным разрешением. Таких телескопов нет и не может быть: любой реальный телескоп имеет некоторую разрешающую способность и рост его увеличения имеет некоторые границы – в тот момент, когда предельное угловое разрешение начинает расти быстрее увеличения, рост увеличения становится не только бесполезен, но и вреден. Поэтому обычно телескопы снабжают не одним окуляром, а несколькими разными окулярами с разными увеличениями. Это позволяет выбрать увеличение, оптимальное для наблюдения за тем или иным объектом в тех или иных условиях.

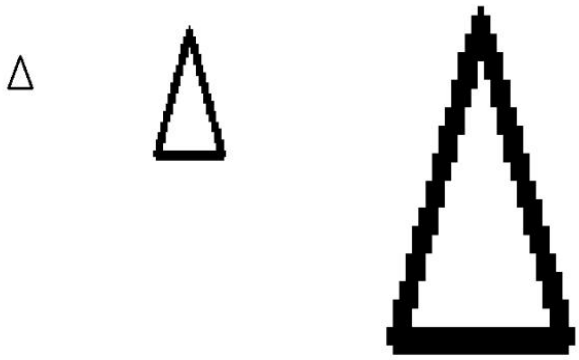


Рис. 5.13. Крупнее – не всегда лучше

Какие же факторы ограничивают разрешающую способность телескопа? Этих факторов очень много.

Во-первых, параксиальный луч – это такая же идеализация, как материальная точка или пружина, в точности подчиняющаяся закону Гука. Единственный «в точности» параксиальный луч – это луч, идущий вдоль главной оптической оси телескопа. Ясно, что для формирования изображения его не хватит. Идеализацией является и понятие тонкой линзы. Поэтому реальные лучи после преломления реальной линзой пересекаются не в точности в фокальной точке, а лишь вблизи нее. Результатом этого обстоятельства являются искажения (**«аберрации»**) изображения, именуемые **сферическими аберрациями**.

Сферические аберрации приводят к «размытию» пикселей и тем самым – к ухудшению разрешения оптической системы. Для борьбы со сферическими аберрациями часто заменяют одну линзу на комбинацию нескольких линз, компенсирующих аберрации друг друга. Но наиболее радикальный и современный способ – использование **асферической оптики**, то есть линз, ограниченных не сферическими, а более сложными поверхностями.

Во-вторых, стекло, как и любой другой материал, имеет чуть-чуть разные показатели преломления для оптического излучения с разными частотами (то есть для света разного цвета). Это явление называется **дисперсией**. Поскольку фокусное расстояние линзы зависит от показателя преломления вещества, из которого она изготовлена, оказывается, что одна и та же линза имеет разные фокусные расстояния для красного, зеленого и синего света. В результате изображение в белом свете (который состоит из красного, зеленого и синего света) «расслаивается» на красное, зеленое и синее изображения, причем сфокусироваться на всех трех одновременно просто невозможно. Возникают так называемые **хроматические аберрации**, которые на практике выглядят как «цветной туман», также вызывающий «разбухание» пикселей и ухудшение разрешения оптической системы. Для борьбы со сферическими аберрациями используют либо цветные светофильтры (монохроматизация изображения), либо ахроматы – сложные комбинации линз, изготовленных из разных сортов оптического стекла с разной дисперсией, компенсирующих хроматическую аберрацию друг друга.

Существует и радикальный способ борьбы с хроматическими аберрациями – переход от линзовой оптики к зеркальной. Из школьного курса физики вы, вероятно, помните, что сферические зеркала обладают, как и линзы, фокусирующим действием. Поэтому телескоп можно сделать не только «на линзах», но и «на зеркалах». Использование зеркал позволяет существенно снизить хроматические аберрации, а использование несферических (точнее – параболических) зеркал – существенно снизить сферические аберрации.

Телескопы с «линзовыми» объективами называют **рефракторами** (от слова «рефракция» – преломление), а телескопы с «зеркальными» объективами – **рефлекторами** (от слова «рефлекс» – отражение). Существуют и телескопы смешанной конструкции; у них объектив содержит и линзы, и зеркала.

Разумеется, и объектив, и окуляр современной зрительной трубы – не одиночные линзы, а наборы линз, обеспечивающие достаточно низкий уровень сферических и хроматических аберраций.

Еще одной важной причиной ухудшения разрешения телескопов, расположенных на Земле, является земная атмосфера. Действительно, ведь свет, попадающий в телескоп, перед этим проходит через толстый слой атмосферы, в которой имеется и туман, и пыль, и неоднородности (флуктуации плотности атмосферы), на которых происходит рассеяние и преломление света (вспомните дым и «дрожание воздуха» над костром). Ясно, что это обстоятельство неизбежно ухудшает разрешение телескопа и тем самым ограничивает его увеличение. Для хорошей работы телескопа очень полезно, когда слой атмосферы над ним потоньше, пореже, поспокойнее и попрозрачнее. Поэтому для обсерваторий стараются выбирать возвышенности (а лучше – горы) и места с наиболее безоблачной и безветренной погодой вдали от городов с их трубами и смогом.

Радикальный способ борьбы с отрицательным влиянием земной атмосферы – вынос телескопа в космическое пространство. Такой телескоп есть – это знаменитый оптический телескоп «Хаббл», известный своими великолепными по качеству фотографиями дальнего и ближнего космоса.

Последней и принципиально неустранимой причиной ухудшения разрешающей способности оптического телескопа являются **волновые аберрации**. Пока что мы ни словом не обмолвились о том, что на самом деле свет – это электромагнитная волна, но вы-то со школы это помните. Поэтому приближение геометрической оптики при расчете оптических систем – это очень хорошее, но все же приближение. Ни одна волна не может «сфокусироваться в точку»: для нее самая ма-

ленькая «точка» имеет размер не меньше этой длины волны. Это обстоятельство приводит к следующему фундаментальному соотношению для минимально возможной разрешающей способности любого оптического телескопа: $\Delta\varphi > 70\lambda / D$ градусов, где λ – длина волны света, а D – диаметр объектива телескопа.

Теперь пора познакомиться с реальным телескопом.

Рефрактор Veber 70070

Описание установки

Цель упражнения – ознакомиться с устройством и порядком работы с простым телескопом-рефрактором Veber 70070. Его параметры приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Технические характеристики телескопа *Veber 70070*

Фокусное расстояние объектива	700 мм
Диаметр объектива	70 мм
Монтировка	Альт-азимутальная
Фокусное расстояние окуляров	20 мм (К20), 9 мм (К9)
Изображение	Прямое
Дополнительное оборудование	Линза Барлоу (3х), видоискатель 5х20
Увеличение с окуляром К20	35х
Увеличение с окуляром К9	77,5х
Увеличение с окуляром К20 и линзой Барлоу	105х
Увеличение с окуляром К9 и линзой Барлоу	232,5х

К этой таблице следует добавить некоторые комментарии. Телескопы уровня Veber 70070 – это относительно портативные переносные инструменты, расположенные «на границе» между очень простыми телескопами (любительского уровня) и очень хорошими зрительными трубами. Они предназначены и для наблюдения наземных объектов, и для любительских астрономических наблюдений. Поэтому в них используется **альт-азимутальная монтировка**. Это означает, что зрительную трубу можно поворачивать «по горизонтали» и

«по вертикали». Это очень удобно для наблюдения наземных объектов, которые если и двигаются, то обычно «по горизонтали», но неудобно для наблюдения за астрономическими объектами, которые (в результате вращения Земли) перемещаются относительно нас по окружностям вокруг «оси мира» (направления на Полярную Звезду), то есть по горизонтали и по вертикали одновременно. На таких инструментах, для того чтобы удержать в поле зрения горизонтально перемещающийся объект, можно зафиксировать угол возвышения (в вертикальном направлении), после чего достаточно вертеть только одну ручку (горизонтальной наводки); а вот для того чтобы удержать в поле зрения небесное тело, приходится синхронно работать двумя ручками – это очень неудобно.

Рис. 5.14. Окуляр К20, К9 и линза Барлоу для телескопа Veber70070 (слева направо)

Телескоп снабжен двумя сменными окулярами – К9 с фокусным расстоянием 9 мм и К20 с фокусным расстоянием 20 мм (рис. 5.14). С учетом того, что фокусное расстояние объектива равно 700 мм, получается увеличение или 700/20=35, или 700/9=77,5. Если этого увеличения не хватает, то можно воспользоваться линзой Барлоу (рис. 5.14). Это – рассеивающая линза, вставляемая между объективом и окуляром. Она

как бы ослабляет объектив (то есть увеличивает его фокусное расстояние) и таким образом приводит к росту увеличения телескопа в три раза – в результате с окуляром К20 получается увеличение 105 (вместо 35), а с окуляром К9 – 232,5 (вместо 77,5). Какое увеличение когда применять – зависит от объекта и условий наблюдения. Конечно, большее увеличение вроде бы всегда лучше меньшего, но это только на первый взгляд. С ростом увеличения неизбежно уменьшается поле зрения и резко возрастают проблемы и с наводкой трубы на объект наблюдения, и с удержанием этого объекта в поле зрения.

Телескоп является трубой Кеплера, но дает прямое (не перевернутое) изображение за счет использования диагональной призмы (призма Шмидта). Это приводит к коленообразной конструкции трубы, что очень удобно при проведении наблюдений объектов, расположенных высоко над горизонтом и не мешает при наблюдении линии горизонта («колено» вращается вокруг оси трубы и может быть отогнуто не вверх или вниз, а вбок).

На рис. 5.15 приведено схематическое изображение телескопа. Цифрами обозначены:

1. Оптическая труба.
2. Диагональная призма (оборачивающая призма Шмидта).
3. Компас (для ориентации по магнитному азимуту).
4. Окуляр.
5. Винт крепления окуляра.
6. Держатель (для крепления зрительной трубы к треноге).
7. Платформа (соединенная с треногой с помощью винтов, позволяющих поворачивать трубу в вертикальном и горизонтальном направлении).
8. Винт закрепления зрительной трубы на платформе.
9. Колесо фокусировки (самая важная часть зрительной трубы: вращая это колесо, вы будете изменять расстояние между объективом и окуляром и добиваться резкого изображения объекта наблюдения).
10. Ручка настройки монтировки (вращая эту ручку, вы будете изменять угол возвышения трубы над горизонтом).

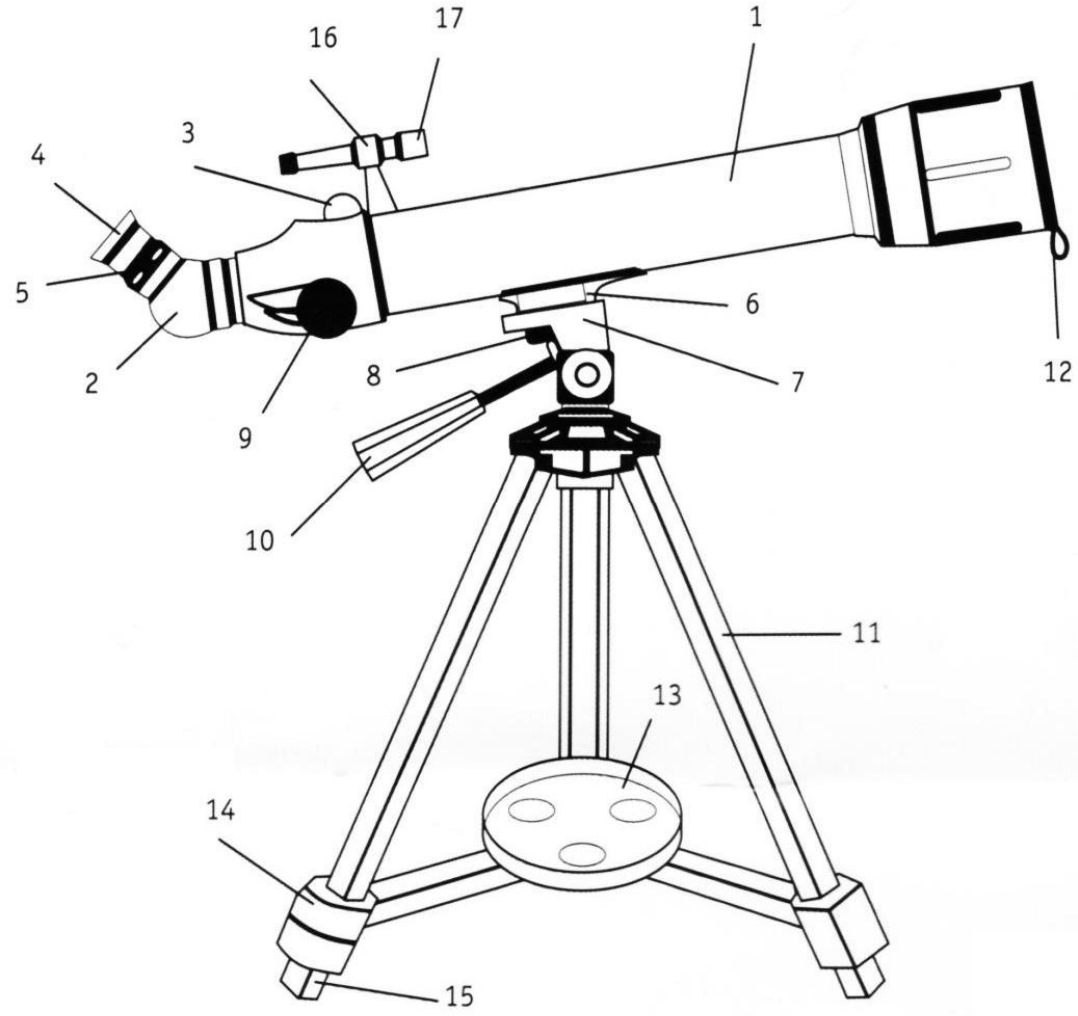


Рис. 5.15. Телескоп Veber 70070

11. Одна из ног треноги.
12. Защитная крышка для объектива.
13. Лоток для окуляров и линзы Барлоу.
14. Фиксатор длины ног треноги.
15. Удлинение ноги треноги.
16. Держатель видоискателя.
17. Видоискатель (простая труба Галилея с увеличением около 4; служит для поиска объекта наблюдения и предварительной наводки зрительной трубы на него).

На рис. 5.16 приведена фотография телескопа. Отмечены органы управления, которыми вы будете непосредственно пользоваться при выполнении лабораторной работы.

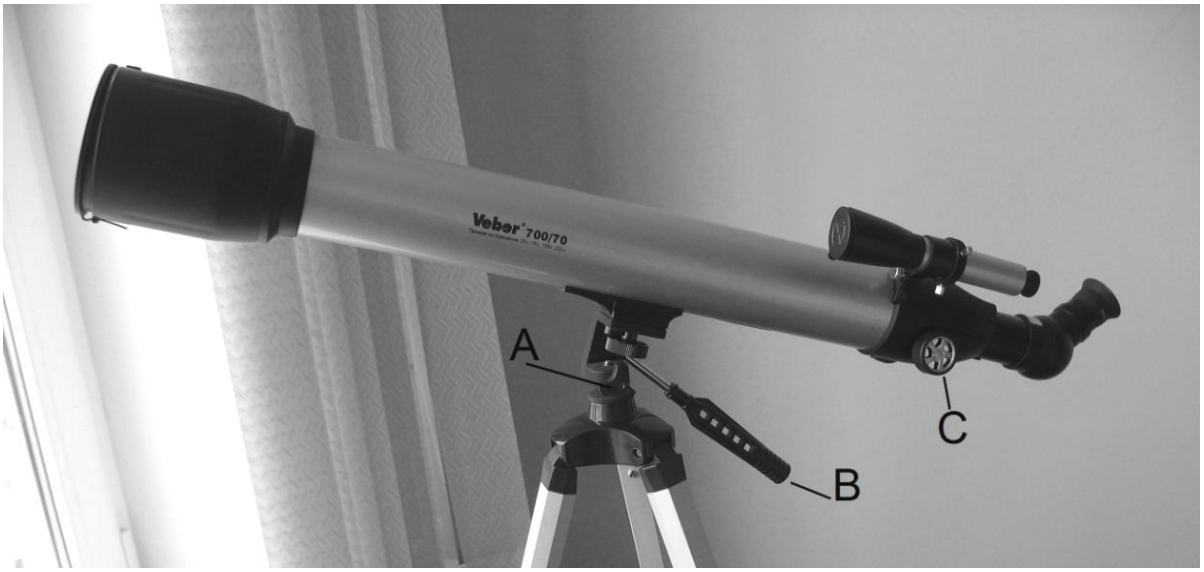


Рис. 5.16. Органы управления телескопа Veber 70070:
А – винт фиксации азимута. Если этот винт ослаблен, то труба свободно поворачивается в горизонтальном направлении, если затянут – труба зафиксирована; В – винт фиксации угла возвышения. Если этот винт ослаблен, то труба свободно поворачивается в вертикальном направлении, если затянут – труба зафиксирована; С – ручка наводки на резкость

Порядок выполнения работы. Измерения и расчеты

Вы будете наблюдать что-нибудь (по выбору преподавателя) на улице за окном. В любом случае то, на что вы смотрите, будем называть объектом наблюдений.

При проведении наблюдений не следует прикасаться руками к стеклянным поверхностям (линзы) ни объектива, ни окуляра. Не следует также прижиматься глазом к окуляру: он рассчитан на то, что в него смотрят не «вплотную», а с некоторого (небольшого, конечно) расстояния. Если вы будете прижиматься к окуляру или прикасаться к телескопу во время наблюдения, он начнет качаться и объект наблюдения будет «скакать» по полю зрения (особенно при больших увеличениях).

Не следует (во избежание утомления глаз) слишком напрягать зрение – надо добиваться хорошей резкости при смотрении ненапряженным глазом за счет правильной фокусировки.

Если за окном виднеется Солнце, при проведении наблюдений следует проявлять крайнюю осторожность: ни в коем случае не наводить телескоп на Солнце. **Помните: в телескоп Солнце можно уви-**

деть только два раза в жизни – один раз правым глазом и еще один раз – левым[17]. Сказанное относится не только к случаю, когда вы (очевидно, спятив) специально намереваетесь рассмотреть Солнце в телескоп, но и к тому случаю, когда оно вообще есть на небе, хотя вы смотрите и не на него, ведь попасть телескопом «на Солнце» можно и непреднамеренно, по неосторожности.

1. Ознакомьтесь с устройством телескопа. Попробуйте изменить наводку трубы в горизонтальном и вертикальном направлении.

2. Очень грубо (на глазок) наведите телескоп на объект наблюдения. Для этого ослабьте винт азимутальной наводки и поверните телескоп в нужном направлении. Затем затяните (не слишком сильно!) винт азимутальной наводки и с помощью ручки настройки монтировки установите нужный угол возвышения телескопа в вертикальной плоскости.

3. Отрегулируйте высоту треноги так, чтобы вам было удобно смотреть в телескоп.

4. Повторите наводку телескопа на объект наблюдения (см. п. 2) с большей точностью («прицелившись» в объект наблюдения по верхнему краю трубы).

5. Повторите наводку телескопа еще более точно, воспользовавшись видоискателем. Добейтесь того, чтобы объект оказался на перекрестье видоискателя.

6. Проведите наблюдение с использованием окуляра К20. При необходимости подрегулируйте наводку телескопа так, чтобы объект наблюдения оказался в центре поля зрения. Если этого не сделать, то рост увеличения телескопа (и соответствующее сужение поля зрения) приведут к исчезновению объекта наблюдения из поля зрения.

7. Проведите наблюдение с использованием окуляра К9. При необходимости подрегулируйте наводку телескопа так, чтобы объект наблюдения оказался в центре поля зрения.

---

[17] Ожог сетчатки и последующее ее отслоение очень трудно лечится.

8. Проведите наблюдение с использованием окуляра К20 и линзы Барлоу. При необходимости подрегулируйте наводку телескопа так, чтобы объект наблюдения оказался в центре поля зрения.

9. Проведите наблюдение с использованием окуляра К9 и линзы Барлоу. Позовите преподавателя и продемонстрируйте ему объект наблюдения.

10. Подумайте над следующими вопросами: какое увеличение оказалось оптимальным? Почему? Какие факторы (в порядке убывания степени вредности) ограничивали возможности визуального наблюдения объекта?

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте первый закон геометрической оптики. Кто и когда его установил? Как его можно подтвердить экспериментально?

2. Предположим, что вы хотите опровергнуть первый закон геометрической оптики – сейчас очень модно опровергать физические законы (не зная физики, разумеется – ведь так опровергать гораздо проще). Какие эксперименты вы предложили бы для этого? Каковы должны быть результаты этих экспериментов для того, чтобы можно было бы сделать вывод: «Первый закон геометрической оптики опровергнут экспериментально!»

3. Сформулируйте второй закон геометрической оптики. Кто и когда его установил? Как его можно подтвердить экспериментально?

4. Предположим, что вы хотите опровергнуть второй закон геометрической оптики – сейчас очень модно опровергать физические законы (не зная физики, разумеется – ведь так опровергать гораздо проще). Какие эксперименты вы предложили бы для этого? Каковы должны быть результаты этих экспериментов для того, чтобы можно было бы сделать вывод: «Второй закон геометрической оптики опровергнут экспериментально!»

5. Сформулируйте третий закон геометрической оптики. Кто и когда его установил? Как его можно подтвердить экспериментально?

6. Предположим, что вы хотите опровергнуть третий закон геометрической оптики – сейчас очень модно опровергать физические законы (не зная физики, разумеется – ведь так опровергать гораздо проще). Какие эксперименты вы предложили бы для этого? Каковы должны быть результаты этих экспериментов для того, чтобы можно было бы сделать вывод: «Третий закон геометрической оптики опровергнут экспериментально!»

7. Сформулируйте четвертый закон геометрической оптики. Кто и когда его установил? Как его можно подтвердить экспериментально?

8. Предположим, что вы хотите опровергнуть четвертый закон геометрической оптики – сейчас очень модно опровергать физические законы (не зная физики, разумеется – ведь так опровергать гораздо проще). Какие эксперименты вы предложили бы для этого? Каковы должны быть результаты этих экспериментов для того, чтобы можно было бы сделать вывод: «Четвертый закон геометрической оптики опровергнут экспериментально!»

9. Что такое линза? Когда появились первые линзы? Чем собирающая линза отличается от рассеивающей?

10. Капелька воды на листе растения – это собирающая или рассеивающая линза? Почему вы так думаете? Каковы последствия этого факта в случае полива на солнышке?

11. Бутылка с минералкой, графин или стеклянная банка с водой на окошке – это собирающая или рассеивающая линза? Почему вы так думаете? Какие последствия этого прискорбного факта хорошо известны пожарным (кстати, об этих последствиях знали уже древние римляне)?

12. Воздушный пузырек в воде – это собирающая или рассеивающая линза? Почему вы так думаете?

13. Оптическая сила линзы 5 диоптрий. Это в воздухе, разумеется. А какова будет оптическая сила той же линзы в воде? Показатель преломления воздуха – примерно 1, воды – примерно 1,3, стекла – примерно 1,5.

14. Оптическая сила линзы 10 диоптрий. Это в воздухе, разумеется. А какова будет оптическая сила той же линзы в воде? Показатель преломления воздуха – примерно 1, воды – примерно 1,3, стекла – примерно 1,5.

15. Оптическая сила линзы – 5 диоптрий. Это в воздухе, разумеется. А какова будет оптическая сила той же линзы в воде? Показатель преломления воздуха – примерно 1, воды – примерно 1,3, стекла – примерно 1,5.

16. Оптическая сила линзы – 10 диоптрий. Это в воздухе, разумеется. А какова будет оптическая сила той же линзы в воде? Показатель преломления воздуха – примерно 1, воды – примерно 1,3, стекла – примерно 1,5.

17. Оптическая сила линзы 5 диоптрий. На каком расстоянии следует держать ее от деревяшки, на которой вы собираетесь что-нибудь выжечь солнечным светом?

18. Оптическая сила линзы 10 диоптрий. На каком расстоянии следует держать ее от деревяшки, на которой вы собираетесь что-нибудь выжечь солнечным светом?

19. Оптическая сила линзы –5 диоптрий. На каком расстоянии следует держать ее от деревяшки, на которой вы собираетесь что-нибудь выжечь солнечным светом?

20. Оптическая сила линзы – 10 диоптрий. На каком расстоянии следует держать ее от деревяшки, на которой вы собираетесь что-нибудь выжечь солнечным светом?

21. Ход лучей в собирающей линзе. Что такое фокус собирающей линзы?

22. Ход лучей в собирающей линзе. Что такое главная оптическая ось собирающей линзы?

23. Ход лучей в рассеивающей линзе. Что такое фокус рассеивающей линзы?

24. Ход лучей в рассеивающей линзе. Что такое главная оптическая ось рассеивающей линзы?

25. Ход лучей в собирающей линзе. Что такое фокусное расстояние собирающей линзы? Положительно оно или отрицательно?

26. Ход лучей в собирающей линзе. Что такое оптическая сила собирающей линзы? Положительна она или отрицательна?

27. Ход лучей в рассеивающей линзе. Что такое оптическая сила рассеивающей линзы? Положительна она или отрицательна?

28. В чем измеряется фокусное расстояние?

29. В чем измеряется оптическая сила линзы?

30. Что такое диоптрия?

31. Что такое двояковыпуклая линза? Она рассеивающая или собирающая?

32. Что такое двояковогнутая линза? Она рассеивающая или собирающая?

33. Что такое выпукло-вогнутая линза? Она рассеивающая или собирающая?

34. Можно ли смотреть в телескоп на Солнце? Сколько раз?

35. Можно ли смотреть в бинокль на Солнце? Сколько раз?

36. Можно ли смотреть в монокуляр на Солнце? Сколько раз?

37. Можно ли смотреть в подзорную трубу на Солнце? Сколько раз?

38. Можно ли смотреть через лупу на Солнце? Сколько раз?

6. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА. МИКРОСКОП

Основы теории

Материал данной главы пригодится вам при выполнении **экспериментального задания № 6-0 [6,7].** Это экспериментальное задание является прекрасной экспериментальной иллюстрацией изложенного в настоящей главе теоретического материала.

Микроскоп (от лат. микро... и греч. skopéo – смотрю) – это оптический прибор для получения сильно увеличенных изображений объектов, невидимых невооружённым глазом.

Свойство системы из двух линз давать увеличенные изображения предметов было известно уже в XVI веке в Нидерландах и Северной Италии мастерам, изготовлявшим очковые стекла. Имеются сведения, что около 1590 года прибор типа микроскопа был изготовлен З. Янсеном (в Нидерландах). После этого начинается быстрое развитие микроскопической техники. Первые блестящие успехи применения микроскопа в научных исследованиях связаны с именем великого английского физика (и не только физика) Р. Гука (рис. 6.1).

Рис. 6.1. Роберт Гук, открывший клетку

В 1665 году Роберт Гук, рассматривая в усовершенствованный им микроскоп тонкие срезы бутылочной пробки, сердцевины бузины и древесины различных растений, обнаружил их клеточное строение.

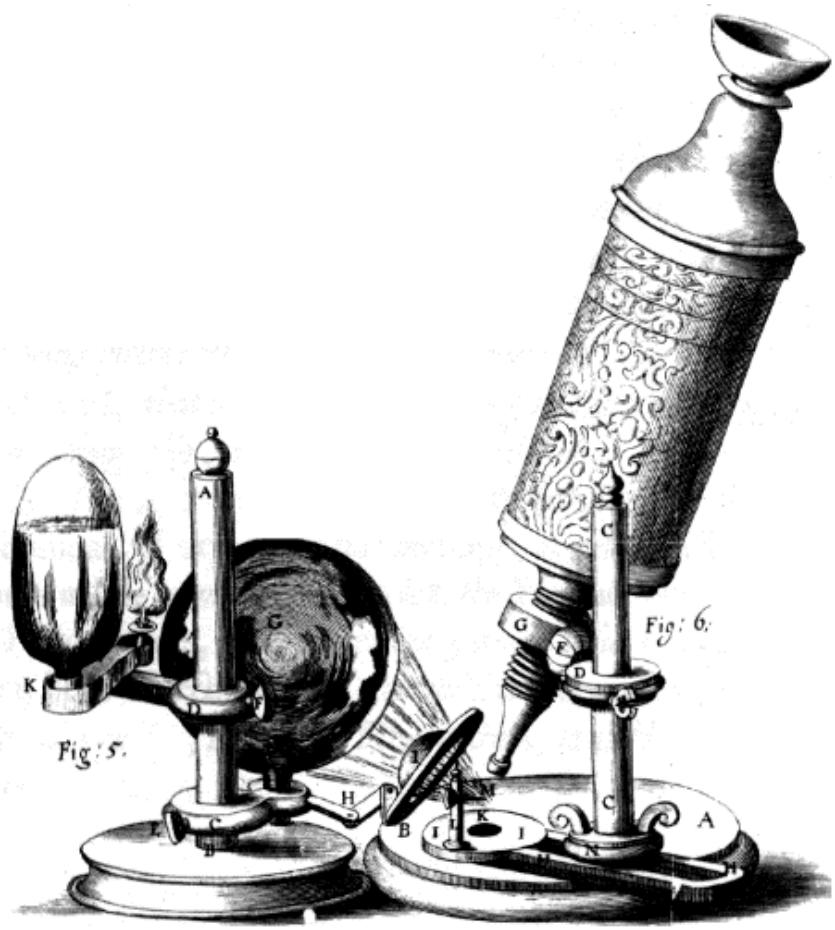


Рис. 6.2. Микроскоп Роберта Гука

Нидерландский натуралист А. Левенгук в 1673-1677 годах открыл с помощью микроскопа микроорганизмы.

Как же устроен микроскоп? Чтобы разобраться в этом вопросе, следует начать с существенно более простого оптического устройства – **лупы**, то есть с отдельной линзы, используемой для того, чтобы получить увеличенное изображение чего-нибудь. Дата «изобретения» лупы, в отличие от даты изобретения микроскопа, неизвестна или, другими словами, «теряется в веках». Дело в том, что археологи достаточно регулярно находят изготовленные из различных прозрачных материалов (стекло, обсидиан, самоцветы) линзы, которые, вероятно, использовались либо как лупы, либо как очковые стекла, либо как

зажигательные стекла. Кто их изготовил и как именно использовал, теперь уже сказать невозможно; впрочем, известно, что уже древние римляне были информированы и об «увеличительных», и о «зажигательных» свойствах стеклянных сосудов с водой. Работа обычной лупы показана на рис. 6.3. Для того чтобы ее понять, необходимо прочитать основы теории работы № 5-0 («Телескоп») и вспомнить приведенные там основные правила оптики линз:

1. Лучи, пересекающиеся в одной точке (точка предмета), после прохождения через линзу пересекаются в одной точке (точка изображения).

2. Луч, прошедший через оптический центр линзы, не преломляется.

3. Луч, падающий на линзу параллельно ее оптической оси, после преломления проходит через ее фокус.

4. Луч, при падении на линзу проходящий через ее фокус, после преломления идет параллельно ее оптической оси.

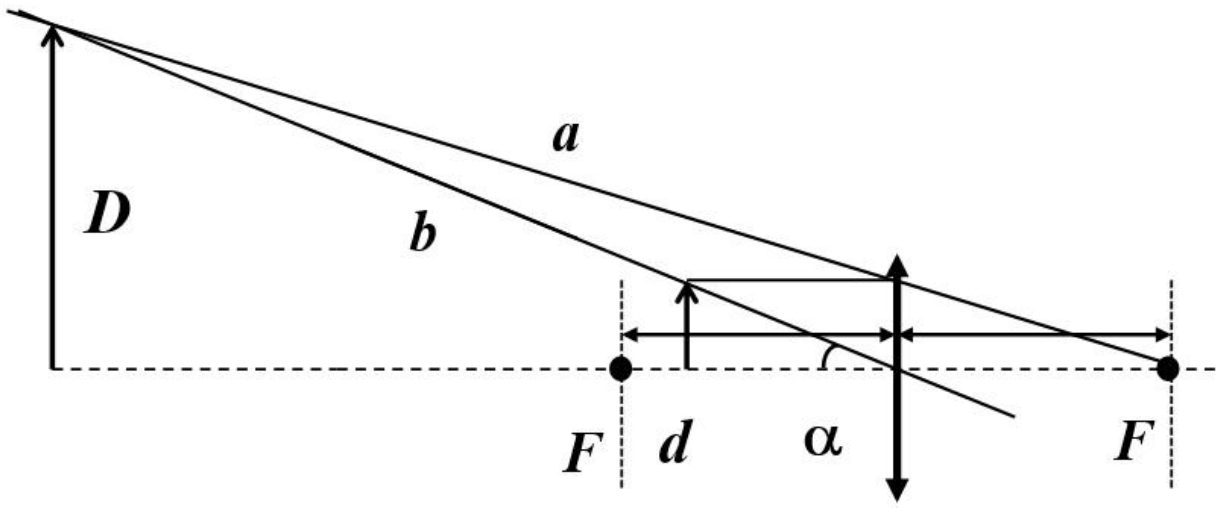


Рис. 6.3. Лупа (она же – окуляр микроскопа):
F – передний и задний фокусы линзы, *d* – предмет, *D* – его мнимое изображение. Видно, что при расположении предмета вблизи фокуса линии *a* и *b* становятся практически параллельными и изображение *D* расположено в бесконечности, где его удобно рассматривать расслабленным (спокойным) глазом под тем же самым углом α, что и предмет из оптического центра линзы

Теперь вам, вероятно, понятен ход лучей, изображенных на рис. 6.3. А чтобы найти увеличение лупы, достаточно вспомнить, что здоровый человеческий глаз устроен так, что сфокусироваться (**«аккомодироваться»**) он может только на расстояниях не менее 25 см от предмета. Это расстояние (***l*** = 25 см) так и называется – **«расстояние наилучшего зрения»**. Если мы хотим «рассмотреть что-нибудь получше», то мы приближаем предмет к себе (чтобы «все было крупнее»), но только до этого расстояния – иначе «все расплывается[18]». Из рисунка видно, что видимые угловые размеры и предмета (***d***), и изображения (***D***) одинаковы и равны одному и тому же углу **α**, если смотреть из оптического центра линзы.

Где же тут увеличение – вроде бы его просто нет? Есть! Дело в том, что на практике предмет обычно располагают между линзой и ее фокусом вблизи фокуса, чтобы мнимое изображение возникало «в бесконечности». В этом случае угловые размеры изображения действительно совпадают с угловыми размерами предмета, наблюдаемого от центра лупы (с расстояния ***F***). Вот только наблюдать предмет с этого расстояния бессмысленно, если только ***F<l***, потому что «все расплывется». Поэтому без лупы наблюдать предмет приходится с расстояния ***l*** и он кажется в ***F/l*** раз меньше, чем при наблюдении через лупу. Другими словами, **увеличение лупы равно *l/F***, где ***l=25*** см – расстояние наилучшего зрения, а ***F*** – фокусное расстояние линзы. Поэтому увеличение лупы с фокусным расстоянием ***F=10 см*** равно 25 см /10 см =2,5, увеличение лупы с фокусным расстоянием ***F=5 см*** равно 25 см /5 см =5, а увеличение лупы с фокусным расстоянием ***F=2,5 см*** равно 25 см /2,5 см =10. А чему же равно увеличение лупы с фокусным расстоянием 35 см? Неужели 25/35, то есть примерно 0,71? То есть она не увеличивает, а уменьшает? Строго говоря, да. Но все на свете относительно. Такая лупа действительно формирует изображение, угловые размеры которого меньше, чем они были бы при наблю-

[18] Если бы не это обстоятельство, нам ни лупы, ни микроскопы не были бы нужны – приблизил глаз к предмету на расстояние в 1 мм – и готов «микроскоп» с увеличением 250.

дении без лупы с расстояния наилучшего зрения (25 см). Но она же формирует изображение, увеличенное в два раза по сравнению с тем, что мы имели бы на расстоянии 50 см. И это очень удобно: в конце концов, при постоянном выполнении тонкой работы не очень-то приятно все время сидеть, «уткнувшись носом» в объект работы.

Поэтому линзы со столь малой оптической силой[19] никто в качестве «обычных» луп и не использует. Их применяют либо в качестве препарировальных луп (что это такое – объяснено ниже), либо в качестве очковых линз, которые, в отличие от луп, располагаются практически вплотную к глазу и просто «добавляют» оптической силы хрусталику глаза.

А можно ли использовать не мнимое (и неперевернутое) изображение, а вещественное (и перевернутое)? В принципе можно, хотя обычно и не нужно. Для этого достаточно (рис. 6.4) поместить предмет не между фокусом линзы и линзой, а за фокусом линзы. В случае приближения предмета к фокусу изображение (перевернутое действительное) неограниченно увеличивается в размерах и отодвигается в бесконечность. Использовать таким образом линзу в качестве лупы неразумно хотя бы потому, что полученное изображение оказывается перевернутым.

Но вот в качестве **объектива микроскопа** линзу (или систему линз) используют именно так: предмет помещают перед фокусом объектива (первая линза или система линз), а получившееся за объективом вещественное перевернутое изображение рассматривают с помощью окуляра как с помощью лупы (вторая линза или система линз). В результате изображение рассматриваемого предмета увеличивается дважды – сначала с помощью объектива, а потом – с помо-

[19] **Оптическая сила линзы *D*** – это по определению величина, обратная ее фокусному расстоянию, то есть ***D=1/F***. Измеряется оптическая сила линзы в 1/м, которые имеют и специальное название – Диоптрия (Дптр). Если оптическая сила линзы равна 4 Дптр, то ее фокусное расстояние – ¼ м=25 см, если 2 Дптр – то ½ м=50 см и так далее. Чем меньше фокусное расстояние – тем сильнее линза. А оконное стекло, например, вообще не имеет свойства фокусировать свет – можно считать, что его «фокус» расположен на бесконечности, фокусное расстояние бесконечно, а оптическая сила равна нулю.

щью окуляра. Поэтому и увеличение микроскопа есть произведение увеличений объектива и окуляра (рис. 6.5).

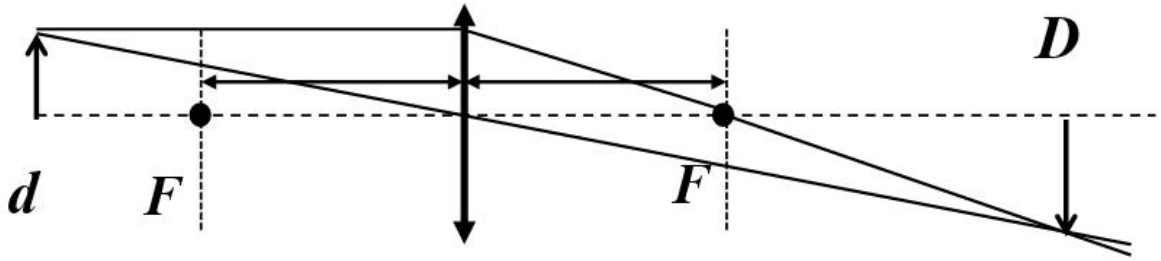


Рис. 6.4. Объектив микроскопа: F – передний и задний фокусы линзы, d – предмет, D – его вещественное перевернутое изображение

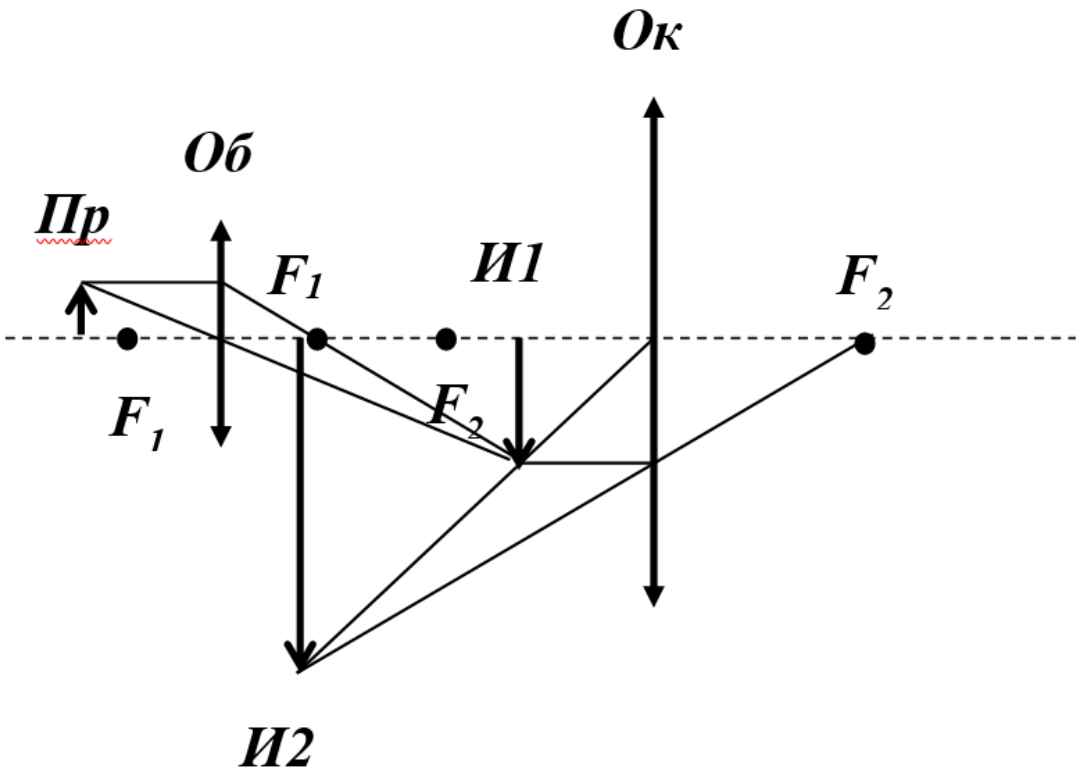


Рис. 6.5. Ход лучей в микроскопе:
Пр – предмет, И1 – создаваемое объективом (Об) действительное перевернутое изображение, рассматриваемое в окуляр, И2 – создаваемое окуляром (Ок) мнимое перевернутое изображение, F_1 – фокусы объектива, F_2 – фокусы окуляра

Сейчас микроскопы применяются практически во всех отраслях науки и техники – в биологии и медицине (для исследования микроорганизмов и образцов тканей), в материаловедении (для исследования структуры различных материалов), в геологии (для исследования минералов и горных пород), в технике – в общем, везде, где требуется «рассмотреть что-нибудь как следует».

Поэтому нет ничего удивительного в том, что микроскопы бывают разные – биологические, металлографические, минералогические, поляризационные, инструментальные и т. д. и т. п. В основном они отличаются друг от друга по характеру освещения – «на просвет» (биологические) или «поверхностному» (почти все остальные). Организовать освещение непрозрачной поверхности – достаточно сложная задача, поэтому биологические микроскопы (предназначенные для изучения тонких полупрозрачных пленок с освещением «на просвет») при прочих равных условиях раз в 10 дешевле всех прочих. Наш микроскоп – «биологический». Впрочем, это не означает, что с его помощью совсем нельзя рассматривать непрозрачные объекты – просто необходимо использовать дополнительный источник освещения (например, хорошую настольную лампу). При этом главная трудность состоит в том, что при больших увеличениях расстояние от объектива до исследуемой поверхности очень мало и «посветить» в образовавшуюся между объективом и поверхностью щель очень сложно. Поэтому таким «самодельным» освещением можно пользоваться только при небольших увеличениях (80 и 200).

Вам в зависимости от характера объекта изучения следует пользоваться либо «штатной» системой освещения (для полупрозрачных объектов типа «просто» бумаги, билета Банка России или нетканого материала, см. рис. 6.6–6.8), либо настольной лампой (для таких заведомо непрозрачных материалов, как лазерный диск или монета Банка России (рис. 6.19–6.22), либо не пользоваться никакой (для таких самосветящихся объектов, как экран вашего мобильника, см. рис. 6.23).

Существенно, что с ростом увеличения требования к яркости освещения объекта наблюдения нарастают. Сравните, например, правую (увеличение 80) и левую (увеличение 200) фотографии рис. 6.23. Видно, что левая фотография гораздо тусклее и темнее. Тем не менее яркость свечения экрана мобилы от увеличения, конечно, не зависит. Отсюда вывод: если мы хотим, чтобы с ростом увеличения изображение не тускнело, мы должны увеличивать яркость освещения. Это требование настолько существенно, что сфотографировать экран мобильника при увеличении 800 просто не удается: он выглядит как несветящийся и на нём ничего не видно.

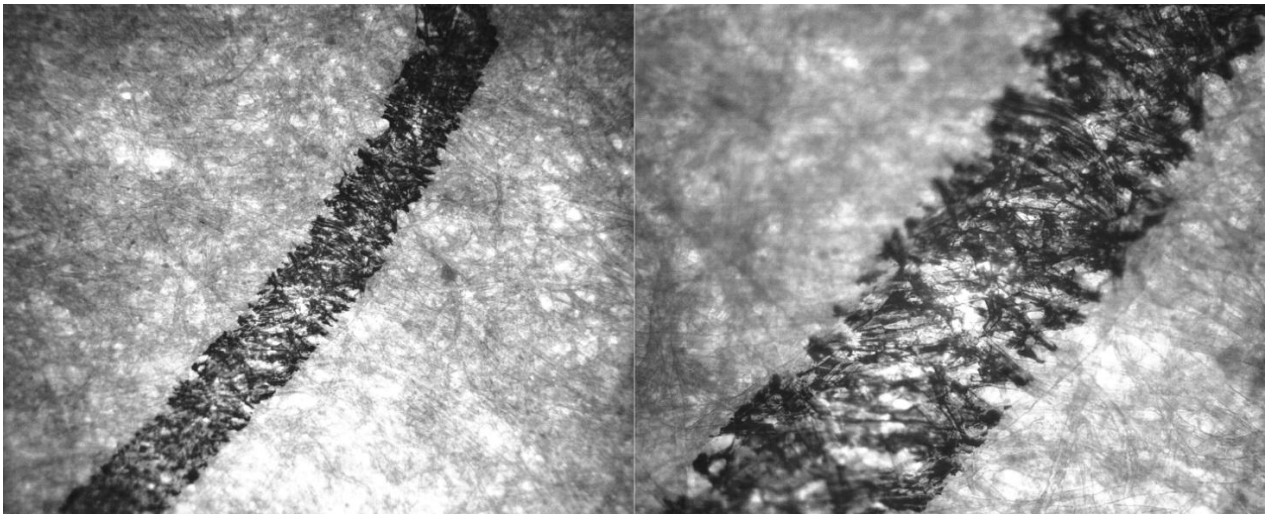


Рис. 6.16. След шариковой ручки на бумаге для записей (увеличение 80 слева и 200 справа). Ширина следа – около 300 мкм

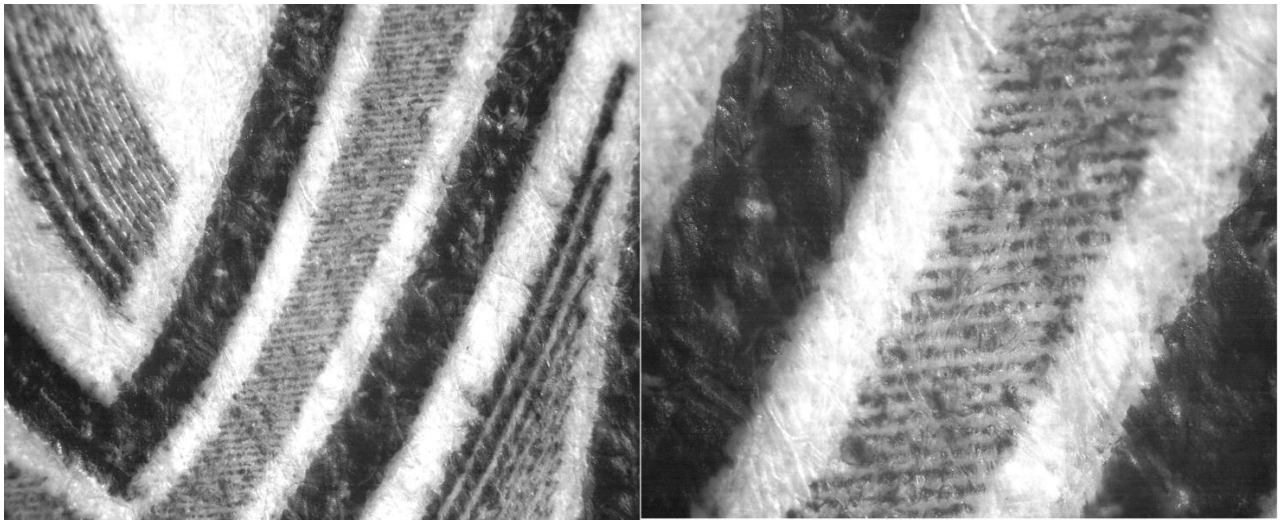


Рис. 6.17. Билет Банка России (увеличение 80 слева и 200 справа). Толщина горизонтальных штрихов в центре рисунка – около 20 мкм. Сравните качество бумаги (толщину волокон) с рис. 6.16

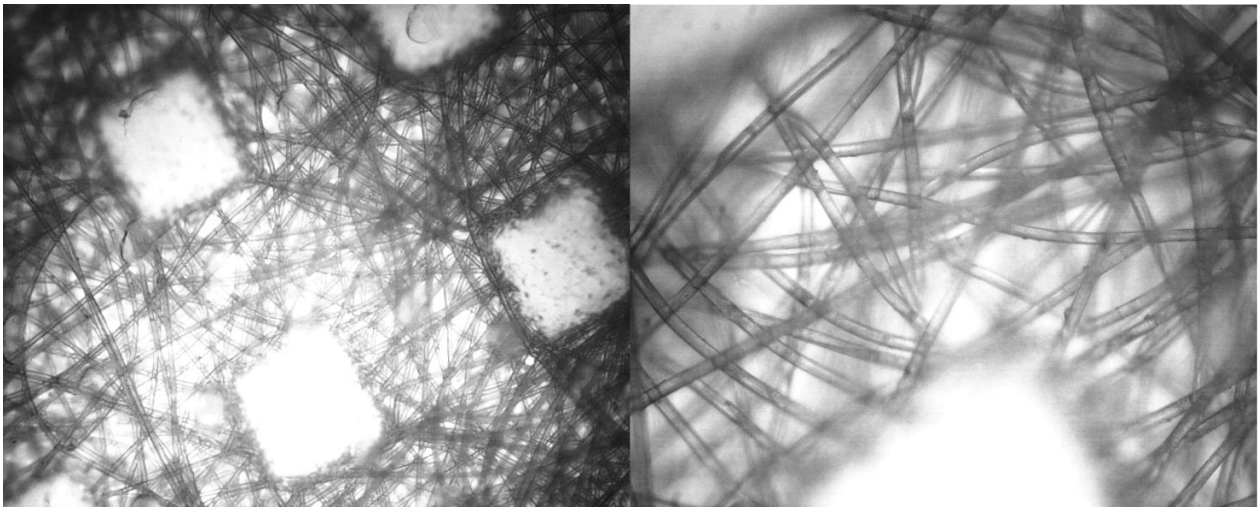


Рис. 6.18. Нетканый материал (увеличение 80 слева и 200 справа). Своего рода «полиэтиленовая бумага» (сравни с рис. 6.16)

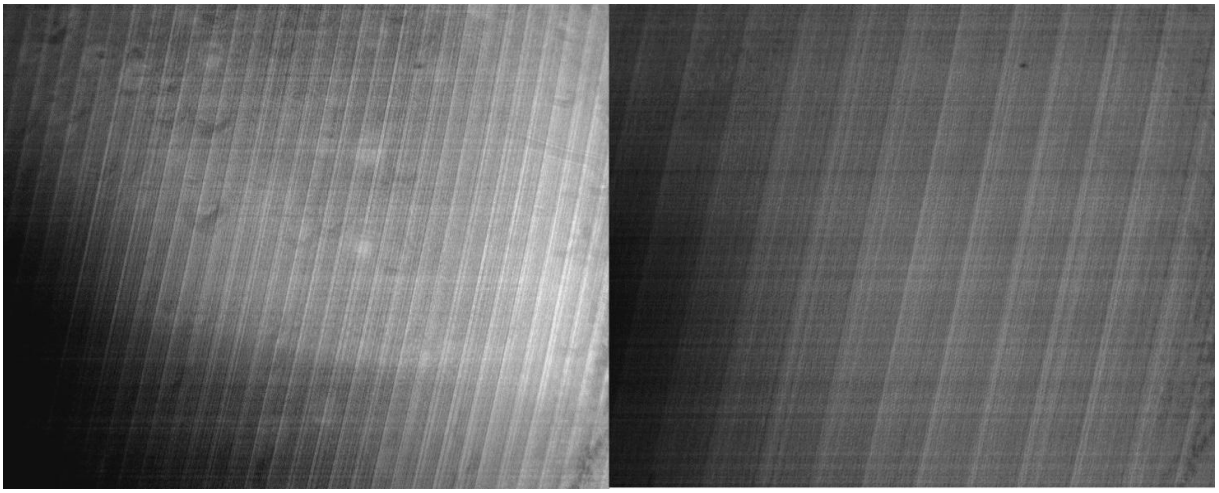


Рис. 6.19. Лазерный диск (CD-RW) (увеличение 80 слева и 200 справа). То, что вы видите, – отрезки спирали, по которой осуществляется записи информации. Шаг спирали – около 100 мкм

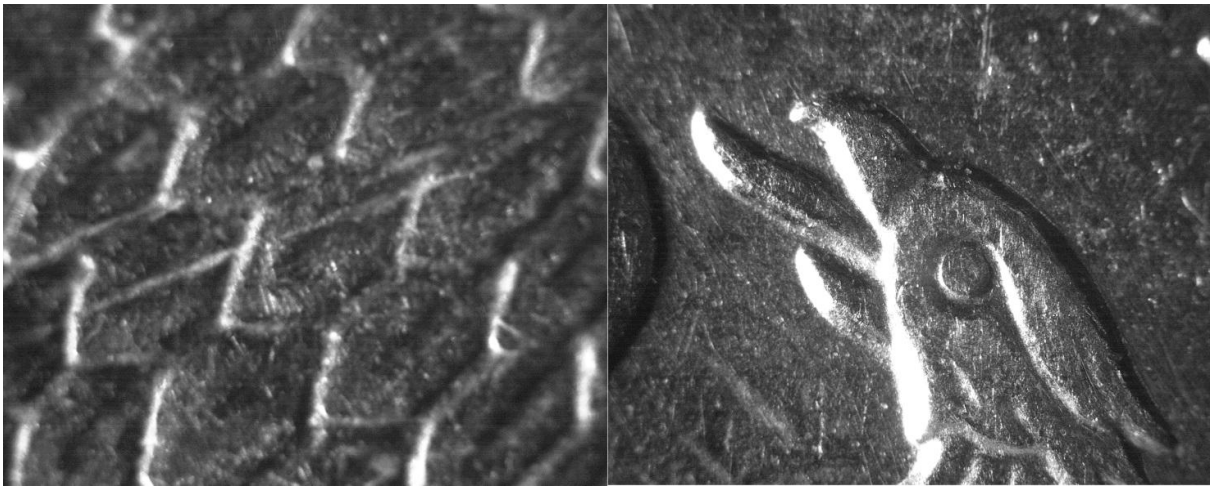


Рис. 6.20. Монета Банка России при увеличении 80. Слева – перья орла, справа – его голова. Монета б/у, поэтому украшена многочисленными царапинами

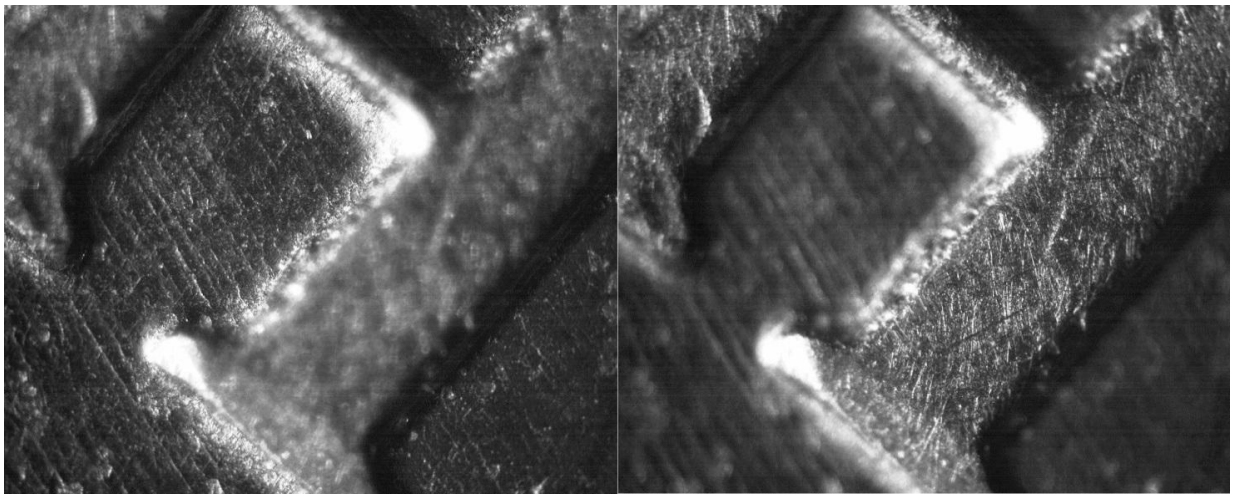


Рис. 6.21. Монета Банка России при увеличении 200. Это – вполне приличное увеличение, поэтому глубина резкости невелика. Сфокусироваться можно либо на поверхность монеты (слева), либо на поверхность буквы (справа)

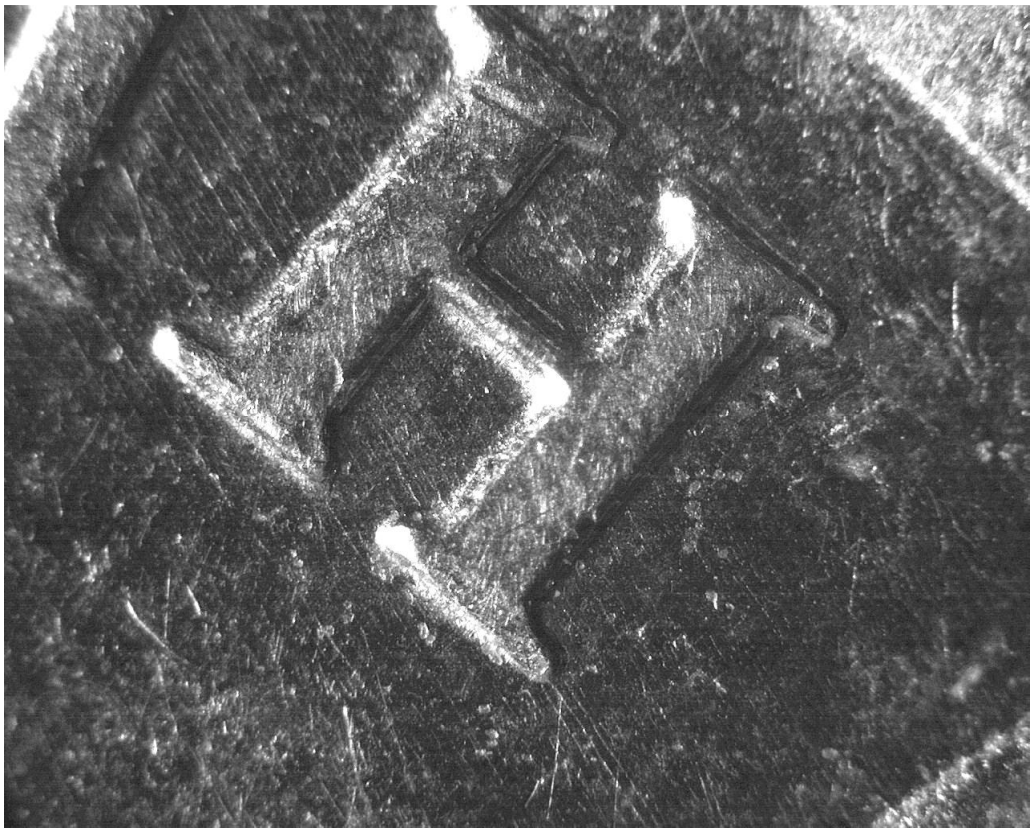


Рис. 6.22. Та же самая монета, что на рис. 6.21, но при увеличении 80. Это увеличение существенно меньше, чем на рис. 6.21. Поэтому глубина резкости больше и вполне можно сфокусироваться одновременно на поверхности монеты и поверхности надписи. Отсюда вывод: меньшее увеличение – не всегда плохо. Иногда оно лучше, чем большее

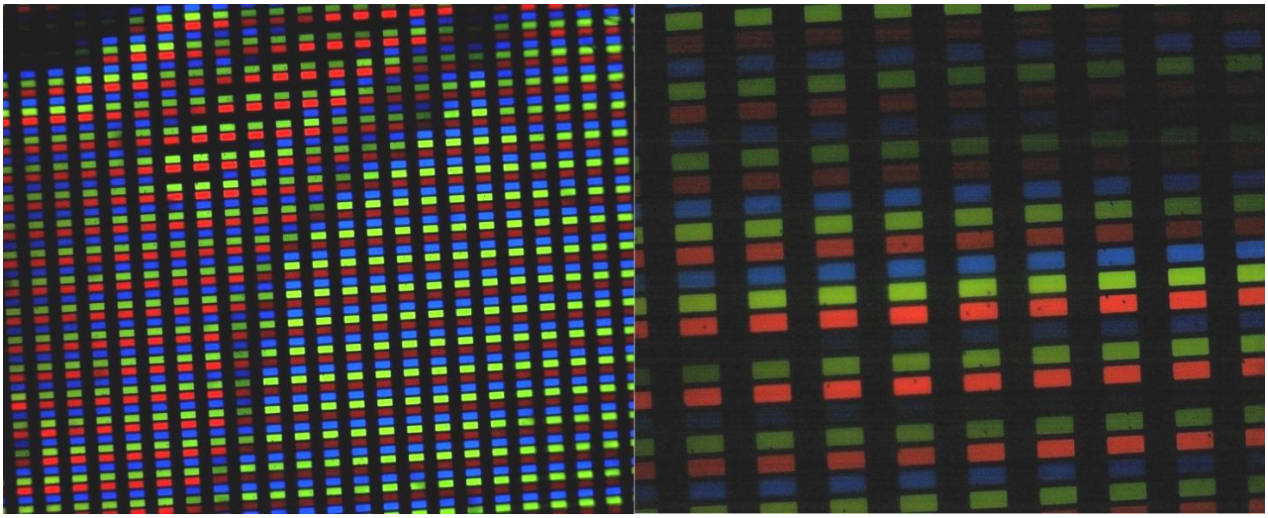


Рис. 6.23. Экран мобильника (увеличение 80 слева и 200 справа). Обратите внимание на то, что с ростом увеличения изображение становится тусклее

Человеческий глаз представляет собой естественную оптическую систему[20], характеризующуюся определённым **разрешением**, то есть наименьшим расстоянием между элементами наблюдаемого объекта, при котором они ещё могут быть отличены один от другого. Для нормального здорового глаза (при удалении от объекта на так называемое расстояние наилучшего видения – около 250 мм) минимальное разрешение составляет примерно 0,1 мм (у человека с очень хорошим зрением). Размеры микроорганизмов, большинства растительных и животных клеток, мелких кристаллов, деталей микроструктуры металлов и сплавов и тому подобное значительно меньше этой величины. Для наблюдения и изучения подобных объектов и предназначены микроскопы различных типов. С помощью микроскопов определяют форму, размеры, строение и многие другие характеристики микрообъектов. Оптический микроскоп даёт возможность различать структуры с расстоянием между элементами **до 0,25 мкм**[21].

Основная характеристика любого микроскопа (рис. 6.24) – это его **увеличение**, а основные части любого оптического микроскопа – **объектив** (рис. 6.25) и **окуляр** (рис. 6.26). Объектив служит для создания увеличенного перевернутого действительного изображения изучаемого объекта, а окуляр – для рассматривания этого изображе-

---

[20] Глаз состоит из одной линзы (хрусталика) и сетчатки, на которой формируется изображение.

[21] Лучшего разрешения достичь невозможно просто потому, что оптический микроскоп использует видимый свет, а рассмотреть с помощью световых волн детали объекта, меньшие длины этой самой световой волны, невозможно. Это все равно что нарисовать почтовую марку малярной кистью. А минимальная длина видимого света (фиолетового цвета) около 4500 ангстрем (то есть 0,45 мкм). Отсюда и идет условное ограничение в 0,25 мкм. Условное потому, что принципиальной разницы между 0,24 мкм и 0,26 мкм нет – детали в 0,24 мкм кое-как все же видны, а детали в 0,26 мкм видны еле-еле.

Здесь можно вспомнить известный древнегреческий софизм «лысый» – «с какого количества волосков на голове человека можно считать лысым?». Ясно, что 1 лишний волосок ситуации не меняет, но где-то надо «провести границу». В данном случае ее и «провели» на уровне 0,25 мкм, условно считая, что детали меньшего размера не видны, а большего – видны.

ния (как лупа). Поэтому микроскоп создает мнимое перевернутое увеличенное изображение объекта наблюдения. Это не очень удобно при перемещении объекта наблюдения, потому что местами меняются не только «верх» и «низ», но и «лево» и «право». Поэтому при попытке передвинуть объект наблюдения в какую-нибудь сторону его изображение двигается в прямо противоположном направлении. Привыкнуть к этому сложно, но можно.

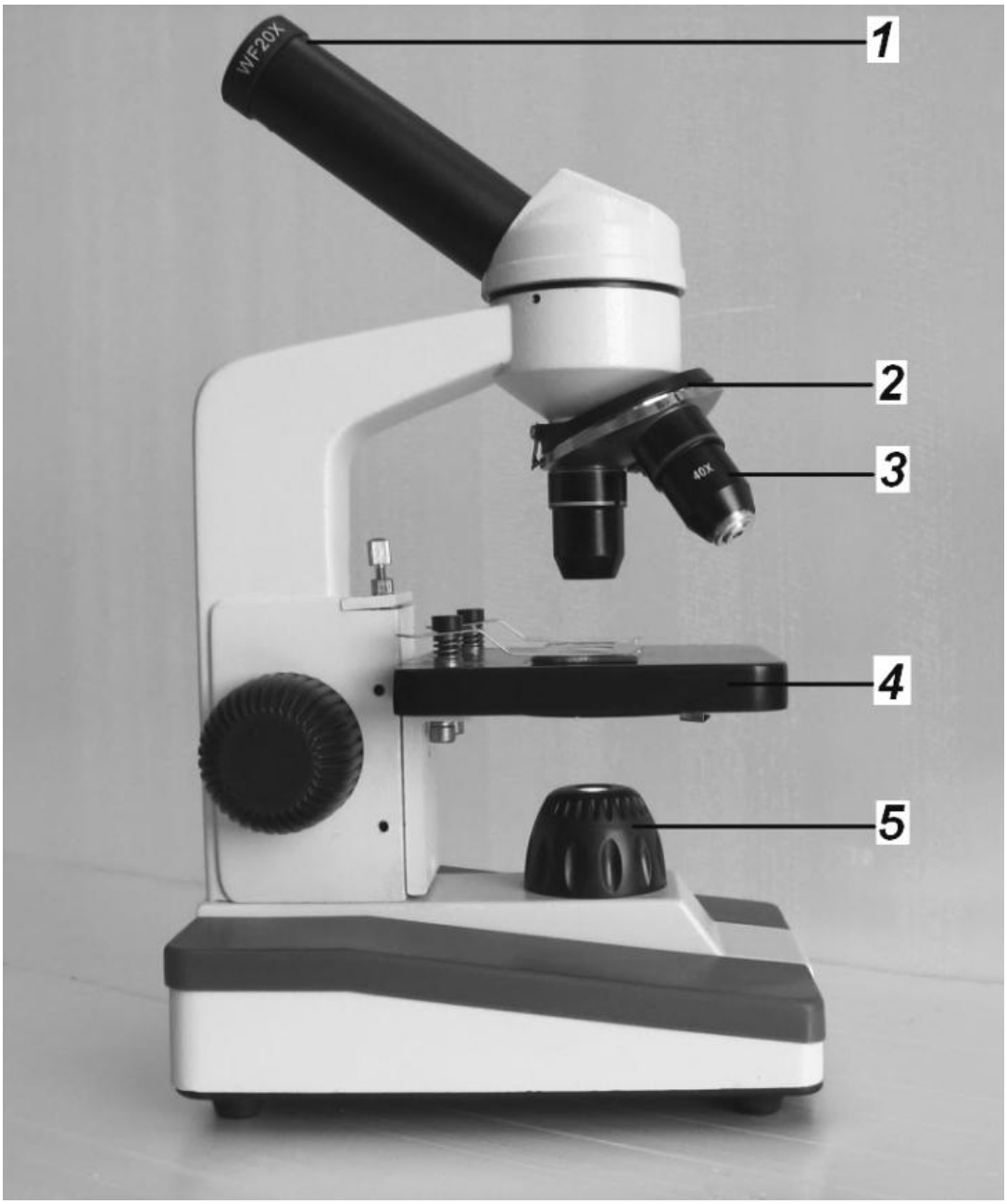


Рис. 6.24. Общий вид типичного микроскопа:
1 – окуляр, 2 – револьверное устройство, на котором установлены 3 сменных объектива, 3 – один (из трех имеющихся) объективов, 4 – предметный столик, 5 – осветительное устройство

Рис. 6.25. Объективы. Видна маркировка на объективе с увеличением 40 (синее кольцо, 40X). В данный момент используется объектив с увеличением 10 (с желтым кольцом)

Рис. 6.26. Окуляр с увеличением 20 (20X)

В простейшем случае и объектив, и окуляр – это просто собирающие линзы. Но это – только в простейшем случае. На самом деле «бес сидит в деталях» – если взять просто две линзы, то качество изображения будет «никаким» – вместо увеличенного изображения объекта мы

увидим темное (низкая светосила), искаженное (сферические аберрации), расплывчатое (сферические аберрации) и притом «украшенное» цветным туманом (хроматические аберрации) «нечто», очень мало похожее на реальный объект. Поэтому в нормально работающем микроскопе и объектив, и окуляр – это сбалансированные друг с другом сложные (многолинзовые) оптические системы, качество которых соответствует друг другу[22] и заявленному увеличению микроскопа.

Увеличение микроскопа – это величина, показывающая, во сколько раз объект кажется больше, чем он есть на самом деле. Увеличение микроскопа равно произведению увеличений объектива и окуляра. Если, например, увеличение объектива равно 40 (на нем написано 40X), а окуляра – 20 (на нем написано 20X), то суммарное увеличение микроскопа равно 800 (40x20).

Именно под это увеличение должно быть обеспечено качество и объектива, и окуляра[23]: в противном случае мы увидим описанный выше «туман крупным планом». Хороший микроскоп на увеличении 800 позволял бы рассмотреть детали структуры размером 0,1 мм/800=0,12 мкм, если бы это было возможно теоретически. На самом деле **теоретический предел разрешения для оптического микроскопа** – это расстояния порядка длины световой волны (в районе 0,5 мкм) – с помощью световой волны нельзя рассмотреть объекты, которые меньше световой волны. **Иммерсионные микроскопы** обеспечивают и меньшее разрешение (до 0,2 мкм) за счет того, что объект наблюдения помещается в жидкость (иммерсионную жидкость) с высоким показателем преломления: в такой жидкости длина волны света может быть раза в два меньше, чем в вакууме и разрешение – раза в два лучше, чем у обычного (неиммерсионного) микро-

---

[22] Где тонко – там и рвется. Гадкий объектив может «свести на нет» прекрасный окуляр и наоборот.

[23] Ясно, что чем выше увеличение, тем более качественной должна быть оптика – объектив 20X, «хороший» для суммарного увеличения микроскопа 100, может быть «очень средним» для увеличения 200 и «абсолютно непригодным» для увеличения 800.

скопа. Но это – предел. Лучшее увеличение (с соответствующим разрешением) дает **электронный микроскоп**, в котором вместо света используется пучок электронов.

На самом деле понятие «увеличение микроскопа» не следует понимать буквально. Оно сложилось исторически в те времена, когда способов увеличения изображения без использования микроскопа в общем-то и не было. Сейчас «тупо» увеличить изображение очень легко – выделить любой фрагмент изображения на компьютере, «потянуть» мышкой за уголок – и готово: картинка стала больше. Но лучше она от этого обычно не становится, потому что дело вовсе не в размере картинки, а именно в разрешающей способности («не в силе правота, а в правоте – сила»).

В качестве примера на рисунке приведена фотография одного и того же объекта (дифракционной решетки с расстоянием между штрихами 0,01 мм) на одном и том же микроскопе с увеличением 80 (рис. 6.27), 200 (рис. 6.28) и 800 (рис. 6.29). А на рис. 6.30 проведено сравнение изображения с «законным» увеличением 800 и с тем же самым увеличением 800, полученным путем «жульничания», то есть путем компьютерного увеличения изображения с увеличением 200 в четыре раза и с увеличением 80 в 10 раз. Видно, что проку от такого «увеличения» нет.

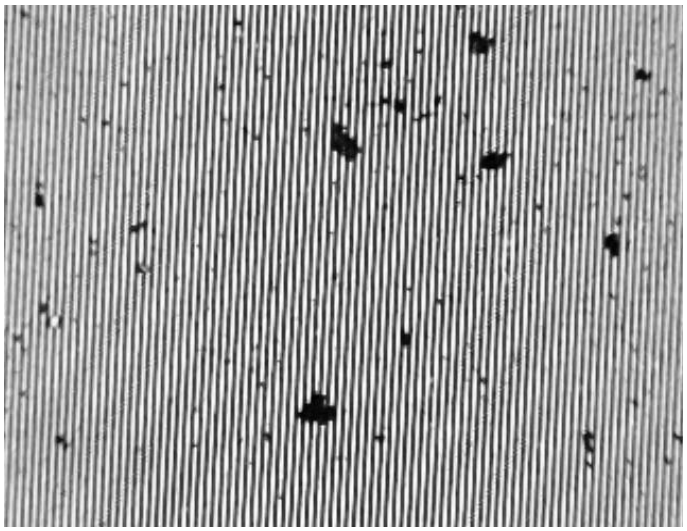


Рис. 6.27. Фрагмент дифракционной решетки при увеличении 80

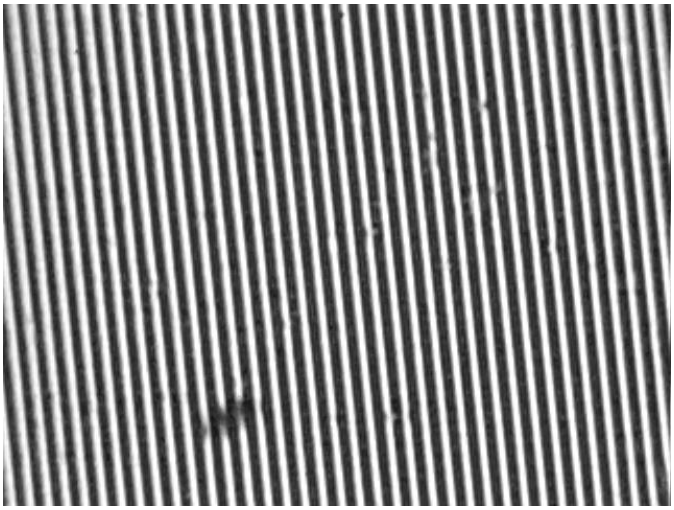


Рис. 6.28. Фрагмент дифракционной решетки при увеличении 200

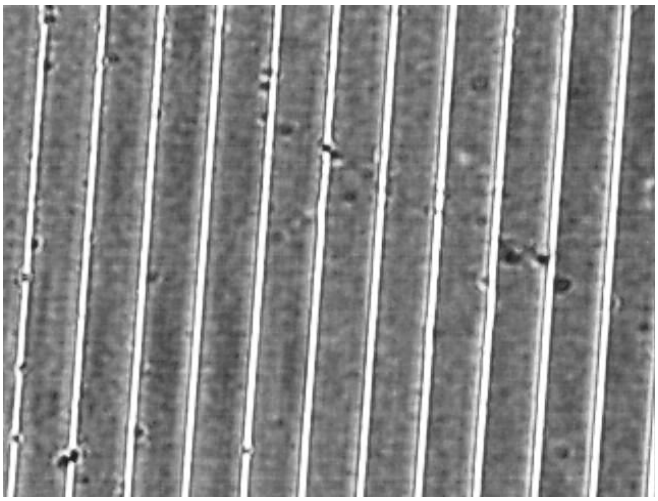


Рис. 6.29. Фрагмент дифракционной решетки при увеличении 800

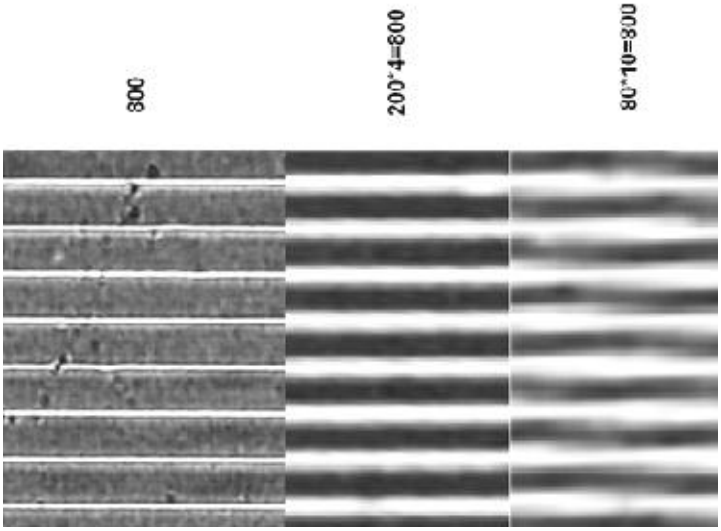


Рис. 6.30. А это получается, если увеличить изображение без улучшения разрешения этого изображения. Жалкое, душераздирающее зрелище!

Поэтому увеличение в 200 раз следует понимать как способность микроскопа увеличить изображение в 200 раз без потери качества, то есть как способность получить картинку с разрешением 0,1 мм/200=0,5 мкм. К сожалению, так бывает только у очень хороших (по качеству исполнения) микроскопов. Реально обеспечиваемое разрешение обычно бывает гораздо хуже. Впрочем, это не должно нас очень уж огорчать, ведь люди, способные невооруженным глазом разрешить детали в 0,1 мм, встречаются в наше время очень редко. А если человек способен разрешать только 0,5 мм, то он ничего плохого не почувствует, даже если реальное разрешение микроскопа будет в пять раз хуже (2,5 мкм). Вот для таких-то, как мы, «зорких соколов» и придумано увеличение 800, которое теоретически означает разрешение чуть ли не 0,1 мкм (что просто невозможно с учетом волновой природы света), а на практике – раз в 5-10 хуже, что тоже очень даже неплохо.

Итак, реальной характеристикой любого микроскопа является все-таки его разрешающая способность, которую можно оценить по формуле d=100/N, где N – обещанное в инструкции увеличение, а d – разрешающая способность (в микрометрах). Если разрешающая способность окажется лучше (то есть меньше) 5 мкм, то стоит поинтересоваться качеством оптики: некачественная оптика (типа китайских пластмассовых линз) вполне способна заменить теоретическое разрешение 5 мкм на практическое 20 мкм. Если же разрешающая способность окажется лучше 0,5 мкм, то стоит поинтересоваться, не иммерсионный ли это микроскоп: если не иммерсионный, то следует морально подготовиться к неизбежной туманности картинки.

Какое увеличение микроскопа следует использовать на практике? Ответ очевиден: то, которое позволит лучше всего рассмотреть то, что мы хотим рассмотреть. И это вовсе не обязательно – самое большое увеличение. Ведь с ростом увеличения сужается поле зрения и резко возрастают проблемы с фокусировкой: в частности, резко уменьшается глубина фокусировки. Что это означает, видно на рис. 6.31. На левом фото изображение сфокусировано на поверхности монеты и эта поверхность видна хорошо – все царапины «как на ла-

дони». На правом, наоборот, фокусировка проведена на поверхность букв и теперь эта поверхность видна хорошо, а поверхность монеты – как в тумане. И никакие ухищрения не позволят нам сфокусировать микроскоп при этом увеличении (200) на поверхность монеты и поверхность букв одновременно. А вот при меньшем увеличении 80 **глубина резкости**[24] больше и мы без труда можем сфокусироваться на поверхности монеты и букв одновременно.

Упражнение 1
Описание установки

Лупа препарировальная

Препарировальными лупами (рис. 6.31) обычно называют лупы с небольшим увеличением (не более 2–3[25]), достаточно большим (не менее 10 см) диаметром[26] и штативом, позволяющим при использовании этой лупы иметь свободные руки. Больше всего они напоминают настольные лампы с линзой вместо лампочки. Эти приборы приносят большую пользу при проведении различных работ с достаточно мелкими объектами. Разумеется, увеличение 2 – это не очень много[27], но даже такое увеличение может быть очень полезным, особенно если добавить к нему широкое поле зрения, минимум искаже-

---

[24] **Глубина резкости** – это величина интервала расстояний, в пределах которого возможна одновременная наводка на резкость.

[25] Да и то это декларированное производителем увеличение иногда относится не к расстоянию наилучшего зрения, а к какому-либо другому расстоянию (другими словами – взято с потолка).

[26] Одно связано с другим. Если увеличение лупы достаточно велико (например, составляет около 10), то она просто не может быть большой: попытка увеличить диаметр линзы приводит к росту (квадратичному!) толщины линзы в центре, а рост толщины линзы – к резкому увеличению разного рода аберраций. Поэтому «внешность лупы» обманчива: лупы с небольшим увеличением – это достаточно большие, «солидные» и недешевые приборы, а «мощные» лупы с увеличением 10–20 – это обычно мелкие, дешевые и низкокачественные «пигалицы».

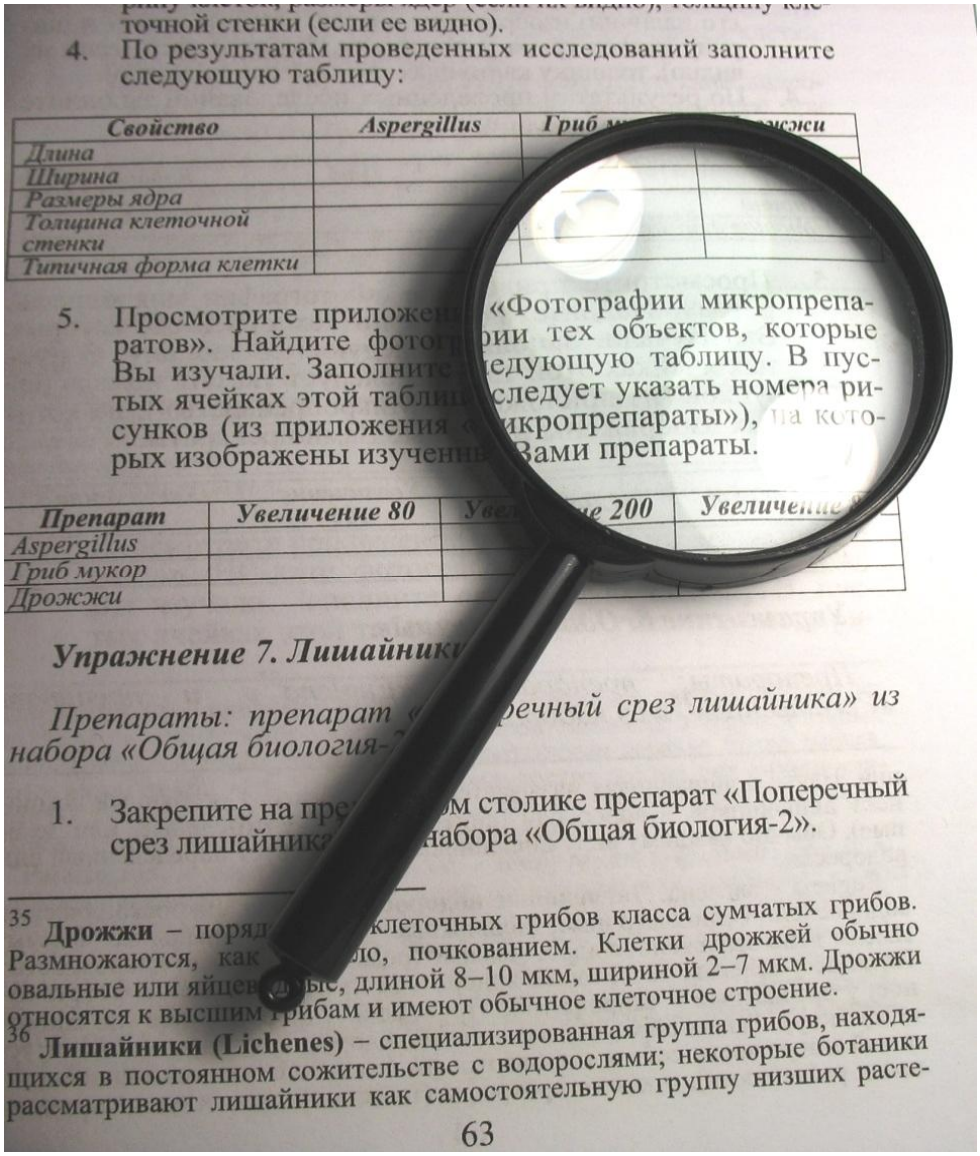
[27] Хотя это как глянуть: представьте, что вы стали «всего» в 2 раза выше или ниже. Это – совсем не мало…

ний и удобство работы. Поэтому не следует считать препарировальные лупы «плохими и дешевыми» инструментами: и то, и другое совершенно неверно. Цена типичной препарировальной лупы, например, раз в 10 больше цены типичной «ручной» лупы с гораздо большим увеличением.

Рис. 6.31. Лупа препарировальная

Лупа ручная

Ручная лупа (рис. 6.32) обычно имеет увеличение 2–10, небольшой диаметр (5–2 см) и ручку для удобства держания. Наша лупа имеет увеличение 2, диаметр 55 мм и среднее качество – типичный китайский ширпотреб.



точной стенки (если ее видно).

4. По результатам проведенных исследований заполните следующую таблицу:

Свойство	Aspergillus	Гриб мукор	Дрожжи
Длина			
Ширина			
Размеры ядра			
Толщина клеточной стенки			
Типичная форма клетки			

5. Просмотрите приложение «Фотографии микропрепаратов». Найдите фотографии тех объектов, которые Вы изучали. Заполните следующую таблицу. В пустых ячейках этой таблицы следует указать номера рисунков (из приложения «Микропрепараты»), на которых изображены изученные Вами препараты.

Препарат	Увеличение 80	Увеличение 200	Увеличение [illegible]
Aspergillus			
Гриб мукор			
Дрожжи			

Упражнение 7. Лишайники

Препараты: препарат «Поперечный срез лишайника» из набора «Общая биология-2».

1. Закрепите на предметном столике препарат «Поперечный срез лишайника» из набора «Общая биология-2».

[35] **Дрожжи** – порядок одноклеточных грибов класса сумчатых грибов. Размножаются, как правило, почкованием. Клетки дрожжей обычно овальные или яйцевидные, длиной 8–10 мкм, шириной 2–7 мкм. Дрожжи относятся к высшим грибам и имеют обычное клеточное строение.

[36] **Лишайники (Lichenes)** – специализированная группа грибов, находящихся в постоянном сожительстве с водорослями; некоторые ботаники рассматривают лишайники как самостоятельную группу низших расте-

63

Рис. 6.32. Ручная лупа вплотную к предмету. Увеличение равно 1 (то есть увеличения нет), изображение прямое (неперевернутое)

Порядок выполнения работы. Измерения и расчеты

1. Вам необходимо научиться обращаться с лупой и находить ее **фокусное расстояние**, то есть расстояние от линзы до ее главного фокуса[28]. Для этого включите настольную лампу на расстоянии не менее трех метров от стены, приставьте лупу вплотную к стене и начните медленно отодвигать ее от стены, наблюдая за появляющимся на стене изображением. В тот момент, когда изображение лампы

[28] Напомним, что **главным фокусом линзы** называется точка, в которой пересекаются после преломления линзой лучи, падающие на линзу параллельно ее оптической оси.

на стене станет четким, расстояние от лупы до стены будет равно (строго говоря, почти равно[29]) фокусному расстоянию линзы. Измерив это расстояние с помощью обычной линейки, вы можете определить фокусное расстояние линзы. Найдите таким методом фокусные расстояния препарировальной лупы и ручной лупы. Запишите полученные значения в тетрадь ($F_{пр}$=..., $F_{об}$=…).

2. Положите лупу на хорошо освещенный лист книги. Начните медленно отодвигать ее от листа бумаги, следя за характером изображения (размер, перевернутость). Сначала изображение не перевернуто, увеличение – около 1 (то есть увеличения нет, см. рис. 6.22). Затем, по мере удаления от предмета и приближения расстояния от предмета к фокусному, изображение становится все крупнее, а искажения – все больше (рис. 6.33–6.35).

Рис. 6.33. Расстояние от лупы до предмета заметно меньше фокусного. Увеличение невелико (примерно 1,5), изображение прямое. Качество изображения достаточно высокое

[29] Почти – потому что в фокусе возникает изображение бесконечно удаленного объекта, а лампа удалена от линзы не «на бесконечность», а всего-навсего метра на три. Впрочем, фокусные расстояния наших линз во много раз меньше трех метров и для них три метра «сойдет за бесконечность».

Рис. 6.34. Расстояние от лупы до предмета меньше фокусного, но ближе к нему, чем на рис. 6.34. Изображение прямое. Увеличение около 3
Качество изображения посредственное

Рис. 6.35. Расстояние от лупы до предмета почти равно фокусному, но меньше фокусного. Изображение прямое. Увеличение около 9. Качество изображения очень плохое. Наблюдаются сферические и хроматические аберрации

Апогея этот процесс достигает тогда, когда расстояние от лупы до предмета становится равным фокусному. В этот момент ничего разобрать не удается, за исключением того, что это «ничего» – очень крупное (рис. 6.36). При дальнейшем увеличении расстояния от предмета до лупы изображение становится перевернутым, а увеличение (и искажения) – все меньше (рис. 6.37). При расстоянии от предмета до линзы более двух фокусных изображение становится меньше предмета, то есть увеличение становится меньше 1 (рис. 6.38).

Рис. 6.36. Расстояние от лупы до предмета почти равно фокусному. Качество изображения настолько плохое, что невозможно даже разобрать, прямое оно или перевернутое. Тем более не удается оценить увеличение. Впрочем, при таком качестве изображения говорить об увеличении бессмысленно. «Радужные» пятна на черно-белом рисунке свидетельствуют о значительных хроматических аберрациях

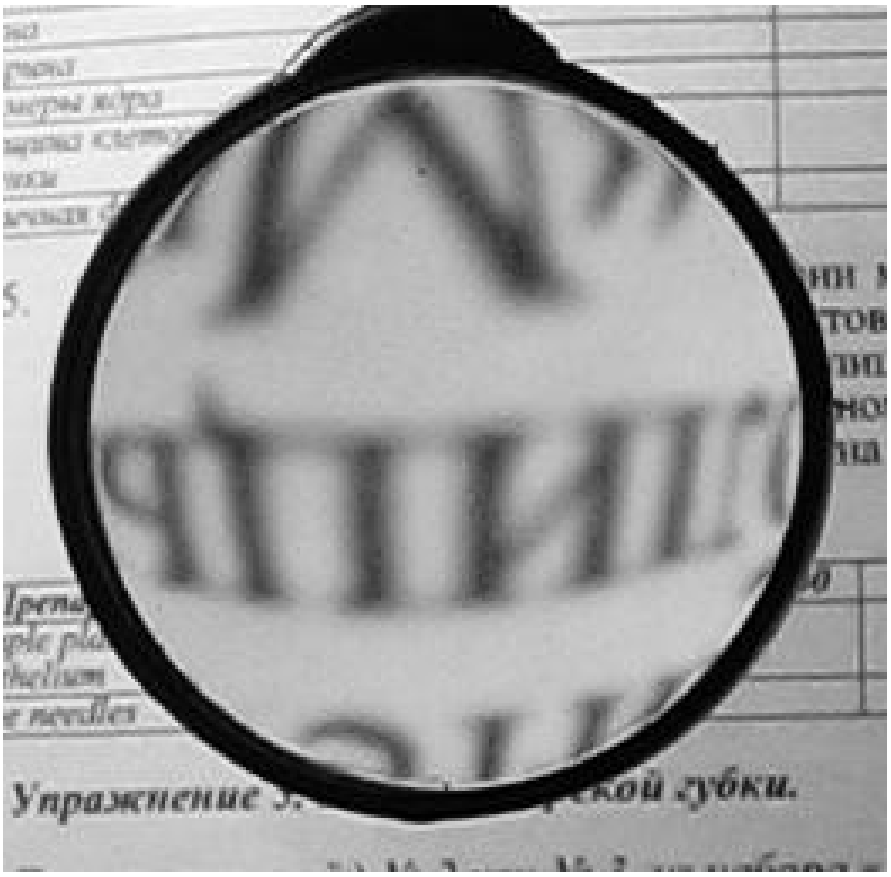


Рис. 6.37. Расстояние от лупы до предмета несколько больше фокусного. Изображение перевернутое. Увеличение около 6. Качество изображения плохое. Наблюдаются сферические и хроматические аберрации

3. Рассчитайте увеличение препарировальной лупы и ручной лупы по формуле $N=d/F$, где d=25 см – расстояние наилучшего зрения, а F – фокусное расстояние лупы. Запишите полученные значения в тетрадь ($N_{пр}$=..., $N_{об}$=…).

4. Вам необходимо изучить последовательно следующие объекты:

А) бумага для записей (освещение настольной лампой);

Б) денежная купюра – любая, которая у вас найдется, но желательно поновее (освещение настольной лампой);

В) монета – любая, которая у вас найдется (освещение настольной лампой);

Г) экран вашего мобильника (самосветящийся объект).

5. Что значит – «изучить»? Сначала вы должны рассмотреть перечисленные объекты с помощью препарировальной лупы, затем – с помощью ручной лупы, затем – с помощью их комбинации, которая

при правильно подобранных расстояниях между лупами и предметом[30] представляет собой примитивный микроскоп и позволяет получать большее увеличение, чем каждая из этих луп в отдельности.

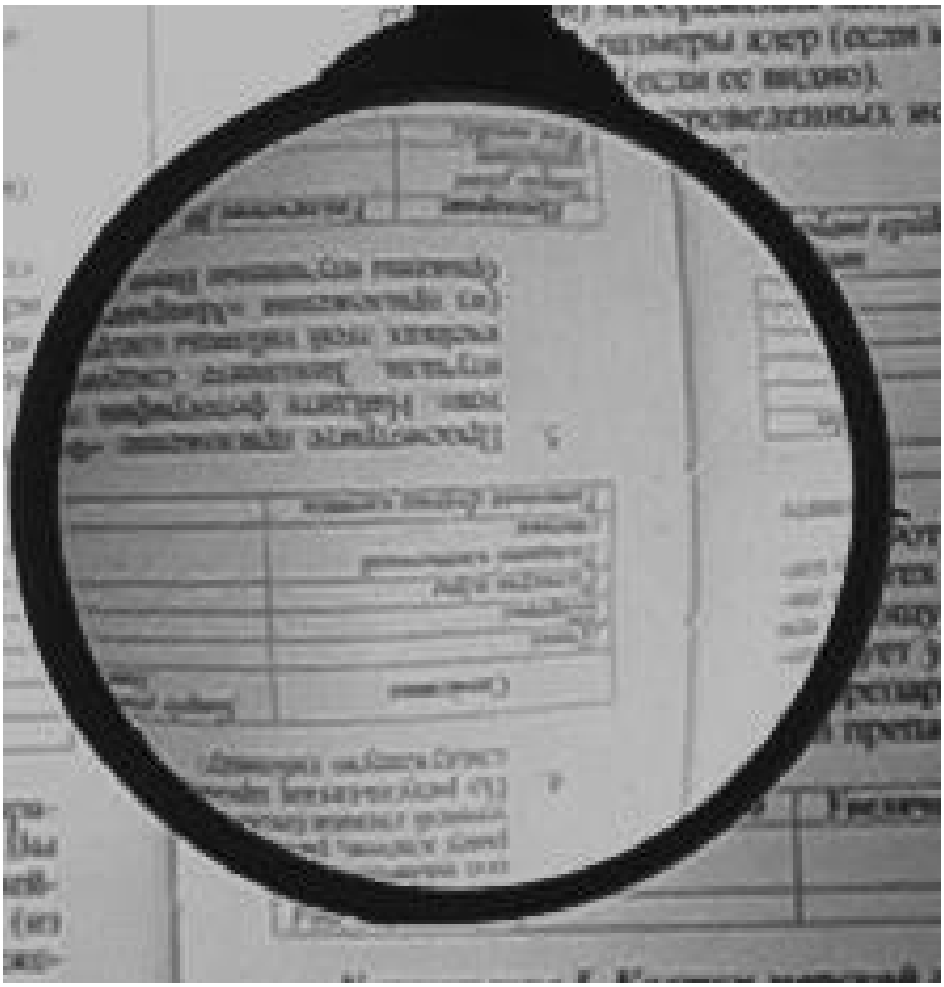


Рис. 6.38. Расстояние от лупы до предмета больше двойного фокусного. Изображение перевернутое. Увеличение около 0,7 (то есть изображение уменьшено примерно в полтора раза)

[30] «Правила» здесь такие: от предмета до первой линзы (играющей роль объектива) – примерно фокусное расстояние, между линзами – гораздо больше суммы их фокусных расстояний (чем больше – тем больше будет и увеличение, и искажение изображения).

Упражнение 2
Описание установки

Микроскоп Микромед-С11

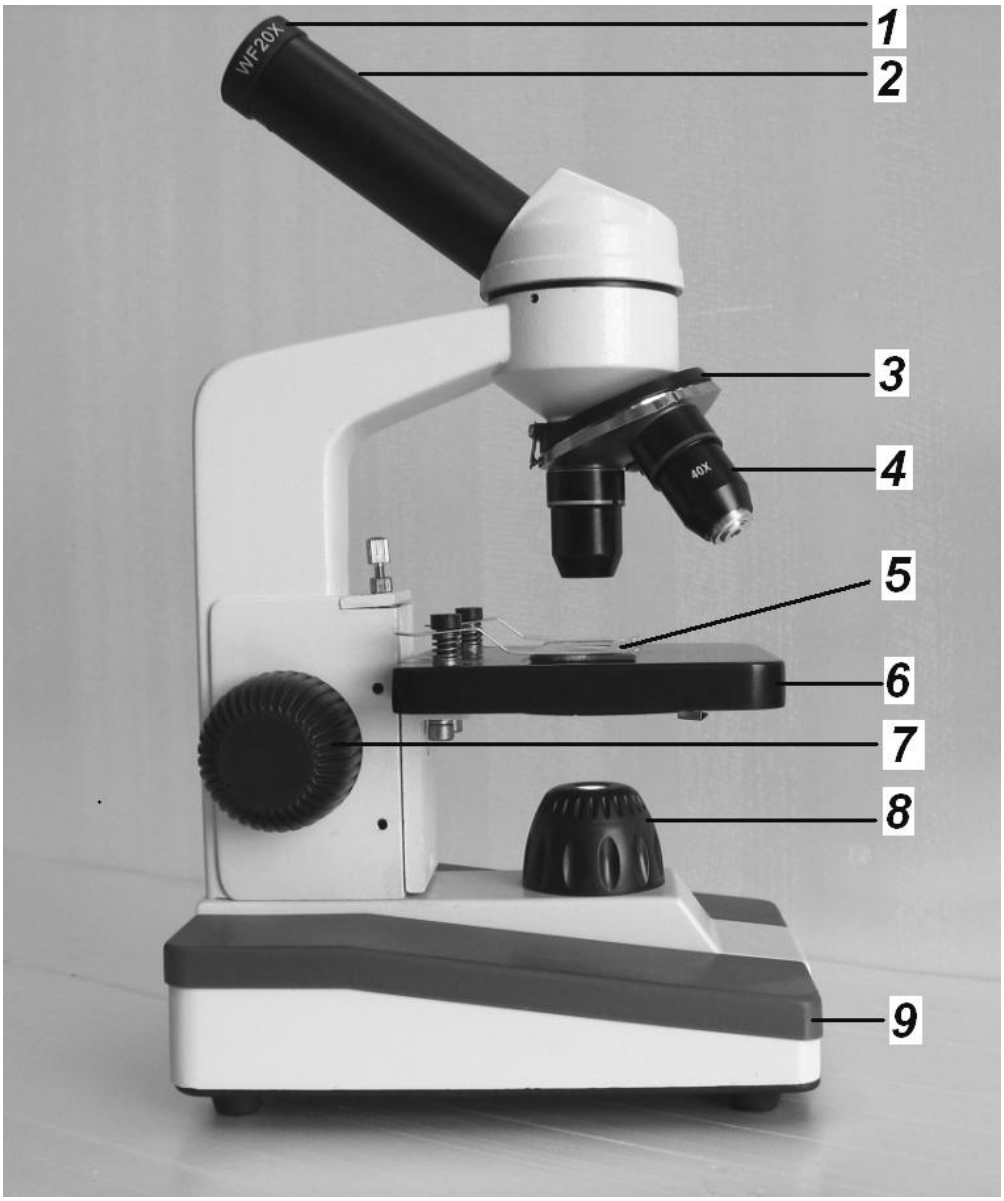


Рис. 6.39. Общий вид микроскопа Микромед С-11:
1 – окуляр (20X), 2 – тубус окуляра, 3 – револьверный механизм с тремя объективами, 4 – один из трех объективов (4X – с красным кольцом, 10X – с желтым кольцом и 40X – с синим кольцом), 5 – препарат на предметном стекле, 6 – предметный столик, 7 – ручка для перемещения предметного столика вверх-вниз (для фокусировки), 8 – осветительное устройство (светодиод и конденсор), 9 – основание микроскопа

В нашей лабораторной работе используется микроскоп Микромед С-11. Его общий вид показан на рис. 6.39.

Микроскоп оснащен окуляром (20Х) и набором из трех объективов (4Х – короткий, с красным кольцом, 10Х – средний, с желтым кольцом и 40Х – длинный, с синим кольцом), размещенных на одном общем револьверном устройстве. Это позволяет рассматривать один и тот же объект при различном увеличении (4*20=80Х, 10*20=200Х или 40*20=800Х). Для изменения увеличения не следует трогать сам объект – достаточно просто повернуть револьверное кольцо. Следует, впрочем, иметь в виду, что при смене увеличения немного сбивается наводка на резкость и меняется величина поля зрения – чем выше увеличение, тем уже поле зрения. Поэтому для того чтобы не «потерять» объект при переходе от меньшего увеличения к большему, следует позаботиться о том, чтобы при меньшем увеличении он был в самом центре поля зрения. Кроме того, при замене объектива на более длинный иногда он начинает цеплять за объект наблюдения. Поэтому при замене объектива на более мощный следует чуть-чуть отодвигать предметный столик от объектива. Так, на всякий случай. Во избежание.

Предметный столик микроскопа предназначен для размещения объекта наблюдения – приготовленной тем или иным способом тонкой пленки или среза чего-нибудь, что рассматривается на просвет. Для размещения объекта наблюдения используется **предметное стекло** (рис. 6.41), на поверхности которого размещен изучаемый объект. При необходимости[31] предметное стекло прижимается к поверхности предметного столика двумя пружинными лапками так, чтобы объект изучения находился напротив отверстия в предметном столике. Напротив того же отверстия ниже предметного столика расположен **конденсор** – линза, предназначенная для фокусирования пучка света от осветительного устройства на объект изучения. Система освещения играет важную роль в микроскопе: без нее мы видели бы только темноту.

[31] Перемещать предметное стекло по поверхности столика, конечно, надо не в прижатом состоянии. Прижимают для фиксации, если интересный объект уже «стоит» по центру поля зрения или если все равно, на что смотреть.

В результате объект наблюдения (тонкая пленка) оказывается как бы самосветящимся, причем очень сильно самосветящимся. Разумеется, на самом деле светится светодиод, а не наблюдаемая нами в микроскоп пленка, но важен результат. Впрочем, такая система освещения пригодна только для изучения полупрозрачных тонких пленок. Для непрозрачных объектов вам придется использовать просто настольную лампу.

Для обеспечения точной фокусировки объектива на объект наблюдения (то есть для «наводки на резкость») необходимо уметь изменять расстояние между объективом и предметным столиком. Для этого служит ручка перемещения предметного столика относительно объектива. Пользоваться этой ручкой следует осторожно, ведь «наезд» объективом на объект приведет к порче того и другого.

Поэтому не следует приближать предметный столик к объективу «вслепую», то есть глядя в окуляр. Гораздо лучше проделать следующее:

- сначала приблизить объектив к предметному столику на заведомо слишком малое расстояние (внимательно контролируя визуально расстояние между объективом и столиком);
- взглянуть в окуляр и **медленно** увеличивать расстояние между предметным столиком и объективом до тех пор, пока не появится изображение и пока резкость изображения не будет оптимальной;
- ни в коем случае нельзя применять силу при приближении предметного столика к объективу: при большом увеличении очень легко «проскочить» максимум резкости и «наехать» предметным столиком на объектив. При этом легко сломать микроскоп.

При микроскопическом изучении объекта следует сначала использовать наименьшее увеличение (красный объектив). При минимальном увеличении легче всего добиться резкого изображения объекта и «сориентироваться на местности». При этом следует добиться того, чтобы наиболее интересная часть объекта оказалась в самой середине поля зрения. Иначе при смене объектива самое интересное исчезнет из поля зрения (при переходе от красного объектива к желтому поле зрения уменьшается примерно в 2,5 раза). Микроскоп не оборудован механизмом перемещения предметного столика в гори-

зонтальной плоскости (дешевая модель, ничего не попишешь). Поэтому приходится пользоваться «молотком, отверткой и помощью чьей-то матушки». При малых увеличениях можно просто очень аккуратно двигать предметное стекло пальцем, а при больших увеличениях неплохие результаты дает легкое постукивание по той стороне предметного столика, в которую следует сместить свободно лежащий на столике препарат. Впрочем, изображение в микроскопе перевернуто, поэтому следует стучать по той стороне, которая кажется противоположной – в общем, на месте сориентируетесь.

После наименьшего увеличения (красный объектив) следует использовать промежуточное (желтый объектив), а затем (при необходимости) и максимальное (синий). «При необходимости» сказано потому, что без необходимости переходить к большему увеличению не следует: при этом резко увеличиваются проблемы с фокусировкой и заметно снижается качество изображения.

Для оценки истинных размеров наблюдаемых объектов «на глазок» можно пользоваться известными размерами поля зрения: при увеличении 80 – это примерно 2 мм, при увеличении 200 – 0,8 мм = 800 мкм, при увеличении 800 – 0,2 мм=200 мкм (табл. 6.1).

Для этого следует оценить, примерно во сколько раз интересующий вас размер меньше диаметра поля зрения, и поделить известные вам размеры поля зрения на это число. Пусть, например, вы видите что-то типа того, что изображено на рис. 6.40 при увеличении 200, то есть при размере поля зрения 800 мкм. Ясно, что длина объекта примерно в 3…4 раза меньше диаметра поля зрения. Значит, его размеры примерно равны 800/(3…4)=200…300 мкм. А как найти ширину объекта? Или мысленно «выстроить» объекты по ширине, или (гораздо проще) учесть, что ширина объекта примерно в 2,5 раза меньше длины и потому составляет около 80…100 мкм.

Не следует пренебрегать возможностью изменения освещенности объекта наблюдения. Для этого служит **диафрагма конденсора**. Размеры диафрагмы (а следовательно, и освещенность объекта наблюдения) можно изменять с помощью кольца диафрагмы (рис. 6.41). Освещенность должна соответствовать степени прозрачности препа-

рата. Чем более прозрачен препарат, тем меньше должна быть освещенность, и наоборот.

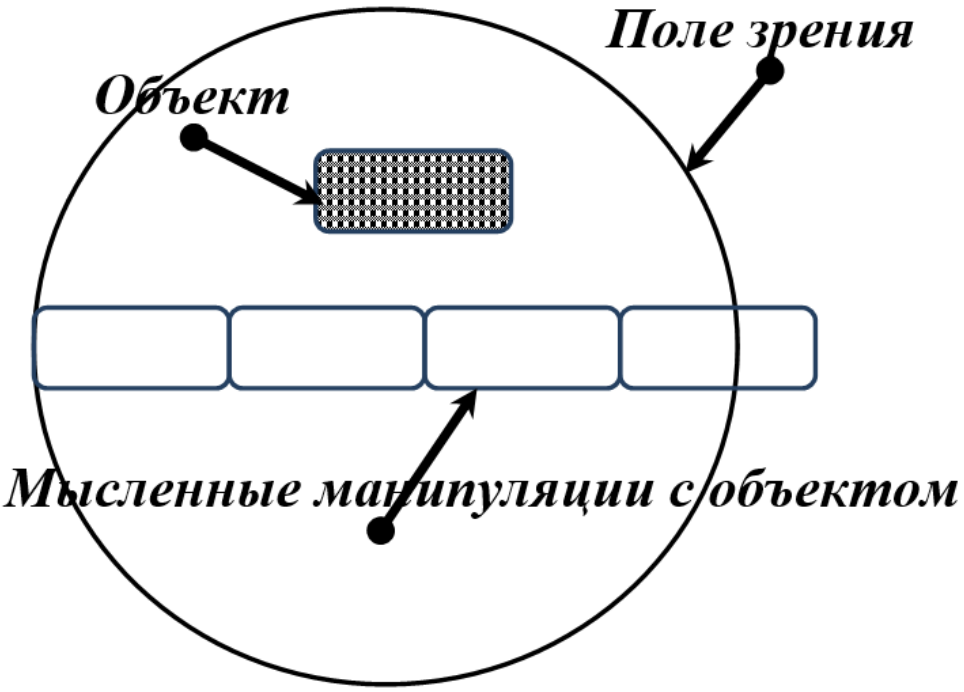


Рис. 6.40. Оценка размеров объекта путем мысленного сравнения его размеров с размерами поля зрения

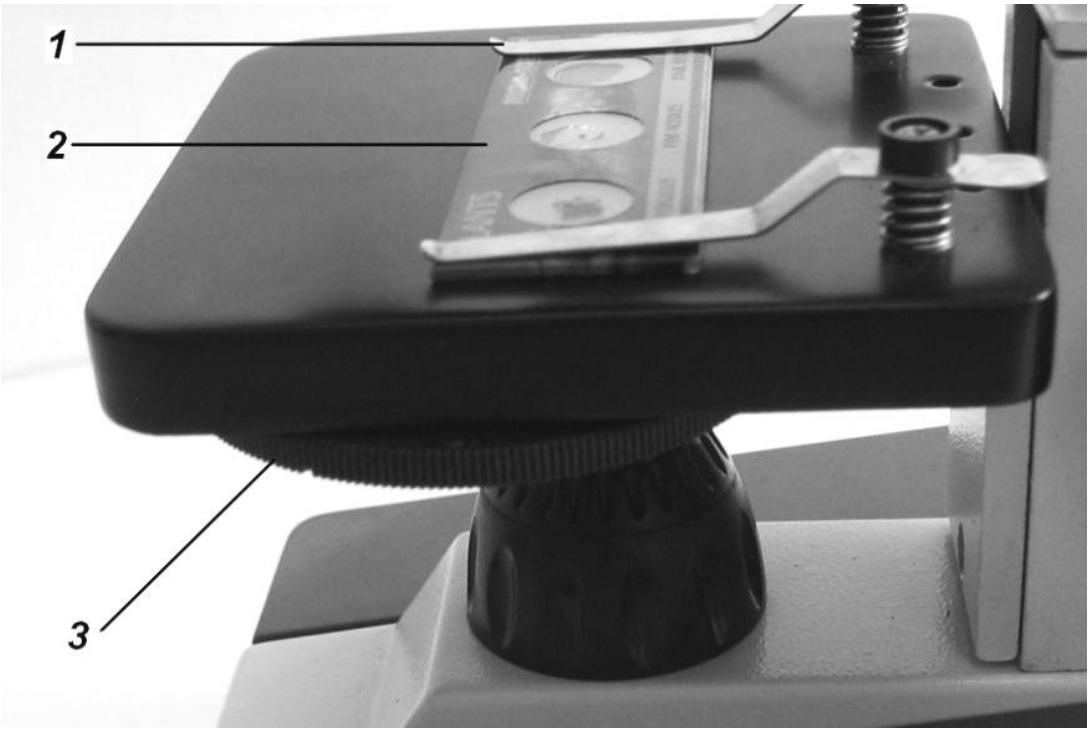


Рис. 6.41. Размещение препарата на предметном столике:
1 – лапка для фиксации препарата, 2 – предметное стекло с препаратом,
3 – кольцо диафрагмы конденсора,
поворотом которого регулируется освещенность объекта

Слишком маленькая освещенность приведет к картинке типа «ночь в Крыму», на которой ничего нельзя будет разглядеть. Слишком большая – к «никакой» контрастности изображения, что тоже очень плохо. Наиболее информативна картинка, на которой есть и темные, и светлые участки – именно такой и следует добиваться.

В табл. 6.1 для удобства приведены все основные характеристики микроскопа Микромед С-11.

Таблица 6.1

Основные характеристики микроскопа Микромед-С11

Цвет объектива	Увеличение объектива	Увеличение окуляра	Суммарное увеличение	Теоретическая разрешающая способность	Реальная разрешающая способность	Поле зрения
Красный	4	20	80	1 мкм	5мкм	2 мм
Желтый	10	20	200	0,5 мкм	5 мкм	0,8 мм
Синий	40	20	800	0,1 мкм	1 мкм	200 мкм

Порядок выполнения работы. Измерения и расчеты

1. Вам необходимо изучить последовательно следующие объекты:

А) бумага для записей (освещение «на просвет», увеличение 80, 200, 800);

Б) денежная купюра – любая, которая у вас найдется, но желательно поновее (освещение «на просвет», увеличение 80, 200, 800);

В) монета – любая, которая у вас найдется (освещение настольной лампой, увеличение 80 и 200);

Г) экран вашего мобильника (самосветящийся объект, увеличение 80 и 200).

2. Что значит «изучить»? При выполнении работы без видеоокуляра необходимо просто рассмотреть соответствующий объект и оценить размеры деталей изображения:

А) бумага для записей – ширина и длина волокон;

Б) денежная купюра – ширина и длина волокон бумаги, размеры наиболее мелких деталей печати;

В) монета – размеры наиболее мелких деталей штамповки;

Г) экран вашего мобильника – размеры пикселей.

Полученные сведения вы должны сообщить преподавателю. Кроме того, в процессе выполнения работы вы должны подзывать преподавателя и показывать ему то, что вы видите в микроскопе, чтобы он потом не сомневался, что вы действительно что-то видели.

Упражнение 3
Описание установки

Микроскоп Микромед С-11 с видеоокуляром ORBITOR

Некоторые из используемых в лабораторном практикуме микроскопов оснащены не обычным (оптическим) окуляром, а видеоокуляром. **Видеоокуляр** – это просто миниатюрная видеокамера без собственного запоминающего устройства, но с USB-выходом на компьютер. При наличии специального программного обеспечения изображение с микроскопа попадает непосредственно на экран монитора и в дальнейшем может быть сохранено как файл изображения (типа *.bmp или *.jpg) или видеофайл (типа *.avi или *.mpg).

Рис. 6.42. Видеоокуляр ORBITOR

Общий вид видеоокуляра ORBITOR приведен на рис. 6.42, общий вид микроскопа с видеоокуляром – на рис. 6.43.

В нашем практикуме используется программа Ulead Photo Explorer 7.0 SE, поставляемая в комплекте с этим окуляром.

Ярлык этой программы, а также других программ и файлов, используемых в данной лабораторной работе, находится в папке ORBITOR, расположенной на рабочем столе соответствующего компьютера (рис. 6.44).

Рис. 6.43. Общий вид микроскопа с видеоокуляром

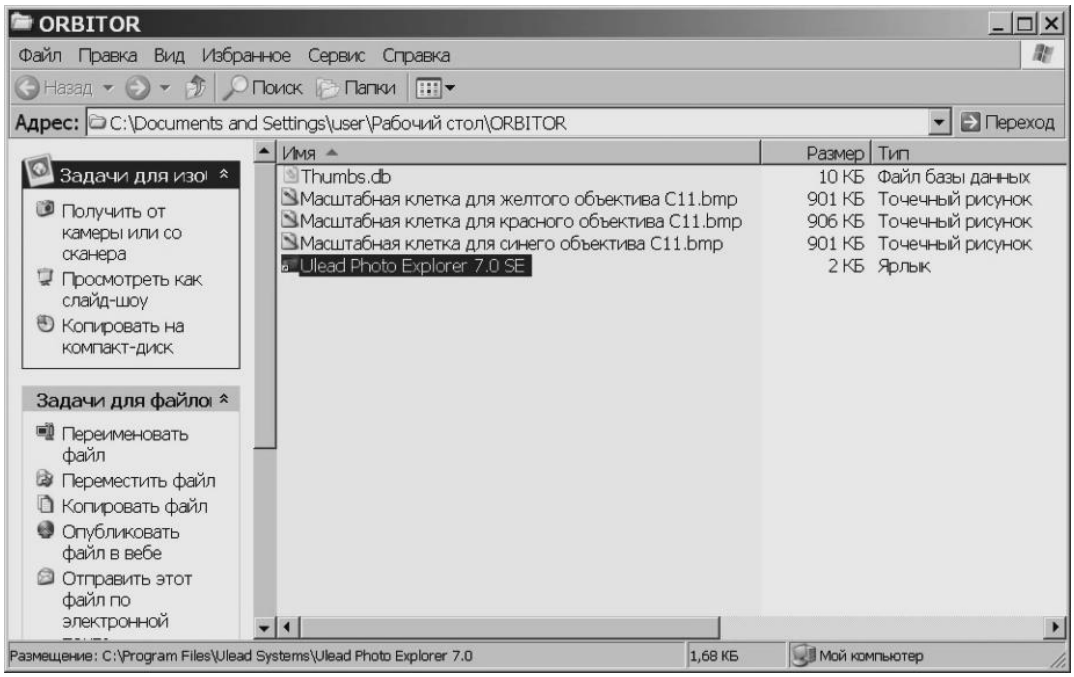


Рис. 6.44. Содержимое папки ORBITOR, расположенной на рабочем столе

Работа с микроскопом, оснащенным видеоокуляром, в принципе, почти ничем не отличается от работы с обычным микроскопом. Отличие лишь в том, что изображение не рассматривается через окуляр, а появляется на экране монитора.

Основным достоинством видеоокуляра является возможность захвата изображения с экрана монитора. После этого изображение (или видеофайл) может быть обработано с помощью любой программы работы с графикой (или с видео). Например, фотографии, приведенные на рис. 6.16-23, получены именно таким способом.

Недостатком видеоокуляра является более узкое (примерно в два раза) поле зрения: это затрудняет поиск объекта наблюдения. Кроме того, фокусировка на объект при использовании видеоокуляра затруднена двумя факторами: некоторой инерционностью изображения на экране компьютера (передача изображения по USB-каналу требует небольшого, но все же времени) и неучастием в процессе фокусировки вашего глаза. При наблюдении через обычный оптический окуляр небольшая неточность фокусировки микроскопа автоматически компенсируется соответствующей деформацией вашего хрусталика (аккомодация глаза); при использовании видеоокуляра ваш глаз обеспечивает резкое изображение экрана монитора: если само изображение на экране уже расплывчато, глаз ничего не может с этим поделать. И, наконец, качество изображения в случае использования видеоокуляра при прочих равных условиях просто не может быть выше, чем в случае использования обычного окуляра, ведь к обычным оптическим искажениям добавляются искажения при переводе оптического сигнала в электрический, при передаче электрического сигнала от окуляра к компьютеру и при обратном преобразовании электрического сигнала в оптический на экране монитора.

Порядок выполнения работы. Измерения и расчеты

1. Вам категорически запрещается включать и выключать компьютер, а также самостоятельно подключать видеоокуляр к компьютеру и отключать его от компьютера. Это должен делать только лаборант. Вы должны подойти к включенному компьютеру и отойти от включенного компьютера!

2. Вам необходимо изучить последовательно следующие объекты:

А) бумага для записей (освещение «на просвет», увеличение 80, 200, 800);

Б) денежная купюра – любая, которая у вас найдется, но желательно поновее (освещение «на просвет», увеличение 80, 200, 800);

В) монета – любая, которая у вас найдется (освещение настольной лампой, увеличение 80 и 200);

Г) экран вашего мобильника (самосветящийся объект, увеличение 80 и 200).

3. Что значит – «изучить»? При выполнении работы с видеоокуляром необходимо сфотографировать соответствующий объект при всех заданных увеличениях и оценить размеры деталей изображения:

А) бумага для записей – ширина и длина волокон;

Б) денежная купюра – ширина и длина волокон бумаги, размеры наиболее мелких деталей печати;

В) монета – размеры наиболее мелких деталей штамповки;

Г) экран вашего мобильника – размеры пикселей.

4. Вы должны не только оценить размеры деталей изучаемых объектов (как – описано ниже), но и продемонстрировать преподавателю на мониторе фотографии всех изучаемых предметов при всех заявленных увеличениях (всего 10 фотографий). Для этого закрепите на предметном столике препарат «Бумага для записей». Введите объектив с наименьшим увеличением (красный).

5. Включите осветительное устройство.

6. Откройте папку ORBITOR (рис. 6.44).

7. Запустите программу Ulead Photo Explorer (рис. 6.44). При этом откроется стартовое окно программы (рис. 6.45). Оно содержит дерево каталогов (слева сверху), содержимое выделенного каталога (основная часть) и изображение (preview) выделенного файла (слева внизу).

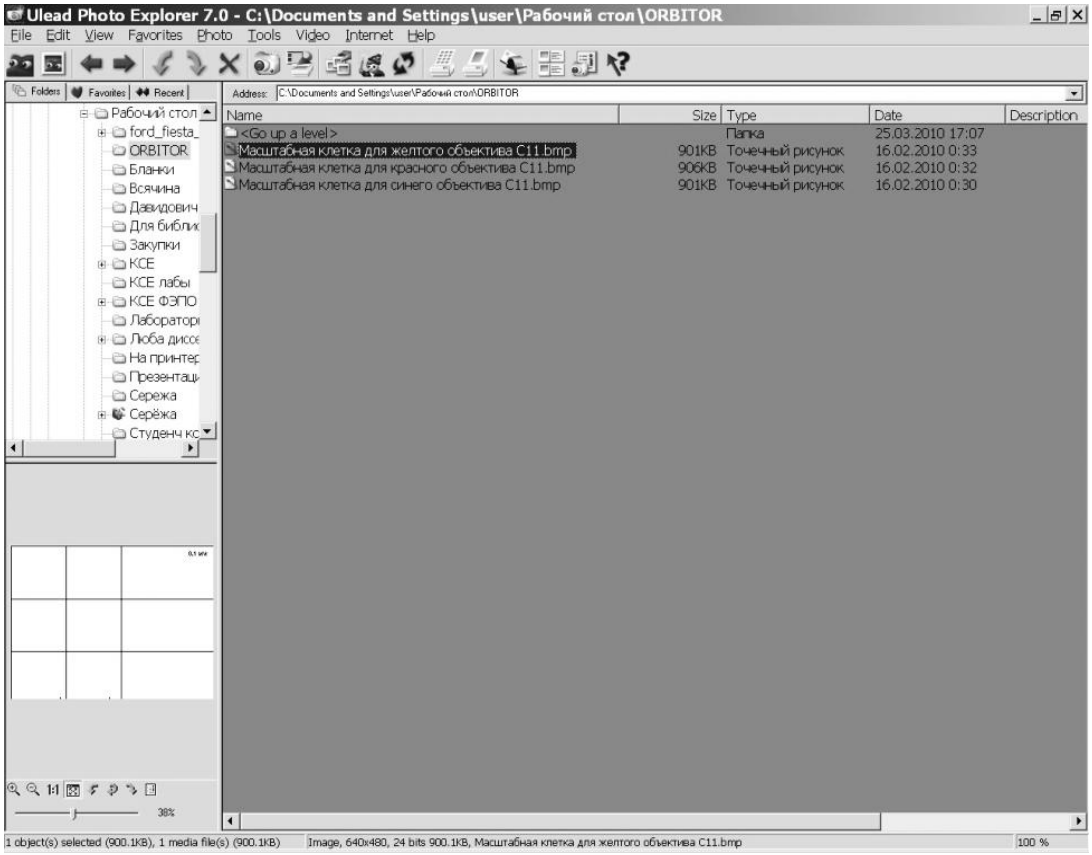


Рис. 6.45. Стартовое окно программы

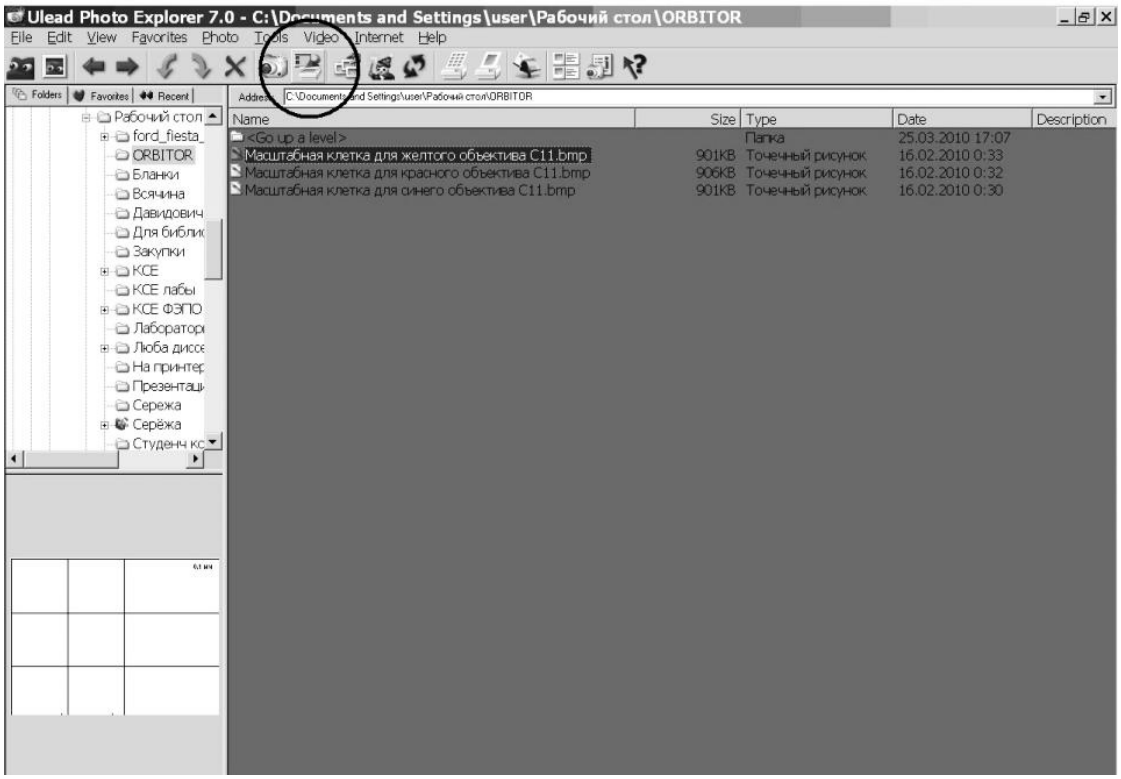


Рис. 6.46. Кнопка слежения за изображением TWAIN Acqure

8. Нажмите на кнопку TWAIN Acqure (рис. 6.46). После этого откроется окно предварительного просмотра изображения (рис. 6.47, 6.48).

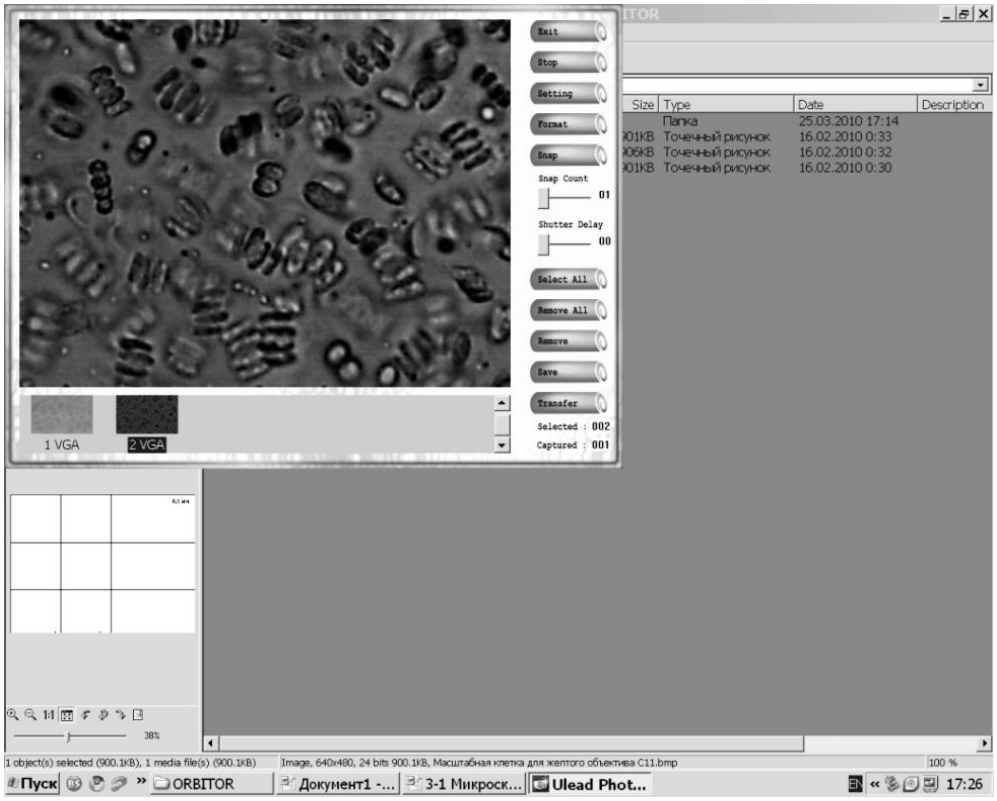


Рис. 6.47. Окно основной программы с открытым окном предварительного просмотра изображения

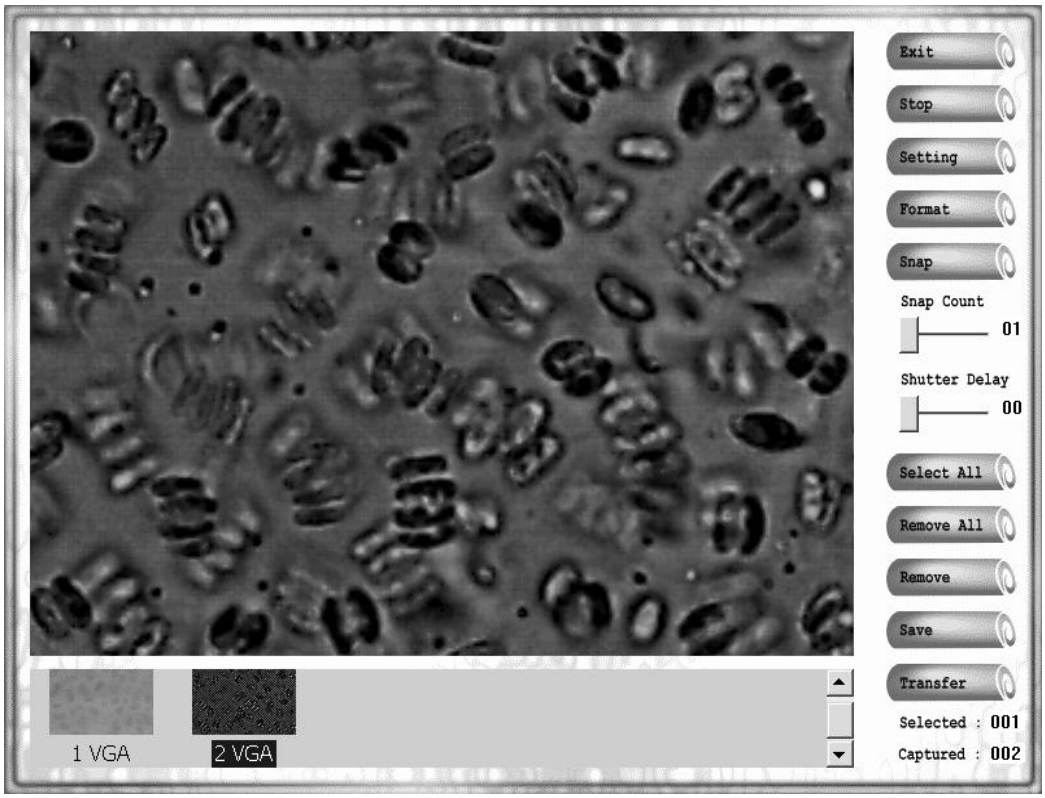


Рис. 6.48. Окошко предварительного просмотра изображения

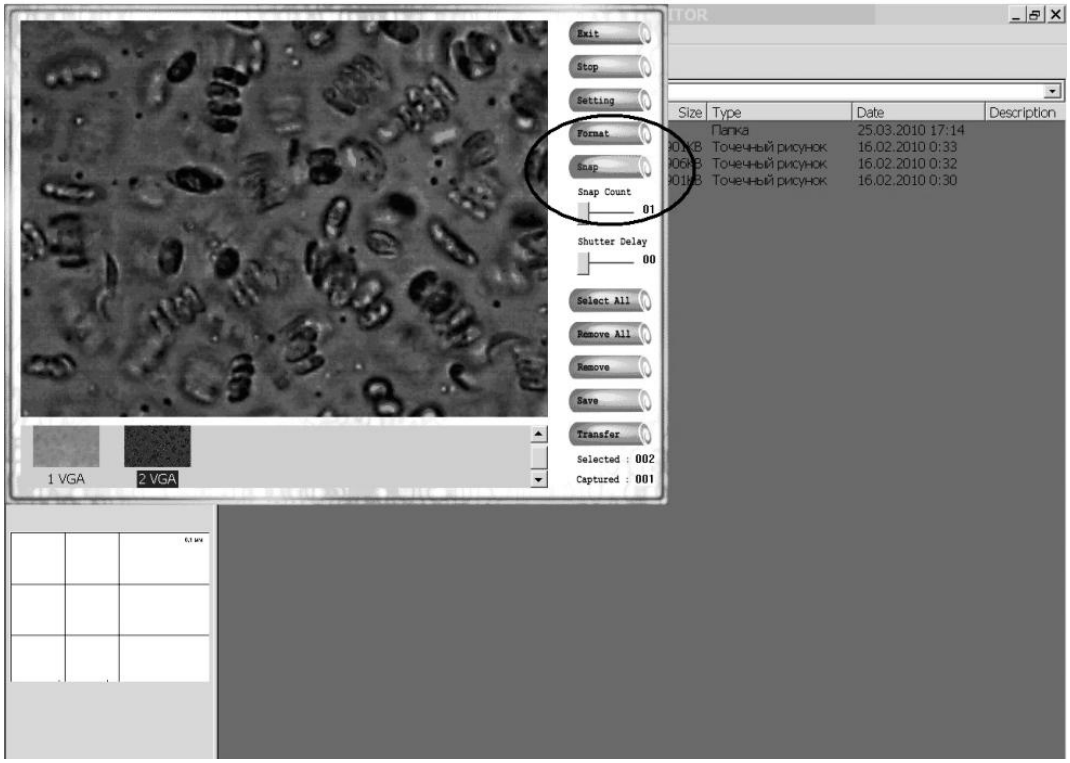


Рис. 6.49. Кнопка захвата изображения «Snap»

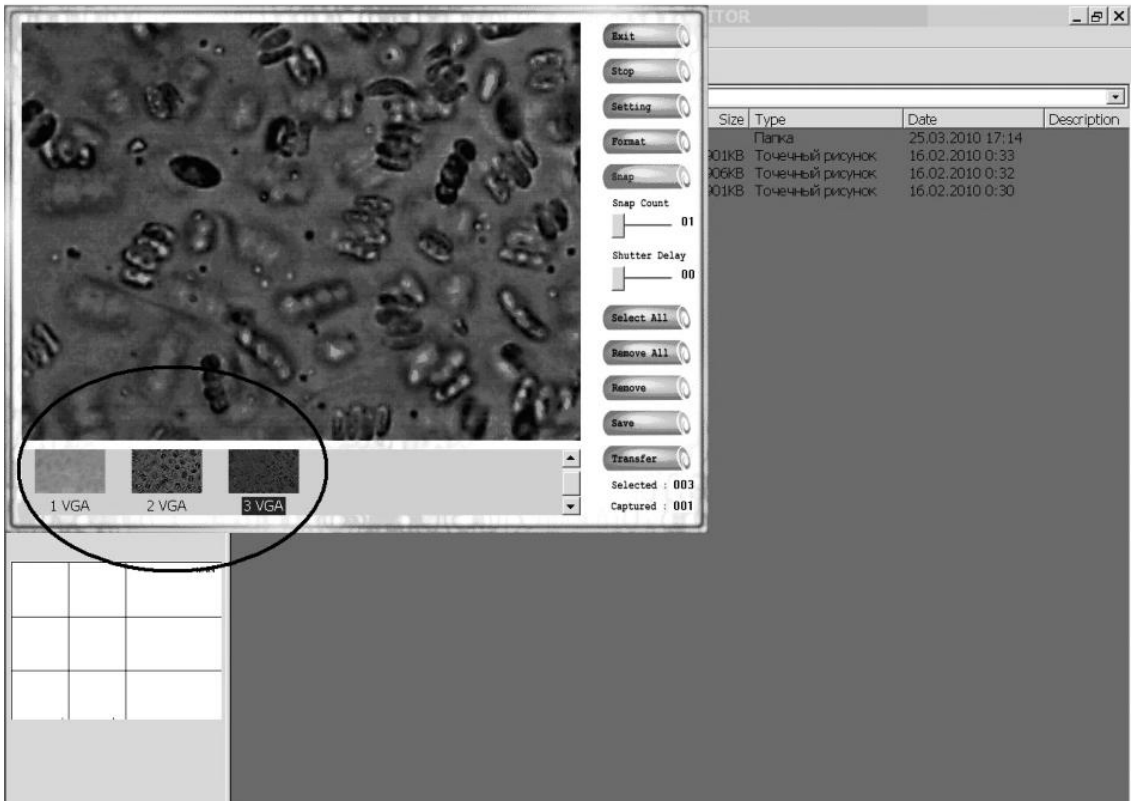


Рис. 6.50. Окно предварительного просмотра изображения
с иконками захваченных изображений

9. С помощью ручки перемещения предметного столика добейтесь резкого изображения на экране монитора. Перемещайте столик медленно, иначе компьютер не успеет за вами и вы пропустите точку наибольшей резкости.

10. Получив приличное изображение, нажмите на кнопку захвата изображения Snap (рис. 6.49).

11. Иконка с захваченным изображением появится в нижней части окна предварительного просмотра изображения (рис. 6.50).

12. Набрав три приличных изображения с увеличением 80 (красный объектив), смените объектив на желтый (с итоговым увеличением микроскопа 200) и повторите процедуру начиная с пункта 10.

13. Набрав три приличных изображения с увеличением 200 (желтый объектив), смените объектив на синий (с итоговым увеличением микроскопа 800) и повторите процедуру начиная с пункта 10.

14. Теперь в нижней части окна предварительного просмотра у вас 9 иконок – по три на каждое увеличение (рис. 6.51). Надо сохранить эти изображения в виде файлов на жестком диске. Для этого нажмите на кнопку Select all (рис. 6.51) и затем – на кнопку Save (рис. 6.52).

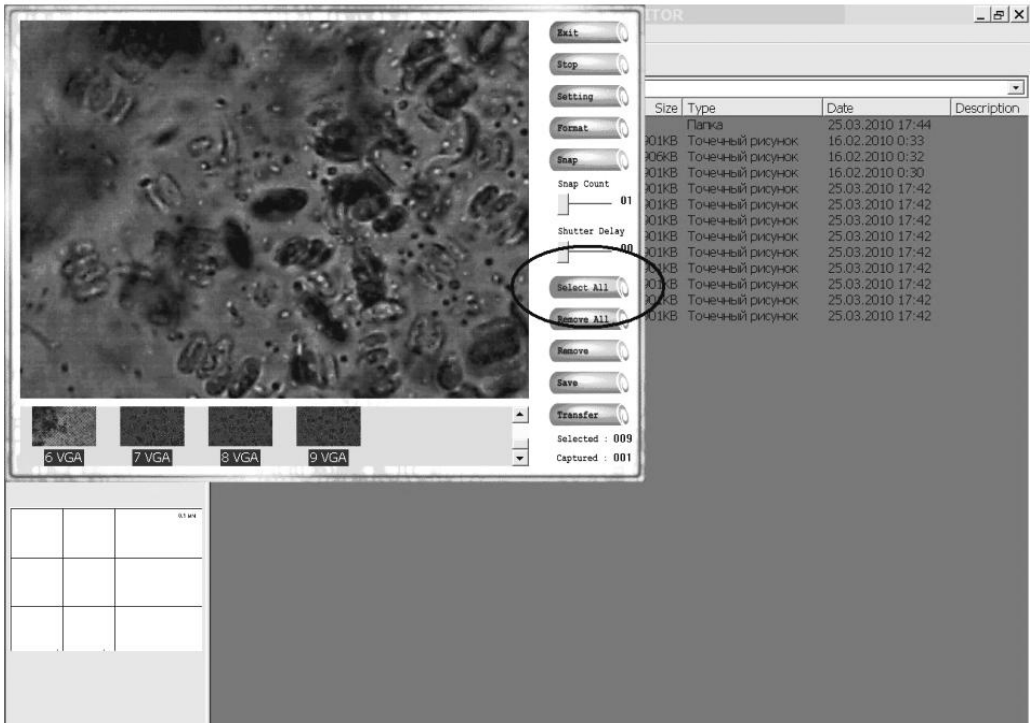


Рис. 6.51. Кнопка выделения захваченных изображений для последующего сохранения

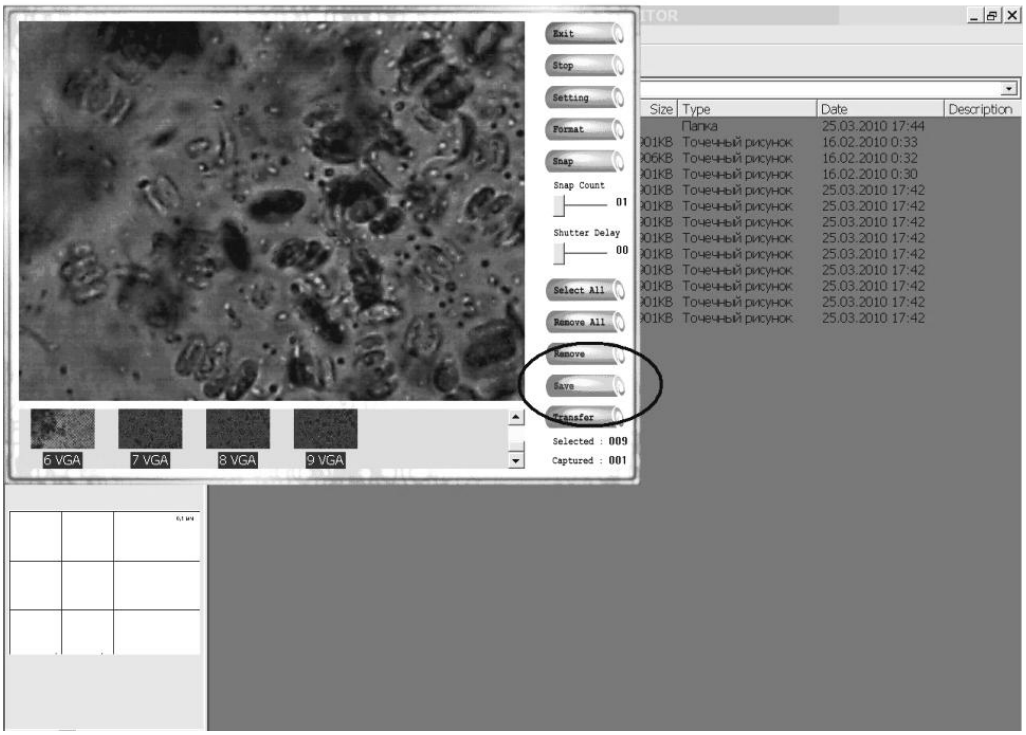


Рис. 6.52. Кнопка сохранения захваченных изображений

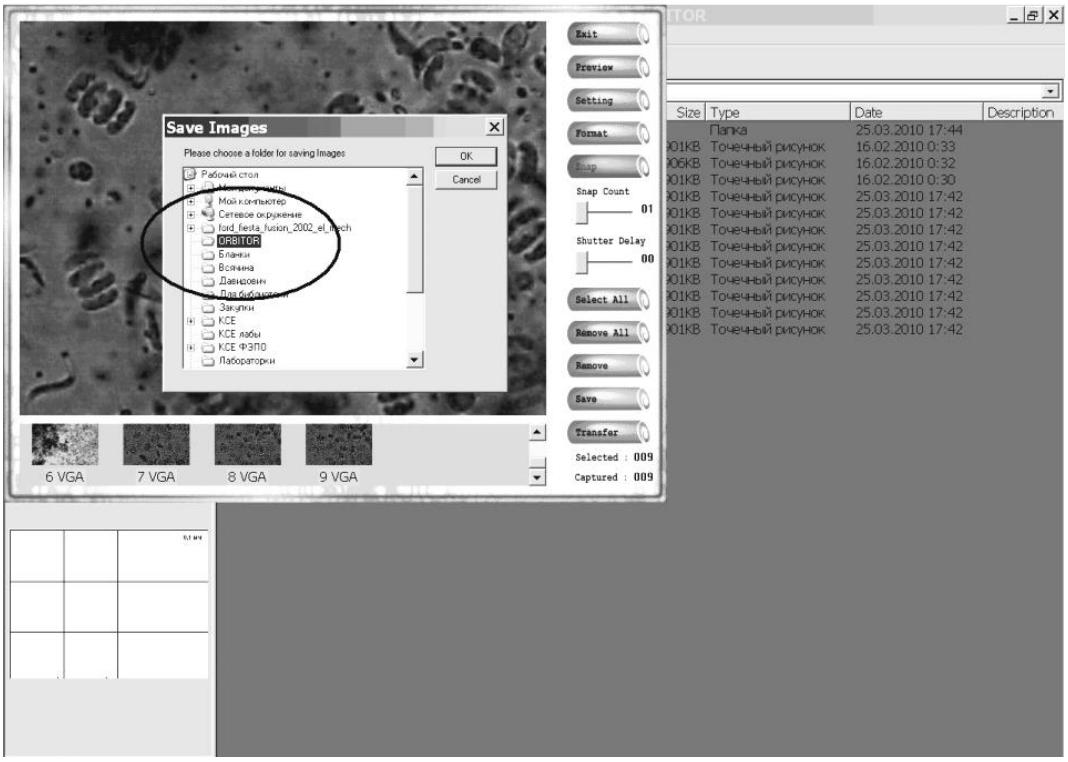


Рис. 6.53. Выбор папки для сохранения изображений

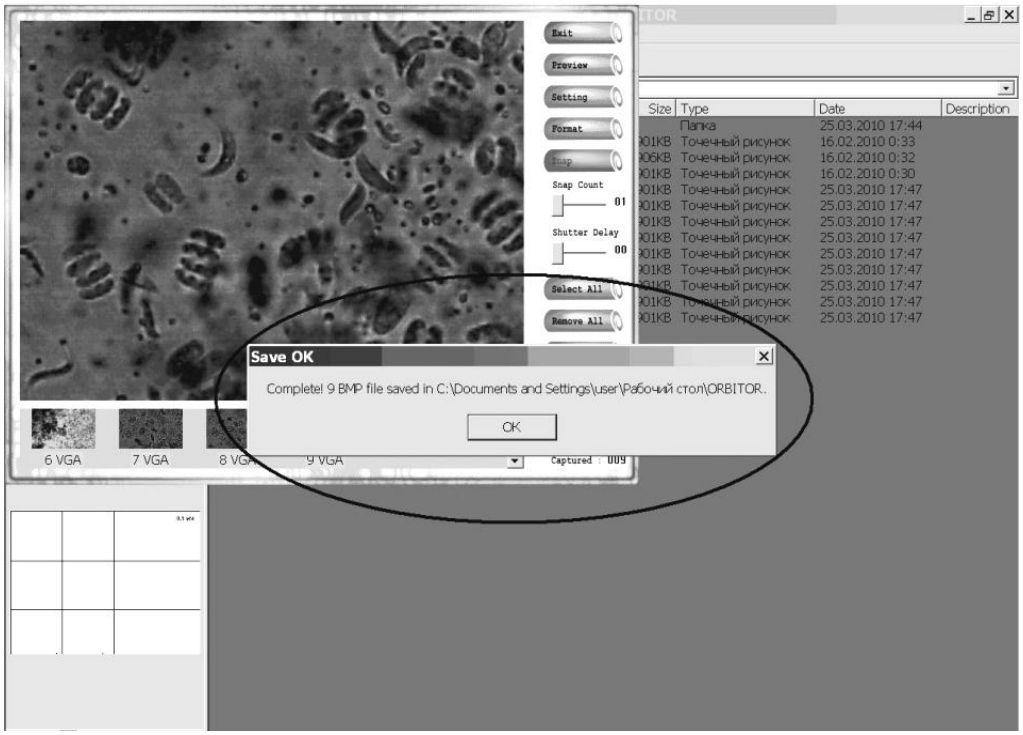


Рис. 6.54. Сообщение об успешном сохранении изображений

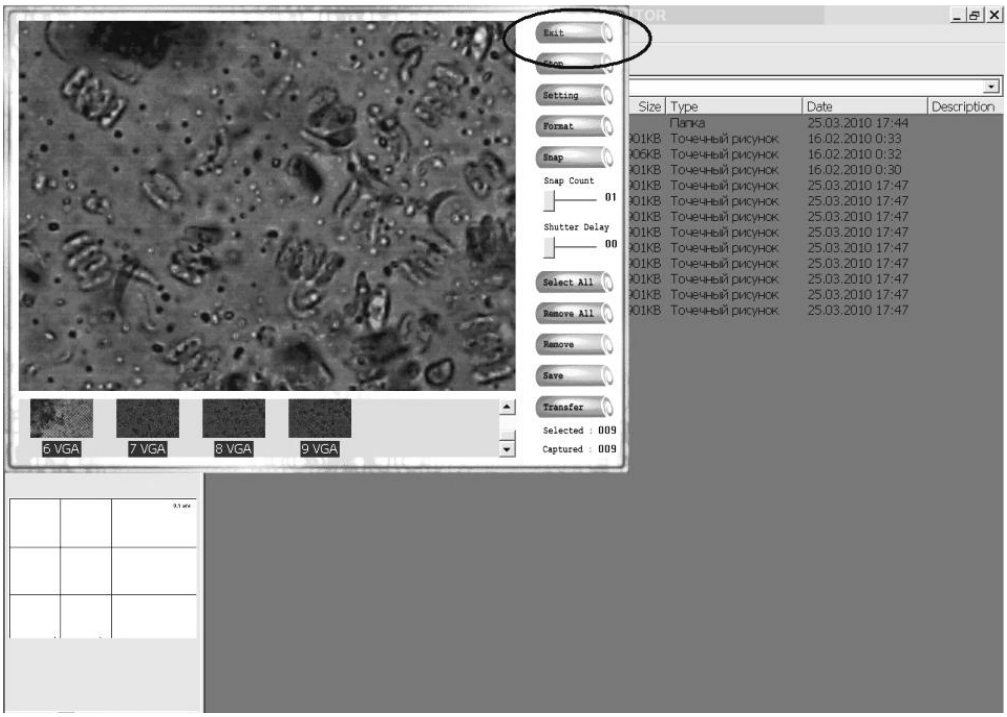


Рис. 6.55. Кнопка выхода из режима предварительного просмотра изображения

15. Для сохранения захваченных изображений выберите папку ORBITOR на рабочем столе (рис. 6.53). После этого появится рапорт об успешном сохранении файлов с изображениями (рис. 6.54).

16. Чтобы заняться этими изображениями, следует закрыть окно предварительного просмотра микрообъектов, нажав на кнопку Exit в окне предварительного просмотра (рис. 6.55). После этого вы окажетесь вновь в стартовом окне программы Ulead Photo Explorer (рис. 6.45). Завершите работу с этой программой, нажав на крестик в правом верхнем углу окна этой программы.

17. Проверьте, что девять ваших «картинок», соответствующих трем увеличениям (80, 200 и 800), действительно имеются в папке ORBITOR (рис. 6.56). Просмотрите эти картинки с помощью любой программы, установленной на компьютере, например, с помощью программы Paint. Для этого достаточно щелкнуть на соответствующем файле правой кнопкой мыши и выбрать из появившегося списка соответствующую программу[32]. Из девяти имеющихся фотографий выберите три лучших (по одной на увеличение 80, 200, 800). Остальные удалите (рис. 6.57). Оставшиеся три фотографии переименуйте в «бумага 80», «бумага 200» и «бумага 800».

[32] Программа Paint в этом списке быть просто обязательна. Это – минимум. Могут быть и другие программы работы с изображениями, например, Microsoft Office Picture Manager или «Программа просмотра изображений и факсов». Некоторые из этих программ (например, Microsoft Office Picture Manager) допускают обработку изображений (повышение контрастности, улучшение цветов и так далее). Если хотите – можете «поиграть» с изображениями, то есть попытаться их улучшить.

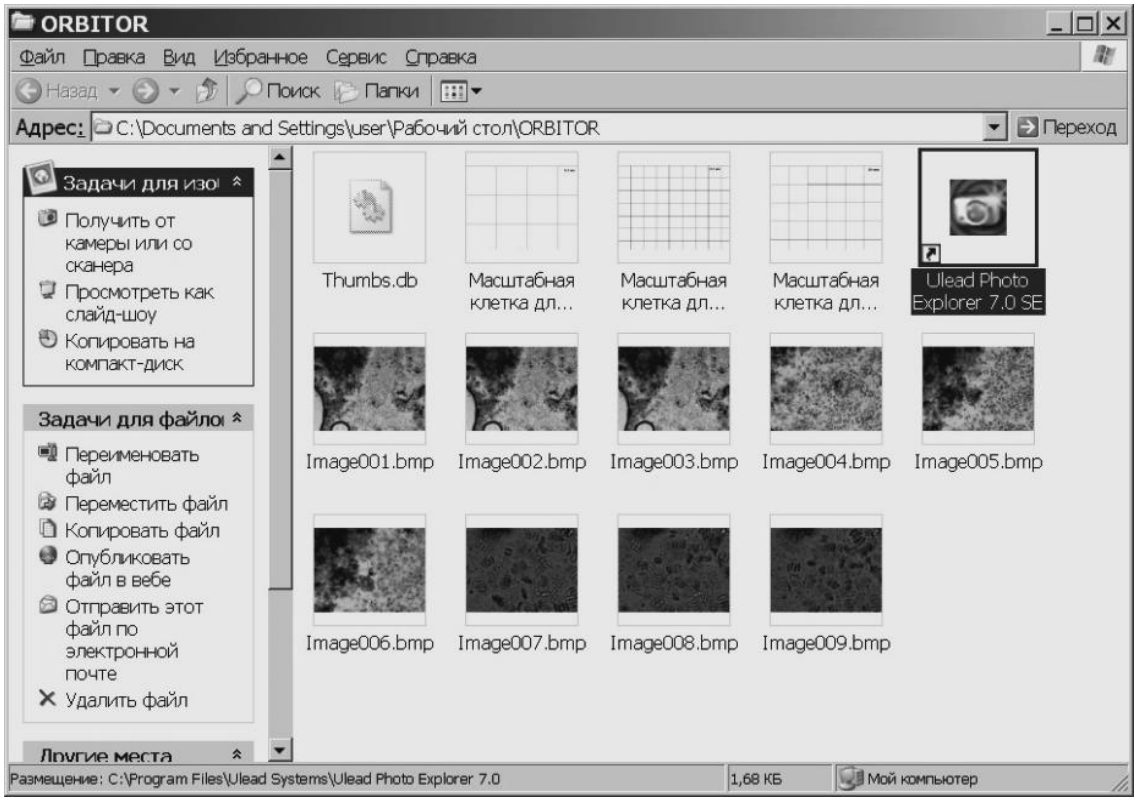


Рис. 6.56. Папка ORBITOR с файлами изображений

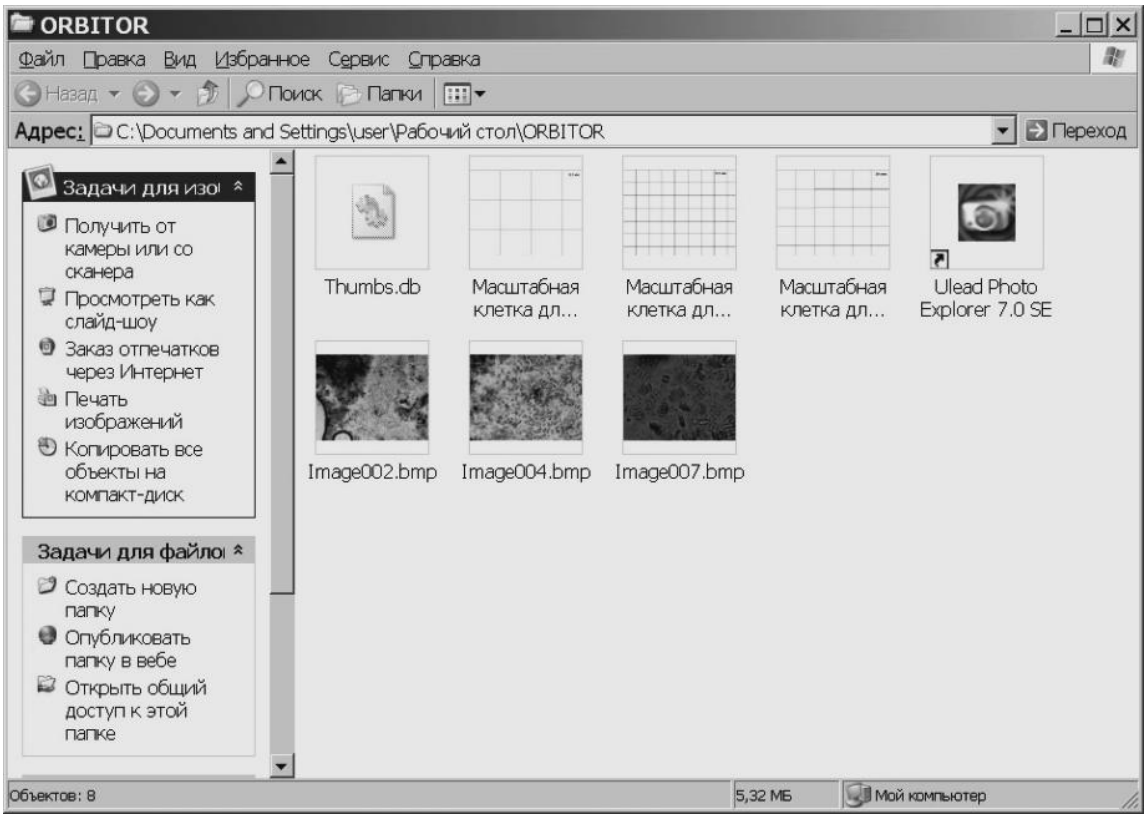


Рис. 6.57. Папка ORBITOR после удаления неудачных изображений

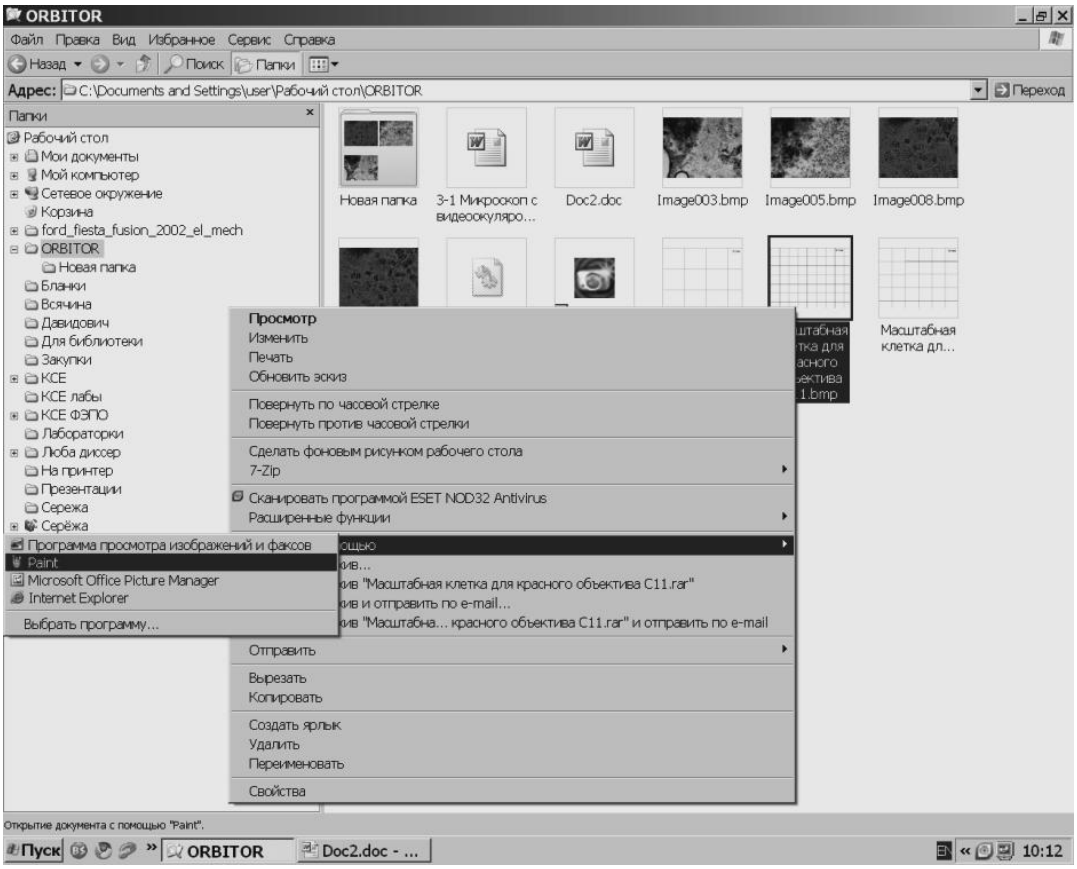


Рис. 6.58. Открытие файла с масштабной сеткой с помощью программы Paint

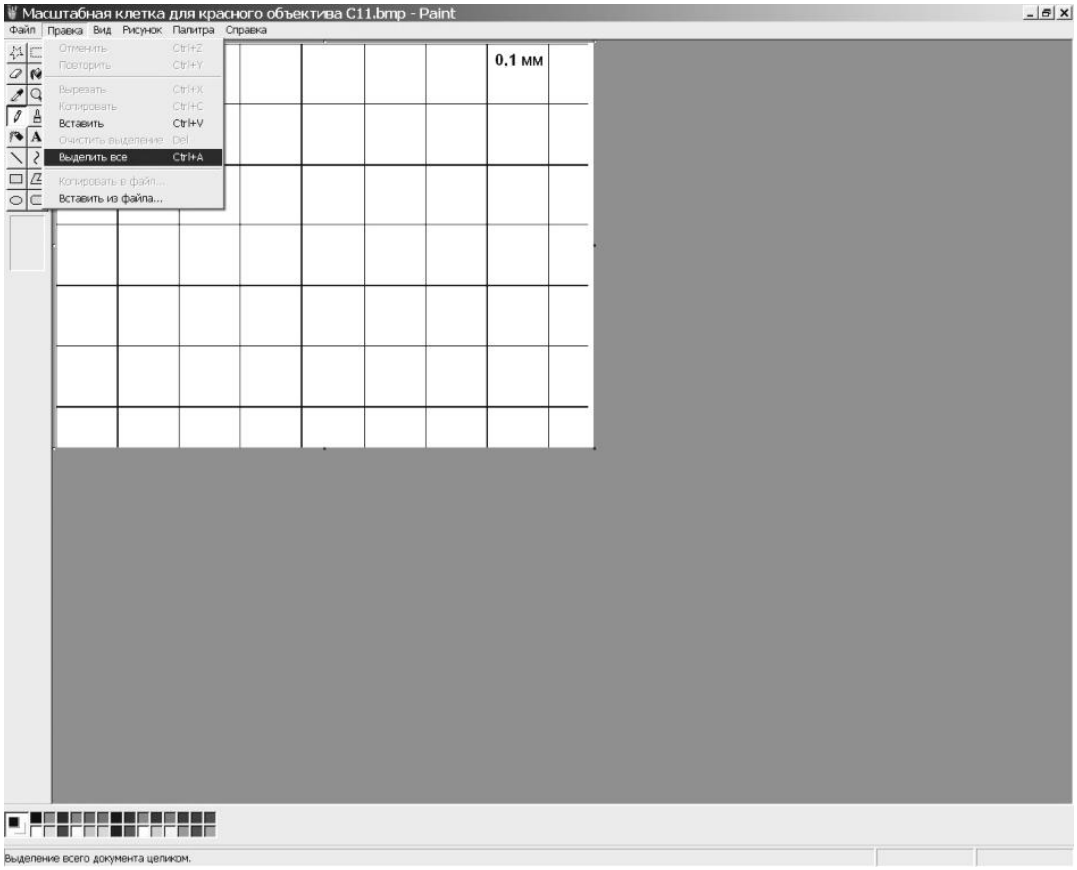


Рис. 6.59. Работа с файлом масштабной сетки

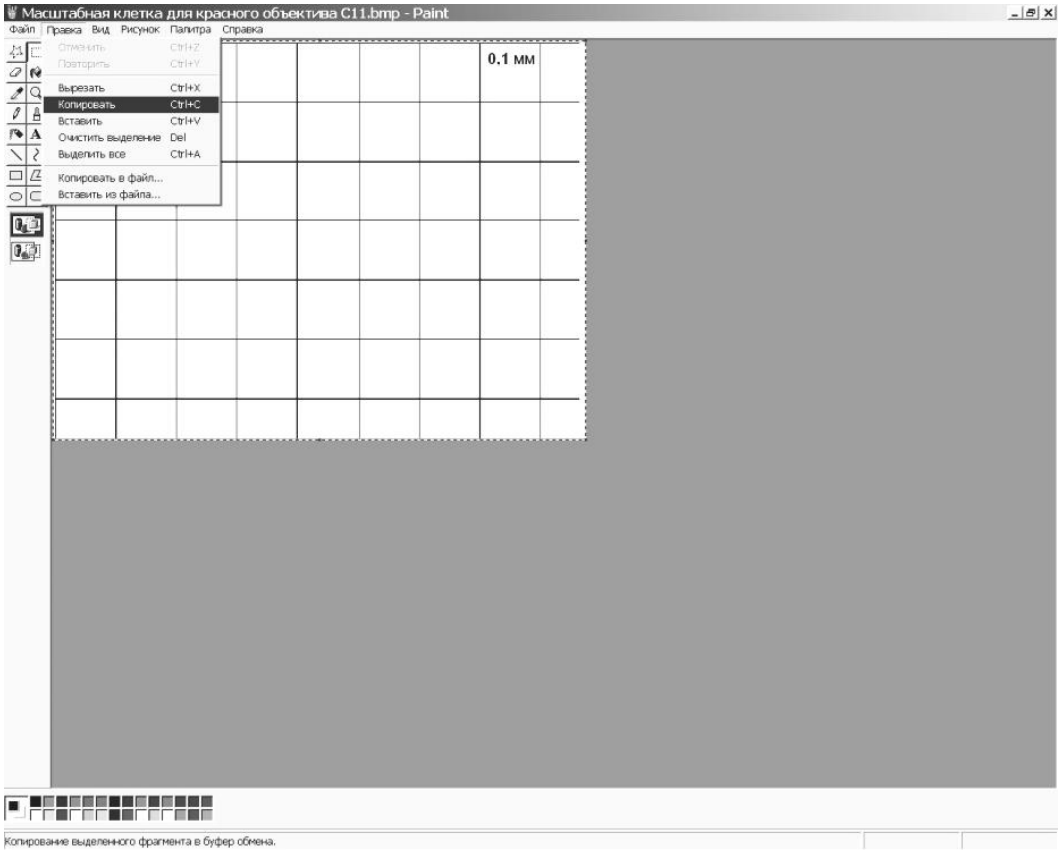


Рис. 6.60. Копирование масштабной сетки в буфер обмена

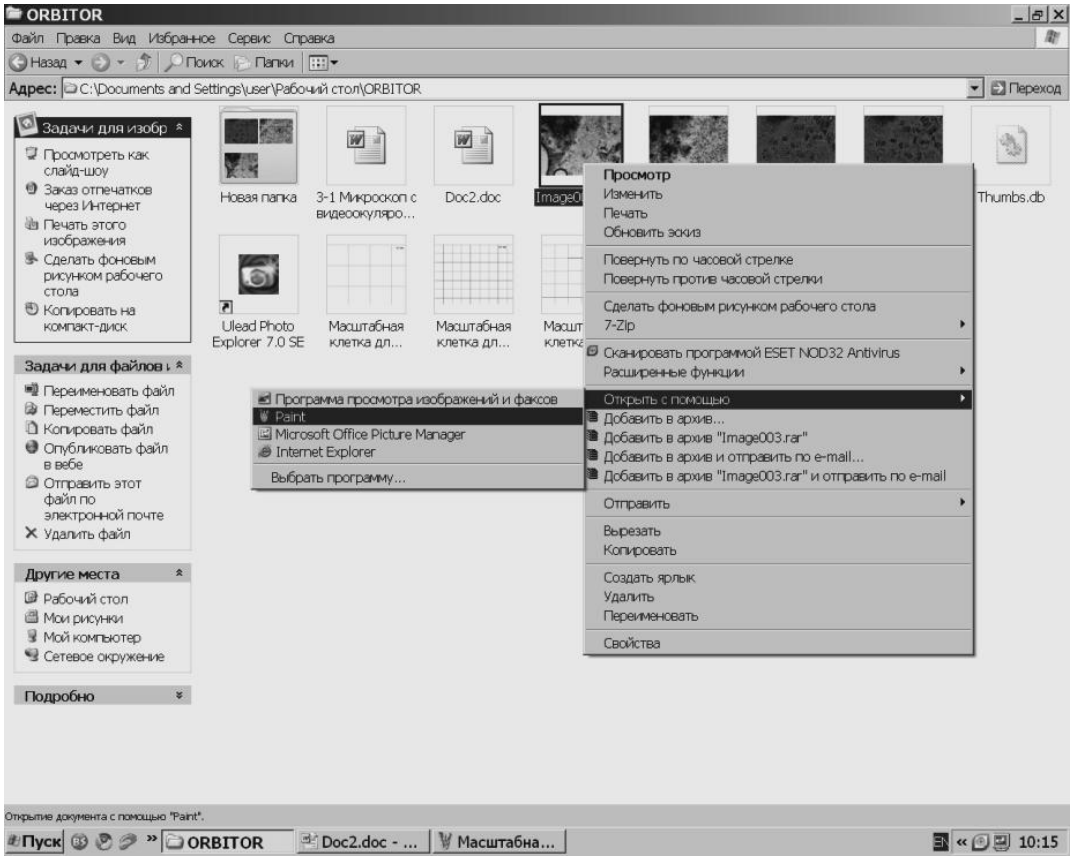


Рис. 6.61. Открытие файла изображения с помощью программы Paint

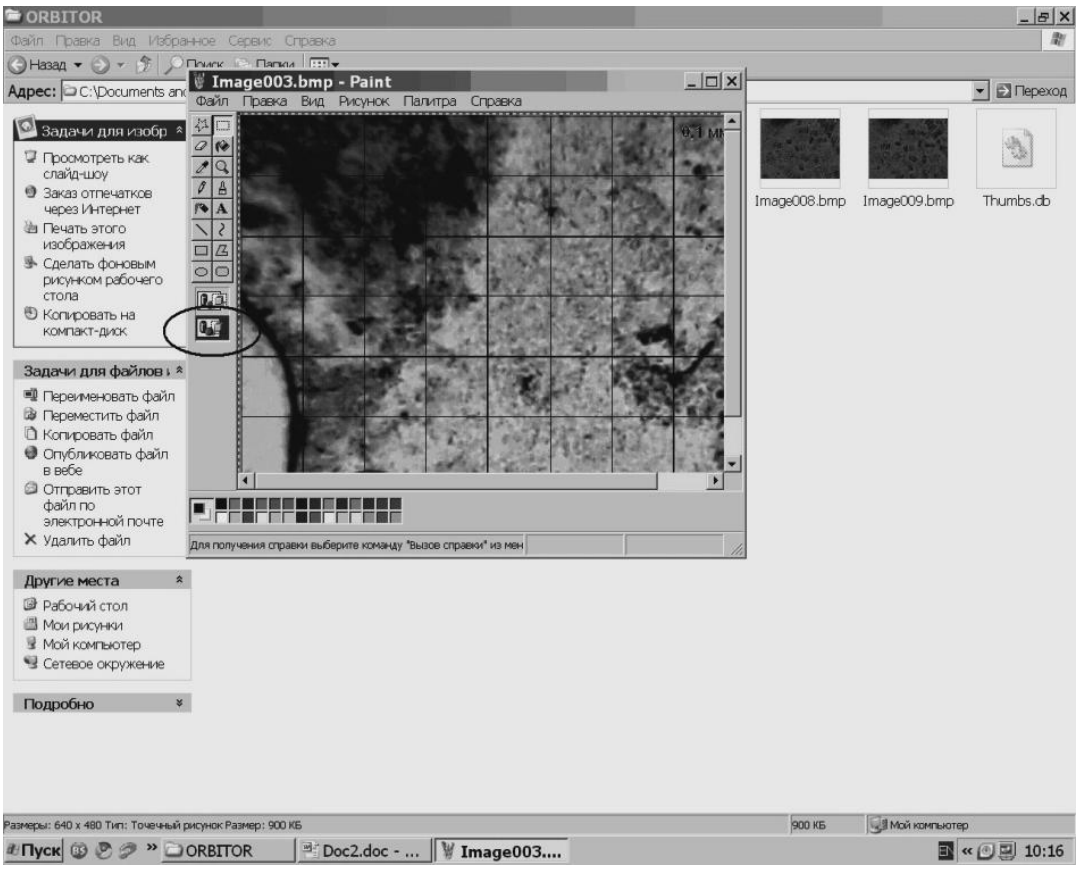


Рис. 6.62. Наложение масштабной сетки на изображение

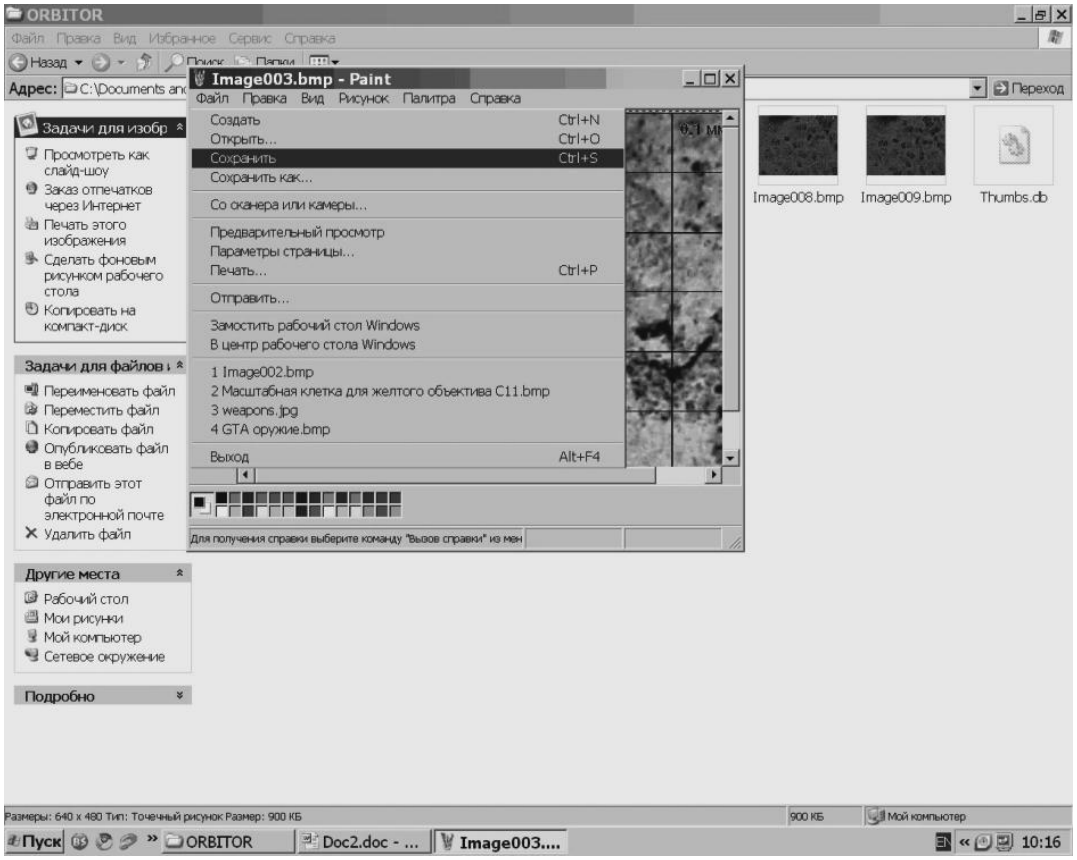


Рис. 6.63. Сохранение изображения с наложенной масштабной сеткой

18. Наложите на картинку, полученную с увеличением 80, соответствующую масштабную сетку. Для этого:

- Откройте с помощью программы Paint файл «Масштабная клетка для красного объектива C11.bmp». Для этого щелкните по файлу правой кнопкой мыши и в появившемся контекстном меню выберите пункт «Открыть с помощью Paint» (рис. 6.58).
- После этого в главном окне программы Paint откройте меню «Правка» (рис. 6.59) и щелкните по пункту «выделить все» (рис. 6.59), а затем – по пункту «Копировать» (рис. 6.60).
- После этого закройте файл масштабной сетки, нажав на крестик в правом верхнем углу окна программы Paint.
- Откройте файл, содержащий картинку с увеличением 80, с помощью программы Paint (рис. 6.61).
- В меню «Правка» нажмите на пункт «Вставить» (рис. 6.62). На рисунке появится масштабная сетка. Если эта сетка закроет изображение, нажмите на самую нижнюю кнопку бокового меню (рис. 6.62).
- Теперь сохраните полученное изображение с нанесенной на него масштабной сеткой (рис. 6.63).

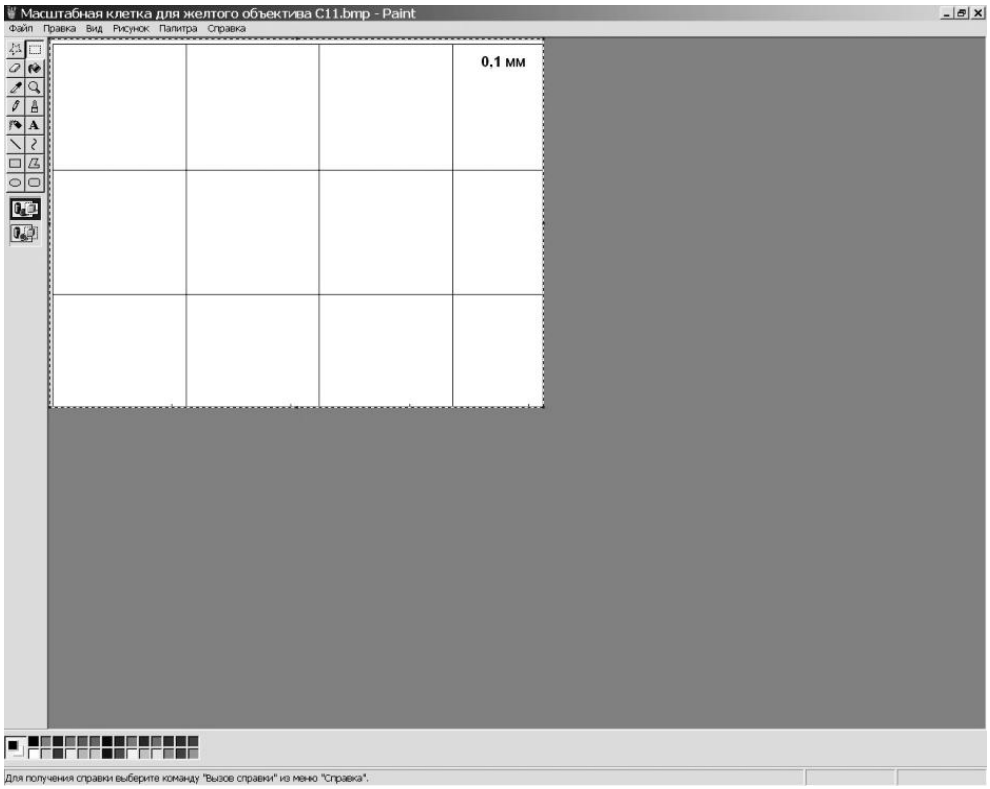


Рис. 6.64. Масштабная сетка для желтого объектива

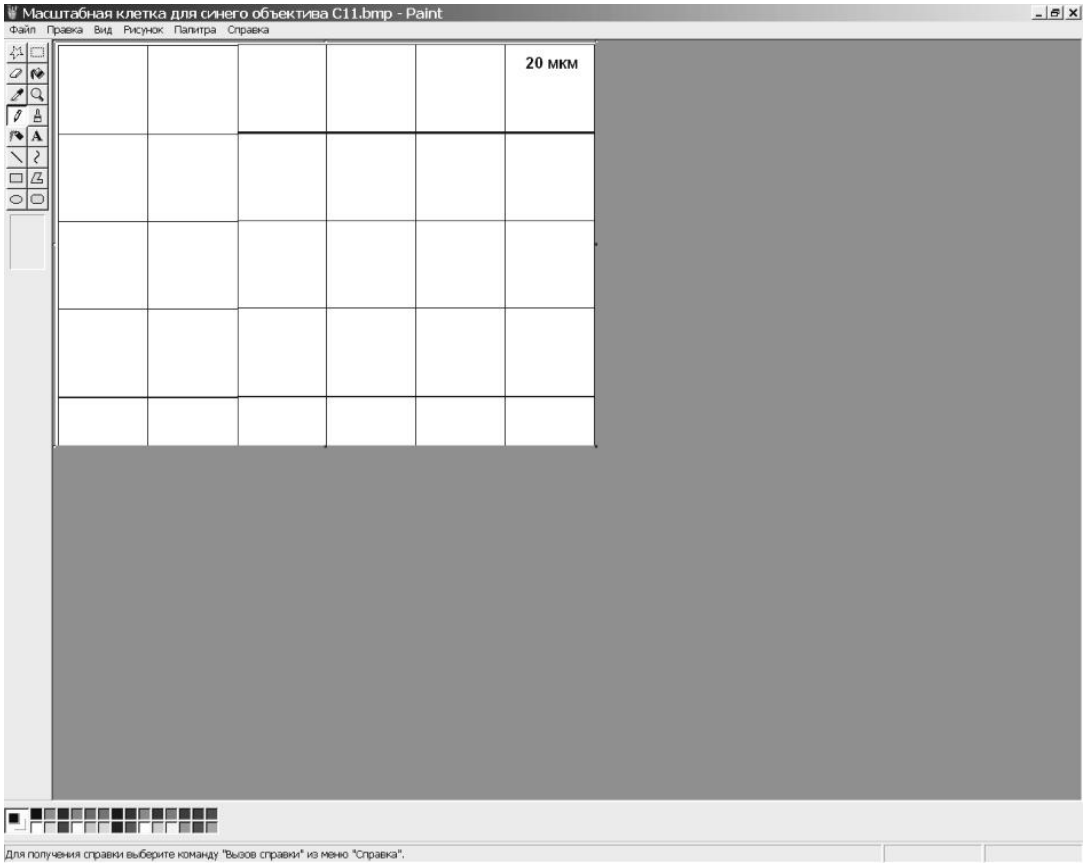


Рис. 6.65. Масштабная сетка для синего объектива

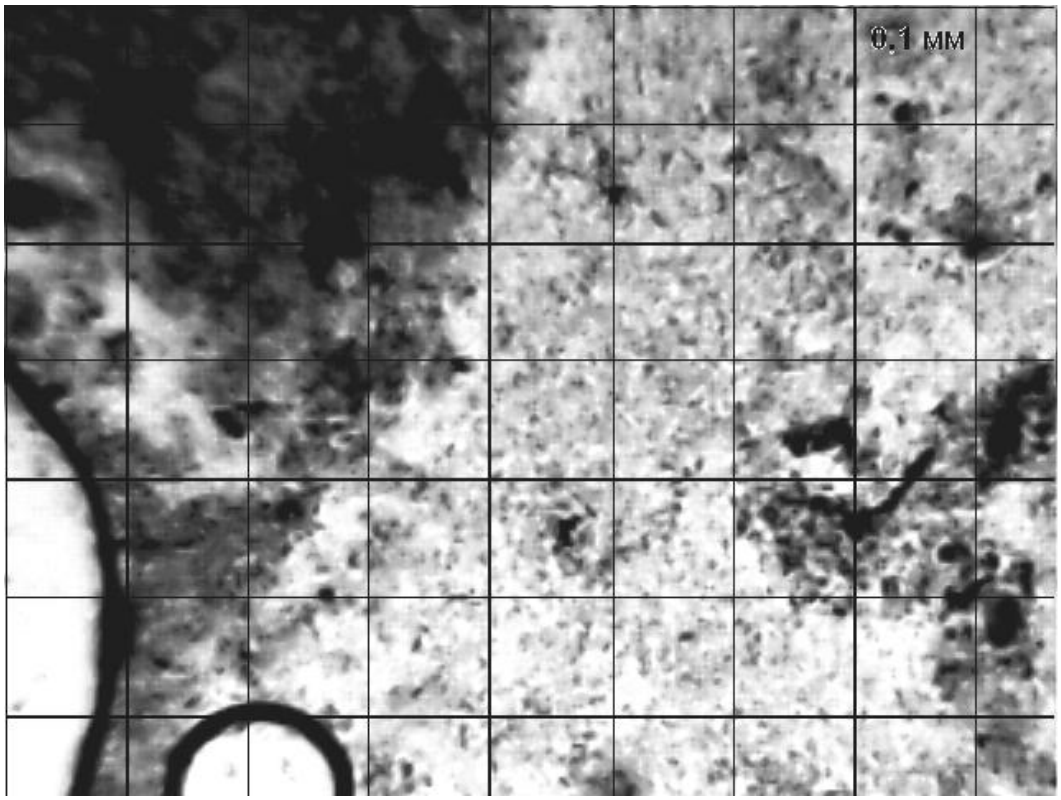


Рис. 6.66. Изображение, полученное с помощью красного объектива с наложенной масштабной сеткой

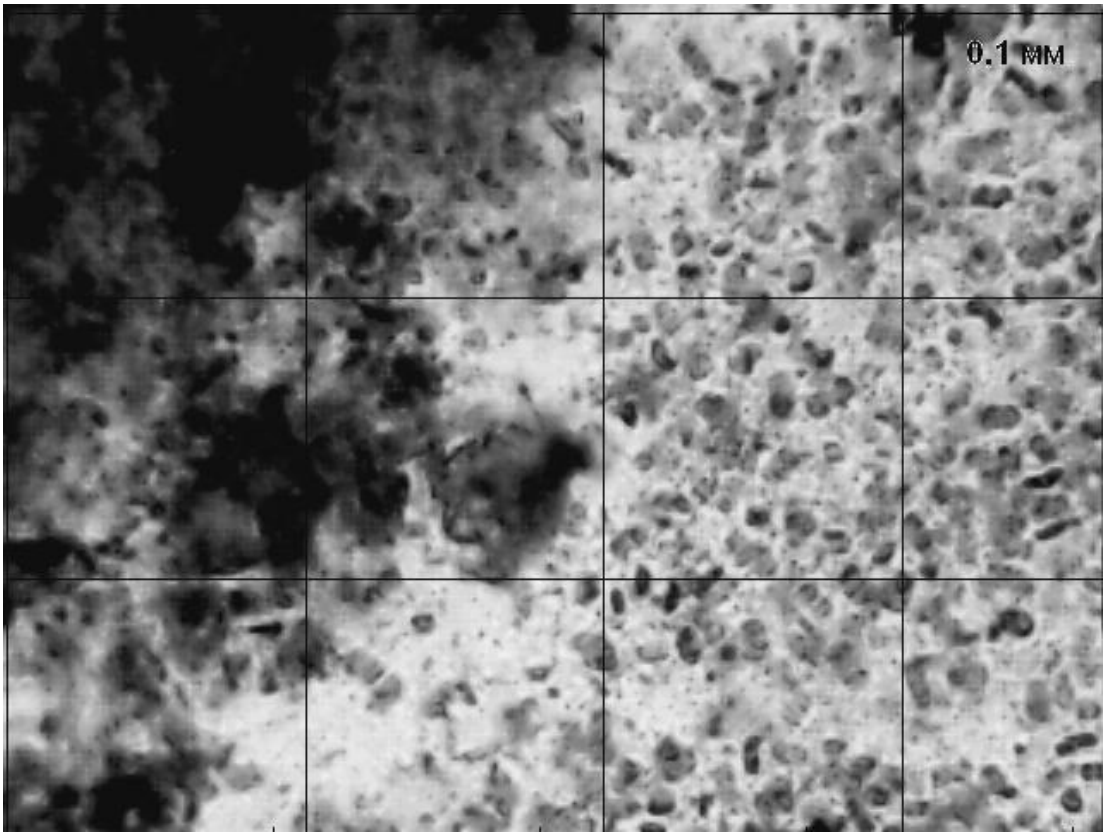


Рис. 6.67. Изображение, полученное с помощью желтого объектива с наложенной масштабной сеткой

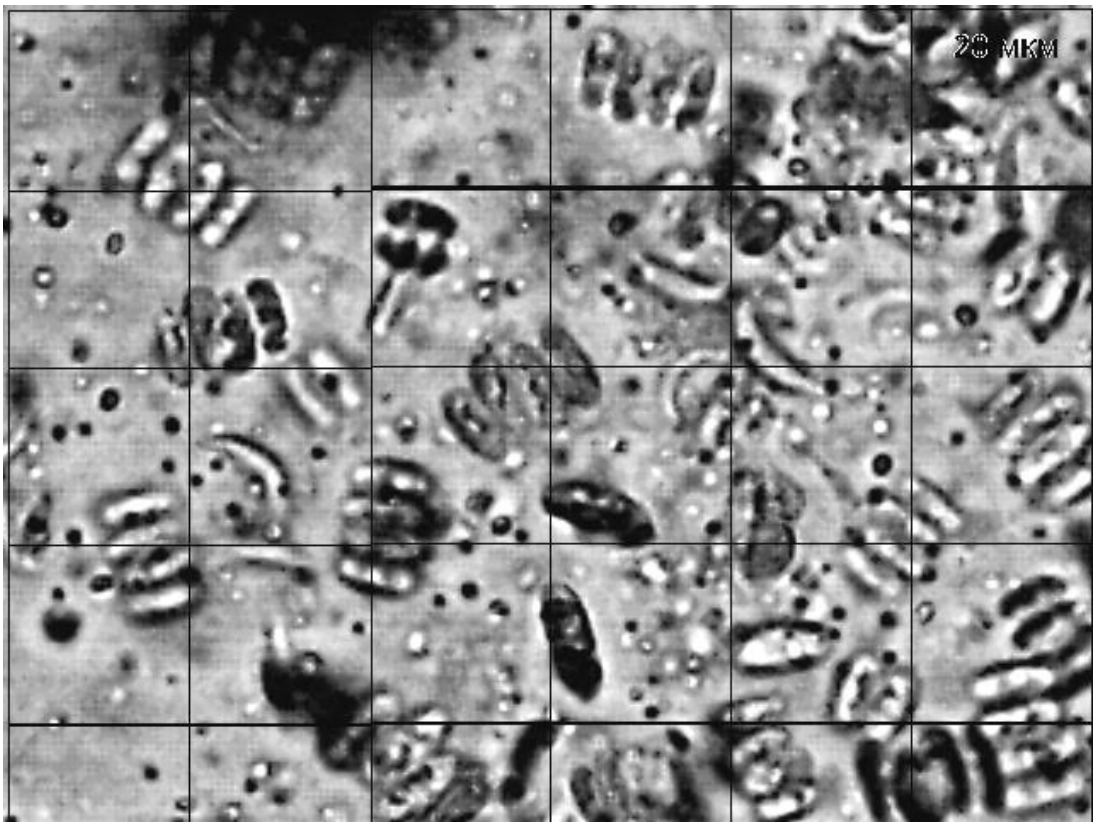


Рис. 6.68. Изображение, полученное с помощью синего объектива с наложенной масштабной сеткой

19. Проделайте аналогичную процедуру со своими картинками, полученными с увеличением 200 (желтый объектив) и 800 (синий объектив). Для желтого объектива используйте файл «Масштабная клетка для желтого объектива.bmp» (рис. 6.64), а для синего – файл «Масштабная клетка для синего объектива.bmp» (рис. 6.65). В нашем случае для красного, желтого и синего объективов получаются картинки, изображенные на рис. 6.66-6.68 соответственно.

- **Имейте в виду, что на картинках в данном описании – вовсе не то, что вы должны увидеть, а свежеприготовленные временные препараты водорослей**. **Вы должны увидеть (и показать преподавателю) совсем другие картинки. Какие – увидите. И покажете.**

20. С помощью полученных графических файлов оцените приближенно толщину и длину волокон бумаги. Для этого воспользуйтесь тем, что размеры масштабной сетки известны и отмечены в соответствующих файлах. Именно – размер квадратика масштабной сетки для красного объектива составляет 0,1 мм (то есть 100 мкм), для желтого – тоже 0,1 мм (то есть 100 мкм), а для синего – 20 мкм. Пусть, например, на рис. 6.68 видно, что длина клетки составляет примерно половину квадратика масштабной сетки. Поскольку размеры квадратика равны 20 мкм, это означает, что длина клетки составляет примерно 10 мкм.

21. Повторите описанную выше для бумаги для записей процедуру для всех остальных объектов наблюдения.

22. Продемонстрируйте преподавателю свои картинки на экране монитора («бумага 80», «бумага 200», «бумага 800», «банкнота 80», «банкнота 200», «банкнота 800», «монета 80», «монета 200», «мобила 80», «мобила 200» – всего 10 картинок) и поделитесь полученными оценками размеров деталей изучаемых объектов.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте первый закон геометрической оптики. Кто и когда его установил? Как его можно подтвердить экспериментально?

2. Предположим, что вы хотите опровергнуть первый закон геометрической оптики – сейчас очень модно опровергать физические законы (не зная физики, разумеется – ведь так опровергать гораздо

проще). Какие эксперименты вы предложили бы для этого? Каковы должны быть результаты этих экспериментов для того, чтобы можно было бы сделать вывод: «Первый закон геометрической оптики опровергнут экспериментально!»

3. Сформулируйте второй закон геометрической оптики. Кто и когда его установил? Как его можно подтвердить экспериментально?

4. Предположим, что вы хотите опровергнуть второй закон геометрической оптики – сейчас очень модно опровергать физические законы (не зная физики, разумеется – ведь так опровергать гораздо проще). Какие эксперименты вы предложили бы для этого? Каковы должны быть результаты этих экспериментов для того, чтобы можно было бы сделать вывод: «Второй закон геометрической оптики опровергнут экспериментально!»

5. Сформулируйте третий закон геометрической оптики. Кто и когда его установил? Как его можно подтвердить экспериментально?

6. Предположим, что вы хотите опровергнуть третий закон геометрической оптики – сейчас очень модно опровергать физические законы (не зная физики, разумеется – ведь так опровергать гораздо проще). Какие эксперименты вы предложили бы для этого? Каковы должны быть результаты этих экспериментов для того, чтобы можно было бы сделать вывод: «Третий закон геометрической оптики опровергнут экспериментально!»

7. Сформулируйте четвертый закон геометрической оптики. Кто и когда его установил? Как его можно подтвердить экспериментально?

8. Предположим, что вы хотите опровергнуть четвертый закон геометрической оптики – сейчас очень модно опровергать физические законы (не зная физики, разумеется – ведь так опровергать гораздо проще). Какие эксперименты вы предложили бы для этого? Каковы должны быть результаты этих экспериментов для того, чтобы можно было бы сделать вывод: «Четвертый закон геометрической оптики опровергнут экспериментально!»

9. Что такое линза? Когда появились первые линзы? Чем собирающая линза отличается от рассеивающей?

10. Капелька воды на листе растения – это собирающая или рассеивающая линза? Почему вы так думаете? Каковы последствия этого факта в случае полива на солнышке?

11. Бутылка с минералкой, графин или стеклянная банка с водой на окошке – это собирающая или рассеивающая линза? Почему вы так думаете? Какие последствия этого прискорбного факта хорошо известны пожарным (кстати, об этих последствиях знали уже древние римляне)?

12. Воздушный пузырек в воде – это собирающая или рассеивающая линза? Почему вы так думаете?

13. Оптическая сила линзы 5 диоптрий. Это в воздухе, разумеется. А какова будет оптическая сила той же линзы в воде? Показатель преломления воздуха – примерно 1, воды – примерно 1,3, стекла – примерно 1,5.

14. Оптическая сила линзы 10 диоптрий. Это в воздухе, разумеется. А какова будет оптическая сила той же линзы в воде? Показатель преломления воздуха – примерно 1, воды – примерно 1,3, стекла – примерно 1,5.

15. Оптическая сила линзы -5 диоптрий. Это в воздухе, разумеется. А какова будет оптическая сила той же линзы в воде? Показатель преломления воздуха – примерно 1, воды – примерно 1,3, стекла – примерно 1,5.

16. Оптическая сила линзы -10 диоптрий. Это в воздухе, разумеется. А какова будет оптическая сила той же линзы в воде? Показатель преломления воздуха – примерно 1, воды – примерно 1,3, стекла – примерно 1,5.

17. Оптическая сила линзы 5 диоптрий. На каком расстоянии следует держать ее от деревяшки, на которой вы собираетесь что-нибудь выжечь солнечным светом?

18. Оптическая сила линзы 10 диоптрий. На каком расстоянии следует держать ее от деревяшки, на которой вы собираетесь что-нибудь выжечь солнечным светом?

19. Оптическая сила линзы -5 диоптрий. На каком расстоянии следует держать ее от деревяшки, на которой вы собираетесь что-нибудь выжечь солнечным светом?

20. Оптическая сила линзы -10 диоптрий. На каком расстоянии следует держать ее от деревяшки, на которой вы собираетесь что-нибудь выжечь солнечным светом?

21. Ход лучей в собирающей линзе. Что такое фокус собирающей линзы?

22. Ход лучей в собирающей линзе. Что такое главная оптическая ось собирающей линзы?

23. Ход лучей в рассеивающей линзе. Что такое фокус рассеивающей линзы?

24. Ход лучей в рассеивающей линзе. Что такое главная оптическая ось рассеивающей линзы?

25. Ход лучей в собирающей линзе. Что такое фокусное расстояние собирающей линзы? Положительно оно или отрицательно?

26. Ход лучей в собирающей линзе. Что такое оптическая сила собирающей линзы? Положительна она или отрицательна?

27. Ход лучей в рассеивающей линзе. Что такое оптическая сила рассеивающей линзы? Положительна она или отрицательна?

28. В чем измеряется фокусное расстояние?

29. В чем измеряется оптическая сила линзы?

30. Что такое диоптрия?

31. Что такое двояковыпуклая линза? Она рассеивающая или собирающая?

32. Что такое двояковогнутая линза? Она рассеивающая или собирающая?

33. Что такое выпукло-вогнутая линза? Она рассеивающая или собирающая?

34. Что такое лупа? Какие бывают лупы? Увеличение лупы.

35. Чему равно фокусное расстояние лупы с увеличением 8?

36. Чему равно фокусное расстояние лупы с увеличением 12?

37. Чему равно увеличение лупы с фокусным расстоянием 10 см?

38. Чему равно увеличение лупы с фокусным расстоянием 4 см?

39. Чему равно увеличение лупы с фокусным расстоянием 2 см?

40. Чему равно увеличение лупы с фокусным расстоянием 1 см?

41. Оптическая сила лупы 4 Дптр. Чему равно ее увеличение?

42. Оптическая сила лупы 8 Дптр. Чему равно ее увеличение?

43. Оптическая сила лупы 10 Дптр. Чему равно ее увеличение?

44. Оптическая сила лупы 16 Дптр. Чему равно ее увеличение?

45. Оптическая сила лупы 20 Дптр. Чему равно ее увеличение?

46. Оптическая сила лупы 30 Дптр. Чему равно ее увеличение?

47. Оптическая сила лупы 50 Дптр. Чему равно ее увеличение?

48. Оптическая сила лупы 4 Дптр. Чему равно ее фокусное расстояние?

49. Оптическая сила лупы 8 Дптр. Чему равно ее фокусное расстояние?

50. Оптическая сила лупы 10 Дптр. Чему равно ее фокусное расстояние?

51. Оптическая сила лупы 16 Дптр. Чему равно ее фокусное расстояние?

52. Оптическая сила лупы 20 Дптр. Чему равно ее фокусное расстояние?

53. Оптическая сила лупы 30 Дптр. Чему равно ее фокусное расстояние?

54. Оптическая сила лупы 50 Дптр. Чему равно ее фокусное расстояние?

55. Кто и когда изобрел микроскоп? Как он устроен? Что такое увеличение микроскопа? Как оно зависит от увеличения объектива и окуляра?

56. Что такое разрешающая способность микроскопа? Какова разрешающая способность невооруженного глаза? Каков минимальный размер объектов, различимых в оптический микроскоп?

57. Каково предельное разрешение оптического микроскопа? Почему?

58. С какого увеличения следует начинать наблюдения – с минимального или максимального? Что такое глубина резкости? Большая глубина резкости – это хорошо или плохо? Как изменяется глубина резкости с ростом увеличения?

59. Что такое предметный столик, предметное стекло, конденсор, диафрагма конденсора?

7. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА. СПИН МИКРОЧАСТИЦЫ

Основы теории

Материал данной главы пригодится вам при выполнении **экспериментального задания № 7-0 [6,7].** Это задание является прекрасной экспериментальной иллюстрацией изложенного в настоящей главе теоретического материала.

Известно, что свет – это электромагнитная волна, а электромагнитные волны **поперечны**. Поэтому два световых луча могут отличаться не только направлением распространения, интенсивностью и цветом (частотой), но и **поляризацией,** то есть направлением колебаний электрического вектора. Явление двулучепреломления исландского шпата, связанное (как мы сейчас понимаем) именно с поляризацией света, впервые было открыто еще Бартолином в 1670 году и изучалось Гюйгенсом в 1690 году.

Рис. 7.1. Христиан Гюйгенс

Рис. 7.2. Томас Юнг

Впрочем, объяснить это явление Гюйгенс не смог. Не смог сделать это и Малюс, введший в 1808 году термин «поляризация». Ясное понимание «смысла происходящего» было достигнуто только в 1816

году, когда Юнг и Френель высказали догадку о поперечности световых волн, после которой «все встало на свои места». По современным представлениям, поляризация электромагнитных волн связана с моментом импульса (спином) фотонов, являющихся квантами электромагнитного поля. С момента импульса мы и начнем.

Рис. 7.3. Огюстен Жан Френель

Момент импульса (он же момент количества движения) механической системы – это мера интенсивности ее вращательного движения. Моментом импульса обладает, например, вращающийся волчок, маховик, вращающаяся вокруг звезды и одновременно вокруг своей оси планета – в общем, любой вращающийся объект. Момент импульса имеется и у микрообъектов – молекул, атомов, атомных ядер. Имеется он и у субатомных частиц, в том числе и у элементарных – протонов, нейтронов, электронов, фотонов.

Момент импульса тела состоит из двух частей: из момента импульса орбитального движения тела и из его внутреннего момента импульса**. Момент импульса орбитального движения** связан с движением микро- или макрообъекта как целого вокруг некоторого центра вращения. В качестве классического примера момента им-

пульса орбитального движения макрообъекта можно указать на момент импульса орбитального движения планеты, вращающейся вокруг Солнца, или спутника, вращающегося вокруг планеты.

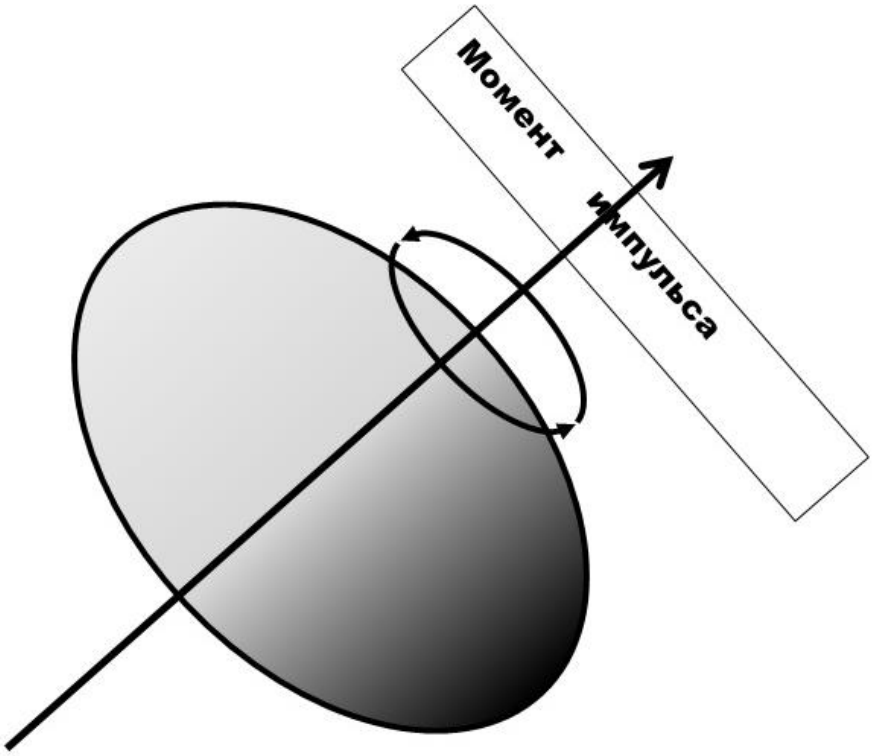


Рис. 7.4. Вращающееся тело, направление его вращения, ось вращения и момент импульса, направленный по оси вращения

В классической физике момент импульса орбитального движения может принимать любые значения и может меняться непрерывно, сколь угодно мелкими порциями. **В квантовой физике момент импульса орбитального движения обязан быть кратен постоянной Планка ħ** и минимальная величина, на которую он может измениться, равна ħ (как говорят в этом случае, «момент импульса квантуется»). Например, электрон, вращающийся вокруг атомного ядра, имеет некоторый орбитальный момент, который в единицах ħ (ħ – постоянная Планка) может быть равен 0 (s-электроны), 1 (p-электроны), 2 (d-электроны) и так далее.

Внутренний момент импульса тела – это момент импульса тела, связанный с его вращением не относительно какого-либо внешнего «центра вращения», а относительно своей собственной оси. При-

мером внутреннего момента импульса макроскопического тела может служить момент импульса вращающейся вокруг своей оси звезды, планеты или спутника планеты. Разумеется, в классической физике внутренний момент импульса механической системы, так же как и момент импульса орбитального движения, может принимать любые значения и может меняться непрерывно, сколь угодно мелкими порциями. Внутренний момент импульса имеется и у любой микрочастицы. Это странно, но это – экспериментальный факт. Странность заключается в том, что любая элементарная частица «по определению» бесструктурна (иначе она не имела бы права на название «элементарная»); поэтому у нее нет и не может быть никакой «оси» и нечему вокруг этой оси вращаться. Тем не менее элементарные частицы имеют внутренний момент импульса – это экспериментальный факт – и называется этот внутренний момент импульса **спином** элементарной частицы. Спин элементарной частицы «квантуется», то есть не может принимать любое значение. В единицах ħ (ħ – постоянная Планка) он может быть либо **целым** (0, ħ, 2ħ, …), либо **полуцелым** (½ ħ, 3/2 ħ, 5/2 ħ …). Существенным отличием спина элементарной частицы от классического внутреннего момента импульса макрообъекта является его постоянство: вращающийся вокруг своей оси искусственный спутник Земли, в принципе, можно остановить, и он от этого не перестанет «быть самим собой». Внутреннее же вращение элементарной частицы остановить невозможно в принципе – можно только ее (частицу) уничтожить вместе с ее спином. Поэтому одной из важнейших характеристик любой элементарной микрочастицы является ее **спин – внутренний момент импульса**. Так, например, спин протона, нейтрона и электрона всегда и везде равен ½ ħ, а спин фотона всегда и везде равен ħ.

Поэтому одной из важнейших классификаций элементарных частиц является их разделение на две большие группы – **бозоны** и **фермионы**. **Бозонами называются частицы с целым значением спина, а фермионами – частицы с полуцелым значением спина.** К бозонам относится, например, фотон и нейтрино, а к фермионам – про-

тон, нейтрон, электрон. Бозоны названы в честь известного индийского физика Бозе, а фермионы – в честь не менее известного итальянского физика Энрико Ферми.

На первый взгляд кажется, что спин элементарной частицы (как чисто квантовый эффект) не проявляется и не может проявляться на макроскопическом уровне. Как оказывается, это не так: именно наличием спина у фотона обусловлено такое важное свойство электромагнитных волн вообще и света в частности, как его поляризация. Дело в том, что твердо установленным свойством материи является **корпускулярно-волновой дуализм**, то есть двойственная – одновременно корпускулярная и волновая – природа любого типа материи. Оказывается, в природе не существует ни «чисто» частиц (корпускул), ни «чисто» волн – любая микрочастица с импульсом p и энергией E является одновременно волной с длиной волны $\lambda = h/p$ (**де-Бройлевская длина волны**) и частотой $\nu = E/h$. И наоборот, любая волна с длиной волны λ и частотой ν является одновременно потоком микрочастиц с импульсом $p = h/\lambda$ и энергией $E = h\nu$. Гипотеза о корпускулярно-волновом дуализме впервые была высказана в 1924 году известным французским физиком Луи де Бройлем и очень быстро перестала быть гипотезой – уже после опытов Дэвидсона и Джермера по дифракции электронов на монокристаллах в 1927 году.

Поэтому любое поле может рассматриваться как газ микрочастиц, соответствующих этому полю, а любая волна – как поток соответствующих микрочастиц. Спин этих микрочастиц соответствует характеру поля и волны. Так, например, если тому или иному полю соответствует микрочастица с нулевым спином (такие частицы называются скалярными), то поле – скалярно, а соответствующая волна – продольна. А если некоторому полю соответствует микрочастица со спином 1 (такие частицы называются векторными), то поле – векторно и соответствующая волна – поперечна. Что это означает? Чтобы понять это, посмотрим на рис. 7.5 и рис. 7.6. На каждом из них изображены две микрочастицы с одинаковой энергией, импульсом и направлением распространения, только на рис. 7.5 показаны скаляр-

ные частицы (у которых нет спина), а на рис. 7.6 – векторные, со спином 1. Показанные на рис. 7.5 две скалярные частицы ничем друг от друга не отличаются и отличаться не могут: им просто нечем отличаться, потому что все характеристики, которыми можно отличиться, у них одинаковы. А вот две показанные на рис. 7.6 векторные частицы отличаются, и сильно: у них противоположная ориентация вектора спина. То есть у волн, соответствующих векторным частицам, имеется дополнительная «степень свободы» – **поляризация**.

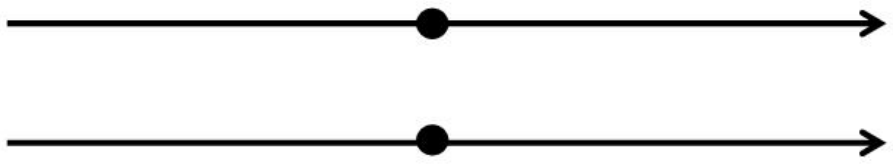


Рис. 7.5. Две скалярные частицы с одинаковым направлением движения, энергией и импульсом. Они одинаковы: им просто нечем отличаться

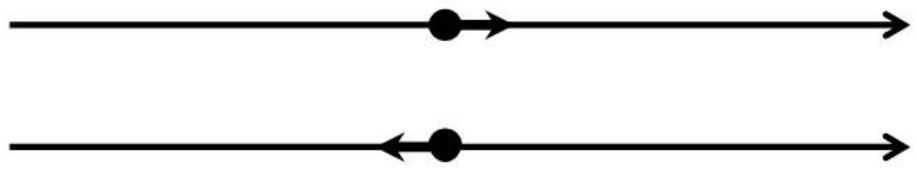


Рис. 7.6. Две векторные частицы с одинаковым направлением движения, энергией и импульсом. Они отличаются направлением спина – по или против хода движения. Они – разные

Проявляется эта дополнительная степень свободы в том, что в поперечной волне колебание чего-нибудь (например, электрического и магнитного вектора в электромагнитной волне) происходит в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны. Таких направлений бесконечно много: их ровно столько, сколько перпендикуляров к прямой линии в пространстве (рис. 7.7). На нем изображен луч света, идущий прямо нам в глаз (по перпендикуляру к плоскости рисунка), и возможные направления электрического вектора, перпендикулярные этому лучу. Каждому направлению соответствует одна из возможных линейных поляризаций поперечной волны. А само направление колебания электрического вектора называется

направлением поляризации электромагнитной волны. Очень важно понять, что направление поляризации электромагнитной волны и направление ее распространения – это совершенно разные вещи. Они никогда не совпадают: электромагнитная волна в изотропной среде строго поперечна, и потому направление поляризации всегда перпендикулярно направлению ее распространения[33].

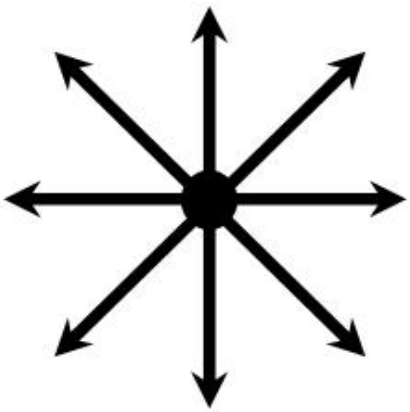


Рис. 7.7. Возможные направления линейной поляризации электромагнитной волны

А как же скалярные частицы и соответствующие им продольные волны? У них колебание чего-нибудь (например, частиц среды в звуковой волне) происходит всегда только в направлении распространения волны, потому они и называются продольными.

Итак, по принципу корпускулярно-волнового дуализма любой волне соответствует какая-нибудь частица: **электромагнитной волне (свету) – фотон, волне упругости (акустической волне) – фонон, гравитационной волне – гравитон**[34]. Все волны делятся на продольные и поперечные, причем продольным волнам соответствуют бесспиновые (скалярные) частицы, а поперечным – векторные частицы (со спином 1). В продольных волнах колебания происходят вдоль

[33] А как же стрелочки на рис. 7.7? Они направлены вдоль направления движения фотона потому, что показывают направление спина, а спин – это момент импульса, а вектор момента импульса направлен по оси вращения, а движение при вращении как раз и происходит перпендикулярно оси вращения.

[34] Правда, экспериментально ни гравитационных волн, ни гравитонов еще не нашли. Но считается, что есть и то, и другое.

направления распространения волны, а в поперечных – поперек направления распространения. Поэтому для полного задания поперечной волны необходимо, кроме всего прочего, указать направление ее поляризации.

Примером продольной волны является **волна упругости** (звуковая волна) в жидкости или газе. Примером поперечной волны является электромагнитная волна (радиоволны, свет, рентгеновское и гамма-излучение). Акустические волны в упругих телах бывают двух видов: **продольные** (волны сжатия) и **поперечные** (волны сдвига). Они имеют разные скорости и распространяются независимо друг от друга.

Такая же ситуация имеет место и для волн, распространяющихся по упругой струне (или веревке, или шнуру): если мы оттянем струну в сторону и отпустим ее, то по струне пойдет поперечная волна с определенным направлением поляризации (с тем самым направлением, в котором мы оттянули струну). А если мы зажмем кусочек струны рукой и оттянем его в направлении струны, а потом отпустим, по струне пойдет продольная волна «без поляризации», потому что в продольной волне направление колебания частиц струны по определению совпадает с направлением струны и других вариантов нет.

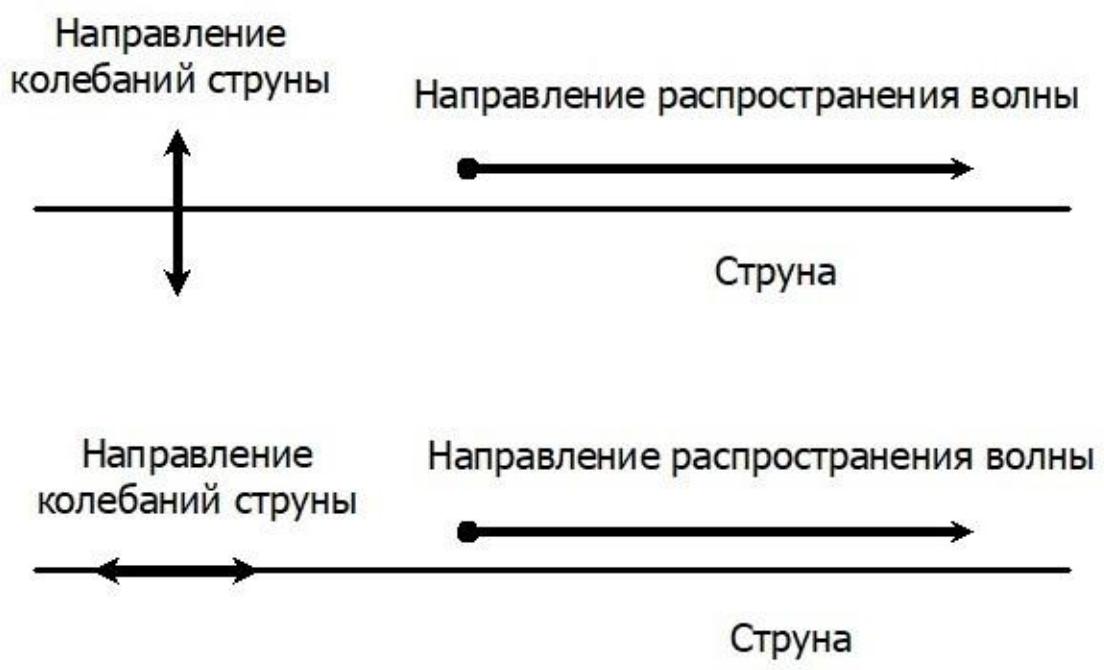


Рис. 7.8. Поперечная (сверху) и продольная (внизу) волна на струне

Для анализа и управления поляризацией поперечных волн существуют специальные устройства – **поляризаторы**. Эти устройства пропускают волны некоторой определенной поляризации и не пропускают волны дополнительной (противоположной) поляризации. Это означает, что поляризатор вовсе не «поляризует» волну (как можно было бы заключить из его названия) – он просто «отсекает» ненужную поляризацию и оставляет «нужную».

Как работает поляризатор, проще всего выяснить на примере «веревочной» волны, распространяющейся по струне, протянутой через решетку (рис. 7.9–7.11). Если направление колебаний совпадает с направлением прутьев решетки, то решетка не мешает струне, а струна – решетке. Волна просто проходит сквозь решетку, «не заметив» ее. Если направление колебаний струны перпендикулярно направлению прутьев решетки, то решетка не пропускает волну: она не дает струне двигаться в нужном направлении, и в результате за решеткой волны на струне нет.

Если же реализуется более общий случай, когда направление колебаний струны составляет некоторый угол α с направлением прутьев решетки, то происходит разложение колебаний струны на вертикальные (совпадающие по направлению с прутьями решетки) и горизонтальные (перпендикулярные прутьям решетки). Первые полностью проходят через решетку, а вторые – полностью отражаются. В результате за решеткой по струне распространяется волна, в которой направление колебаний струны совпадает с направлением прутьев решетки, причем интенсивность этой волны связана с интенсивностью падающей на решетку волны соотношением $I = I_0 \cos^2 \alpha$. Это соотношение известно как **закон Малюса**. Направление, в котором должна быть поляризована волна, проходящая через поляризатор без потерь (или почти без потерь), называется **направлением пропускания поляризатора**. Следует понимать, что «направление пропускания поляризатора» – это вовсе не направление, в котором распространяется волна, проходящая через поляризатор (направление луча),

а направление, в котором она должна быть поляризована, чтобы пройти через поляризатор. Поскольку поляризатор обычно располагают перпендикулярно лучу, направление пропускания поляризатора обычно перпендикулярно лучу. Можно наглядно представлять себе направление пропускания поляризатора как невидимую стрелку, которую кто-то нарисовал на пластинке поляризатора и которая показывает, как должен быть направлен вектор поляризации волны, проходящей через поляризатор, чтобы поляризатор пропустил волну.

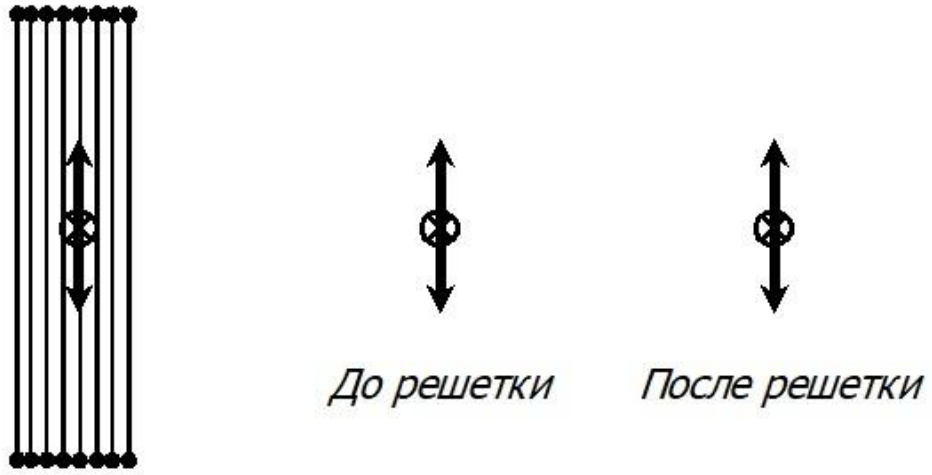


Рис. 7.9. Вертикально поляризованная волна на струне проходит через решетку с вертикальными прутьями без малейшего ущерба для себя

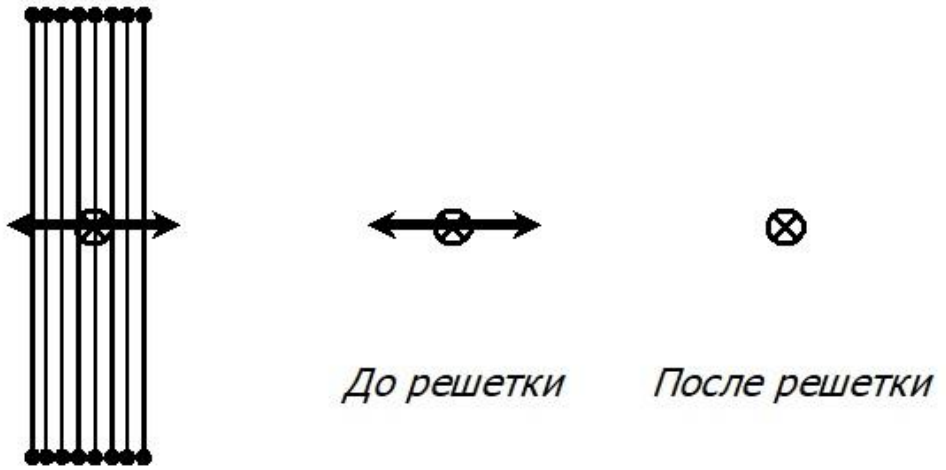


Рис. 7.10. Горизонтально поляризованная волна не проходит через решетку с вертикальными прутьями

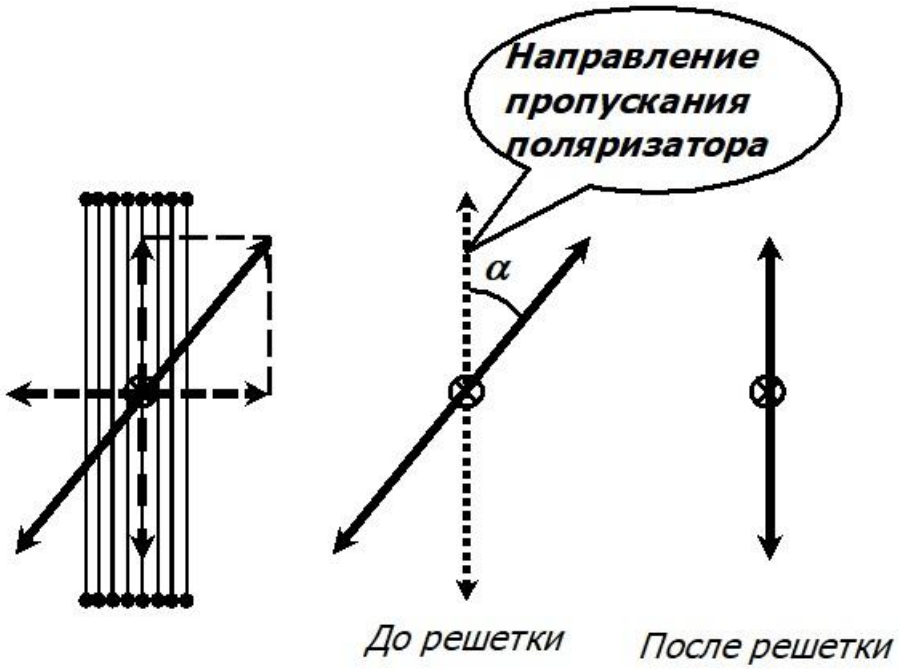


Рис. 7.11. Прохождение через поляризатор волны, направление поляризации которой не совпадает ни с направлением пропускания поляризатора, ни с перпендикуляром к этому направлению

Итак, мы выяснили, как устроен и как работает поляризатор для «веревочной» волны. Но гораздо более важен вопрос о том, как устроен поляризатор для электромагнитных волн вообще и для световой волны в частности. Для решения этого вопроса придется начать с обычного зеркала, которое не пропускает сквозь себя электромагнитную волну. Все мы видим зеркала каждый день и очень к ним привыкли. Но если вдуматься, то зеркало – просто удивительный объект. Действительно, ведь за зеркалом нет электромагнитной волны, то есть зеркало ее «уничтожает». Проблема в том, что уничтожить электромагнитное поле, строго говоря, невозможно – можно только создать другое электромагнитное поле, в точности совпадающее с исходным по величине и противоположное по направлению. Тогда (в результате принципа суперпозиции) наложение двух полей приведет к их взаимной компенсации. Именно это и делает металлическое зеркало (рис. 7.12): в металле имеются свободные заряды (электроны), которые под действием электрического поля падающей волны начинают колебаться и излучать свою собственную (вторичную) электро-

магнитную волну. За зеркалом эта волна в точности компенсирует исходную, а перед зеркалом – формирует отраженную волну. А если в металле прорезать большое количество параллельных друг другу щелей, то есть сделать из зеркала решетку? В случае, когда направление щелей (и прутьев решетки) совпадает с направлением электрического вектора световой волны, не произойдет ничего: такие щели не будут мешать движению зарядов, не будут мешать им излучать вторичную волну, и такая решетка будет «работать» зеркалом. То есть в случае, когда направление прутьев решетки совпадает с направлением поляризации падающей волны, волна не пройдет. Но если прутья решетки будут перпендикулярны направлению электрического вектора, то ситуация изменится радикально, ведь в этом случае заряды не смогут смещаться под действием электрического поля падающей волны, они не будут излучать вторичную волну и некому будет компенсировать первичную волну за решеткой. По существу, в этом случае решетка окажется как бы непроводящей, свободные заряды в металле – как бы связанными, а наша решетка – как бы «пустым местом», через которое световая волна спокойненько пройдет.

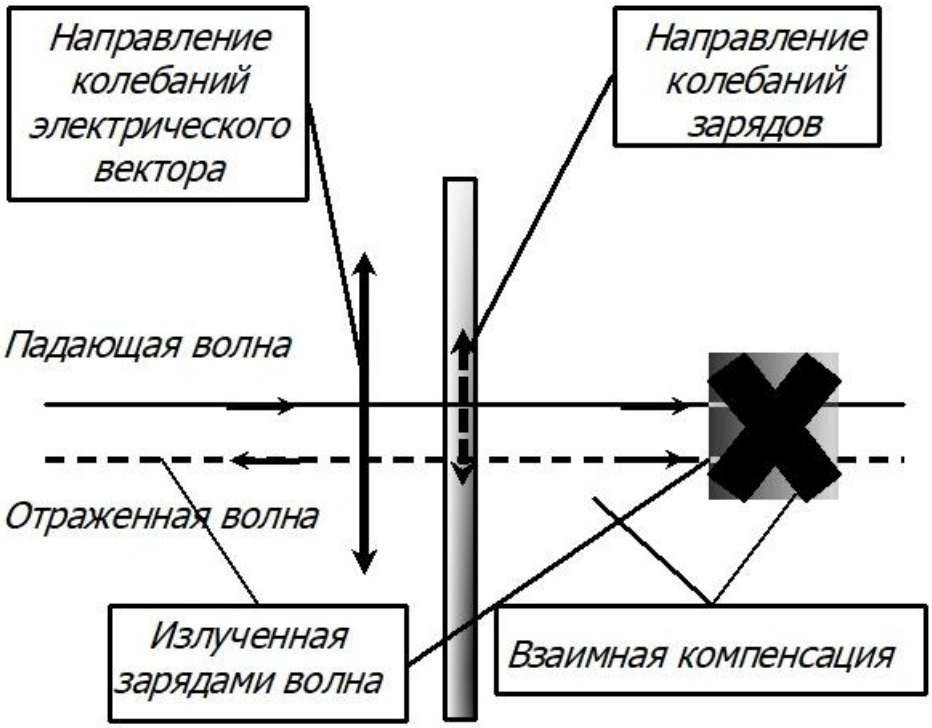


Рис. 7.12. Отражение светового луча от зеркала

Вывод прост: металлическая решетка с достаточно часто расположенными прутьями является поляризатором для электромагнитных волн, причем направление пропускания этого поляризатора перпендикулярно направлению прутьев решетки. Такие поляризаторы-решетки действительно практически используются для радиоволн сантиметрового диапазона. И для света их можно было бы использовать, если бы кто-нибудь догадался, как изготовить проволочную решетку с расстоянием между прутьями порядка десятых или сотых долей микрометра. Впрочем, решить эту задачу можно и «обходным путем»: можно взять побольше достаточно длинных молекул, плавающих в каком-нибудь «киселе», нанести этот «коктейль» в виде пленки на прозрачную основу, ориентировать молекулы в одном направлении (например, внешним электрическим полем) и после этого дать «киселю» застыть. После этого мы получим искомую «решетку», вмонтированную в прозрачную пленку; в этой решетке вместо прутьев будут проводящие вдоль своей оси длинненькие молекулы. Полученные таким путем пленки называются **поляроидами** и практически используются очень широко.

Итак, любая электромагнитная волна – и свет в том числе – является поперечной и потому просто обязана обладать какой-либо поляризацией. Как же поляризован естественный свет, с которым мы имеем дело постоянно, за исключением того времени, когда спим? А никак. Он так и называется – **неполяризованный**. Конечно, это название, освященное традицией, на самом деле неправильно. Строго говоря, неполяризованным свет не может быть в принципе, ведь это – поперечная волна, а любая поперечная волна обязана иметь ту или иную поляризацию. Просто состояние поляризации естественного света постоянно хаотически (случайно) изменяется, а какого-либо преимущественного состояния поляризации у него нет. Если же у света имеется некоторое преимущественное (но не исключительное) направление поляризации, то такой свет называется **частично поля-**

ризованным. Частично поляризованный свет можно рассматривать как смесь неполяризованного (точнее – хаотически поляризованного) и полностью поляризованного в каком-нибудь направлении света. Частично поляризованный свет в природе встречается очень часто, и просто несправедливо, что он не называется естественным. Для того чтобы естественный (неполяризованный) свет стал частично поляризованным (а иногда – и полностью поляризованным), достаточно преднамеренно или непреднамеренно поставить его в условия, при которых разные направления поляризации неравноправны, а такие ситуации сами собой возникают сплошь и рядом.

Например, частичная поляризация света возникает при его отражении от диэлектрика (рис. 7.13–7.14), ведь ясно, что коэффициент отражения луча на рис. 7.13 и на рис. 7.14 вовсе не обязаны совпадать; одно дело, когда электрический вектор лежит в плоскости падения, другое – когда он перпендикулярен этой плоскости. Они и не совпадают. Более того, существует угол падения, именуемый **углом Брюстера** ($\alpha = arctg\, n$, где n – относительный показатель преломления на границе сред), при котором луч 2 просто отсутствует (коэффициент отражения равен 0).

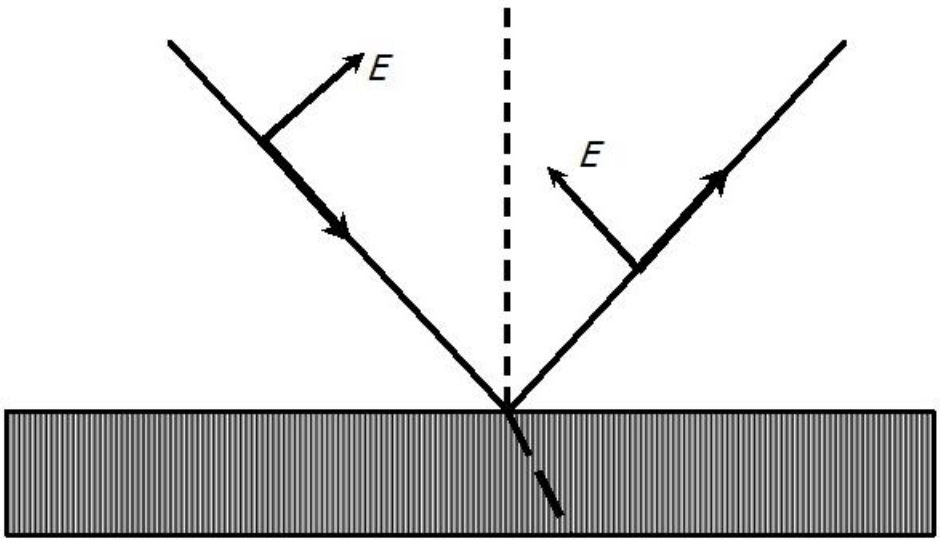


Рис. 7.13. Отражение светового луча от поверхности диэлектрика в случае, когда луч поляризован в плоскости падения

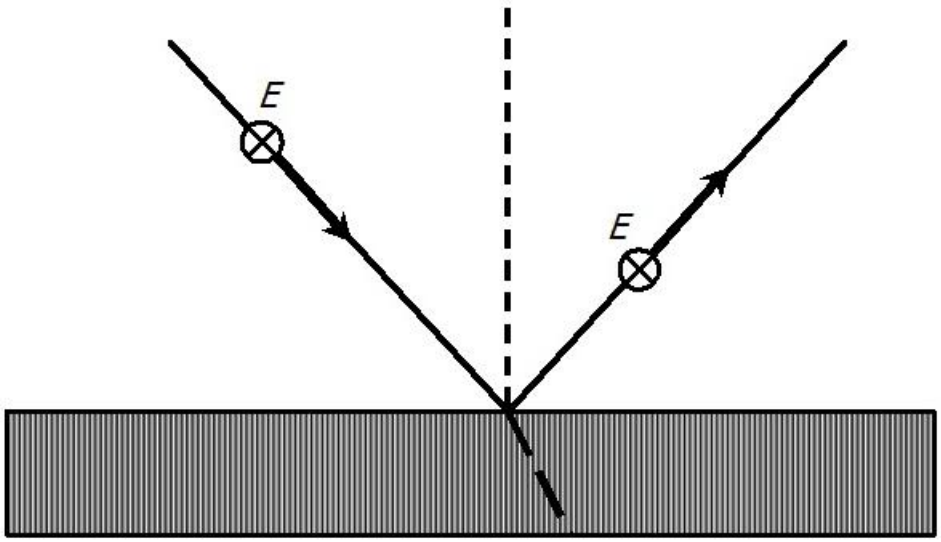


Рис. 7.14. Отражение светового луча от поверхности диэлектрика в случае, когда луч поляризован перпендикулярно плоскости падения

При падении луча неполяризованного света на границу раздела двух сред под углом Брюстера отраженный луч света оказывается полностью поляризован в направлении, перпендикулярном плоскости падения[35]. А часто ли в жизни луч света отражается от границы раздела двух диэлектриков? Да легче сказать, когда он этого не делает. Ведь все твердые и жидкие тела в природе – это проводники или диэлектрики (что не стихи – то проза, что не проводник – то диэлектрик). Поэтому гладкой поверхностью диэлектрика является и поверхность оконного стекла, и любая окрашенная или лакированная поверхность, и линолеум, и ламинат, и поверхность любой декоративной пленки, и гладь Волги за окном… При отражении от любой из этих поверхностей неполяризованный свет становится частично поляризованным, а при отражении под углом Брюстера – полностью поляризованным. Поэтому мир вокруг нас наполнен частично поляризованным светом, и очень обидно, что глаза человека устроены так, что мы не чувствуем поляризацию. А насекомые, например, чувствуют, и это позволяет им даже в пасмурный день знать, в какой точке неба на самом деле находится Солнце.

[35] При падении света из воздуха на стекло ($n=1,5$) угол Брюстера равен примерно 56^0.

Многообразны и применения поляризованного света в технике. В жидкокристаллических дисплеях (LCD-дисплей) каждый пиксель (точка) состоит из двух скрещенных поляризаторов, между которыми находится капля жидкого кристалла. Если на жидкий кристалл не подается никакое напряжение, то свет от источника (расположенного за экраном) наружу (к нам) не проходит, и мы видим черную точку. Если же подать на жидкий кристалл небольшое электрическое напряжение, то в нем происходит некоторый поворот плоскости поляризации света и часть света (какая – зависит от поданного напряжения) проходит через второй поляризатор и выходит наружу – мы видим светящуюся точку. Так работают практически все современные дисплеи компьютеров, калькуляторов, мобильных телефонов и электронных наручных часов.

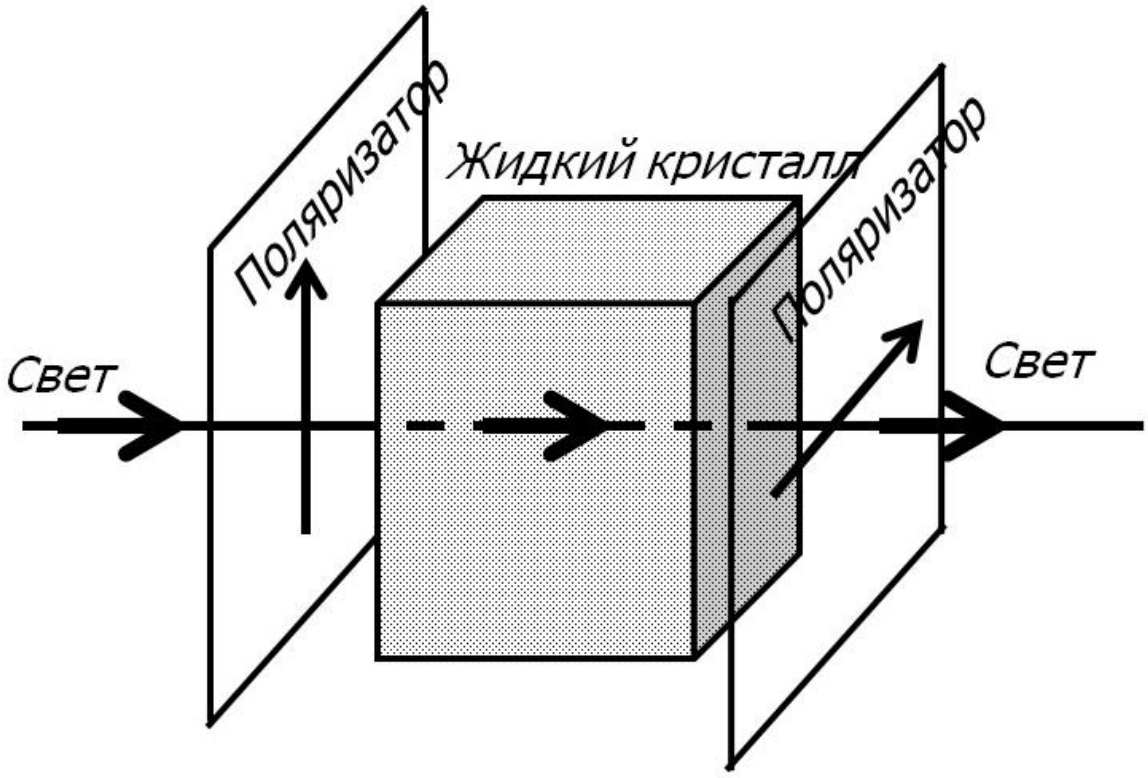


Рис. 7.15. Схематический план устройства пикселя жидкокристаллического дисплея

Порядок выполнения работы. Измерения и расчеты

Установка для выполнения работы выглядит очень просто (рис. 7.16). Основной частью установки является «поляризационная

труба» (1). Это – два поляроида в круглой оправе, вставленные в общую трубку (рис. 7.17). Направление пропускания поляроидов обозначено заостренными металлическими штырьками, укрепленными на оправах. Поляроиды можно поворачивать в трубке, изменяя угол между направлениями пропускания поляроидов. Их можно даже вытащить из трубки – вот только делать это вам совершенно незачем. Кроме того, вам потребуется настольная лампа (2) и набор отражающих поверхностей (пластина из затемненного стекла (3), пластина из оргстекла (4), лазерный диск (5)).

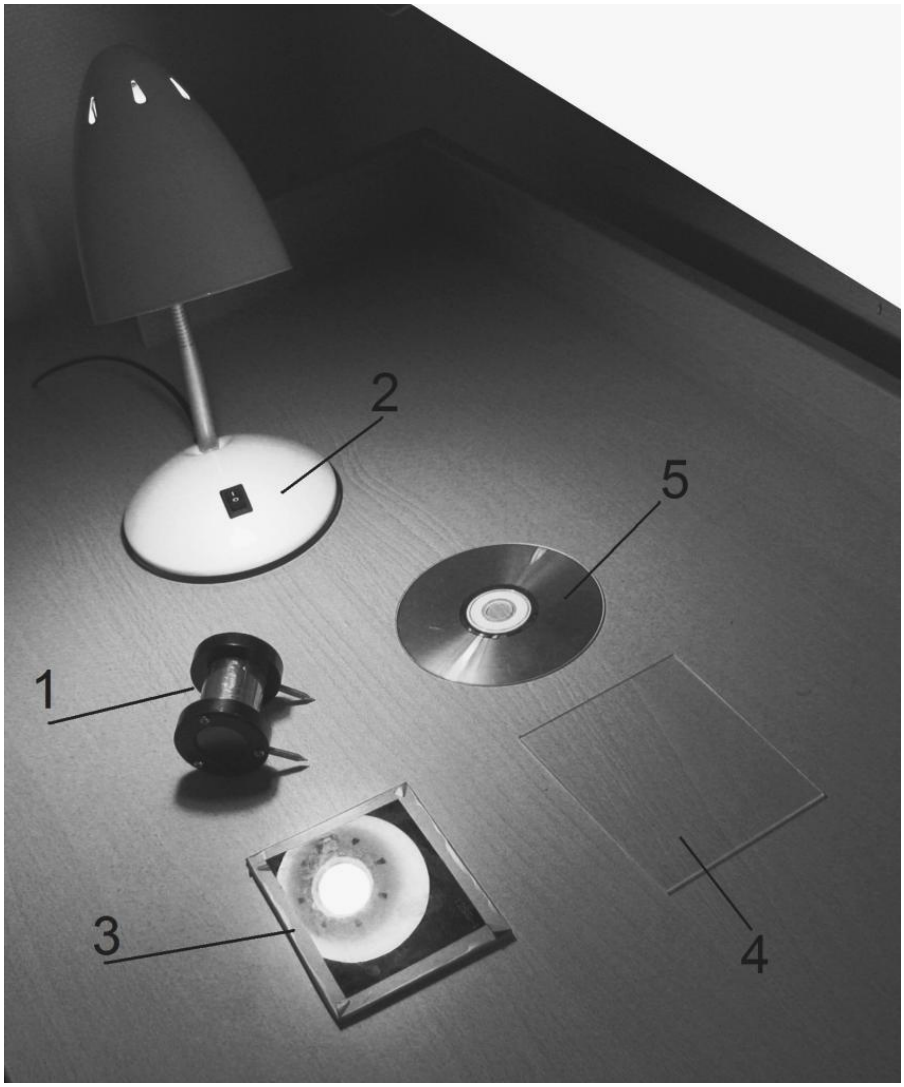


Рис. 7.16. Общий вид установки для изучения поляризации:
1 – «поляризационная труба», 2 – настольная лампа,
3 – пластина из затемненного стекла,
4 – пластина из оргстекла, 5 – лазерный диск

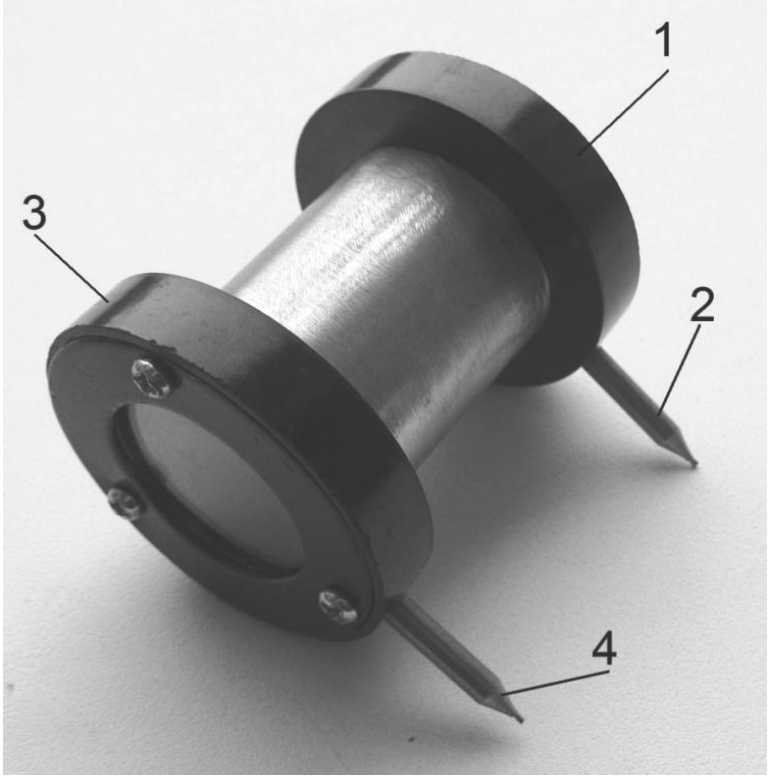


Рис. 7.17. Труба поляризационная (общий вид):
1 – первый поляризатор; 2 – штырек, указывающий направление пропускания первого поляризатора; 3 – второй поляризатор; 4 – штырек, указывающий направление пропускания второго поляризатора

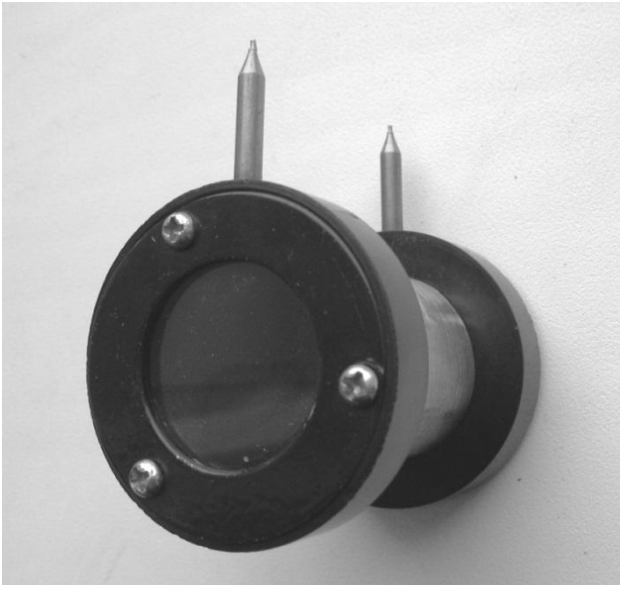


Рис. 7.18. Поляризационная труба с параллельным направлением пропускания обоих поляризаторов.
В этом случае она работает как один поляризатор «повышенного качества» (происходит «двойная очистка» неполяризованного света)

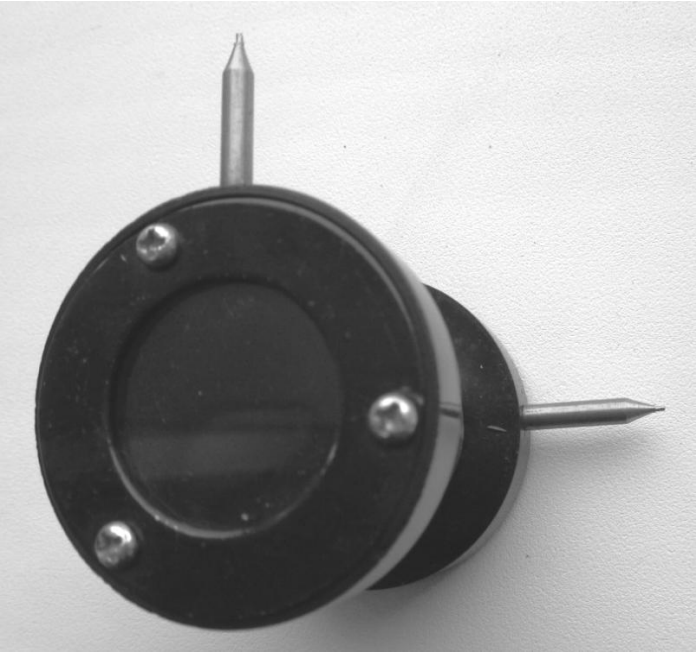


Рис. 7.19. Поляризационная труба со скрещенными поляризаторами. Если бы поляризаторы были идеальны, в ней всегда была бы чернота, ведь все, что пропускает первый поляризатор, будет задержано вторым. На самом деле при наблюдении яркого источника белого света он все-таки чуть-чуть виден и окрашен в синие тона. Это означает, что в синей части спектра качество наших поляризаторов хуже, чем в красной

Вы должны сделать следующее:

1. Проверить закон Малюса и познакомиться с понятием **«скрещенные поляризаторы»**. Для этого выберите хорошо освещенный объект (подоконник или лампочку, или вид за окном, а лучше все это «по очереди») и наставьте на него свою «поляризационную трубу». Начните с одинаково направленных указателей поляризации (штырьки параллельны, см. рис. 7.18). При этом вы увидите выбранный объект как через солнечные очки. В этом нет ничего удивительного: при пропускании через первый поляризатор естественного (неполяризованного) света половина мощности пучка (поляризованная «не как надо») поглощается и лишь половина (поляризованная «как надо») проходит через поляризатор. Зато эта половина уже линейно поляризована и потому через второй поляризатор (с тем же самым направлением пропускания) проходит целиком. Не отрывая трубу от глаза и не изменяя положения дальнего от глаза поляризатора, поворачивайте ближний к глазу поляризатор, следя за интенсивно-

стью «картинки». В соответствии с законом Малюса интенсивность прошедшего через два поляризатора света зависит от угла между их направлениями пропускания по закону $I = I_0 \cos^2 \alpha$ (рис. 7.20). Это означает, что при угле в 90^0 между направлениями пропускания поляризаторов («скрещенные поляризаторы») изображение исчезнет вообще. При угле в 180^0 (направления пропускания опять параллельны) интенсивность изображения опять будет максимальна, при угле в 270^0 между направлениями пропускания поляризаторы опять окажутся скрещенными и изображение опять исчезнет, а при угле поворота в 360^0 (полный поворот) ситуация вернется к исходной ($360^0=0^0$).

2. Выясните, где вокруг вас свет неполяризован, где частично поляризован и где поляризован полностью. Для этого установите одинаковые направления пропускания обоих поляризаторов (направьте штырьки в одну сторону). При этом ваша «поляризационная труба» работает как один, но достаточно качественный поляризатор, направление пропускания которого указано общим направлением штырьков. Направьте «поляризационную трубу» на интересующий вас источник света и медленно поворачивайте ее вокруг своей оси. Если изображение при этой процедуре не изменяется, значит, оно сформировано неполяризованным светом. Если освещенность изменяется при повороте поляризатора с периодом 90^0, то изображение сформировано частично поляризованным светом, причем направление доминирующей поляризации – это то направление пропускания поляризатора, при котором освещенность максимальна. Если при определенном положении направления пропускания поляризатора свет полностью исчезает – то он полностью поляризован.

Исследуйте таким способом:

а) настольную лампу;

б) лампу дневного света;

в) если солнце светит в окно – солнечные блики на поверхности стола. Если ваш стол лакированный или ламинированный, то при повороте направления пропускания поляризатора яркость блика должна изменяться;

г) отражение настольной лампы в стеклянной пластине при разных углах падения света на стекло (см. рис. 7.16 – на нем как раз в стеклянной пластине виднеется отражение лампочки; именно это отражение и следует рассматривать через «поляризационную трубу»). При произвольном угле падения света на пластину яркость отражения лампочки в стекле должна изменяться при повороте направления пропускания поляризатора, а при угле падения около 56^0 и вертикальном направлении пропускания поляризатора отражение лампы в стекле должно исчезать);

г) монитор компьютера;

д) экран собственного и соседского мобильника;

е) циферблат собственных часов.

Запишите результаты своих исследований в конспект в виде табл. 7.1.

Таблица 7.1

Наблюдение поляризованного света

Источник света	Неполяризованный свет	Частично поляризованный свет	Поляризованный свет
Настольная лампа			
Лампа дневного света на потолке			
Солнечный блик на поверхности стола			
Изображение лампы в стеклянной пластине			
Изображение лампы в плексигласовой пластине			
Изображение лампы в лазерном диске			
Экран мобильника			
Монитор компьютера			
Циферблат часов			

В этой таблице для каждого исследованного вами источника света поставьте крестик в соответствующей графе в зависимости от того, каким оказался его свет – неполяризованным, частично поляризованным или полностью поляризованным.

Покажите результаты своих исследований преподавателю.

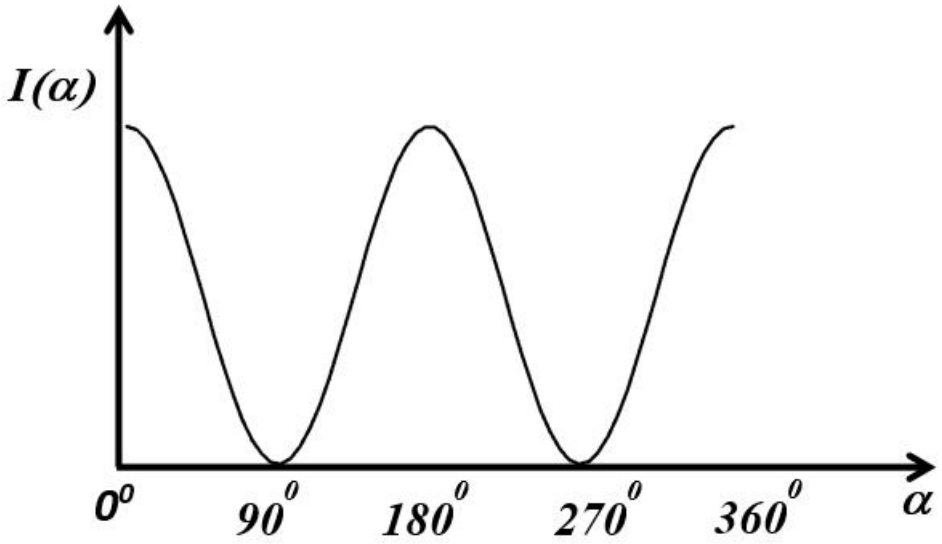


Рис. 7.20. Закон Малюса – зависимость интенсивности светового луча, прошедшего через два поляризатора, от угла между их направлениями пропускания

Контрольные вопросы

1. Кто открыл поляризацию света? Поперечны или продольны электромагнитные волны?
2. Поперечны или продольны звуковые волны в газе?
3. Поперечны или продольны звуковые волны в жидкости?
4. Поперечны или продольны звуковые волны в воздухе?
5. Поперечны или продольны звуковые волны в воде?
6. Поперечны или продольны звуковые волны в стали?
7. Поперечны или продольны сейсмические волны?
8. Поперечны или продольны волны на воде?
9. Поперечны или продольны волны на струне?
10. Поперечны или продольны волны на мембране?
11. Электрон – это бозон или фермион?

12. Позитрон – это бозон или фермион? Не знаете, что такое позитрон? Посмотрите в интернете.

13. Протон – это бозон или фермион?

14. Нейтрон – это бозон или фермион?

15. Нейтрино – это бозон или фермион?

16. Фонон – это бозон или фермион?

17. В чем заключается корпускулярно-волновой дуализм? Какая частица соответствует свету?

18. В чем заключается корпускулярно-волновой дуализм? Какая частица соответствует звуку?

19. Что такое скалярная частица? Приведите примеры скалярных частиц.

20. Что такое векторная частица? Приведите примеры векторных частиц.

21. Что такое продольная волна? Приведите примеры.

22. Что такое поперечная волна? Приведите примеры.

23. Что такое поляризация? Что такое направление поляризации световой волны?

24. Что такое поляризатор? Как устроен поляроид?

25. Что такое направление пропускания поляризатора? Совпадает ли оно с направлением распространения света через поляризатор?

26. Сформулируйте закон Малюса. Что такое скрещенные поляризаторы?

27. Что такое неполяризованный свет? Что такое частично поляризованный свет?

28. В каких естественных процессах неполяризованный свет становится поляризованным? Что такое угол Брюстера?

29. Что такое антибликовая оптика? Как она работает? Не знаете – поищите в интернете.

30. Как устроен LCD-монитор?

8. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ. КОЛЬЦА НЬЮТОНА

Основы теории

Материал данной главы пригодится вам при выполнении **экспериментального задания № 8-0 [6,7].** Это задание является прекрасной иллюстрацией изложенного в настоящей главе теоретического материала.

Одним из важнейших разделов физики вообще и теории электромагнитного поля в частности является оптика – наука о свете. Долгие тысячи лет единственным разделом оптики была геометрическая оптика, опирающаяся на представление о прямолинейных световых лучах. В XVII веке законы геометрической оптики казались незыблемыми и никаких отклонений от этих законов не предвиделось. На основе законов геометрической оптики были созданы замечательные приборы – телескопы и микроскопы, раздвинувшие горизонты человеческого познания от микроскопических живых существ до звезд Млечного Пути. Более того, сами законы геометрической оптики представлялись естественным следствием трех законов механики Ньютона, которые казались вечным и незыблемым эталоном для любой науки.

Действительно, достаточно предположить, что свет – это поток тончайших световых корпускул, летящих по инерции в однородной среде и не встречающих никакого сопротивления благодаря своей легкости и гладкости, и главнейший из законов геометрической оптики – закон прямолинейного распространения световых лучей в однородной среде – становится просто следствием первого закона Ньютона. Так же легко объясняются и законы отражения и преломления световых лучей на границе раздела двух прозрачных сред.

Но ничто не вечно под Луной – уже в XVII веке прогресс экспериментальной физики привел к открытию явлений интерференции и дифракции, противоречащих простой и ясной корпускулярной теории света. В дальнейшем выяснилось, что **геометрическая оптика – приближенная теория** и что она применима только в ситуациях, когда длину световой волны можно считать исчезающе малой величиной или,

что то же самое, когда размеры любых материальных тел, с которыми имеет дело световая волна, велики в сравнении с ее длиной.

Любопытно, что явление **интерференции**, в корне противоречащее корпускулярным представлениям Ньютона о природе света, открыл в 1675 году не кто иной, как сам сэр Исаак Ньютон. Речь идет о кольцах Ньютона. Впрочем, открытие колец Ньютона отнюдь не было концом его корпускулярной теории света – она господствовала (хотя и не безраздельно[36]) в физике вплоть до конца XVIII века. Дело в том, что отказ от корпускулярной теории Ньютона в пользу волновой теории света был не очень-то привлекателен потому, что сама волновая теория света «возмужала» и стала способна что-нибудь внятно объяснить только в начале XIX века. Так, например, объяснение колец Ньютона смог дать только Томас Юнг и только в 1802 году (введя попутно понятие интерференции световых волн).

Итак, что же такое интерференция? В буквальном переводе «интерференция» означает взаимодействие – очевидно, взаимодействие световых волн – и в этом смысле **термин вводит в заблуждение**. Ведь на самом деле **интерферирующие световые волны вовсе не действуют друг на друга – просто суммарный результат наложения двух световых волн не равен сумме результатов каждой из этих двух волн в отдельности**. Как же это происходит и «куда смотрит» при этом твердо установленный для электромагнитных полей принцип суперпозиции, который утверждает, что вектор напряженности суммарного электромагнитного поля равен сумме векторов напряженности накладывающихся друг на друга полей? Ларчик открывается просто: на самом деле интерференция световых полей является неизбежным следствием именно принципа суперпозиции и знакомого вам с детства математического тождества

$$(a+b)^2 = a^2 + 2ab + b^2 \neq a^2 + b^2 .$$

Дело в том, что принцип суперпозиции справедлив для напряженности электромагнитного поля, а непосредственно ощущаемой

[36] В «диссидентах» ходил, например, великий русский ученый М.В. Ломоносов, бывший сторонником волновой оптики.

величиной (фотопластинкой, глазом, фотоэлементом, да, наконец, просто рукой, выставленной на солнце) является не напряженность, а интенсивность поля – средняя (по времени) величина **квадрата** напряженности поля. Для интенсивности же поля принцип суперпозиции не выполняется и выполняться не может просто потому, что он выполняется для напряженности: ну не могут же одновременно выполняться равенства $c^2 = a^2 + b^2$ и $c = a + b$. **Интерференция и есть отклонение от принципа суперпозиции для интенсивностей, неизбежно следующее из выполнения этого принципа для напряженностей.** Проявляется интерференция двух волн обычно как возникновение темных и светлых полос в области наложения двух световых волн (эта область называется **интерференционным полем**). Темные и светлые полосы возникают потому, что возникающая при наложении двух волн интенсивность суммарного поля в одних точках пространства оказывается больше, чем сумма интенсивностей интерферирующих волн (**конструктивная интерференция**), а в других – меньше (**деструктивная интерференция**).

Пусть, например, в некоторой точке пространства накладываются две волны: волна с напряженностью $a = 1$ и интенсивностью $a^2 = 1$ и волна с напряженностью $b = 1$ и интенсивностью $b^2 = 1$. Тогда напряженность суммарного поля составит $a + b = 2$, а его интенсивность – $(a + b)^2 = 4$. Сумма же интенсивностей исходных волн $a^2 + b^2 = 2$. Мы видим, что интенсивность суммарного поля оказалась в два раза больше суммы интенсивностей исходных полей, то есть в данном случае имеет место конструктивная интерференция. Теперь рассмотрим другой пример. Пусть в некоторой точке пространства складываются две волны: волна с напряженностью $a = 1$ и интенсивностью $a^2 = 1$ и волна с напряженностью $b = -1$ и интенсивностью $b^2 = 1$. Тогда напряженность суммарного поля будет составлять $a + b = 0$, а его интенсивность – $(a + b)^2 = 0$. Сумма же интенсивностей исходных волн равна, как и в предыдущем случае,

$a^2 + b^2 = 2$. Мы видим, что интенсивность суммарного поля оказалась нулевой – меньше суммы интенсивностей исходных полей, то есть в данном случае имеет место деструктивная интерференция.

Итак, интерференция связана с так называемым интерференционным членом в тождестве $(a+b)^2 = a^2 + 2ab + b^2$. **Если интерференционный член положителен – имеет место конструктивная интерференция, а если отрицателен – деструктивная**. Существенно, что знак интерференционного члена зависит не от знаков интерферирующих полей «по отдельности», а от их согласованности (то есть **когерентности**): оба поля могут быть и отрицательны, и положительны, но если они становятся положительными и отрицательными «синхронно» («++» или «--») – имеет место конструктивная интерференция, а если, наоборот, «по очереди» («+-» или «-+») – деструктивная. Если же интерферирующие поля не согласованы друг с другом (то есть с равной вероятностью имеет место «++», «--», «+-» и «-+»), то в среднем интерференционный член оказывается равен нулю, суммарная интенсивность равна сумме интенсивностей и интерференции нет.

Теперь понятно, почему интерференцию не заметили древние греки и почему мы твердо уверены в том, что суммарная освещенность от двух лампочек равна сумме их освещенностей: если имеет место наложение световых полей от двух несогласованных (некогерентных) световых источников, то интерференционный член в среднем равен нулю и интерференция не возникает. Обеспечить согласованность (когерентность) двух световых полей проще всего, взяв одно световое поле и разделив его тем или иным способом на два поля, которые «уже самостоятельны», но еще очень хорошо согласованы друг с другом. Если после этого обеспечить наложение этих двух световых полей друг на друга, мы получим интерференцию. Понятна и «полосатость» интерференционного поля – ведь в каждой точке пространства напряженности интерферирующих световых полей быстро изменяются по гармоническому закону, становясь то положительны-

ми, то отрицательными. Поэтому результат интерференции существенно зависит от разности фаз интерферирующих колебаний, а разность фаз в разных точках пространства разная – вот интерференционное поле и распадается на **темные полосы деструктивной интерференции** (на которых разность фаз равна $\pi + 2\pi k$, где k – любое целое число) и **светлые полосы конструктивной интерференции** (на которых разность фаз равна $2\pi k$, где k – любое целое число). Если вместо разности фаз пользоваться понятием разности хода интерферирующих световых лучей, то условием конструктивной интерференции является кратность оптической разности хода целому числу длин волн ($z = k\lambda$, где k – любое целое число), а условием деструктивной интерференции – кратность оптической разности хода полуцелому числу длин волн ($z = k\lambda + \lambda/2$, где k – любое целое число).

Кольца Ньютона являются частным случаем так называемых **полос равной толщины**. Эти полосы возникают при освещении тонких прозрачных пленок внешним источником света и в белом свете (то есть при освещении пленки белым светом) выглядят как красивые цветные полосы причудливой формы. Появление этих полос пояснено на рис. 8.1. Пусть на слой прозрачного диэлектрика с показателем преломления n и толщиной d падает световой луч. На первой (по ходу луча) границе диэлектрика он частично отражается, а частично проходит внутрь диэлектрика. Прошедший в диэлектрик луч попадает на вторую границу диэлектрика: на ней он частично отражается, а частично преломляется. Отраженный луч возвращается к первой границе диэлектрика и, преломившись на ней, выходит наружу. В результате описанной последовательности отражений и преломлений от слоя диэлектрика идут два отраженных луча: один отражен от первой границы раздела, а второй – от второй[37]. Эти два луча совсем недавно

[37] На самом деле отраженный от второй поверхности раздела луч не полностью выходит наружу – на внешней границе он частично отражается назад в диэлектрик, после чего все описанное выше происходит еще раз – и так до бесконечности. Обдумайте, изменит ли это обстоятельство наши выводы.

были единым целым (падающим лучом), а потому **когерентны** и способны интерферировать друг с другом. Интерференция будет конструктивной тогда, когда оптическая разность хода этих двух лучей (*2d*) будет кратна полуцелому числу длин волн, и деструктивной тогда, когда оптическая разность хода этих двух лучей (*2d*) будет кратна целому числу длин волн. Условия конструктивной и деструктивной интерференции у нас «поменялись местами» потому, что при отражении луча от оптически менее плотной среды происходит изменение фазы волны на π, или, другими словами, «потеря полуволны».

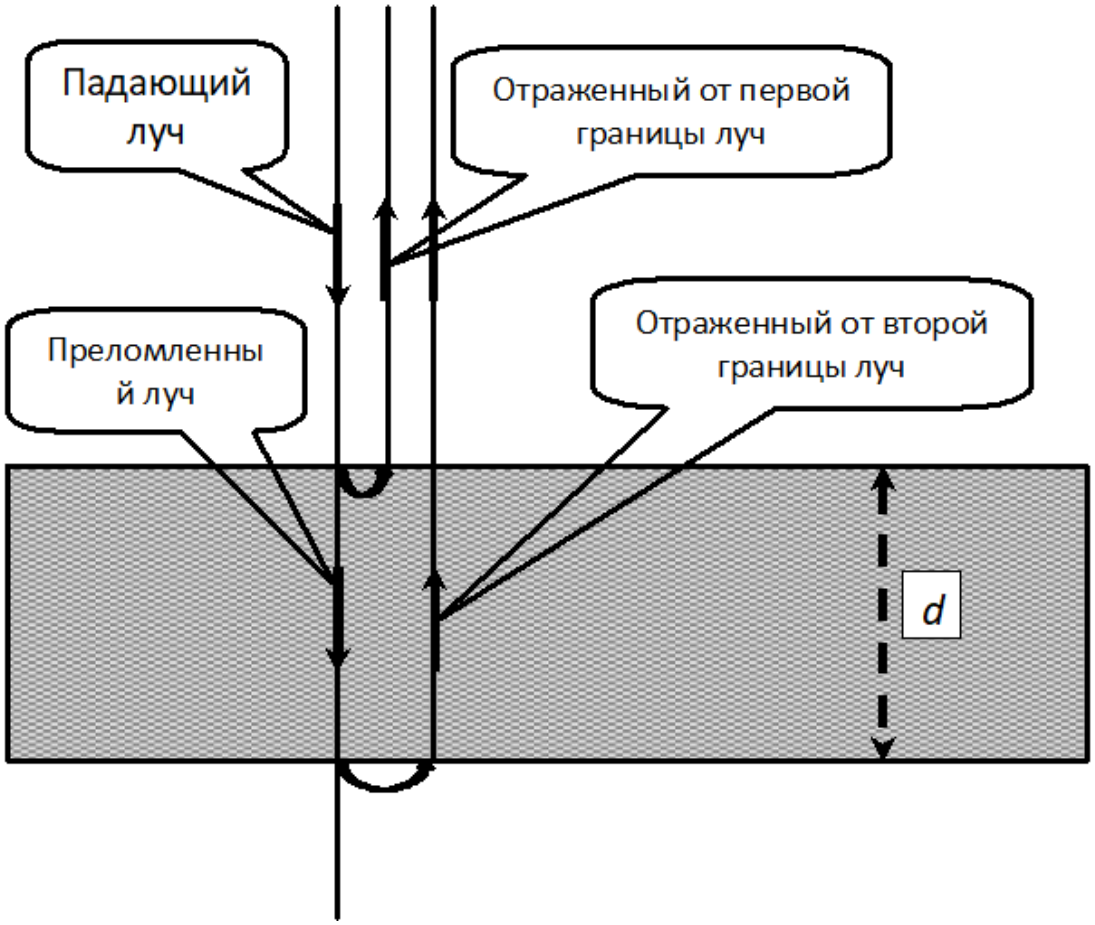


Рис. 8.1. К образованию полос равной толщины

Основным результатом проведенного рассмотрения является вывод о том, что характер интерференции (конструктивная или деструктивная) очень сильно зависит от толщины пластинки: изменение толщины всего на четверть длины волны (то есть примерно на 0,2 мкм) приводит к замене «света на тьму» или наоборот. Если толщина пластины абсолютно одинакова во всех ее точках, то вся пластина

будет одинаково светлая или одинаково темная. Но если толщина пластины хоть чуть-чуть изменяется по ее поверхности, то ее поверхность окажется «пятнистой» – яркой в зонах конструктивной интерференции и темной в зонах интерференции деструктивной. При этом все точки пластины, в которых она имеет одинаковую толщину, светятся одинаково, поэтому и возникающие на поверхности пластины при интерференции полосы и пятна называются полосами равной толщины. Так все происходит в случае освещения пластины (пленки) монохроматическим (одноцветным) светом.

А если осветить пластину белым светом, который состоит из электромагнитных волн с длиной от 7000 Ангстрем (красный свет) до 4000 Ангстрем (фиолетовый свет)? В этом случае практически при любой толщине пластины для какой-нибудь длины волны эта толщина окажется соответствующей конструктивной интерференции и пластина будет ярко сиять именно этим цветом или несколькими цветами, если условия конструктивной интерференции выполнены одновременно для нескольких длин волн. Это вполне возможно: например, при толщине пластины 1,05 мкм = 10500 А мы будем иметь конструктивную интерференцию для длины волны 6000 А (при k=3, красный свет) и одновременно – для длины волны 4667 А (при k=4, синий свет). В случае достаточной толщины пластины в каждой ее точке будут одновременно выполняться условия конструктивной интерференции для большого количества разных длин волн и произойдет наложение большого количества интерференционных максимумов разных цветов и разных порядков. В результате все эти многочисленные цвета сольются в более или менее однородный белый свет и интерференция окажется незаметной. Поэтому наилучшие условия для наблюдения интерференционных полос равной толщины возникают при достаточно тонком слое диэлектрика, и второе название этого эффекта – «**цвета тонких пленок**». Эти цвета действительно возникают в тонких пленках – нефтяных или масляных на поверхности воды, в оксидных пленках на поверхности некоторых металлов и минералов (радужные цвета побежалости), на крыльях бабочек (кото-

рые зачастую окрашены не «краской», а «интерференцией»), на раковинах моллюсков (перламутр, жемчуг), на лазерных дисках и так далее – в общем, везде, где есть тонкая прозрачная пленка.

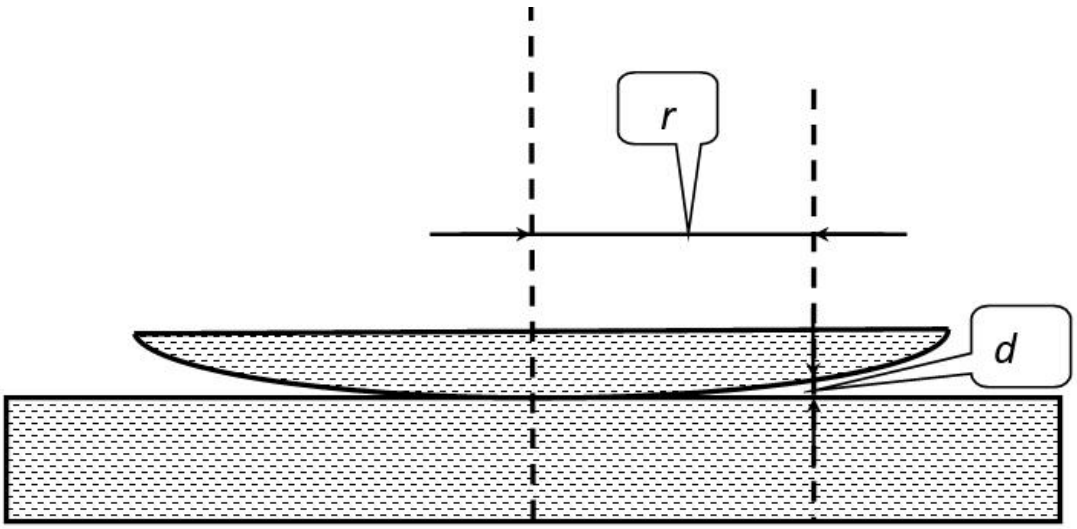


Рис. 8.2. К образованию колец Ньютона

В данной работе мы изучим (вслед за Исааком Ньютоном) цвета тонкой воздушной пленки в «контролируемых» условиях. Речь идет о тонком воздушном клине, образующемся между стеклянной пластиной и положенной на нее выпуклой линзой (рис. 8.2). Все изложенные выше теоретические соображения применимы к этому случаю не хуже, чем к любому другому, ведь и воздух, и стекло – прозрачные диэлектрики, между ними имеются границы раздела, на которых происходит отражение и преломление света, и воздушная пластина в стеклянной среде подходит для наших целей ничуть не хуже, чем стеклянная пластина в воздушной среде. Контролируемость условий в данном случае означает, что воздушный клин между стеклянной пластиной и сферической поверхностью линзы в данном случае является осесимметричным и его толщина зависит от расстояния r до точки контакта линзы (с радиусом кривизны R) и стекла по закону $d = r^2 / R$. Поэтому полосы равной толщины в данном случае – просто семейство концентрических окружностей. Радиус темной полосы с номером k может быть найден по формуле $r_k = \sqrt{k\lambda R}$, а радиус

светлой – по формуле $r_k = \sqrt{(k+1/2)\lambda R}$. Разумеется, при наблюдении в белом свете мы получаем целое семейство перекрывающихся разноцветных окружностей, цвета которых не являются чистыми спектральными цветами (во-первых) и не совпадают с нормальной спектральной последовательностью «каждый охотник желает знать, где сидит фазан» (во-вторых).

Последовательность цветов колец Ньютона при наблюдениях в естественном солнечном свете приведена в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Распределение цветов в спектре колец Ньютона

Порядок	***Цвет***
1	Черный
	Серо-синий
	Зелено-белый
	Соломенно-желтый
	Ярко-желтый
	Коричнево-желтый
	Красновато-оранжевый
	Темно-красный
2	Пурпурный
	Небесно-голубой
	Светло-зеленый
	Чисто желтый
	Темно-фиолетово-красный
3	Светло-синевато-фиолетовый
	Зеленовато-голубой
	Блестяще-зеленый
	Карминово-красный
	Фиолетово-серый

Разумеется, пронаблюдать все эти цвета можно только при следующих условиях:

А. Естественный солнечный свет. Поскольку все цвета колец Ньютона не являются спектрально-чистыми и получились путем

смешивания нескольких спектрально-чистых цветов в разных пропорциях, при изменении распределения энергии по длинам волн в спектре источника света эти цвета могут и должны измениться. В частности, при проведении наблюдений в свете лампы накаливания цвета будут другими, а при проведении наблюдений в свете дампы дневного света (энергосберегающей лампы) – совсем другими, причем разными для разных типов ламп. То, что получается с нашей лампочкой, показано на рис. 8.4.

Б. Очень хорошая освещенность и хорошая оптическая система наблюдения.

В. Наконец, самое «страшное» – наблюдатель, способный оперировать понятиями типа «карминово-красный цвет». Вы знаете, чем «карминово-красный» цвет отличается от «просто красного»? Я тоже не знаю ☹…

Этих условий у вас не будет, тем не менее кое-какие заключения о цвете колец Ньютона вы сделать сможете.

Порядок выполнения работы. Измерения и расчеты

Основной частью установки является круглая металлическая оправа (рис. 8.3, поз. 4), в которой закреплены стеклянная пластинка и прижатая к ней стеклянная линза с большим радиусом кривизны поверхности. Кроме того, вам потребуются настольная лампа (при солнечной погоде можно и должно пользоваться солнечным светом) и лупы для разглядывания колец Ньютона. Препарировальная лупа обеспечивает небольшое увеличение (в два раза), но более удобна в работе; ручная лупа обеспечивает большее увеличение (в пять раз), но менее удобна. Вам следует попользоваться обоими и решить, какая из них нравится вам больше. А еще лучше – пользоваться обеими сразу, то есть «сварганить» из них «типа микроскоп» (см. лаб. раб. № 6-0) – получается очень хорошо.

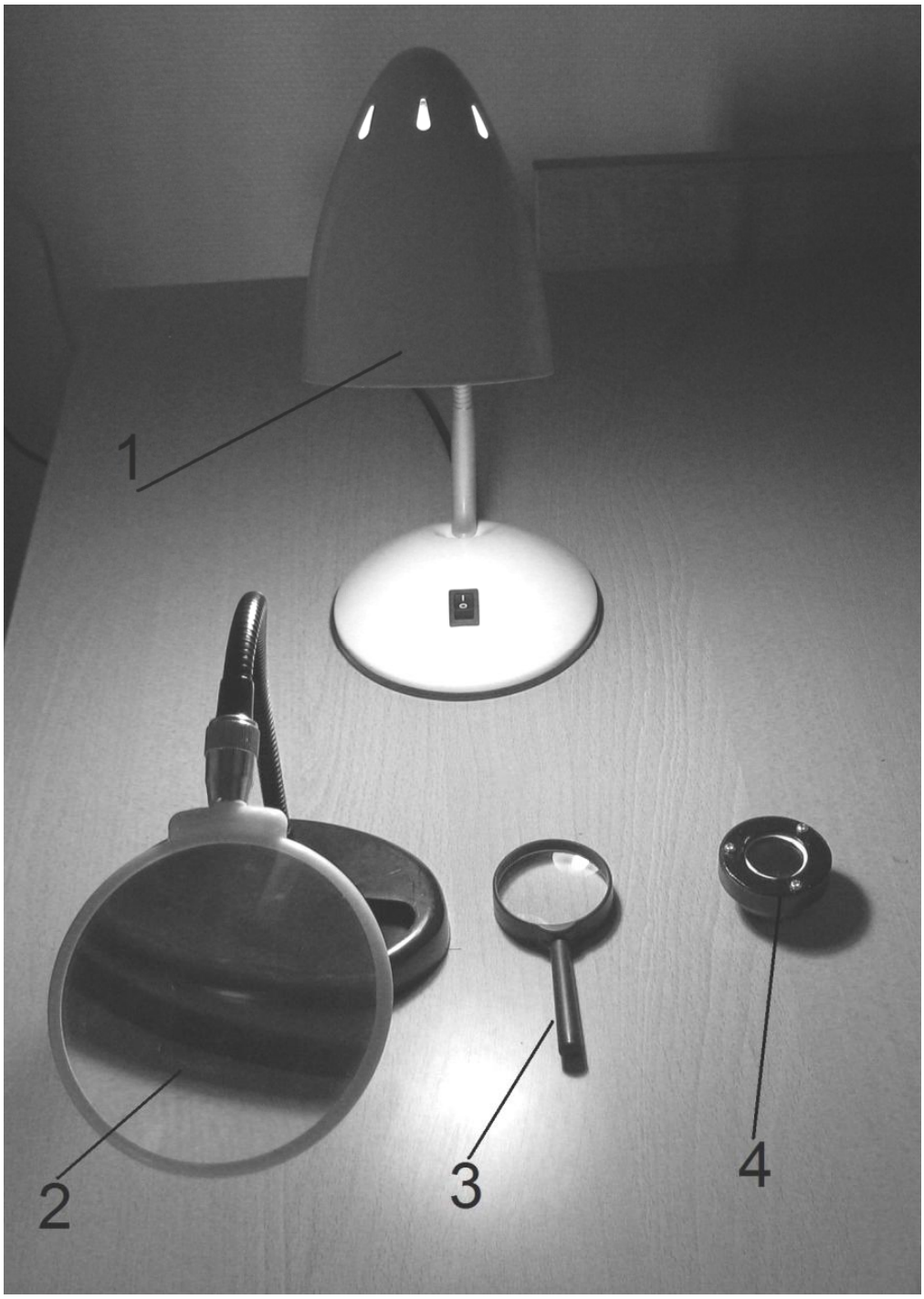


Рис. 8.3. Установка для изучения колец Ньютона:

1 – настольная лампа, 2 – лупа препарировальная, 3 – лупа ручная,
4 – металлическая оправа с линзой, прижатой к стеклянной пластинке

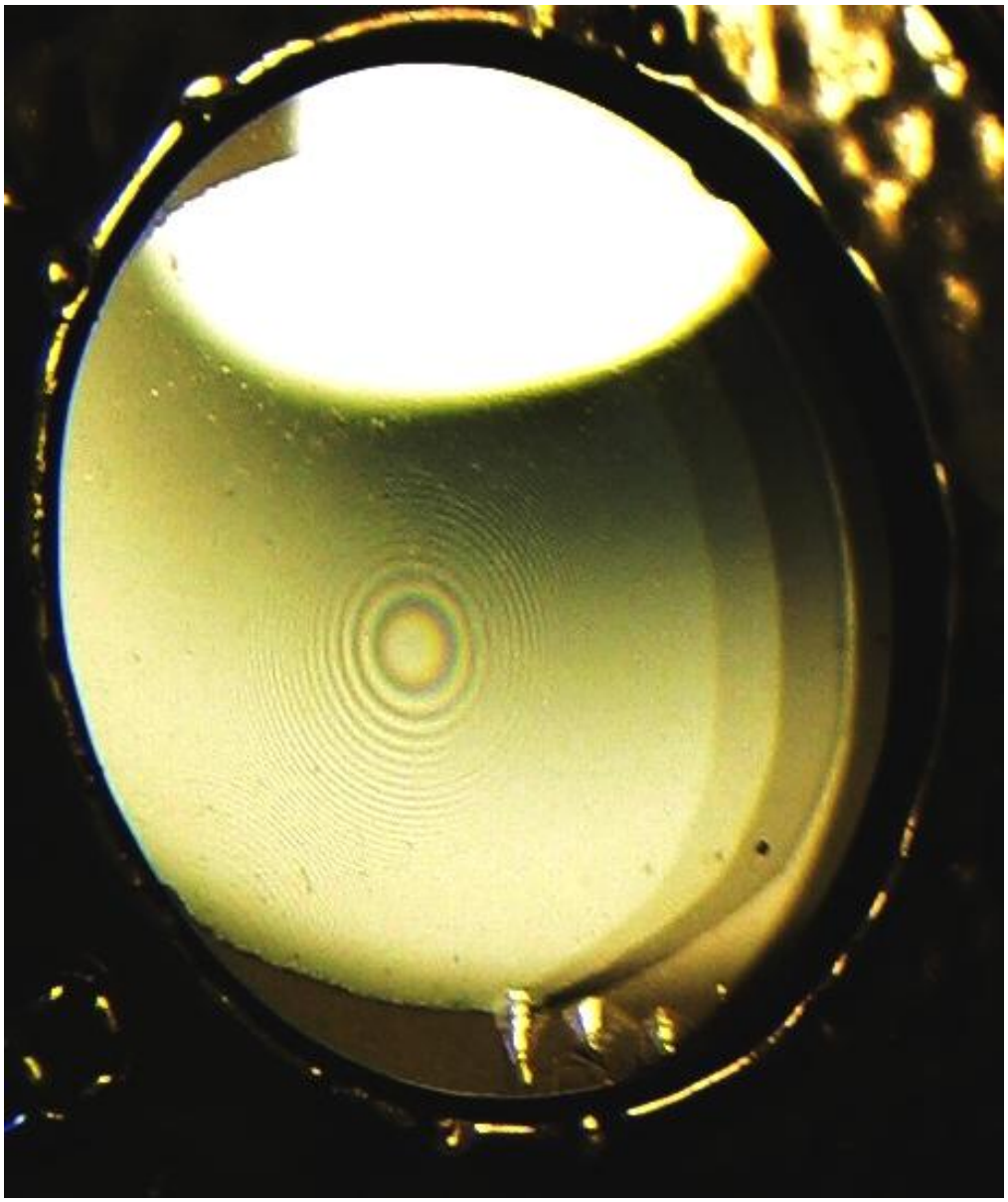


Рис. 8.4. Кольца Ньютона

Вы должны:

1. Взять в руку оправу и рассмотреть отражение хорошо освещенного объекта (например, поверхности энергосберегающей лампы) в верхнем стекле оправы. На фоне этого отражения вы и увидите кольца Ньютона в виде системы концентрических колец (рис. 8.4). Радиус самого маленького кольца составляет около 2 мм.

2. Теперь, когда вы знаете, как все это выглядит «в жизни», вооружитесь лупами и разглядите кольца Ньютона «по-настоящему». Постарайтесь записать последовательность цветов первых трех колец Ньютона в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Наблюдаемая последовательность цветов в спектре колец Ньютона

Порядок	***Цвет***
1	
2	
3	

Не огорчайтесь, если у вас цветов получится меньше, чем у профессионала, в таблице, приведенной во введении: вы не профессионалы и условия у вас далеки от идеала.

3. Сосчитайте, сколько всего вы видите темных колец?

4. Попробуйте сменить источник освещения и посмотреть, изменится ли цвет колец Ньютона.

Контрольные вопросы

1. Всегда ли справедлива геометрическая оптика? Можно ли с помощью геометрической оптики объяснить интерференцию?

2. В чем смысл корпускулярной оптики Ньютона? Как Ньютон объяснял законы геометрической оптики?

3. Как Ньютон объяснял интерференцию?

4. В чем смысл волновой оптики? Какая оптика правильнее – волновая или геометрическая?

5. Всегда ли справедлива волновая оптика?

6. Что такое интерференция? Какие вы можете привести примеры интерференции?

7. Что такое конструктивная интерференция? Когда она возникает? Условие конструктивной интерференции.

8. Что такое деструктивная интерференция? Когда она возникает? Условие деструктивной интерференции.

9. Какова должна быть разность фаз двух интерферирующих световых волн для возникновения конструктивной интерференции?

10. Какова должна быть разность фаз двух интерферирующих световых волн для возникновения деструктивной интерференции?

11. Какова должна быть оптическая разность хода двух интерферирующих световых волн для возникновения конструктивной интерференции?

12. Какова должна быть оптическая разность хода двух интерферирующих световых волн для возникновения деструктивной интерференции?

13. Могут ли интерферировать звуковые волны?

14. Какова должна быть разность фаз двух интерферирующих звуковых волн для возникновения конструктивной интерференции?

15. Какова должна быть разность фаз двух интерферирующих звуковых волн для возникновения деструктивной интерференции?

16. Какова должна быть оптическая разность хода двух интерферирующих звуковых волн для возникновения конструктивной интерференции?

17. Какова должна быть оптическая разность хода двух интерферирующих звуковых волн для возникновения деструктивной интерференции?

18. Могут ли интерферировать акустические волны?

19. Какова должна быть разность фаз двух интерферирующих акустических волн для возникновения конструктивной интерференции?

20. Какова должна быть разность фаз двух интерферирующих акустических волн для возникновения деструктивной интерференции?

21. Какова должна быть оптическая разность хода двух интерферирующих акустических волн для возникновения конструктивной интерференции?

22. Какова должна быть оптическая разность хода двух интерферирующих акустических волн для возникновения деструктивной интерференции?

23. Могут ли интерферировать сейсмические волны?

24. Какова должна быть разность фаз двух интерферирующих сейсмических волн для возникновения конструктивной интерференции?

25. Какова должна быть разность фаз двух интерферирующих сейсмических волн для возникновения деструктивной интерференции?

26. Какова должна быть оптическая разность хода двух интерферирующих сейсмических волн для возникновения конструктивной интерференции?

27. Какова должна быть оптическая разность хода двух интерферирующих сейсмических волн для возникновения деструктивной интерференции?

28. Что такое монохроматические волны? Бывают ли строго монохроматические волны?

29. Что такое частично когерентные волны? Могут ли две строго монохроматические волны одинаковой частоты быть частично когерентными?

30. Что такое частично когерентные волны? Могут ли две строго монохроматические волны одинаковой частоты не быть частично когерентными?

31. Что такое частично когерентные волны? Могут ли две строго монохроматические волны разной частоты быть частично когерентными?

32. Что такое частично когерентные волны? Могут ли две строго монохроматические волны разной частоты не быть частично когерентными?

33. Что такое частично когерентные волны? Могут ли две не полностью монохроматические волны разной частоты быть частично когерентными?

34. Что такое полностью когерентные волны? Могут ли две строго монохроматические волны одинаковой частоты быть полностью когерентными?

35. Что такое полностью когерентные волны? Могут ли две строго монохроматические волны одинаковой частоты не быть полностью когерентными?

36. Что такое полностью когерентные волны? Могут ли две строго монохроматические волны разной частоты быть полностью когерентными?

37. Что такое полностью когерентные волны? Могут ли две строго монохроматические волны разной частоты не быть полностью когерентными?

38. Что такое полностью когерентные волны? Могут ли две не полностью монохроматические волны разной частоты быть полностью когерентными?

9. ДИФРАКЦИЯ. ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА

Основы теории

Материал данной главы пригодится вам при выполнении **экспериментального задания № 9-0 [6,7].** Это задание является прекрасной экспериментальной иллюстрацией изложенного в настоящей главе теоретического материала.

Одним из важнейших разделов физики вообще и теории электромагнитного поля в частности является **оптика – наука о свете**. Долгие тысячи лет единственным разделом оптики была геометрическая оптика, опирающаяся на представление о прямолинейных световых лучах. В XVII веке законы геометрической оптики казались незыблемыми и никаких отклонений от этих законов не предвиделось.

Но в XVII веке прогресс экспериментальной физики привел к открытию явлений интерференции и дифракции, противоречащих простой и ясной корпускулярной теории света. В дальнейшем выяснилось, что **геометрическая оптика – приближенная теория** и что она применима только в ситуациях, когда длину световой волны можно считать исчезающе малой величиной или, что то же самое, когда размеры любых материальных тел, с которыми имеет дело световая волна, велики в сравнении с ее длиной.

Что же такое дифракция? Наиболее общее определение дифракции имеет «негативный» характер: **дифракцией называется любое отклонение от закона геометрической оптики о прямолинейности световых лучей**. В первую очередь речь идет о том, что резкая граница света и тени, возникающая при ограничении светового пучка каким-нибудь экраном, на самом деле не является в точности резкой, а всегда более или менее размыта. Другими словами, световой луч всегда хотя бы чуть-чуть «загибает за угол». Это обстоятельство противоречит основному в геометрической оптике понятию прямолинейного светового луча и показывает, что геометрическая оптика, несмотря на все свои достоинства, все-таки является приближенной теорией.

Не следует думать, что у корпускулярной теории Ньютона (она же – теория истечения) с самого начала не было противников. Уже современник Ньютона Христиан Гюйгенс в 1678 году выступил с альтернативной – волновой – теорией света. Этой же теории придерживался и вечный противник Ньютона Роберт Гук, и Леонард Эйлер, и Михаил Васильевич Ломоносов. Впрочем, несмотря на жаркие и не всегда корректные споры Ньютона и Гука, особого успеха волновая теория не имела. Дело было не только в громадном авторитете Ньютона как создателя классической механики, но и в том, что волновая оптика «от Гука и Гюйгенса» не была стройной, последовательной и разработанной теорией, способной к количественному объяснению имевшихся к тому времени экспериментальных фактов. Скорее это был набор интуитивных представлений, которые в дальнейшем оказались в основном правильными – и не более того. В волновой теории того времени не было, например, даже понятия длины волны, потому что Гюйгенс считал световые волны непериодическими. Поэтому волновая теория того (ньютоновского) времени не только не объясняла, но и в принципе не могла количественно объяснить интерференцию и дифракцию света. Она не могла даже толком объяснить, почему световые лучи в однородной среде распространяются прямолинейно, ведь с точки зрения качественной волновой теории волны и должны всегда «загибать за угол», причем «как следует», а не «чуть-чуть», как это происходит со световыми лучами. Последовательное количественное описание эффектов интерференции и дифракции (и даже законов геометрической оптики как предельного случая волновой оптики при исчезающе малой длине волны) было достигнуто в **волновой оптике** только в XIX веке трудами Томаса Юнга и О.Ж. Френеля. Для этого Френелю пришлось модифицировать уже известный до этого принцип Гюйгенса и сформулировать принцип Гюйгенса – Френеля. Смысл этого принципа состоит в том, что при распространении волны через какое-либо отверстие каждая точка волнового фронта может рассматриваться как источник вторичных сферических волн, интерференция которых порождает волновое поле за отверсти-

ем. Видно, что для объяснения явления дифракции приходится опираться на явление интерференции. Обоснование принципа Гюйгенса – Френеля было дано еще позже в работах Густава Кирхгофа.

Кто и когда открыл дифракцию? Вероятно, первым известным (опубликованным) наблюдением дифракционных эффектов следует считать опыты Гримальди, результаты которых были опубликованы в 1665 году. Чуть позже (в интервале между 1672 и 1675 годами) явление дифракции наблюдал Роберт Гук.

Мы в данной лабораторной работе должны познакомиться с несколько «классическими» дифракционными экспериментами – с дифракцией на одной щели и на двух щелях на дифракционной решетке.

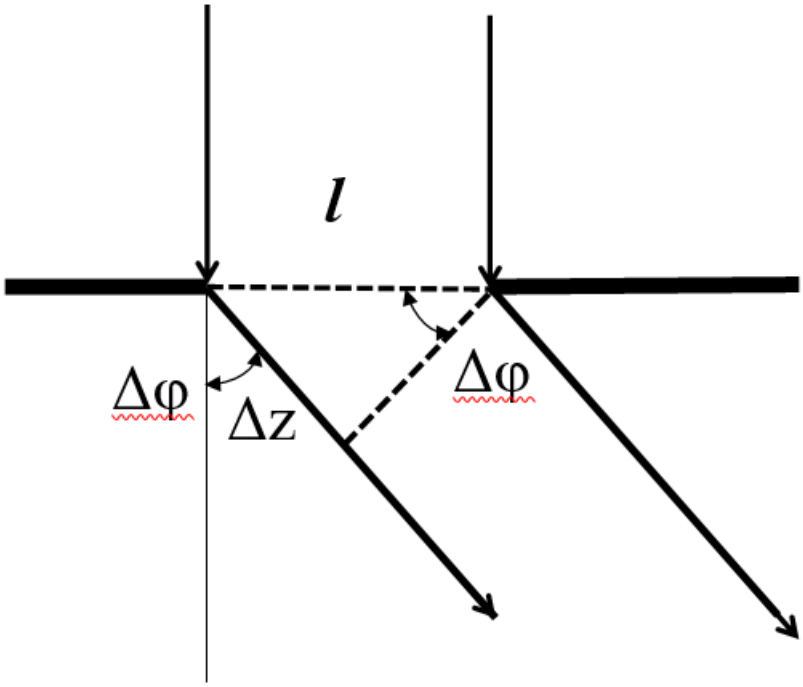


Рис. 9.1. К расчету оптической разности хода двух лучей, идущих под углом Δφ к первоначальному направлению распространения света

Дифракция на одной щели. Строгая (и даже не очень строгая) теория вам «не по зубам», поэтому ограничимся простыми качественными соображениями. Смысл возникающей за щелью дифракционной картинки можно понять, если учесть, что каждый из краев щели выступает как источник рассеянной на крае волны. Интерференция этих двух волн, естественно, порождает интерференционную

картину – систему полос. Для оценки угловой ширины этих полос достаточно воспользоваться известным вам со школьных лет условием деструктивной интерференции: кратность оптической разности хода равна полуцелому числу длин волн ($z = k\lambda + \lambda/2$, где k – любое целое число). Если оптическая разность хода (рис. 9.1) лучей от двух краев щели равна половине длины волны ($\lambda/2$), то образуется интерференционный минимум (темная полоса). Из рисунка видно, что при заданном угле отклонения Δφ для оптической разности хода Δz получается формула $\Delta z = l \sin \Delta\varphi$, где l – ширина щели. Темные полосы (границы светового пучка) появляются при $z = \pm\lambda/2$, то есть при $\Delta\varphi = \pm\lambda/2l$. В результате угловая ширина светового пучка после щели оказывается равна λ/l. Это и есть дифракция: вместо того чтобы распространяться после щели параллельным пучком, луч света расширяется. Если щель достаточно узкая, то угол раскрытия пучка оказывается порядка 1 радиана (1 радиан – это примерно 60^0) и практически щель оказывается точечным источником света, который посылает световые лучи по всем возможным направлениям.

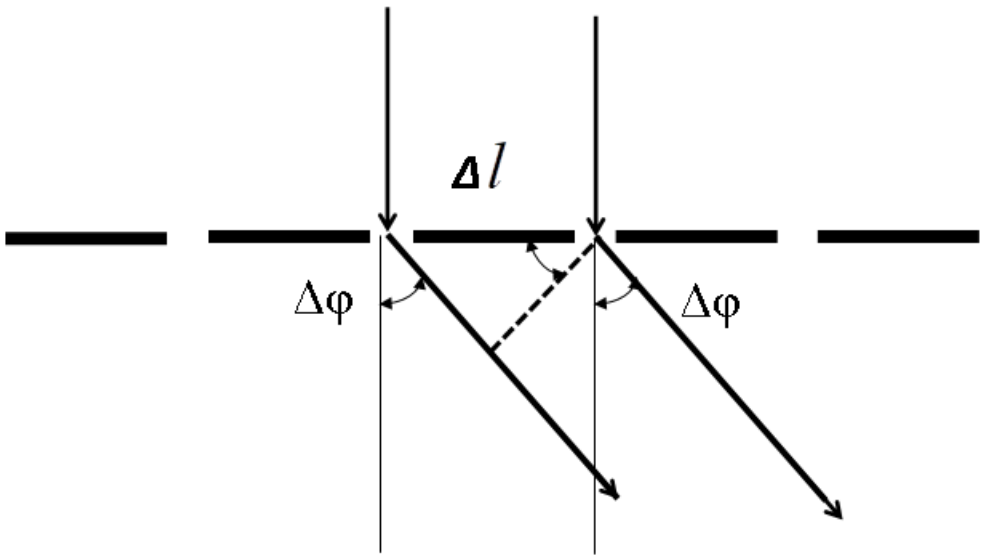


Рис. 9.2. Дифракционная решетка. К расчету оптической разности хода лучей, идущих от двух соседних щелей дифракционной решетки

Дифракционная решетка. Дифракционная решетка (рис. 9.2) – это просто периодическая последовательность достаточно узких

(чтобы «светили» не в одном направлении, а в достаточно широком угле) щелей, расположенных друг от друга на расстоянии Δl, именуемом периодом решетки. Практически дифракционная решетка – это просто стекло, на поверхности которого нанесены параллельные друг другу царапины, причем неповрежденное стекло между царапинами играет роль прозрачной щели, а сами царапины играют роль непрозрачных промежутков между щелями. Поскольку реальным источником света у всех этих щелей является исходный пучок света, излучение разных щелей когерентно и может интерферировать друг с другом. Результат интерференции (взаимное усиление или взаимное гашение волн) зависит от того, чему равна оптическая разность хода лучей от соседних щелей – целому числу длин волн (конструктивная интерференция, взаимное усиление) или полуцелому количеству длин волн (деструктивная интерференция, взаимное ослабление). Рассуждая точно так же, как и при анализе интерференции двух волн от краев щели, нетрудно сообразить, что условие конструктивной интерференции для излучения всех щелей дифракционной решетки имеет вид $\Delta l \sin \Delta\varphi = k\lambda$, где k – любое целое число, именуемое порядком дифракционного максимума.

Теперь понятно, что за дифракционной решеткой будет не один пучок, а несколько. Самый сильный пучок света (дифракционный максимум нулевого порядка, $k = 0, \Delta\varphi = 0$) будет идти «прямо»; два следующие по силе пучка (дифракционные максимумы первого и минус первого порядка, $k = \pm 1, \Delta\varphi = \pm \arcsin(\lambda / \Delta l)$) будут отклонены от первоначального направления распространения светового пучка влево и вправо; два еще более слабых пучка (дифракционные максимумы второго и минус второго порядка, $k = \pm 2, \Delta\varphi = \pm \arcsin(2\lambda / \Delta l)$) будут еще сильнее отклонены от первоначального направления распространения светового пучка влево и вправо и так далее, пока аргумент арксинуса не станет больше единицы.

Разумеется, все написанное выше – идеализация. Обычно ширина щели дифракционной решетки все-таки значительно больше длины

волны света и каждая щель излучает не во всех возможных направлениях, а в достаточно узком диапазоне направлений (несколько градусов); поэтому и вся дифракционная решетка дает только несколько (обычно 2–3) дифракционных максимумов, причем соответствующие им пучки распространяются под небольшими (несколько градусов) углами к плоскости дифракционной решетки. Но и этого вполне хватает.

Существенно, что направление всех световых пучков (кроме соответствующего дифракционному максимуму нулевого порядка) зависит от длины волны излучения: **чем больше длина волны излучения (чем краснее свет), тем сильнее дифракционная решетка отклоняет этот свет**. Сильнее всего отклоняется красный свет, слабее всего – фиолетовый. Поэтому при освещении дифракционной решетки белым светом (который, как известно, представляет собой смесь красного, оранжевого, желтого, зеленого, синего и фиолетового света) возникает исключительно красивая картина – цветные полосы, соответствующие дифракционным максимумам. Эти цветные полосы вам и предстоит пронаблюдать в данной лабораторной работе.

Кстати, не исключено, что при этом вы в первый и последний раз в жизни увидите **истинные** (чистые) цвета. Дело в том, что цветовое восприятие человеческого глаза основано на анализе сигналов от цветовых рецепторов (так называемых «колбочек») трех разных типов, каждый из которых реагирует на определенный участок спектра. При этом вывод о том или ином цвете света делается просто на основе бессознательного анализа соотношения интенсивностей сигналов от этих трех типов рецепторов. В результате свет, который нам кажется чисто зеленым, может не содержать ни одного «зеленого» фотона (то есть ни одного фотона, длина волны которого соответствует зеленой части спектра), а состоять из «синих» и «желтых» фотонов в определенной пропорции. То же самое справедливо и для других цветов.

Порядок выполнения работы. Измерения и расчеты

Общий вид установки показан на рис. 9.3. Основной частью установки является оптическая скамья (1), на которой с помощью

специальных держателей (2) крепятся все остальные элементы установки. Держатели фиксируются на оптической скамье с помощью винтов (3), а оптические элементы фиксируются в держателях с помощью винтов (4).

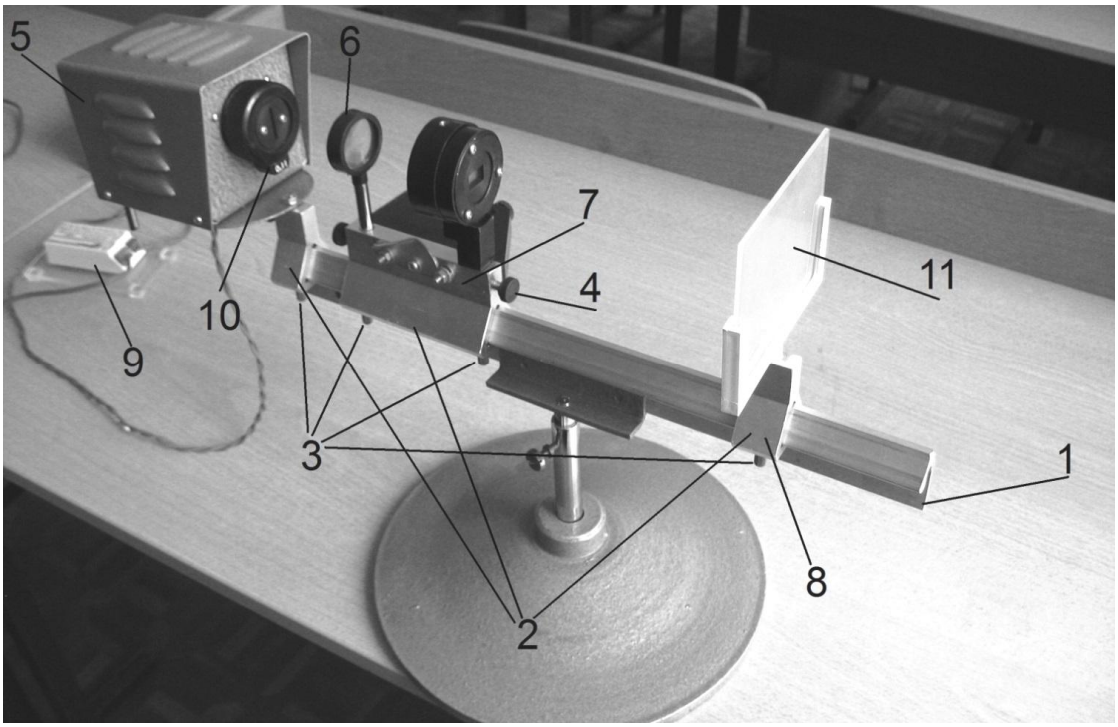


Рис. 9.3. Общий вид установки для изучения дифракции

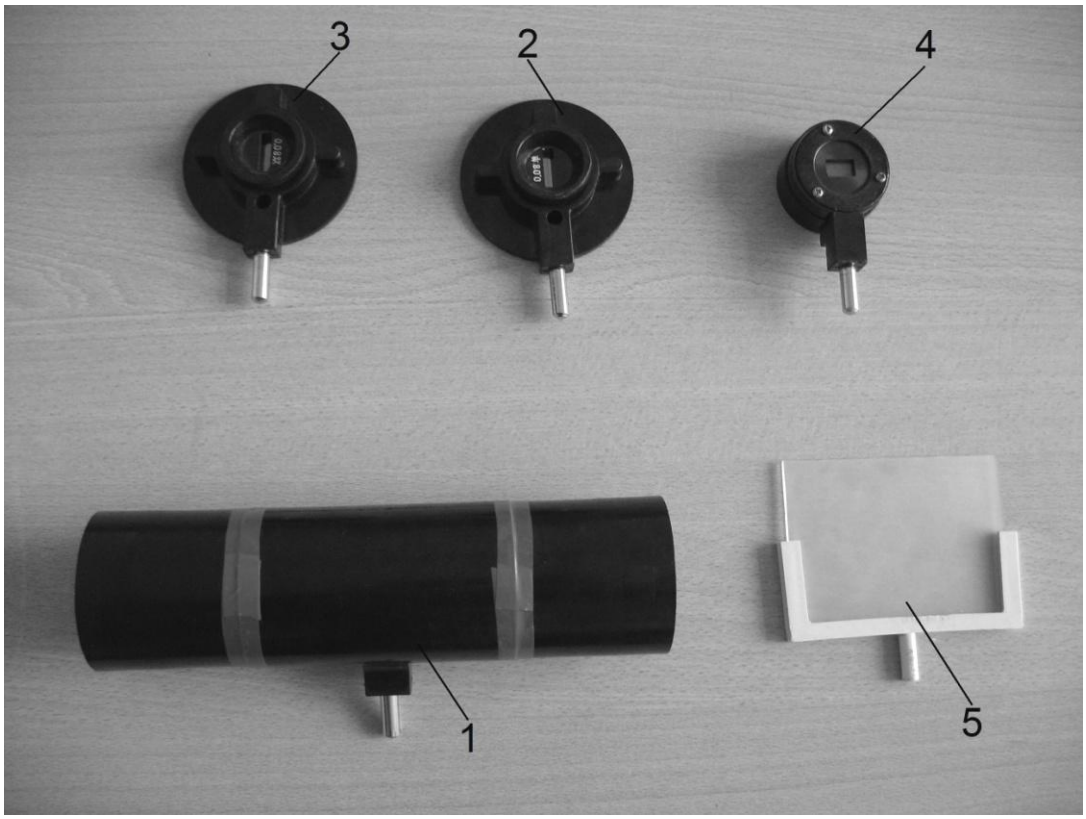


Рис. 9.4. Оптические элементы, устанавливаемые на оптическую скамью

Некоторые элементы (осветитель (5) и линзу (6)) вам трогать не следует вообще. Держатель (7) для линзы, дифракционной решетки, щели и двойной щели отвинчивать от скамьи не нужно, но элементы в нем вам придется заменять – вставлять то один, то другой. Держатель (8) для матового экрана или системы наблюдения вам придется перемещать по оптической скамье (чтобы навести резкость) и заменять установленные в нем элементы (экран или система наблюдения).

Осветитель (5) питается от сети через обычный трансформатор для галогеновых ламп (9), щелевая диафрагма (10) надета на осветитель. Ее задача – сформировать яркий объект для дальнейшего исследования. Установленная на оптической скамье линза (6) служит для создания четкого изображения освещенной щели на матовом экране (11).

Оптические элементы, которые можно устанавливать на оптическую скамью, показаны на рис. 9.4. Вместо матового экрана (поз. 11 рис. 9.3 и поз. 5 рис. 9.4) можно устанавливать систему наблюдения (поз. 1 рис. 9.4). Система наблюдения представляет собой матовый экран, снабженный защитной оправой (для уменьшения посторонней засветки) и лупой (для облегчения наблюдения мелких деталей дифракционной картины). Между лупой и экраном может устанавливаться держатель с одиночной щелью (поз. 2, рис. 9.4), с двойной щелью (поз. 3, рис. 9.4) или с дифракционной решеткой (поз. 4, рис. 9.4). В зависимости от того, что установлено, на экране будет возникать та или иная дифракционная картина.

В случае одиночной щели на экране возникнет яркая, относительно широкая белая полоса (изображение щели), по бокам которой можно разглядеть несколько более бледных узких полос, появление которых связано с дифракцией света на краях щели (рис. 9.5).

Если приглядеться, то можно заметить, что ближние к середине края полос – синеватые, а дальние – красноватые. Это связано с тем, что условие возникновения интерференционного максимума для разных длин волн (то есть цветов) света выполняются в разных точках экрана. Грубо говоря, чем больше длина волны света (то есть чем он

краснее), тем более узкой (для него) оказывается щель и тем сильнее она отклоняет этот свет. Поэтому красные лучи всегда отклоняются сильнее синих. Вызванные дифракцией полосы гораздо уже и бледнее центральной полосы, поэтому наблюдать эту картину лучше с использованием «системы наблюдения».

В случае двойной щели на экране возникнет почти та же картина, но без изображения центральной щели (рис. 9.6).

Рис. 9.5. Дифракция на одной щели (цв. 146)

Рис. 9.6. Дифракция на двух щелях

Действительно, две расположенные рядом щели можно рассматривать как одну щель с краями, но без промежутка (почти как у Чеширского Кота: улыбка еще есть, а кота уже нет). Поэтому дифракционная картина (узкие полосы) остается той же самой, но широкое и яркое изображение центральной щели исчезает – вместо него появляется дифракционный максимум нулевого порядка – белый, но узкий. Остальные дифракционные максимумы выглядят примерно как в первом случае, но расстояние между ними больше просто потому, что расстояние

между щелями меньше, чем ширина одной щели: по формуле $\Delta l \sin \Delta\varphi = k\lambda$ чем больше расстояние между источниками интерферирующих волн, тем меньше расстояние между дифракционными максимумами, и наоборот. Ясно, что дифракционные полосы без «засветки» видны гораздо лучше, чем в первом случае. Эту картинку можно увидеть и просто на матовом экране, но лучше все-таки использовать «систему наблюдения».

В случае дифракционной решетки на экране возникает яркая узкая белая полоса (дифракционный максимум нулевого порядка), по бокам которой очень хорошо видны несколько (обычно три слева и три справа) цветных спектров (дифракционные максимумы высших порядков, см. рис. 9.7). Цвета в этих спектрах расположены в нормальном порядке («Каждый Охотник Желает Знать, Где Сидит Фазан») – ближе к середине синий, дальше – красный. Яркость картинки весьма высока, так что ее прекрасно видно и на обычном матовом экране.

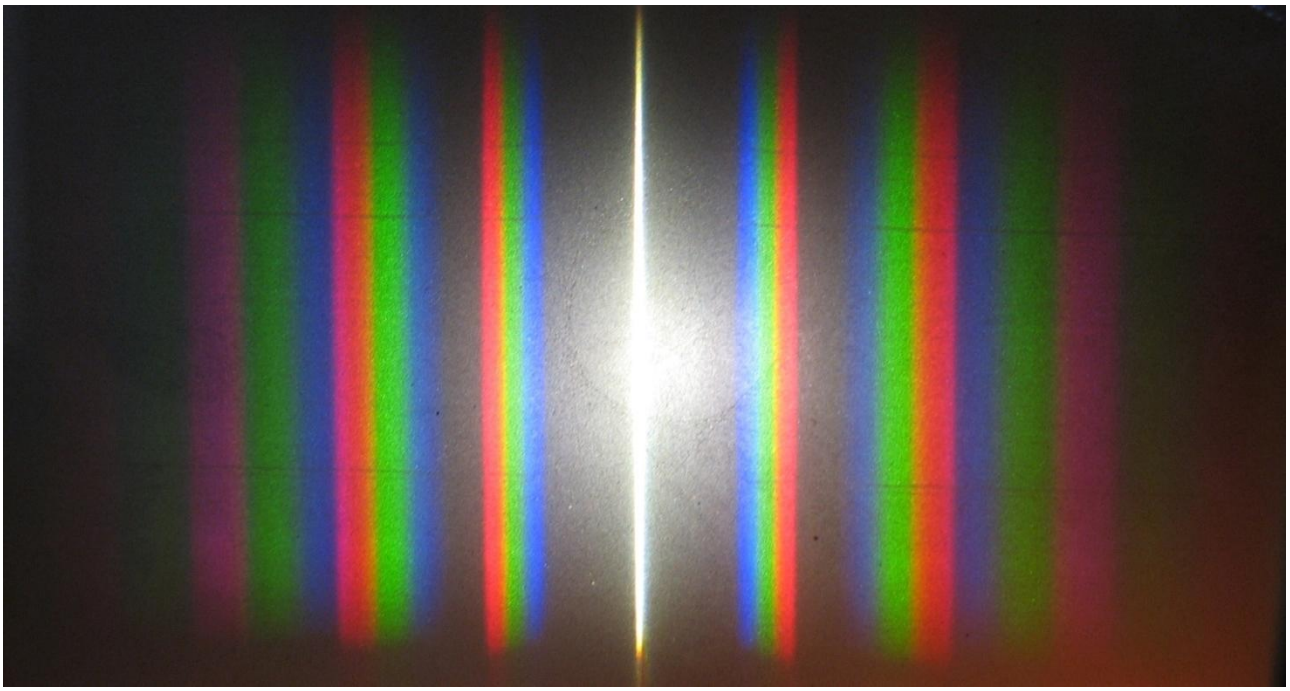


Рис. 9.7. Дифракция на дифракционной решетке

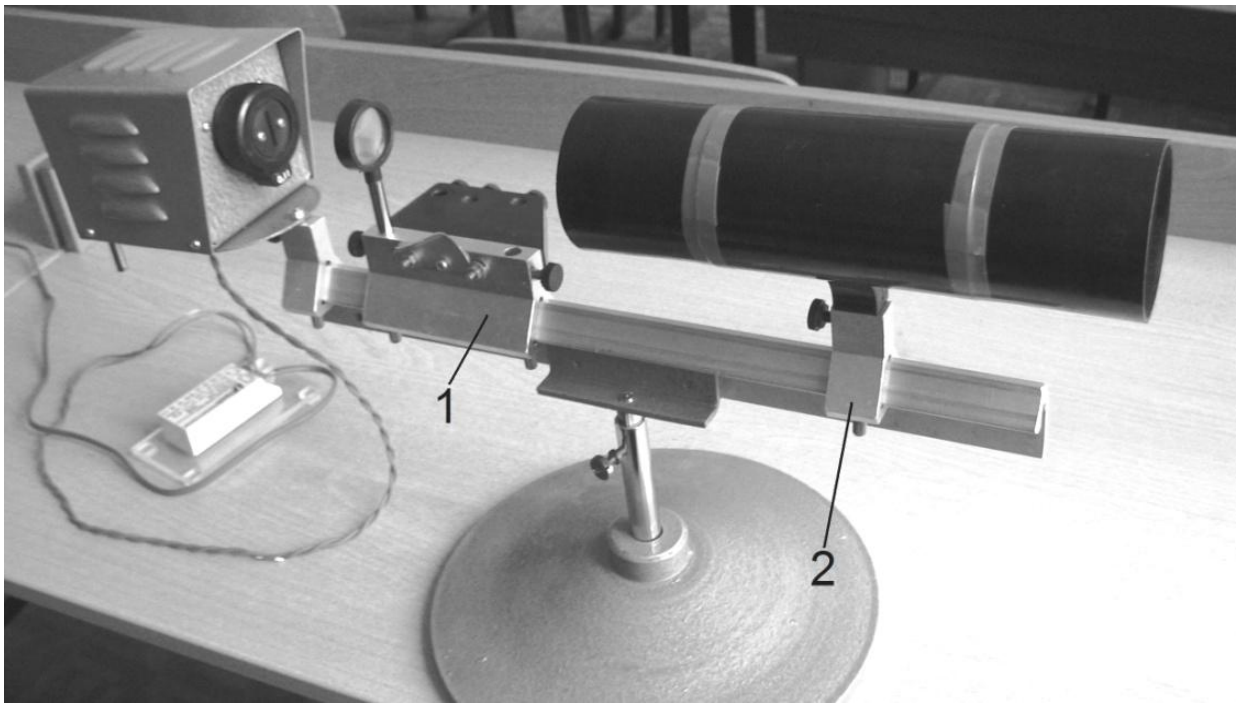


Рис. 9.8. Стартовое состояние установки для изучения дифракции. В держатель 1 поочередно вставляется одиночная щель, двойная щель и дифракционная решетка. В держатель 2 поочередно вставляется система наблюдения и простой матовый экран

Вы должны сделать следующее:

1. Проверьте, что источник света и линза на месте. Их вам трогать не следует.

2. Проверьте, что в держателе для дифракционной решетки, одиночной щели или двойной щели (поз. 1 рис. 9.8) ничего нет и что он закреплен на оптической скамье. Отвинчивать его вам не следует – пусть стоит, где стоит. Если в держателе что-нибудь есть – вытащите и положите в ящик.

3. Проверьте, что в держателе для системы наблюдения или матового экрана (поз. 2 рис. 9.8) установлена система наблюдения. Если установлено что-нибудь другое – вытащите и положите в ящик, а систему наблюдения вставьте и закрепите винтом, чтобы не болталась (закрепите систему наблюдения в держателе, а не держатель на оптической скамье: это разные вещи).

4. Таким образом, стартовое состояние установки должно соответствовать изображенному на рис. 9.8.

5. Включите в сеть источник питания для лампы.

6. Перемещая держатель с системой наблюдения (поз. 2 рис. 141) по оптической скамье, добейтесь резкого изображения щелевой диафрагмы на матовом стекле. После этого зафиксируйте систему наблюдения на оптической скамье.

7. Вставьте в держатель (поз. 1 рис. 9.8) оправу с одиночной щелью. Рассмотрите и зарисуйте (или сфотографируйте на мобильник) полученную картинку.

8. Вставьте в держатель оправу с двойной щелью. Рассмотрите и зарисуйте (или сфотографируйте на мобильник) полученную картинку.

9. Вставьте в держатель оправу с дифракционной решеткой. Рассмотрите и зарисуйте (или сфотографируйте на мобильник) полученную картинку.

10. Замените систему наблюдения в держателе (поз. 2 рис. 9.8) на матовый экран и повторите пункты 6, 7, 8 и 9. В каких случаях изображение на матовом экране лучше, а в каких случаях – хуже, чем при использовании системы наблюдения?

11. Приведите установку в исходное состояние – вытащите из держателя 1 дифракционную решетку и положите ее в ящик, установите в держатель 2 систему наблюдения, выключите ток.

Контрольные вопросы

1. Что такое дифракция? Как она проявляется?

2. Можно ли объяснить дифракцию с помощью геометрической оптики?

3. Можно ли объяснить дифракцию с помощью волновой оптики?

4. Все ли оптические явления можно объяснить с помощью волновой оптики?

5. Какие оптические явления нельзя объяснить с помощью волновой оптики?

6. Кто и когда впервые наблюдал дифракцию?

7. Какая оптика правильнее – волновая или геометрическая?

8. Свет является волной или потоком корпускул (то есть фотонов)? Как отвечал на этот вопрос Ньютон?

9. Свет является волной или потоком корпускул (то есть фотонов)? Как отвечал на этот вопрос Гук?

10. Свет является волной или потоком корпускул (то есть фотонов)? Как отвечал на этот вопрос Галилей?

11. Свет является волной или потоком корпускул (то есть фотонов)? Как отвечал на этот вопрос Эйнштейн?

12. Свет является волной или потоком корпускул (то есть фотонов)? Как отвечал на этот вопрос Френель?

13. Свет является волной или потоком корпускул (то есть фотонов)? Как отвечал на этот вопрос Снеллиус?

14. Свет является волной или потоком корпускул (то есть фотонов)? Как вы ответите на этот вопрос?

15. Кто из известных ученых считал свет волной?

16. В чем смысл корпускулярной оптики Ньютона? Как Ньютон объяснял законы геометрической оптики?

17. Какая картина возникает при дифракции на одной щели? Почему?

18. Какая картина возникает при дифракции на двух щелях? Почему?

19. Что такое дифракционная решетка? Как она устроена?

20. Можно ли считать тюремную решетку дифракционной решеткой? При каких условиях? Для какой длины каких волн?

21. Можно ли считать «Рабицу» дифракционной решеткой? При каких условиях? Для какой длины каких волн?

22. Можно ли считать тюль на окне дифракционной решеткой? При каких условиях? Для какой длины каких волн?

23. Какая картина возникает при дифракции на дифракционной решетке? Почему?

24. Какой свет испытывает более значительное отклонение в случае возникновения дифракционных эффектов – синий или красный? Почему?

25. Какой свет испытывает более значительное отклонение в случае возникновения дифракционных эффектов – синий или желтый? Почему?

26. Какой свет испытывает более значительное отклонение в случае возникновения дифракционных эффектов – синий или оранжевый? Почему?

27. Какой свет испытывает более значительное отклонение в случае возникновения дифракционных эффектов – синий или зеленый? Почему?

28. Какой свет испытывает более значительное отклонение в случае возникновения дифракционных эффектов – синий или фиолетовый? Почему?

29. Какой свет испытывает более значительное отклонение в случае возникновения дифракционных эффектов – красный или синий? Почему?

30. Какой свет испытывает более значительное отклонение в случае возникновения дифракционных эффектов – красный или желтый? Почему?

31. Какой свет испытывает более значительное отклонение в случае возникновения дифракционных эффектов – красный или оранжевый? Почему?

32. Какой свет испытывает более значительное отклонение в случае возникновения дифракционных эффектов – красный или зеленый? Почему?

33. Какой свет испытывает более значительное отклонение в случае возникновения дифракционных эффектов – красный или фиолетовый? Почему?

34. Какой свет испытывает более значительное отклонение в случае возникновения дифракционных эффектов – оранжевый или красный? Почему?

35. Какой свет испытывает более значительное отклонение в случае возникновения дифракционных эффектов – оранжевый или желтый? Почему?

36. Какой свет испытывает более значительное отклонение в случае возникновения дифракционных эффектов – оранжевый или голубой? Почему?

37. Какой свет испытывает более значительное отклонение в случае возникновения дифракционных эффектов – оранжевый или зеленый? Почему?

38. Какой свет испытывает более значительное отклонение в случае возникновения дифракционных эффектов – оранжевый или фиолетовый? Почему?

39. Какой свет испытывает более значительное отклонение в случае возникновения дифракционных эффектов – желтый или красный? Почему?

40. Какой свет испытывает более значительное отклонение в случае возникновения дифракционных эффектов – желтый или синий? Почему?

41. Какой свет испытывает более значительное отклонение в случае возникновения дифракционных эффектов – желтый или оранжевый? Почему?

42. Какой свет испытывает более значительное отклонение в случае возникновения дифракционных эффектов – желтый или зеленый? Почему?

43. Какой свет испытывает более значительное отклонение в случае возникновения дифракционных эффектов – желтый или фиолетовый? Почему?

44. Какой свет испытывает более значительное отклонение в случае возникновения дифракционных эффектов – зеленый или красный? Почему?

45. Какой свет испытывает более значительное отклонение в случае возникновения дифракционных эффектов – зеленый или желтый? Почему?

46. Какой свет испытывает более значительное отклонение в случае возникновения дифракционных эффектов – зеленый или оранжевый? Почему?

47. Какой свет испытывает более значительное отклонение в случае возникновения дифракционных эффектов – зеленый или синий? Почему?

48. Какой свет испытывает более значительное отклонение в случае возникновения дифракционных эффектов – зеленый или фиолетовый? Почему?

49. Какой свет испытывает более значительное отклонение в случае возникновения дифракционных эффектов – фиолетовый или красный? Почему?

50. Какой свет испытывает более значительное отклонение в случае возникновения дифракционных эффектов – фиолетовый или желтый? Почему?

51. Какой свет испытывает более значительное отклонение в случае возникновения дифракционных эффектов – фиолетовый или оранжевый? Почему?

52. Какой свет испытывает более значительное отклонение в случае возникновения дифракционных эффектов – фиолетовый или зеленый? Почему?

53. Какой свет испытывает более значительное отклонение в случае возникновения дифракционных эффектов – фиолетовый или голубой? Почему?

54. У какого света больше длина волны – у инфракрасного или у красного? (Не знаете? Интернет в помощь!)

55. У какого света больше длина волны – у инфракрасного или у оранжевого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

56. У какого света больше длина волны – у инфракрасного или у желтого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

57. У какого света больше длина волны – у инфракрасного или у зеленого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

58. У какого света больше длина волны – у инфракрасного или у голубого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

59. У какого света больше длина волны – у инфракрасного или у синего? (Не знаете? Интернет в помощь!)

60. У какого света больше длина волны – у инфракрасного или у фиолетового? (Не знаете? Интернет в помощь!)

61. У какого света больше длина волны – у инфракрасного или у ультрафиолетового? (Не знаете? Интернет в помощь!)

62. У какого света больше частота – у инфракрасного или у красного? (Не знаете? Интернет в помощь!)

63. У какого света больше частота – у инфракрасного или у оранжевого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

64. У какого света больше частота – у инфракрасного или у желтого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

65. У какого света больше частота – у инфракрасного или у зеленого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

66. У какого света больше частота – у инфракрасного или у голубого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

67. У какого света больше частота – у инфракрасного или у синего? (Не знаете? Интернет в помощь!)

68. У какого света больше частота – у инфракрасного или у фиолетового? (Не знаете? Интернет в помощь!)

69. У какого света больше частота – у инфракрасного или у ультрафиолетового? (Не знаете? Интернет в помощь!)

70. У какого света больше длина волны – у красного или у инфракрасного? (Не знаете? Интернет в помощь!)

71. У какого света больше длина волны – у красного или у оранжевого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

72. У какого света больше длина волны – у красного или у желтого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

73. У какого света больше длина волны – у красного или у зеленого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

74. У какого света больше длина волны – у красного или у голубого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

75. У какого света больше длина волны – у красного или у синего? (Не знаете? Интернет в помощь!)

76. У какого света больше длина волны – у красного или у фиолетового? (Не знаете? Интернет в помощь!)

77. У какого света больше длина волны – у красного или у ультрафиолетового? (Не знаете? Интернет в помощь!)

78. У какого света больше частота – у красного или у инфракрасного? (Не знаете? Интернет в помощь!)

79. У какого света больше частота – у красного или у оранжевого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

80. У какого света больше частота – у красного или у желтого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

81. У какого света больше частота – у красного или у зеленого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

82. У какого света больше частота – у красного или у голубого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

83. У какого света больше частота – у красного или у синего? (Не знаете? Интернет в помощь!)

84. У какого света больше частота – у красного или у фиолетового? (Не знаете? Интернет в помощь!)

85. У какого света больше частота – у красного или у ультрафиолетового? (Не знаете? Интернет в помощь!)

86. У какого света больше длина волны – у желтого или у красного? (Не знаете? Интернет в помощь!)

87. У какого света больше длина волны – у желтого или у оранжевого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

88. У какого света больше длина волны – у желтого или у инфракрасного? (Не знаете? Интернет в помощь!)

89. У какого света больше длина волны – у желтого или у зеленого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

90. У какого света больше длина волны – у желтого или у голубого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

91. У какого света больше длина волны – у желтого или у синего? (Не знаете? Интернет в помощь!)

92. У какого света больше длина волны – у желтого или у фиолетового? (Не знаете? Интернет в помощь!)

93. У какого света больше длина волны – у желтого или у ультрафиолетового? (Не знаете? Интернет в помощь!)

94. У какого света больше частота – у желтого или у красного? (Не знаете? Интернет в помощь!)

95. У какого света больше частота – у желтого или у оранжевого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

96. У какого света больше частота – у желтого или у инфракрасного? (Не знаете? Интернет в помощь!)

97. У какого света больше частота – у желтого или у зеленого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

98. У какого света больше частота – у желтого или у голубого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

99. У какого света больше частота – у желтого или у синего? (Не знаете? Интернет в помощь!)

100. У какого света больше частота – у желтого или у фиолетового? (Не знаете? Интернет в помощь!)

101. У какого света больше частота – у желтого или у ультрафиолетового? (Не знаете? Интернет в помощь!)

102. У какого света больше длина волны – у зеленого или у красного? (Не знаете? Интернет в помощь!)

103. У какого света больше длина волны – у зеленого или у оранжевого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

104. У какого света больше длина волны – у зеленого или у желтого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

105. У какого света больше длина волны – у зеленого или у инфракрасного? (Не знаете? Интернет в помощь!)

106. У какого света больше длина волны – у зеленого или у голубого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

107. У какого света больше длина волны – у зеленого или у синего? (Не знаете? Интернет в помощь!)

108. У какого света больше длина волны – у зеленого или у фиолетового? (Не знаете? Интернет в помощь!)

109.У какого света больше длина волны – у зеленого или у ультрафиолетового? (Не знаете? Интернет в помощь!)

110.У какого света больше частота – у зеленого или у красного? (Не знаете? Интернет в помощь!)

111.У какого света больше частота – у зеленого или у оранжевого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

112.У какого света больше частота – у зеленого или у желтого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

113.У какого света больше частота – у зеленого или у инфракрасного? (Не знаете? Интернет в помощь!)

114.У какого света больше частота – у зеленого или у голубого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

115.У какого света больше частота – у зеленого или у синего? (Не знаете? Интернет в помощь!)

116.У какого света больше частота – у зеленого или у фиолетового? (Не знаете? Интернет в помощь!)

117.У какого света больше частота – у зеленого или у ультрафиолетового? (Не знаете? Интернет в помощь!)

118.У какого света больше длина волны – у голубого или у красного? (Не знаете? Интернет в помощь!)

119.У какого света больше длина волны – у голубого или у оранжевого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

120.У какого света больше длина волны – у голубого или у желтого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

121.У какого света больше длина волны – у голубого или у зеленого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

122.У какого света больше длина волны – у голубого или у инфракрасного? (Не знаете? Интернет в помощь!)

123.У какого света больше длина волны – у голубого или у синего? (Не знаете? Интернет в помощь!)

124.У какого света больше длина волны – у голубого или у фиолетового? (Не знаете? Интернет в помощь!)

125.У какого света больше длина волны – у голубого или у ультрафиолетового? (Не знаете? Интернет в помощь!)

126.У какого света больше частота – у голубого или у красного? (Не знаете? Интернет в помощь!)

127.У какого света больше частота – у голубого или у оранжевого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

128.У какого света больше частота – у голубого или у желтого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

129.У какого света больше частота – у голубого или у зеленого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

130.У какого света больше частота – у голубого или у инфракрасного? (Не знаете? Интернет в помощь!)

131.У какого света больше частота – у голубого или у синего? (Не знаете? Интернет в помощь!)

132.У какого света больше частота – у голубого или у фиолетового? (Не знаете? Интернет в помощь!)

133.У какого света больше частота – у голубого или у ультрафиолетового? (Не знаете? Интернет в помощь!)

134.У какого света больше длина волны – у синего или у красного? (Не знаете? Интернет в помощь!)

135.У какого света больше длина волны – у синего или у оранжевого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

136.У какого света больше длина волны – у синего или у желтого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

137.У какого света больше длина волны – у синего или у зеленого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

138.У какого света больше длина волны – у синего или у голубого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

139.У какого света больше длина волны – у синего или у инфракрасного? (Не знаете? Интернет в помощь!)

140.У какого света больше длина волны – у синего или у фиолетового? (Не знаете? Интернет в помощь!)

141.У какого света больше длина волны – у синего или у ультрафиолетового? (Не знаете? Интернет в помощь!)

142.У какого света больше частота – у синего или у красного? (Не знаете? Интернет в помощь!)

143.У какого света больше частота – у синего или у оранжевого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

144.У какого света больше частота – у синего или у желтого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

145.У какого света больше частота – у синего или у зеленого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

146.У какого света больше частота – у синего или у голубого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

147.У какого света больше частота – у синего или у инфракрасного? (Не знаете? Интернет в помощь!)

148.У какого света больше частота – у синего или у фиолетового? (Не знаете? Интернет в помощь!)

149.У какого света больше частота – у синего или у ультрафиолетового? (Не знаете? Интернет в помощь!)

150.У какого света больше длина волны – у фиолетового или у красного? (Не знаете? Интернет в помощь!)

151.У какого света больше длина волны – у фиолетового или у оранжевого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

152.У какого света больше длина волны – у фиолетового или у желтого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

153.У какого света больше длина волны – у фиолетового или у зеленого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

154.У какого света больше длина волны – у фиолетового или у голубого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

155.У какого света больше длина волны – у фиолетового или у синего? (Не знаете? Интернет в помощь!)

156.У какого света больше длина волны – у фиолетового или у инфракрасного? (Не знаете? Интернет в помощь!)

157.У какого света больше длина волны – у фиолетового или у ультрафиолетового? (Не знаете? Интернет в помощь!)

158.У какого света больше частота – у фиолетового или у красного? (Не знаете? Интернет в помощь!)

159.У какого света больше частота – у фиолетового или у оранжевого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

160.У какого света больше частота – у фиолетового или у желтого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

161.У какого света больше частота – у фиолетового или у зеленого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

162.У какого света больше частота – у фиолетового или у голубого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

163.У какого света больше частота – у фиолетового или у синего? (Не знаете? Интернет в помощь!)

164.У какого света больше частота – у фиолетового или у инфракрасного? (Не знаете? Интернет в помощь!)

165.У какого света больше частота – у фиолетового или у ультрафиолетового? (Не знаете? Интернет в помощь!)

166.У какого света больше длина волны – у ультрафиолетового или у красного? (Не знаете? Интернет в помощь!)

167.У какого света больше длина волны – у ультрафиолетового или у оранжевого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

168.У какого света больше длина волны – у ультрафиолетового или у желтого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

169.У какого света больше длина волны – у ультрафиолетового или у зеленого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

170.У какого света больше длина волны – у ультрафиолетового или у голубого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

171.У какого света больше длина волны – у ультрафиолетового или у синего? (Не знаете? Интернет в помощь!)

172.У какого света больше длина волны – у ультрафиолетового или у фиолетового? (Не знаете? Интернет в помощь!)

173.У какого света больше длина волны – у ультрафиолетового или у инфракрасного? (Не знаете? Интернет в помощь!)

174.У какого света больше частота – у ультрафиолетового или у красного? (Не знаете? Интернет в помощь!)

175.У какого света больше частота – у ультрафиолетового или у оранжевого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

176.У какого света больше частота – у ультрафиолетового или у желтого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

177.У какого света больше частота – у ультрафиолетового или у зеленого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

178.У какого света больше частота – у ультрафиолетового или у голубого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

179.У какого света больше частота – у ультрафиолетового или у синего? (Не знаете? Интернет в помощь!)

180.У какого света больше частота – у ультрафиолетового или у фиолетового? (Не знаете? Интернет в помощь!)

181.У какого света больше частота – у ультрафиолетового или у инфракрасного? (Не знаете? Интернет в помощь!)

182.У какого света больше длина волны – у цвета хаки или у красного? (Не знаете? Интернет в помощь!)

183.У какого света больше длина волны – у цвета хаки или у оранжевого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

184.У какого света больше длина волны – у цвета хаки или у желтого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

185.У какого света больше длина волны – у цвета хаки или у зеленого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

186.У какого света больше длина волны – у цвета хаки или у голубого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

187.У какого света больше длина волны – у цвета хаки или у синего? (Не знаете? Интернет в помощь!)

188.У какого света больше длина волны – у цвета хаки или у фиолетового? (Не знаете? Интернет в помощь!)

189.У какого света больше длина волны – у цвета хаки или у ультрафиолетового? (Не знаете? Интернет в помощь!)

190.У какого света больше частота – у цвета хаки или у красного? (Не знаете? Интернет в помощь!)

191.У какого света больше частота – у цвета хаки или у оранжевого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

192.У какого света больше частота – у цвета хаки или у желтого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

193.У какого света больше частота – у цвета хаки или у зеленого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

194.У какого света больше частота – у цвета хаки или у голубого? (Не знаете? Интернет в помощь!)

195.У какого света больше частота – у цвета хаки или у синего? (Не знаете? Интернет в помощь!)

196.У какого света больше частота – у цвета хаки или у фиолетового? (Не знаете? Интернет в помощь!)

197.У какого света больше частота – у цвета хаки или у ультрафиолетового? (Не знаете? Интернет в помощь!)

10. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ. ИЗУЧЕНИЕ СТОЛКНОВЕНИЯ ТЕЛ

Основы теории

Материал данной главы пригодится вам при выполнении **экспериментального задания № 1-I [8].** Это задание является прекрасной экспериментальной иллюстрацией изложенного в настоящей главе теоретического материала.

В механике под ударом следует понимать кратковременное взаимодействие двух или более тел, возникающее в результате их соприкосновения. Например, столкновение шаров, удар молота о наковальню, попадание пули в мишень и т.д. При соударении тела деформируются. При этом кинетическая энергия, которой обладали тела перед ударом, частично или полностью переходит в потенциальную энергию упругой деформации и во внутреннюю энергию тел. Увеличение внутренней энергии тел сопровождается повышением их температуры.

Существуют два предельных вида удара: абсолютно упругий и абсолютно неупругий.

Абсолютно упругим называется такой удар, при котором механическая энергия тел не переходит в другие, немеханические виды энергии. При таком ударе кинетическая энергия переходит полностью или частично в потенциальную энергию упругой деформации. Затем тела возвращаются к первоначальной форме, отталкивая друг друга. В итоге потенциальная энергия упругой деформации снова переходит в кинетическую энергию, и тела разлетаются со скоростями, величина и направление которых определяются двумя условиями: сохранением полной энергии и сохранением полного импульса системы тел. Абсолютно упругому удару соответствует полное восстановление формы соударяющихся тел. Время соударения зависит от упругих свойств тел, их относительной скорости в момент начала удара и от их массы. Идеально упругих ударов не существует, так как всегда часть энергии затрачивается на необратимую деформацию тел и увеличение их внутренней энергии. Однако при столкновении некоторых

тел, например, стальных шаров, потерями механической энергии можно пренебречь.

Абсолютно неупругий удар характеризуется тем, что потенциальная энергия деформации не возникает. Кинетическая энергия полностью или частично превращается во внутреннюю энергию. После удара столкнувшиеся тела либо движутся с одинаковой скоростью, либо покоятся. При абсолютно неупругом ударе выполняется лишь закон сохранения импульса, закон же сохранения механической энергии не соблюдается: имеет место закон сохранения суммарной энергии различных видов – механической и внутренней.

Ограничимся рассмотрением центрального удара двух шаров. Удар называется центральным, если шары до удара движутся вдоль прямой, проходящей через их центры. При центральном ударе соударение может произойти, если:

1) шары движутся навстречу друг другу (рис. 10.1,а);

2) один из шаров догоняет другой (рис. 10.1,6).

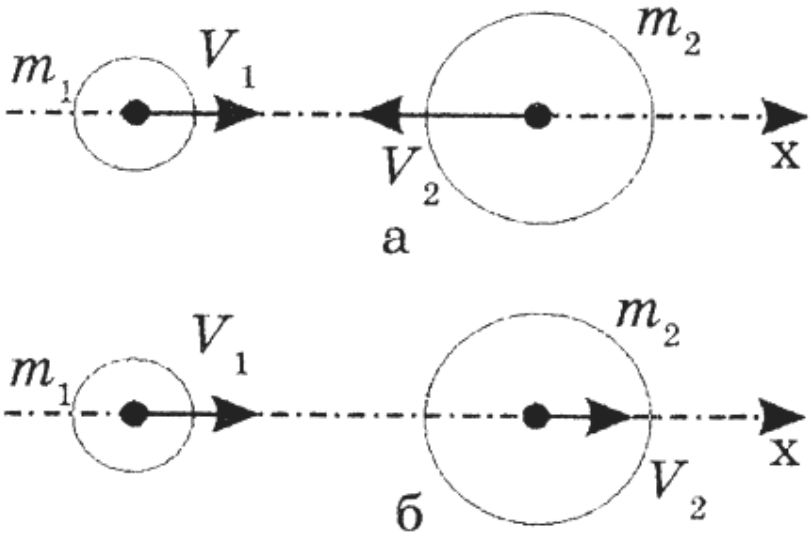


Рис. 10.1. Центральный удар

Предположим, что шары образуют замкнутую систему или внешние силы, приложенные к шарам, уравновешивают друг друга.

Рассмотрим вначале абсолютно неупругий удар. Пусть массы шаров m_1 и m_2, а скорости до удара $\vec{V}_1$ и $\vec{V}_2$. В силу закона

сохранения импульса суммарный импульс шаров после удара должен быть таким же, как и до удара:

$$m_1\vec{V}_1 + m_2\vec{V}_2 = (m_1 + m_2)\vec{U}, \qquad (10.1)$$

где $\vec{U}$ – одинаковая для обоих шаров скорость после удара. Из (10.1) следует, что скорость шаров после абсолютно неупругого удара

$$\vec{U} = \frac{m_1\vec{V}_1 + m_2\vec{V}_2}{m_1 + m_2}. \qquad (10.2)$$

Поскольку векторы $\vec{V}_1$ и $\vec{V}_2$ направлены вдоль одной прямой, вектор $\vec{U}$ также имеет направление, совпадающее с этой прямой. В случае «б» (рис. 10.1) он направлен в ту же сторону, что и векторы $\vec{V}_1$ и $\vec{V}_2$, в случае «а» (рис. 10.1) – в сторону направления вектора начальной скорости того шара, для которого произведение mV больше.

Модуль вектора $\vec{U}$ может быть вычислен по следующей формуле:

$$U = \left|\frac{m_1V_1 \pm m_2V_2}{m_1 + m_2}\right|, \qquad (10.3)$$

где V_1 и V_2 – модули векторов $\vec{V}_1$ и $\vec{V}_2$, знак «–» соответствует случаю «а», знак «+» – случаю «б».

Рассмотрим абсолютно упругий удар. При таком ударе выполняются два закона сохранения: закон сохранения импульса и закон сохранения механической энергии.

Обозначим массы шаров m_1 и m_2, скорости шаров до удара $\vec{V}_1$ и $\vec{V}_2$, скорости шаров после удара $\vec{U}_1$ и $\vec{U}_2$. Напишем уравнения в соответствии с законами сохранения импульса и энергии:

$$m_1\vec{V}_1 + m_2\vec{V}_2 = m_1\vec{U}_1 + m_2\vec{U}_2, \qquad (10.4)$$

$$\frac{m_1\vec{V}_1^2}{2} + \frac{m_2\vec{V}_2^2}{2} = \frac{m_1\vec{U}_1^2}{2} + \frac{m_2\vec{U}_2^2}{2}. \qquad (10.5)$$

Уравнения (10.4) и (10.5) преобразуем следующим образом:

$$m_1\left(\vec{V}_1-\vec{U}_1\right)=m_2\left(\vec{U}_2-\vec{V}_2\right), \tag{10.6}$$

$$m_1\left(\vec{V}_1^{\,2}-\vec{U}_1^{\,2}\right)=m_2\left(\vec{U}_2^{\,2}-\vec{V}_2^{\,2}\right). \tag{10.7}$$

Поскольку удар шаров является центральным, из соображений симметрии можно утверждать, что скорости шаров после удара будут направлены вдоль той же прямой, вдоль которой двигались центры шаров перед ударом. Следовательно, все векторы в (10.6) и (10.7) коллинеарны. Это дает возможность записать уравнение (10.7) в виде

$$m_1\left(\vec{V}_1-\vec{U}_1\right)\left(\vec{V}_1+\vec{U}_1\right)=m_2\left(\vec{U}_2-\vec{V}_2\right)\left(\vec{U}_2+\vec{V}_2\right). \tag{10.8}$$

Деля уравнение (10.8) на уравнение (10.6), можно записать:

$$\vec{V}_1+\vec{U}_1=\vec{U}_2+\vec{V}_2. \tag{10.9}$$

Умножая (10.9) на m_2 и вычитая результат из (10.6), получим:

$$\left(m_1-m_2\right)\vec{V}_1-\left(m_1+m_2\right)\vec{U}_1=-2m_2\vec{V}_2.$$

Отсюда получим вектор скорости первого шара после удара:

$$\vec{U}_1=\frac{2m_2\vec{V}_2+\left(m_1-m_2\right)\vec{V}_1}{m_1+m_2}. \tag{10.10}$$

Затем, умножая (10.9) на m_1 и складывая результат с (10.6), получим вектор скорости второго шара после удара:

$$\vec{U}_2=\frac{2m_1\vec{V}_1+\left(m_2-m_1\right)\vec{V}_2}{m_1+m_2}. \tag{10.11}$$

Для численных подсчетов можно спроектировать (10.10) и (10.11) на направление вектора $\vec{V}_1$. Получим:

$$U_1=\frac{\mp 2m_2V_2+\left(m_1-m_2\right)V_1}{m_1+m_2}, \tag{10.12}$$

$$U_2=\frac{2m_1V_1\mp\left(m_2-m_1\right)V_2}{m_1+m_2}. \tag{10.13}$$

В полученных формулах (10.12) и (10.13) V_1 и V_2 – модули, а U_1 и U_2 – проекции соответствующих векторов. Знак «–» соответствует случаю удара шаров, движущихся навстречу друг другу. Знак «+» – случаю, когда первый шар догоняет второй.

Рассмотрим случай, когда массы соударяющихся шаров равны: $m_1 = m_2$. Из (10.10) и (10.11) следует, что при этом условии $\vec{U}_1 = \vec{V}_2$ и $\vec{U}_2 = \vec{V}_1$ то есть шары при ударе обмениваются скоростями. В частности, если один из шаров, например, второй, до соударения покоится, то после удара он будет двигаться с той же скоростью, с которой двигался первый шар до удара. Первый же шар после удара окажется неподвижным.

Для изучения законов соударения шаров на опыте рассмотрим систему, состоящую из двух шаров, подвешенных на практически нерастяжимых нитях (рис.10.2). Массы шаров одинаковы: $m_1 = m_2 = m$. Отведем шар 2 на угол α от положения равновесия и отпустим его. Возвращаясь в положение равновесия и обладая в момент, предшествующий удару, скоростью V_2, он передаст импульс шару 10.

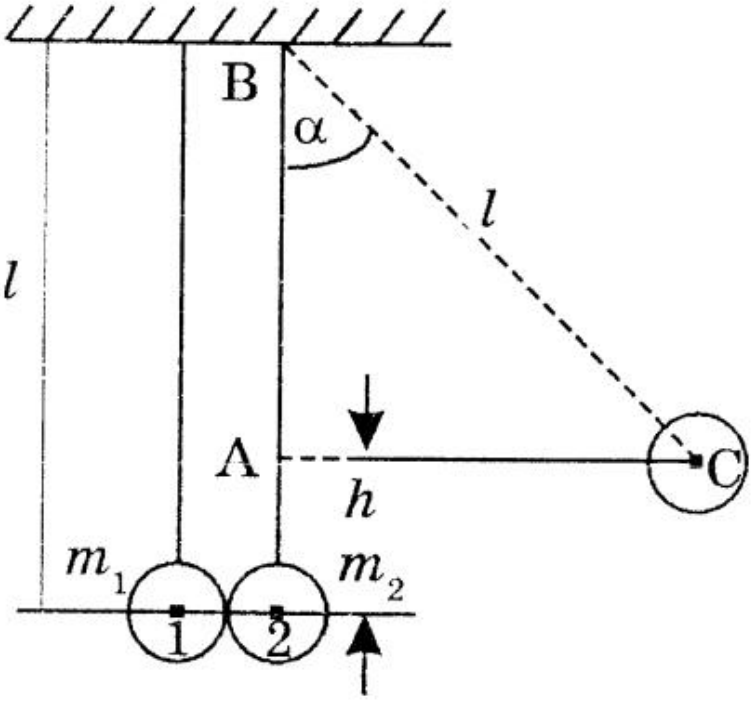


Рис. 10.2. Схема установки

На основании второго закона Ньютона импульс силы равен изменению импульса тела:

$$\overline{F}\tau = m\Delta V. \qquad (10.14)$$

Если рассматривать уравнение (10.14) применительно рассматриваемому случаю, то в уравнении (10.14) $\overline{F}$ – средняя сила удара; τ – время соударения, т.е. время соприкосновения шаров при ударе; m – массы соударяющихся шаров; ΔV – изменение скорости шара в результате удара.

Если в рассматриваемом опыте шар 2 после соударения остается в покое, то формулу (10.14) можно переписать в виде

$$\overline{F}\tau = mV_2,$$

где τ – время соударения. Отсюда:

$$\overline{F} = \frac{mV_2}{\tau}. \qquad (10.15)$$

При известной массе шаров, зная скорость шара V_2 в момент, непосредственно предшествующий соударению, и время соударения τ, можно вычислить среднюю силу удара по формуле (10.15).

Скорость шара V_2 можно определить из следующих рассуждений. Шар 2, отведенный из положения равновесия на угол α (рис. 10.2), обладает запасом потенциальной энергии $E_П = mgh$. Эта энергия в момент соприкосновения переходит в кинетическую:

$$E_{\text{П}} = E_{\text{К}} = \frac{mV_2^2}{2}.$$

Отсюда

$$V_2 = \sqrt{2gh}. \qquad (10.16)$$

Из треугольника ABC (рис. 10.2) имеем:

$$\frac{l-h}{h} = \cos\alpha; \qquad h = l(1-\cos\alpha) = 2l\sin^2\frac{\alpha}{2}. \qquad (10.17)$$

Подставив h из (10.17) в (10.16), получим:

$$V_2 = 2\sqrt{gl} \cdot \sin\frac{\alpha}{2}. \qquad (10.18)$$

Описание установки

Общий вид установки приведен на рис. 10.3. Она состоит из двух стальных шаров одинаковой массы, подвешенных на стальных проволоках, электромагнитов и электронной схемы, позволяющей непосредственно измерять время соударения шаров (время соударения в микросекундах высвечивается на цифровом табло прибора).

Рис. 10.3. Общий вид установки

Порядок выполнения работы. Измерения и расчеты

1. Включить установку, нажав на кнопку «Сеть».
2. Включить электромагниты, нажав на кнопку «Вкл. магн.».
3. Спросить у преподавателя или лаборанта значения углов (по умолчанию принять углы равными 5°, 7°, 9°). Записать значение угла α в таблицу.
4. Отвести шар 2 к электромагниту. При этом он притянется к электромагниту. Отметить на шкале угол α, под которым располагается нить.
5. Нажать кнопку «Сброс» для того, чтобы сбросить (обнулить) показание на цифровом табло прибора. Это необходимо сделать даже в том случае, если на цифровом табло прибора высвечиваются нули, так как кнопкой «Сброс» прибор также переводится в режим измерения.
6. Отключить электромагниты, отжав кнопку «Вкл. магн.». При этом шар 2 придет в движение. В момент соударения на цифровом табло высветится время соударения шаров τ в микросекундах. Записать время соударения τ в таблицу.
7. Провести измерение времени соударения шаров для каждого угла α и записать в табл. 10.1.
8. Вычислить значение скорости шара в момент удара по формуле (10.18), подставив в нее время соударения при данном угле α. Значение длины l указано на установке. Результат вычислений занести в табл. 10.1.

Таблица 10.1

Измерение силы взаимодействия шаров

№ п/п	α	τ, мкс	V_2, м/с	F, Н	$\overline{F}$, Н	$\Delta\overline{F}$, Н
1.						
2.						
3.						
4.						
5.						
6.						
7.						
8.						
9.						
10.						

8. Массу шаров найти при помощи взвешивания или узнать у преподавателя или лаборанта.

9. Вычислить силу удара по формуле (10.15). Результат вычислений занести в табл. 10.1.

10. Если для фиксированного угла отклонения груза силы получились одинаковые, то обработку проводить в соответствии с п.11 (см. ниже), если силы разные – см. п.12.

11. Для серии опытов с одним углом определить абсолютную погрешность косвенного измерения средней силы соударения, воспользовавшись формулой (8) или (17) из введения. Пользуясь формулами (10.15), (10.18) можно показать, что

$$\Delta\overline{F} = \overline{F}\sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\frac{\Delta g}{g}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\tau}{\tau}\right)^2}. \quad (10.19)$$

Формула (10.19) получается, если угол измеряется в радианах. Для малых углов отклонения можно положить $\sin\alpha \approx \alpha$. При вычислениях принять $g = 9{,}8\,\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$, $\Delta g = 0.05\,\frac{м}{c^2}$, $\Delta m = 0{,}5\,\text{г}$, $\Delta l = 0.005\,\text{м}$, $\Delta\tau = 5\cdot 10^{-7}\,\text{с}$, $\Delta\alpha = 0{,}5^\circ$.

12. Для серии опытов с одним углом определить полуширину доверительного интервала по формулам (5) и (6) из введения.

Контрольные вопросы

1. Какой удар называют абсолютно упругим и какой – абсолютно неупругим?

2. Какие законы справедливы при абсолютно упругом, абсолютно неупругом ударах?

3. Какой удар называют центральным?

4. Найдите скорость шаров после абсолютно *неупругого* удара, если массы шаров равны 1 кг и 3 кг, скорости 3 $\frac{м}{с}$ и 1 $\frac{м}{с}$ соответственно. Движение до и после удара происходит вдоль одной прямой. Рассмотрите два варианта.

5. Найдите скорость шаров после абсолютно *неупругого* удара, если массы шаров равны 1 кг и 5 кг, скорости 3 $\frac{м}{с}$ и 2 $\frac{м}{с}$ соответственно. Движение до и после удара происходит вдоль одной прямой. Рассмотрите два варианта.

6. Найдите скорость шаров после абсолютно *неупругого* удара, если массы шаров равны 2 кг и 3 кг, скорости 3 $\frac{м}{с}$ и 2 $\frac{м}{с}$ соответственно. Движение до и после удара происходит вдоль одной прямой. Рассмотрите два варианта.

7. Найдите скорость шаров после абсолютно *неупругого* удара, если массы шаров равны 1 кг и 30 кг, скорости 1 $\frac{м}{с}$ и 1 $\frac{м}{с}$ соответственно. Движение до и после удара происходит вдоль одной прямой. Рассмотрите два варианта.

8. Найдите скорость шаров после абсолютно *неупругого* удара, если массы шаров равны 3 кг и 3 кг, скорости 3 $\frac{м}{с}$ и 1 $\frac{м}{с}$ соответственно. Движение до и после удара происходит вдоль одной прямой. Рассмотрите два варианта.

9. Найдите скорость шаров после абсолютно *упругого* удара, если массы шаров равны 1 кг и 3 кг, скорости 3 $\frac{м}{с}$ и 1 $\frac{м}{с}$ соответственно. Движение до и после удара происходит вдоль одной прямой. Рассмотрите два варианта.

10. Найдите скорость шаров после абсолютно *упругого* удара, если массы шаров равны 10 кг и 3 кг, скорости 3 $\frac{м}{с}$ и 1 $\frac{м}{с}$ соответственно. Движение до и после удара происходит вдоль одной прямой. Рассмотрите два варианта.

11. Найдите скорость шаров после абсолютно *упругого* удара, если массы шаров равны 2 кг и 5 кг, скорости 3 $\frac{м}{с}$ и 10 $\frac{м}{с}$ соответ-

ственно. Движение до и после удара происходит вдоль одной прямой. Рассмотрите два варианта.

12. Найдите скорость шаров после абсолютно *упругого* удара, если массы шаров равны 1 кг и 3 кг, скорости 3 $\frac{м}{с}$ и 1 $\frac{м}{с}$ соответственно. Движение до и после удара происходит вдоль одной прямой. Рассмотрите два варианта.

13. На основании закона сохранения импульса и закона сохранения энергии придумайте способ измерения скорости пули в лабораторных условиях.

14. Пуля массой 10 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 150 гр, висящий на нити длиной 1 м. на какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

15. Пуля массой 10 гр, летящая со скоростью 700 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 150 гр, висящий на нити длиной 1 м. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

16. Пуля массой 10 гр, летящая со скоростью 500 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 150 гр, висящий на нити длиной 1 м. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

17. Пуля массой 10 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 250 гр, висящий на нити длиной 1 м. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

18. Пуля массой 10 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 350 гр, висящий на нити длиной 1 м. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

19. Пуля массой 5 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 150 гр, висящий на нити длиной 1 м. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $100\frac{м}{с}$?

20. Пуля массой 15 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 100 гр, висящий на нити длиной 1 м. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $100\frac{м}{с}$?

21. Пуля массой 15 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 150 гр, висящий на нити длиной 1 м. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

22. Пуля массой 15 гр, летящая со скоростью 700 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 150 гр, висящий на нити длиной 1 м. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

23. Пуля массой 15 гр, летящая со скоростью 500 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 150 гр, висящий на нити длиной

1 м. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

24. Пуля массой 15 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 250 гр, висящий на нити длиной 1 м. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

25. Пуля массой 20 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 350 гр, висящий на нити длиной 1 м. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

26. Пуля массой 20 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 100 гр, висящий на нити длиной 1 м. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $100\frac{м}{с}$?

27. Пуля массой 20 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 150 гр, висящий на нити длиной 1 м. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

28. Пуля массой 20 гр, летящая со скоростью 700 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 150 гр, висящий на нити длиной 1 м. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

29. Пуля массой 20 гр, летящая со скоростью 500 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 150 гр, висящий на нити длиной 1 м. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

30. Пуля массой 20 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 250 гр, висящий на нити длиной 1 м. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

31. Пуля массой 20 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 350 гр, висящий на нити длиной 1 м. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

32. Пуля массой 10 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 150 гр, висящий на нити длиной 1 м 25 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

33. Пуля массой 10 гр, летящая со скоростью 700 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 150 гр, висящий на нити длиной 1 м 25 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

34. Пуля массой 10 гр, летящая со скоростью 500 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 150 гр, висящий на нити длиной

1 м 25 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

35. Пуля массой 10 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 250 гр, висящий на нити длиной 1 м 25 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

36. Пуля массой 10 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 350 гр, висящий на нити длиной 1 м 25 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

37. Пуля массой 5 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 150 гр, висящий на нити длиной 1 м 25 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $100\frac{м}{с}$?

38. Пуля массой 15 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 100 гр, висящий на нити длиной 1 м 25 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $100\frac{м}{с}$?

39. Пуля массой 15 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 150 гр, висящий на нити длиной 1 м 25 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

40. Пуля массой 15 гр, летящая со скоростью 700 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 150 гр, висящий на нити длиной 1 м 25 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

41. Пуля массой 15 гр, летящая со скоростью 500 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 150 гр, висящий на нити длиной 1 м 25 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

42. Пуля массой 15 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 250 гр, висящий на нити длиной 1 м 25 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

43. Пуля массой 20 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 350 гр, висящий на нити длиной 1 м 25 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

44. Пуля массой 20 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 100 гр, висящий на нити длиной 1м 25 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $100\frac{м}{с}$?

45. Пуля массой 20 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 150 гр, висящий на нити длиной

1 м 25 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

46. Пуля массой 20 гр, летящая со скоростью 700 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 150 гр, висящий на нити длиной 1 м 25 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

47. Пуля массой 20 гр, летящая со скоростью 500 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 150 гр, висящий на нити длиной 1 м 25 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

48. Пуля массой 20 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 250 гр, висящий на нити длиной 1 м 25 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

49. Пуля массой 20 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 350 гр, висящий на нити длиной 1 м 25 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

50. Пуля массой 10 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 150 гр, висящий на нити длиной 1 м 50 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

51. Пуля массой 10 гр, летящая со скоростью 700 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 150 гр, висящий на нити длиной 1 м 50 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

52. Пуля массой 10 гр, летящая со скоростью 500 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 150 гр, висящий на нити длиной 1 м 50 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

53. Пуля массой 10 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 250 гр, висящий на нити длиной 1 м 50 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

54. Пуля массой 10 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 350 гр, висящий на нити длиной 1 м 50 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

55. Пуля массой 5 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 150 гр, висящий на нити длиной 1 м 50 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $100\frac{м}{с}$?

56. Пуля массой 15 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 100 гр, висящий на нити длиной

1 м 50 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $100\frac{м}{с}$?

57. Пуля массой 15 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 150 гр, висящий на нити длиной 1 м 50 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

58. Пуля массой 15 гр, летящая со скоростью 700 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 150 гр, висящий на нити длиной 1 м 50 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

59. Пуля массой 15 гр, летящая со скоростью 500 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 150 гр, висящий на нити длиной 1 м 50 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

60. Пуля массой 15 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 250 гр, висящий на нити длиной 1 м 50 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

61. Пуля массой 20 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 350 гр, висящий на нити длиной 1 м 50 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

62. Пуля массой 20 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 100 гр, висящий на нити длиной

1 м 50 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $100\frac{м}{с}$?

63. Пуля массой 20 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 150 гр, висящий на нити длиной 1 м 50 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

64. Пуля массой 20 гр, летящая со скоростью 700 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 150 гр, висящий на нити длиной 1 м 50 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

65. Пуля массой 20 гр, летящая со скоростью 500 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 150 гр, висящий на нити длиной 1 м 50 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

66. Пуля массой 20 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 250 гр, висящий на нити длиной 1 м 50 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

67. Пуля массой 20 гр, летящая со скоростью 600 $\frac{м}{с}$, пробивает насквозь деревянный брусок массой 350 гр, висящий на нити длиной 1 м 50 см. На какой угол отклонится нить, если скорость пули уменьшилась на $50\frac{м}{с}$?

11. ДИНАМИКА ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ (ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2-I)

Материал данной главы пригодится вам при выполнении **экспериментального задания № 2-I [8].** Это задание является прекрасной экспериментальной иллюстрацией изложенного в настоящей главе теоретического материала.

Основы теории

Движение по окружности

При изучении движения материальной точки по окружности ее положение на окружности часто характеризуют не пройденным путем $l(t)$, а углом поворота $\varphi(t)$ (рис. 11.1). Связь пройденного пути и угла поворота дается очевидным соотношением:

$$l(t) = R\varphi(t). \tag{11.1}$$

При этом часто вместо линейной скорости $V(t) = \dfrac{dl}{dt}$ пользуются так называемой угловой скоростью:

$$\omega(t) = \frac{d\varphi}{dt}, \tag{11.2}$$

а вместо тангенциального ускорения $a_\tau(t) = \dfrac{dV}{dt}$ – так называемым угловым ускорением

$$\varepsilon(t) = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}. \tag{11.3}$$

Связь угловой скорости и ускорения с линейной скоростью и тангенциальным ускорением легко найти, продифференцировав правую и левую часть формулы (11.1) по времени (один раз – для угловой скорости и еще один раз – для углового ускорения). Эта связь может быть записана в виде

$$\omega(t) = \frac{V(t)}{R}, \quad \varepsilon(t) = \frac{a_\tau}{R}. \tag{11.4}$$

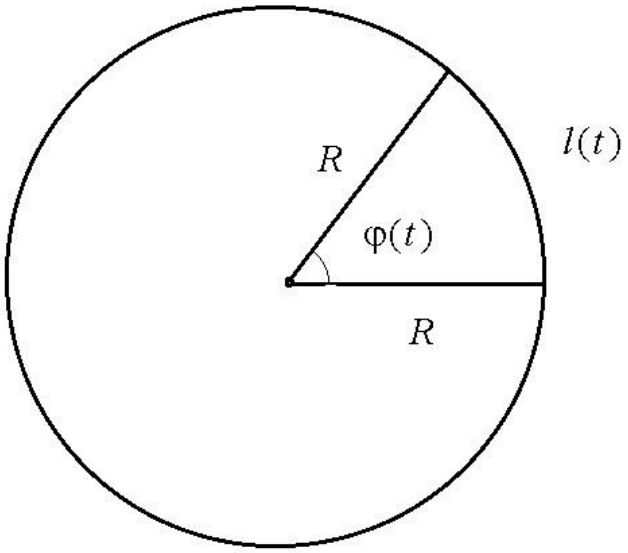


Рис. 11.1. Движение материальной точки по окружности.
Положение точки на окружности задается углом поворота
(от начального положения точки на окружности)

Единицей измерения угла является радиан, поэтому для единиц измерения угловой скорости и углового ускорения в системе СИ имеем:

$$[\omega] = \frac{[\varphi]}{[t]} = \frac{рад}{сек} = c^{-1},$$
$$[\varepsilon] = \frac{[\omega]}{[t]} = \frac{рад}{сек^2} = c^{-2}. \qquad (11.5)$$

Часто угловую скорость задают в оборотах в секунду. Поскольку один оборот – это поворот на угол в 360 градусов (или на 2π радиан), то для связи такой угловой скорости с «обычной» получается формула

$$V(t) = \frac{\omega(t)}{2\pi}, \qquad (11.6)$$

то есть

$$1\frac{рад}{сек} = \frac{1}{2\pi}\frac{об}{сек},$$
$$1\frac{об}{сек} = 2\pi\frac{рад}{сек}. \qquad (11.7)$$

Мы не случайно использовали для угловой скорости, заданной в оборотах в секунду, новую букву. Дело в том, что такая угловая скорость – это уже не угловая скорость, а частота движения точки по окружности, частоту же принято обозначать буквой ν (читается «ню»), а не буквой ω (читается «омега»).

Какое отношение имеет движение по кругу к колебаниям? Самое прямое – при движении по кругу точка все время возвращается в исходное положение; поэтому естественно считать движение по кругу своего рода колебательным движением и характеризовать его частотой ν (то есть количеством оборотов в единицу времени) и периодом T (то есть временем одного оборота):

$$T = \frac{1}{\nu} = \frac{2\pi}{\omega}. \qquad (11.8)$$

Любопытно, что часто поступают и наоборот – при изучении колебательного движения характеризуют его не обычной частотой ν, а так называемой циклической (круговой) частотой $\omega = 2\pi\nu$.

Движение твердого тела, закрепленного на оси. Основной закон динамики вращательного движения

Рассмотрим движение твердого тела, закрепленного на оси. Очевидно, оно вращается вокруг этой оси, причем каждая точка этого тела совершает вращательное движение, которое может быть охарактеризовано углом поворота, угловой скоростью и угловым ускорением. Существенно, что эти параметры движения у всех точек твердого (то есть не деформирующегося при движении) тела одинаковы. Поэтому можно говорить об угле поворота, угловой скорости и угловом ускорении твердого тела целиком.

Все знают, что если на вращающееся твердое тело, закрепленное на оси, не действуют никакие внешние силы (в том числе и силы трения), то оно так и продолжает вращаться с постоянной угловой скоростью. Если же внешние силы есть, то угловая скорость начинает изменяться, то есть возникает угловое ускорение. Найти величину

этого углового ускорения можно с помощью основного закона динамики вращательного движения:

$$\varepsilon = \frac{M_z}{I_z}. \qquad (11.9)$$

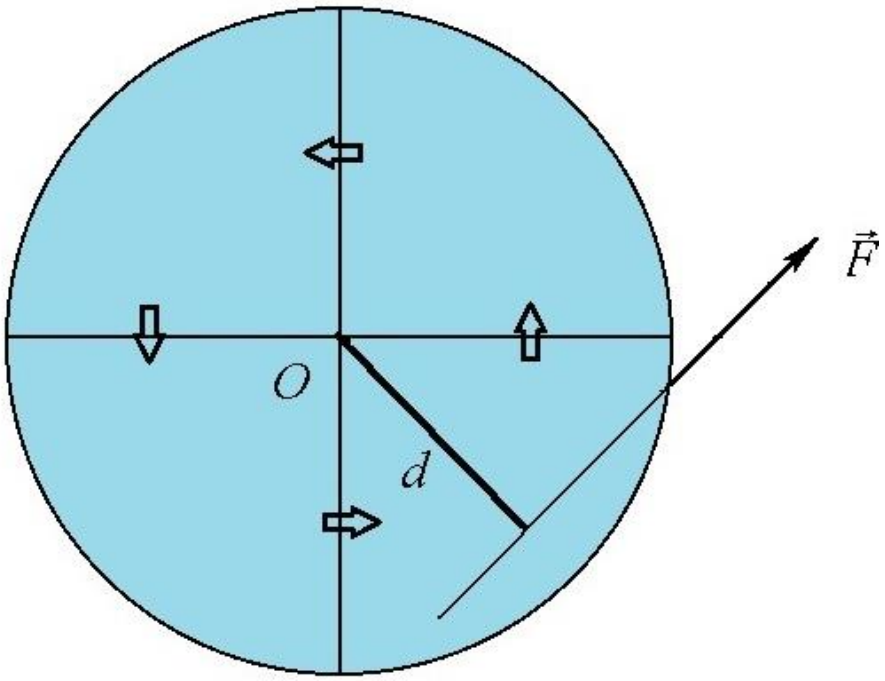


Рис. 11.2. Диск (выделен голубым), вращающийся под действием силы F (вид сверху)

В формуле (11.9) ε – угловое ускорение тела, закрепленного на оси и вращающегося относительно этой оси, M_z – суммарный момент внешних сил, действующих на это тело (относительно оси вращения, которую мы обозначим z), а I_z – момент инерции этого тела относительно оси вращения. Эта формула очень похожа на второй закон Ньютона $a = \frac{F}{m}$, только вместо материальной точки мы имеем вращающееся твердое тело, вместо линейного ускорения – угловое, вместо силы – момент силы и вместо массы – момент инерции. Теперь ясно, что при вращательном движении твердого тела, закрепленного на оси, момент силы является мерой «закручивающего» действия внешних сил, а момент инерции – мерой инертности твердого

тела по отношению к вращению вокруг оси. Что же такое момент силы и момент инерции?

Момент силы относительно оси вращения (он же – вращающий момент) по определению равен произведению модуля силы на его плечо, в свою очередь, плечо момента является расстоянием, измеренным по перпендикуляру между вектором действия силы и осью вращения, то есть (рис. 11.2):

$$M_z = Fd, \tag{11.10}$$

где величина d – плечо силы.

Отметим некоторые важные свойства момента силы.

1) Сила, параллельная оси, не создает момента относительно этой оси. Момент создается только составляющей силы, перпендикулярной оси вращения.

2) При переносе точки приложения силы вдоль направления ее действия момент силы не изменяется.

3) Момент силы зависит не только от величины самой силы, но и от величины ее плеча – маленькая сила с большим плечом может иметь такой же момент, как большая сила с маленьким плечом. В частности, сила, проходящая через ось вращения, не создает момента относительно этой оси.

Единицей измерения момента силы, очевидно, является «ньютон на метр»:

$$[M_z] = [F][d] = H \cdot м. \tag{11.11}$$

Момент инерции тела

Моментом инерции тела I_z относительно оси вращения z называется сумма произведений масс всех материальных точек тела m_i на квадраты их расстояний от оси вращения ρ_i^2 (рис. 11.3):

$$I_z = \left(\sum_{i=1}^{n} m_i \rho_i^2 \right). \tag{11.12}$$

Момент инерции измеряется в килограммах на метр квадратный:

$$[I]=[m]\cdot[\rho]^2=кг\cdot м^2. \qquad (11.13)$$

Нетрудно заметить, что момент инерции тела зависит не только от его массы, но и от среднего расстояния от точек тела до оси вращения – чем дальше «в среднем» расположено тело от оси вращения, тем больше его момент инерции. Кроме того, даже для одного и того же тела момент инерции относительно разных осей будет разным – ведь при смене оси вращения изменяются расстояния от точек тела до этой оси, а вместе с ними – и момент инерции.

Ясно, что момент инерции твердого тела играет важную роль при изучении динамики вращательного движения. Как его вычислить? Очень просто – по определению.

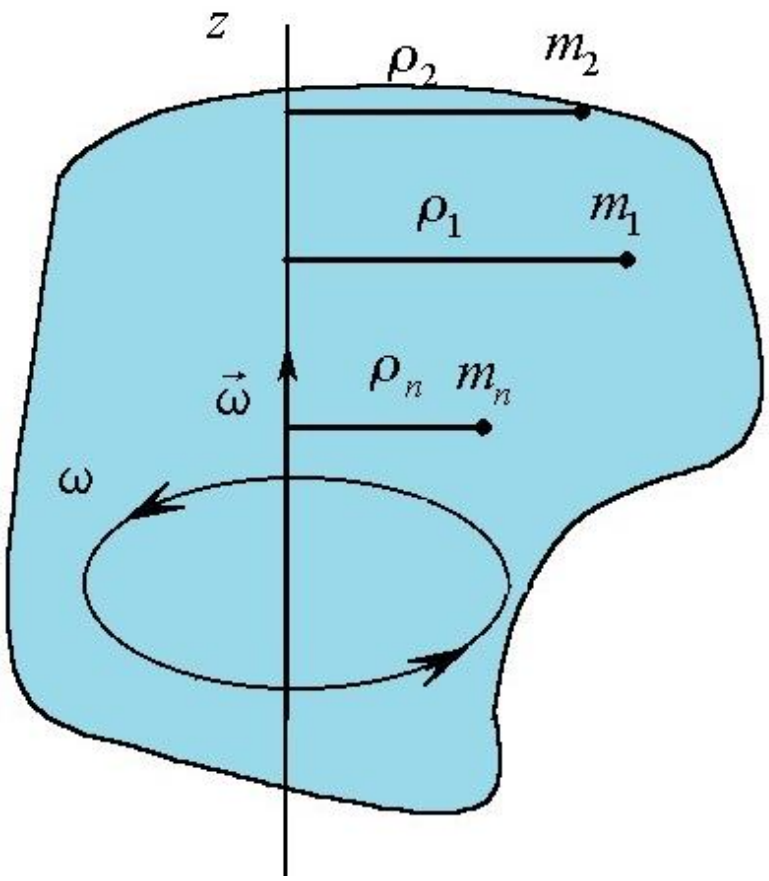


Рис. 11.3. К определению момента инерции твердого тела (выделено голубым) относительно оси. Показана ось вращения z, вокруг которой вращается тело, его угловая скорость и материальные точки m_i, из которых состоит тело, а также расстояния от них до оси вращения ρ_i

В том случае, когда плотность тела $\rho_{пл}(x, y, z)$ можно считать непрерывной функцией от пространственных переменных x, y, z, заменив в формуле (11.12) расстояние от оси вращения ρ на $\sqrt{x^2 + y^2}$ и суммирование на интегрирование, имеем:

$$I_z = \iiint\limits_V \rho_{пл}(x, y, z)\left(x^2 + y^2\right)dxdydz. \qquad (11.14)$$

В случае однородного тела плотность можно вынести из-под знака интегрирования и получить:

$$I_z = \rho_{0пл}\iiint\limits_V \left(x^2 + y^2\right)dxdydz. \qquad (11.15)$$

Для тел простой формы (шары, цилиндры, тонкие стержни и так далее) соответствующие интегралы вычислены давным-давно и результаты (то есть моменты инерции однородных тел простой формы) приводятся в соответствующих справочниках (а вычисление соответствующих интегралов является стандартным упражнением по математическому анализу, раздел «многомерные интегралы»).

Например, момент инерции шара массой m и радиусом R относительно оси, проходящей через его центр:

$$I_{шара} = \frac{2}{5}mR^2, \qquad (11.16)$$

а момент инерции цилиндра с массой m и радиусом R относительно его оси составляет:

$$I_{цил} = \frac{1}{2}mR^2. \qquad (11.17)$$

Момент инерции стержня (пренебрежимо малой толщины) с массой m и длиной l относительно оси, проходящей через его середину перпендикулярно стержню, составляет:

$$I_{ст} = \frac{1}{12}ml^2. \qquad (11.18)$$

Во всех приведенных примерах момент инерции вычислялся относительно оси, проходящей через центр тяжести тела (который для однородных симметричных тел «из соображений симметрии» совпадает с их центром симметрии). Но что делать, если нам требуется определить, например, момент инерции стержня относительно оси, проходящей через его конец? Неужели проделывать все вычисления с самого начала? Или искать эту формулу в справочнике? Отнюдь. Просто следует воспользоваться теоремой Штейнера, которая связывает момент инерции тела массой M относительно оси, проходящей через его центр тяжести I_0, с моментом I относительно параллельной ей оси, сдвинутой относительно исходной оси на некоторое расстояние l_0:

$$I = I_0 + Ml_0^2. \qquad (11.19)$$

По теореме Штейнера момент инерции тела относительно оси, не проходящей через центр тяжести тела, всегда больше, чем момент инерции относительно оси, проходящей через центр тяжести.

Например, для момента инерции стержня относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей через его конец (то есть на расстоянии $l/2$ от центра тяжести), имеем

$$I_{cm} = \frac{1}{12}ml^2 + m\left(\frac{l}{2}\right)^2 = \frac{1}{3}ml^2.$$

Описание установки

Установка для выполнения работы показана на рис. 11.4. Она состоит из крестовины с закрепленными на концах стержней 1 цилиндрическими грузами 11. Крестовина закреплена на оси 3; на той же оси закреплен барабан 4, на который намотан шнур 5 с грузом 6. Для контроля положения груза используется линейка 7, для измерения времени – электронный секундомер 10. В начальный момент времени груз находится на площадке 9, которая фиксируется электромагнитом 8 (рис. 11.5).

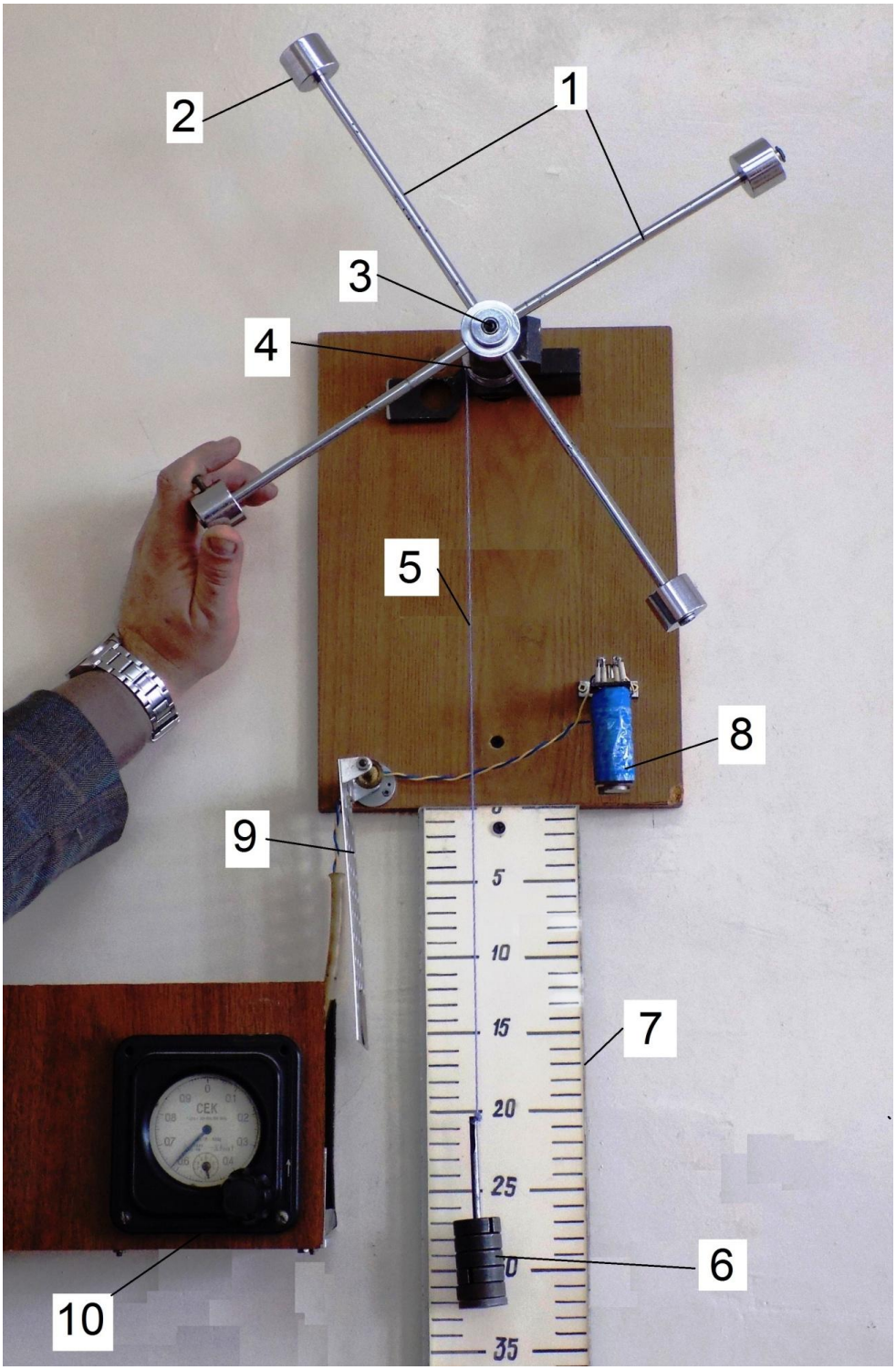


Рис. 11.4. Установка (общий вид)

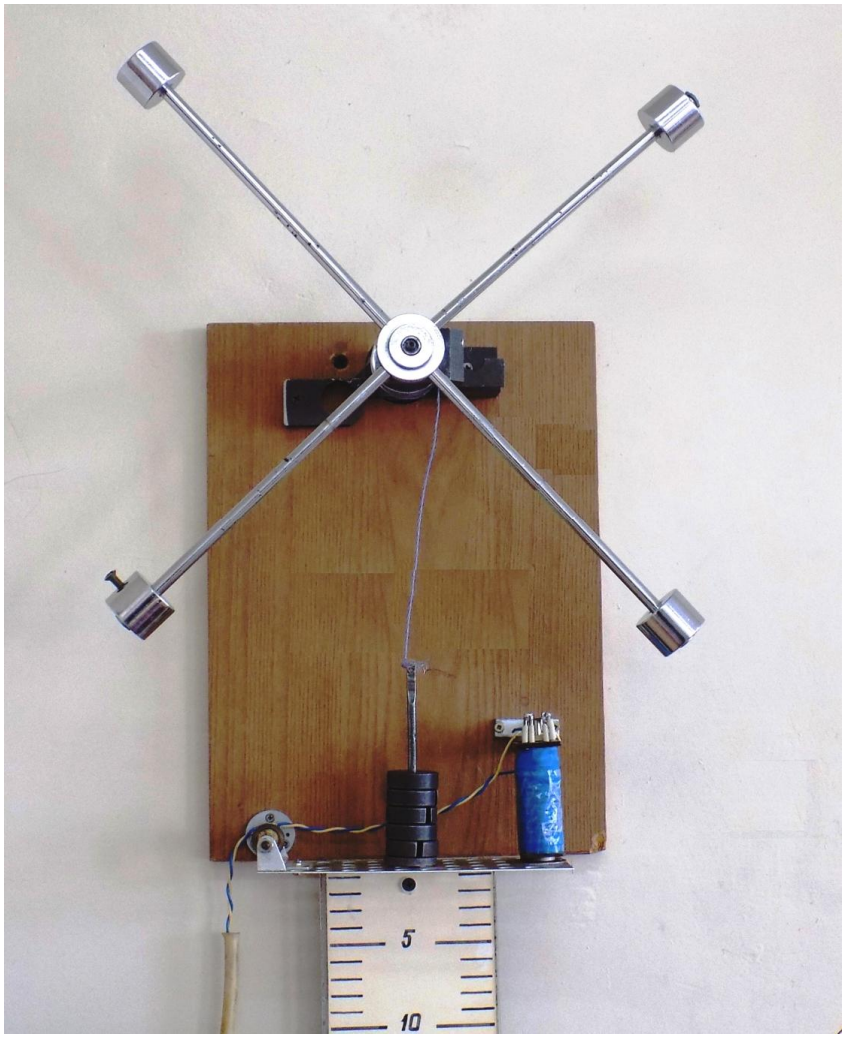


Рис. 11.5. Начальное состояние установки

Массу грузика можно регулировать, добавляя или убирая гирьки (рис. 11.6). Масса каждой гирьки – 50 г, масса основания – тоже 50 г, поэтому на рис. 11.6 масса груза равна 300 г.

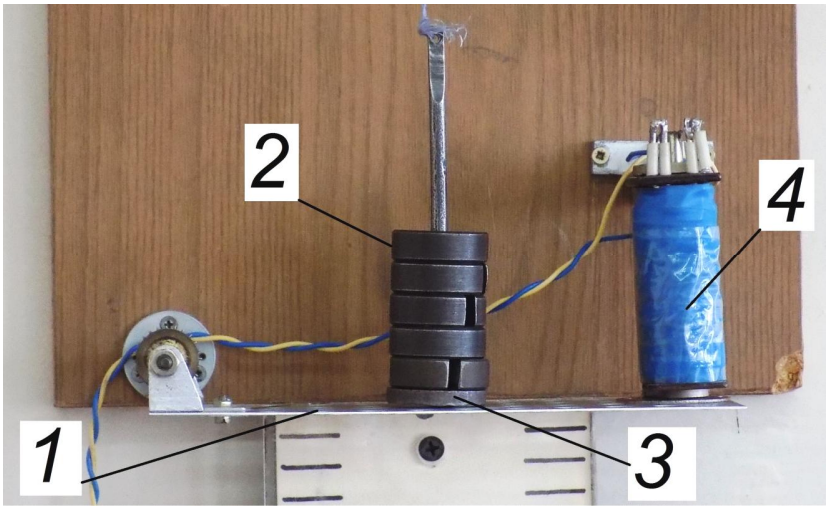


Рис. 11.6. Устройство грузика:

1 – металлическая площадка, на которой стоит груз; 2 – гирьки;
3 – основание груза, на котором лежат гирьки; 4 – электромагнит

На рис. 11.7 показан электронный секундомер. Он включается с помощью тумблера 1 и выключается с его же помощью. После выключения секундомера на его циферблатах остается измеренное время. Для того чтобы вернуть его в исходное состояние (поставить на ноль), необходимо повернуть ручку 2 против часовой стрелки, не прилагая чрезмерного усилия. Ручка, конечно, до конца не повернется, но показания секундомера при этом «обнулятся».

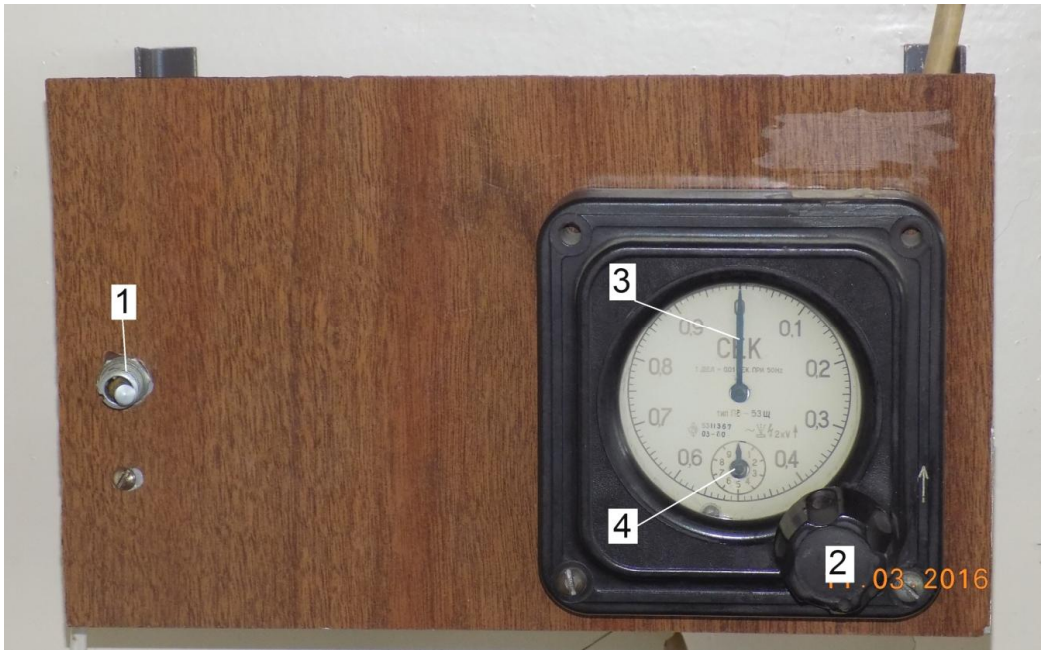


Рис. 11.7. Секундомер

Для измерения времени с точностью до 0,01 сек служат два циферблата с двумя стрелками. Большой циферблат 3 с большой стрелкой служит для измерения сотых долей секунды (цена маленького деления – 0,01 сек). Большая стрелка проходит полный круг за 1 секунду; поэтому ее положения в момент времени 0,25 сек, 1,25 сек и 12,25 сек одинаковы. Для измерения секунд служит маленький циферблат 4 с маленькой стрелкой. Цена его деления равна 1 секунде, а полный круг он проходит за 10 секунд. Поэтому в моменты времени 1,25 сек, 11,25 сек и 123,25 сек положения обоих стрелок одинаковы, и чтобы не ошибиться, необходимо считать круги маленькой стрелки. Впрочем, вам это не потребуется – измеряемые вами интервалы времени меньше 10 секунд.

Существенно, что секундомер и электромагнит связаны электрически с помощью тумблера 1 – электромагнит включен тогда, когда секундомер выключен, и наоборот. На рис. 11.5 показан груз, мирно стоящий на металлической площадке, которая удерживается в горизонтальном положении электромагнитом. Значит, электромагнит включен, а секундомер выключен. При переключении тумблера электромагнит выключится, а секундомер включится. Металлическая площадка упадет и освободит груз. Груз начнет двигаться вниз, натянет шнурок и начнет раскручивать крестовину. Ясно, что ускорение, с которым будет двигаться груз, зависит от момента инерции крестовины – чем больше этот момент инерции, тем труднее раскрутить крестовину и тем меньше будет ускорение груза. Если измерить это ускорение, то можно найти и момент инерции. Для дальнейшего необходимо поставить наши рассуждения на количественную основу (рис. 11.8).

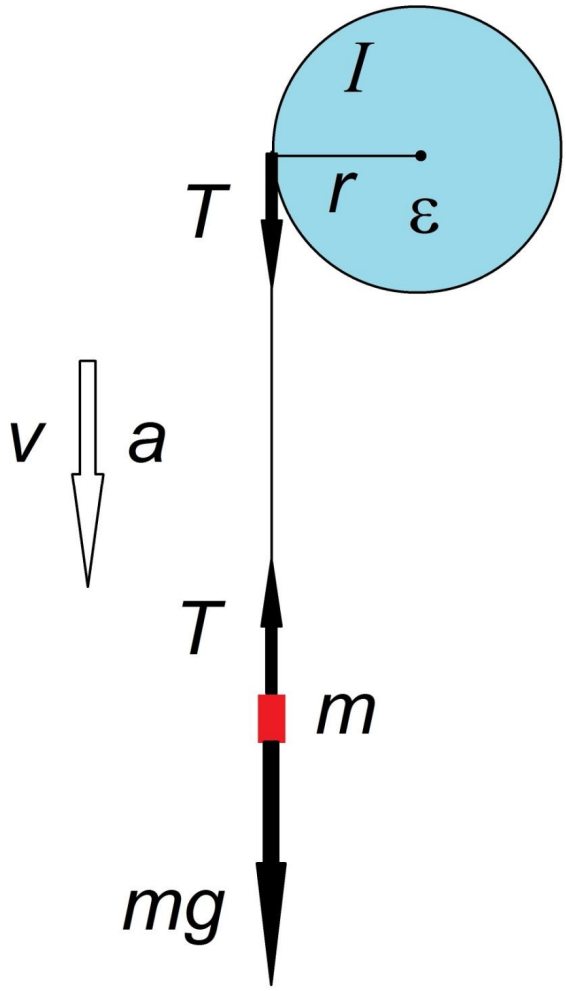


Рис. 11.8. Схема сил

Груз массой m совершает равноускоренное движение вниз под действием суммы силы тяжести mg и силы натяжения нити T. Для его ускорения (по второму закону Ньютона), очевидно, имеем:

$$a = \frac{mg - T}{m} = g - \frac{T}{m}. \qquad (11.20)$$

С другой стороны, закрепленный на оси маховик (крестовина) с моментом инерции I совершает равноускоренное вращение под действием силы T с моментом Tr. Для его углового ускорения имеем (по основному закону динамики вращательного движения):

$$\varepsilon = \frac{Tr}{I}. \qquad (11.21)$$

С третьей стороны, угловое ускорение связано с тангенциальным формулой (11.4), которая в данном случае может быть переписана как

$$a = \varepsilon r. \qquad (11.22)$$

Подставив (11.22) в (11.21) и исключив из системы уравнений ($a = g - \frac{T}{m}$ и $a = \frac{Tr^2}{I}$) силу натяжения, нетрудно получить для ускорения груза формулу

$$a = g\frac{mr^2}{mr^2 + I}. \qquad (11.23)$$

Впрочем, мы будем отыскивать не ускорение по моменту инерции крестовины, а наоборот, поэтому нас интересует другая форма формулы (11.23), а именно:

$$I = mr^2\left(\frac{g}{a} - 1\right). \qquad (11.24)$$

Для того чтобы найти ускорение груза, достаточно измерить пройденный грузом путь h, затраченное на это время t и воспользоваться соотношением $h = \frac{at^2}{2}$. Окончательная расчетная формула имеет вид

$$I = mr^2\left(\frac{gt^2}{2h} - 1\right), \qquad (11.25)$$

где I – момент инерции крестовины (подлежащий определению), m – масса груза на шнурке, r – радиус шкива, на который наматывается шнурок, g – ускорение свободного падения, t – время опускания груза на расстояние h.

Является ли эта формула точной? Нет, конечно. В физике вообще никогда не учитывается «вообще все» и поэтому «абсолютно точных» формул нет – все они являются точными только для определенных идеализированных моделей. В данном случае, например, мы пренебрегли силой трения вращения крестовины – она ведь на самом деле есть, хотя и невелика. Можно ли ее учесть? Можно, но модель при этом станет сложнее. Нужно ли нам это? Вопрос сложный и ответ на него зависит от многих факторов. В данном случае – не нужно. По крайней мере, автор так считает. Если вы считаете по-другому – усложните модель. Только имейте в виду, что она станет сложнее, но совершенно точной не станет никогда – даже если наряду с точным учетом силы трения вращения вы не забудете о трении движущихся частей о воздух, учете силы Кориолиса, энергии упругой деформации шнурка, силе Архимеда и т.д. и т.п.

Можно ли определить момент инерции другим способом? Конечно. Его можно просто рассчитать. Сделаем это. Во-первых, надо учесть, что суммарный момент инерции сложного тела равен сумме моментов инерции его составляющих. Наша крестовина состоит из (рис. 11.9) металлического цилиндра 1, четырех стержней 2 и четырех цилиндрических грузов 3. Поэтому

$$I = I_1 + 4I_2 + 4I_3. \qquad (11.26)$$

Точный расчет моментов инерции составных частей достаточно сложен (во-первых) и совершенно не нужен (во-вторых). Поэтому пренебрежем конечностью размеров цилиндрических грузов (мысленно заменим их материальными точками), а также конечностью ширины стержней (мысленно заменим их бесконечно тонкими

стержнями). Тогда для момента инерции центрального цилиндра имеем (по формуле (11.17)):

$$I_1 = \frac{1}{2} m_1 R_1^2, \tag{11.27}$$

где $m_1 = \pi R_1^2 h \rho$ масса цилиндра с радиусом $R_1 = d_1 / 2$ (рис. 11.9), высотой h и плотностью ρ.

Для момента инерции стержня с учетом (11.18) и теоремы Штейнера (11.19) имеем (рис. 11.9):

$$\begin{aligned} I_2 &= \frac{1}{12} m_2 (l_1 + l_2 + l_3)^2 + m_2 \left(R_1 + \frac{l_1 + l_2 + l_3}{2} \right)^2 = \\ &= \frac{1}{12} m_2 \left[(l_1 + l_2 + l_3)^2 + 3(2R_1 + l_1 + l_2 + l_3)^2 \right], \end{aligned} \tag{11.28}$$

где $m_2 = \pi (l_1 + l_2 + l_3) \left(\frac{d_3}{2} \right)^2 \rho$ – масса стержня.

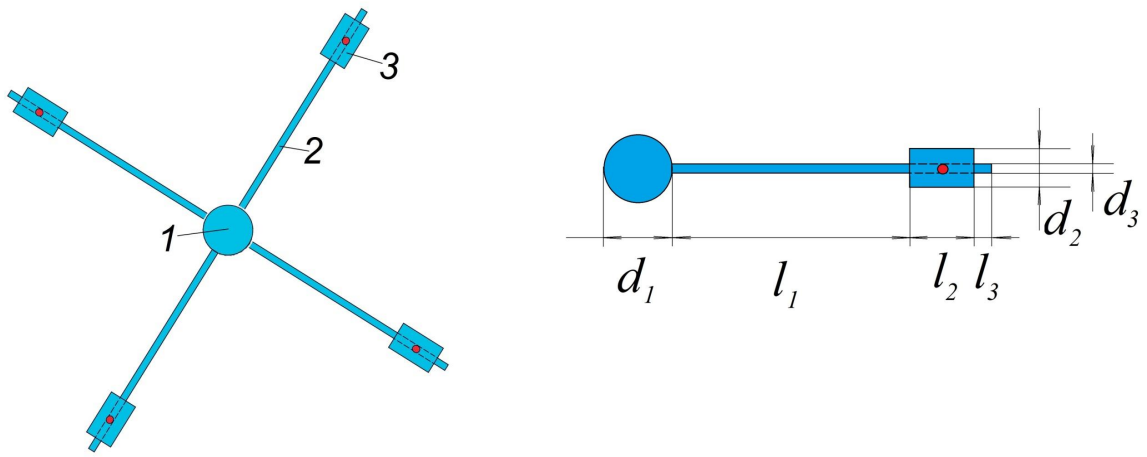


Рис. 11.9. Крестовина

Для момента инерции груза на конце стержня имеем:

$$I_3 = m_3 \left(R_1 + l_1 + \frac{l_2}{2} \right)^2, \tag{11.29}$$

где $m_3 = \pi l_2 \left(\frac{d_2 - d_3}{2} \right)^2 \rho$ – масса цилиндра (за вычетом проходящего внутри цилиндра стержня). Плотность стали можно взять из справочника ($\rho = 7800 \frac{кг}{м^3}$), а все остальное придется измерять штангенциркулем.

Порядок выполнения работы. Измерения и расчеты

1. Возьмите у лаборанта штангенциркуль и измерьте диаметр шкива (шкива, на который наматывается шнурок, а не оси, на которой закреплен маховик!). Поделите полученное значение на 2 и запишите величину радиуса шкива r в табл. 11.1 (столбец 2). Не забудьте перевести его значение в систему СИ (метры). Поскольку в процессе измерений радиус шкива не изменяется, это значение – одно для всех последующих экспериментов.

Таблица 11.1

Измерение момента инерции крестовины

№	r, м	m, кг	t, сек	h, м	I, кг·м^2	$\bar{I}$, кг·м^2	ΔI_i, кг·м^2	s_I кг·м^2	ΔI кг·м^2
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
1.									
2.									
3.									

2. Измерьте (с помощью укрепленной на стене линейки) длину пути груза h. Для этого просто позвольте грузу дойти до низа (размотав весь шнурок) и успокоиться, а после этого посмотрите, на какой отметке линейки он окажется. Запишите полученное значение (в метрах) в пятый столбец табл. 11.1. Это значение – одно и то же для всех ваших экспериментов (если, конечно, в процессе работы вы не порвете шнурок и не замените его на новый).

3. Установите на основание груза (3 по рис. 11.6) несколько (сколько – скажет лаборант[38]) гирек. Запишите получившуюся массу

[38] Если ничего не скажет – три.

груза m в соответствующую строчку столбца 3 табл. 11.1. Если, например, гирек 3, то масса груза равна 3·50+50=200 г=0,2 кг.

4. Аккуратно вращая крестовину, намотайте шнурок на шкив (как показано на рис. 11.4) так, чтобы груз оказался немного выше нижнего конца электромагнита. Придерживая крестовину рукой (чтобы шнурок не размотался и не запутался), включите (тумблером 1 на рис. 11.7) электромагнит и поднимите металлическую пластину. С помощью электромагнита зафиксируйте ее в горизонтальном положении. Поставьте груз на металлическую пластину, продолжая придерживать крестовину рукой (иначе шнурок размотается и запутается).

5. С помощью поворота ручки 2 (по рис. 11.7) против часовой стрелки примерно на 45 градусов (сами почувствуете, когда хватит) «обнулите» секундомер, то есть подготовьте его к проведению измерений.

6. Отпустите крестовину и помощью тумблера 1 по рис. 11.7 включите секундомер (одновременно выключив электромагнит). Секундомер начнет работать, металлическая пластина упадет, груз пойдет вниз. Вы должны выключить секундомер (все тем же тумблером 1) в тот момент, когда грузик будет в нижнем положении.

7. Запишите время спуска грузика в столбец 4 табл. 11.1.

8. Проделайте пункты 3-7 еще два раза – с другим количеством гирек (добавляя по одной гирьке каждый раз).

9. Для каждого из трех измерений рассчитайте[39] момент инерции крестовины по формуле (11.25) и запишите полученное значение в графу 6 табл. 11.1. В вычислениях примите $g = 9{,}81\frac{м}{с^2}$ (именно таково ускорение свободного падения в Самаре).

[39] Не делайте все и всегда «по пунктам». Дочитайте до конца и подумайте, не лучше ли вместо длительных вычислений доделать до конца измерения (пункт 15) и только потом приниматься за вычисления. Если даже не успеете все вычислить на занятии (а ведь наверняка не успеете!), это можно без проблем сделать и дома. А вот проводить измерения дома невозможно – у вас же на стене над кроватью маятника Обербека нет. Отсюда правило – сначала все прочитайте, потом все поймите и только потом все делайте, начиная с того, что дома сделать невозможно (то есть с измерений, а не с вычислений).

10. Если вы не слишком сильно округляли ваши результаты и если не произошло чуда, то вы получите три разных значения одного и того же момента инерции одной и той же крестовины. Ясно, что этого быть не может, если только в промежутке между измерениями неизвестный злодей не погнул крестовину. Тем не менее это факт и он свидетельствует о том, что имеет место случайная ошибка измерений[40]. Для ее уменьшения следует найти среднее значение по формуле

$$\bar{I} = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3}. \qquad (11.30)$$

Запишите этот результат в седьмой столбец табл. 11.1. Это значение – одно, оно «общее» для всех проделанных вами измерений.

11. По формуле

$$\Delta I_i = \left| I_i - \bar{I} \right|, \qquad (11.31)$$

$i = 1,2,3$, найдите отклонение каждого отдельного измерения от эмпирического среднего и запишите полученные результаты в восьмой столбец табл. 11.1.

12. По формуле

$$s_I = \sqrt{\frac{(\Delta I_1)^2 + (\Delta I_2)^2 + (\Delta I_3)^2}{6}} \qquad (11.32)$$

найдите стандартную ошибку для момента инерции и запишите это значение в девятый столбец табл. 11.1.

13. По формуле

$$\Delta I = 1{,}312 s_I \qquad (11.33)$$

найдите полуширину доверительного интервала для момента инерции при доверительной вероятности 68 % (1,312 – коэффициент Стьюдента

[40] А есть ли систематическая ошибка? Очевидно, есть. Но она наверняка меньше случайной – ведь секундомер наверняка «врет» меньше, чем вы сами, когда нажимаете на кнопку чуть раньше или чуть позже, чем надо было бы. Поэтому систематической ошибкой мы пренебрегаем.

при количестве измерений 3 и доверительной вероятности 0,68, см. табл. 2 введения). Запишите это значение в десятый столбец табл. 11.1.

14. Запишите отдельно под этой ей окончательный результат измерения момента инерции в виде $I = (\bar{I} \pm \Delta I)$ кг·м^2, проведя разумное округление полученных значений.

15. Проведите измерение геометрических параметров крестовины (рис. 11.9). Результаты запишите в табл. 11.2 (второй столбец – в миллиметрах, третий – в метрах).

Таблица 11.2

Геометрические параметры крестовины

Геометрический параметр	**мм**	**м**
h (толщина центрального диска)		
l_1		
l_2		
l_3		
d_1		
$R_1 = d_1 / 2$		
d_2		
d_3		

16. С помощью формул (11.27), (11.28) и (11.29) рассчитайте массы составных частей крестовины (m_1, m_2, m_3), моменты инерции составных частей крестовины (I_1, I_2, I_3) и запишите их в табл. 11.3.

17. Рассчитайте суммарную массу крестовины и ее суммарный момент инерции. Запишите полученные результаты в табл. 11.3. Какая часть крестовины вносит главный вклад в ее массу? А какая часть вносит главный вклад в момент инерции?

18. Сравните значения момента инерции, полученные двумя способами. Сильно ли они отличаются?

Таблица 11.3

Массы и моменты инерции составных частей крестовины

Составная часть	Обозначение массы	Масса, кг	Обозначение момента инерции	Момент инерции, кг·м^2
Центральный диск	m_1		I_1	
Стержень	m_2		I_2	
Цилиндрический груз	m_3		I_3	
Вся крестовина	$m = m_1 + 4m_2 + 4m_3$		$I = I_1 + 4I_2 + 4I_3$	

Контрольные вопросы

1. Что такое угловая скорость? В чем она измеряется?
2. Что такое частота вращения? В чем она измеряется?
3. Предположим, что скорость вращения тела 20 об/сек. Как вы считаете, чему в этом случае может быть равна частота вращения?
4. Предположим, что скорость вращения тела 20 об/сек. Как вы считаете, чему в этом случае может быть равна его угловая скорость?
5. Предположим, что скорость вращения тела 20 об/сек. Как вы считаете, чему в этом случае может быть равен период вращения?
6. Предположим, что скорость вращения тела 2 об/сек. Как вы считаете, чему в этом случае может быть равна частота вращения?
7. Предположим, что скорость вращения тела 2 об/сек. Как вы считаете, чему в этом случае может быть равна его угловая скорость?
8. Предположим, что скорость вращения тела 2 об/сек. Как вы считаете, чему в этом случае может быть равен период вращения?
9. Предположим, что скорость вращения тела 5 об/сек. Как вы считаете, чему в этом случае может быть равна частота вращения?

10. Предположим, что скорость вращения тела 5 об/сек. Как вы считаете, чему в этом случае может быть равна его угловая скорость?

11. Предположим, что скорость вращения тела 5 об/сек. Как вы считаете, чему в этом случае может быть равен период вращения?

12. Предположим, что скорость вращения тела 10 об/сек. Как вы считаете, чему в этом случае может быть равна частота вращения?

13. Предположим, что скорость вращения тела 10 об/сек. Как вы считаете, чему в этом случае может быть равна его угловая скорость?

14. Предположим, что скорость вращения тела 10 об/сек. Как вы считаете, чему в этом случае может быть равен период вращения?

15. Предположим, что скорость вращения тела 30 об/сек. Как вы считаете, чему в этом случае может быть равна частота вращения?

16. Предположим, что скорость вращения тела 30 об/сек. Как вы считаете, чему в этом случае может быть равна его угловая скорость?

17. Предположим, что скорость вращения тела 30 об/сек. Как вы считаете, чему в этом случае может быть равен период вращения?

18. Предположим, что скорость вращения тела 15 об/сек. Как вы считаете, чему в этом случае может быть равна частота вращения?

19. Предположим, что скорость вращения тела 15 об/сек. Как вы считаете, чему в этом случае может быть равна его угловая скорость?

20. Предположим, что скорость вращения тела 15 об/сек. Как вы считаете, чему в этом случае может быть равен период вращения?

21. Предположим, что скорость вращения тела 35 об/сек. Как вы считаете, чему в этом случае может быть равна частота вращения?

22. Предположим, что скорость вращения тела 35 об/сек. Как вы считаете, чему в этом случае может быть равна его угловая скорость?

23. Предположим, что скорость вращения тела 35 об/сек. Как вы считаете, чему в этом случае может быть равен период вращения?

24. Предположим, что скорость вращения тела 18 об/сек. Как вы считаете, чему в этом случае может быть равна частота вращения?

25. Предположим, что скорость вращения тела 18 об/сек. Как вы считаете, чему в этом случае может быть равна его угловая скорость?

26. Предположим, что скорость вращения тела 18 об/сек. Как вы считаете, чему в этом случае может быть равен период вращения?

27. Предположим, что скорость вращения тела 38 об/сек. Как вы считаете, чему в этом случае может быть равна частота вращения?

28. Предположим, что скорость вращения тела 38 об/сек. Как вы считаете, чему в этом случае может быть равна его угловая скорость?

29. Предположим, что скорость вращения тела 38 об/сек. Как вы считаете, чему в этом случае может быть равен период вращения?

30. Что такое угловое ускорение? В чем оно измеряется?

31. Что такое момент силы? В чем он измеряется?

32. Что такое момент инерции? В чем он измеряется?

33. У кого больше момент инерции (при одинаковой массе и радиусе) – у шара, у цилиндра, у обруча?

34. У кого больше момент инерции (при одинаковой массе и радиусе) – у сплошного шара или у пустотелого шара?

35. У кого больше момент инерции (при одинаковой плотности и радиусе) – у шара, у цилиндра, у обруча?

36. У кого больше момент инерции (при одинаковой плотности и радиусе) – у сплошного шара или у пустотелого шара?

37. Во сколько раз изменится момент инерции сплошного шара при увеличении его радиуса в 2 раза?

38. Во сколько раз изменится момент инерции сплошного цилиндра при увеличении его радиуса в 2 раза?

39. Во сколько раз изменится момент инерции пустотелого шара при увеличении его радиуса в 2 раза?

40. Во сколько раз изменится момент инерции пустотелого цилиндра (трубы) при увеличении его радиуса в 2 раза?

41. Во сколько раз изменится момент инерции тонкого стержня при увеличении его радиуса в 2 раза?

42. Во сколько раз изменится момент инерции тонкого стержня при увеличении его длины в 2 раза?

43. Во сколько раз изменится момент инерции сплошного шара при его перемещении с Земли на Луну? Ускорение свободного падения на Луне 1,62 м/с^2.

44. Во сколько раз изменится момент инерции сплошного цилиндра при его перемещении с Земли на Луну? Ускорение свободного падения на Луне 1,62 м/с^2.

45. Во сколько раз изменится момент инерции пустотелого шара при его перемещении с Земли на Луну? Ускорение свободного падения на Луне 1,62 м/с^2.

46. Во сколько раз изменится момент инерции пустотелого цилиндра (трубы) при его перемещении с Земли на Луну? Ускорение свободного падения на Луне 1,62 м/с^2.

47. Во сколько раз изменится момент инерции тонкого стержня при его перемещении с Земли на Луну? Ускорение свободного падения на Луне 1,62 м/с^2.

48. Во сколько раз изменится момент инерции тонкого стержня при его перемещении с Земли на Луну? Ускорение свободного падения на Луне 1,62 м/с^2.

49. Во сколько раз изменится момент инерции сплошного шара при увеличении его радиуса в 2 раза без изменения плотности материала?

50. Во сколько раз изменится момент инерции сплошного цилиндра при увеличении его радиуса в 2 раза без изменения плотности материала?

51. Во сколько раз изменится момент инерции пустотелого шара при увеличении его радиуса в 2 раза без изменения плотности материала?

52. Во сколько раз изменится момент инерции пустотелого цилиндра (трубы) при увеличении его радиуса в 2 раза без изменения плотности материала?

53. Во сколько раз изменится момент инерции тонкого стержня при увеличении его радиуса в 2 раза без изменения плотности материала?

54. Во сколько раз изменится момент инерции тонкого стержня при увеличении его длины в 2 раза без изменения плотности материала?

55. Во сколько раз изменится момент инерции сплошного шара при увеличении его радиуса в 2 раза без изменения его массы?

56. Во сколько раз изменится момент инерции сплошного цилиндра при увеличении его радиуса в 2 раза без изменения его массы?

57. Во сколько раз изменится момент инерции пустотелого шара при увеличении его радиуса в 2 раза без изменения его массы?

58. Во сколько раз изменится момент инерции пустотелого цилиндра (трубы) при увеличении его радиуса в 2 раза без изменения его массы?

59. Во сколько раз изменится момент инерции тонкого стержня при увеличении его радиуса в 2 раза без изменения его массы?

60. Во сколько раз изменится момент инерции тонкого стержня при увеличении его длины в 2 раза без изменения его массы?

61. Во сколько раз изменится момент инерции сплошного шара при увеличении его радиуса в 3 раза без изменения плотности материала?

62. Во сколько раз изменится момент инерции сплошного цилиндра при увеличении его радиуса в 3 раза без изменения плотности материала?

63. Во сколько раз изменится момент инерции пустотелого шара при увеличении его радиуса в 3 раза без изменения плотности материала?

64. Во сколько раз изменится момент инерции пустотелого цилиндра (трубы) при увеличении его радиуса в 3 раза без изменения плотности материала?

65. Во сколько раз изменится момент инерции тонкого стержня при увеличении его радиуса в 3 раза без изменения плотности материала?

66. Во сколько раз изменится момент инерции тонкого стержня при увеличении его длины в 3 раза без изменения плотности материала?

67. Во сколько раз изменится момент инерции сплошного шара при увеличении его радиуса в 3 раза без изменения его массы?

68. Во сколько раз изменится момент инерции сплошного цилиндра при увеличении его радиуса в 3 раза без изменения его массы?

69. Во сколько раз изменится момент инерции пустотелого шара при увеличении его радиуса в 3 раза без изменения его массы?

70. Во сколько раз изменится момент инерции пустотелого цилиндра (трубы) при увеличении его радиуса в 3 раза без изменения его массы?

71. Во сколько раз изменится момент инерции тонкого стержня при увеличении его радиуса в 3 раза без изменения его массы?

72. Во сколько раз изменится момент инерции тонкого стержня при увеличении его длины в 3 раза без изменения его массы?

73. Во сколько раз изменится момент инерции сплошного шара при увеличении его радиуса в 4 раза без изменения плотности материала?

74. Во сколько раз изменится момент инерции сплошного цилиндра при увеличении его радиуса в 4 раза без изменения плотности материала?

75. Во сколько раз изменится момент инерции пустотелого шара при увеличении его радиуса в 4 раза без изменения плотности материала?

76. Во сколько раз изменится момент инерции пустотелого цилиндра (трубы) при увеличении его радиуса в 4 раза без изменения плотности материала?

77. Во сколько раз изменится момент инерции тонкого стержня при увеличении его радиуса в 4 раза без изменения плотности материала?

78. Во сколько раз изменится момент инерции тонкого стержня при увеличении его длины в 4 раза без изменения плотности материала?

79. Во сколько раз изменится момент инерции сплошного шара при увеличении его радиуса в 4 раза без изменения его массы?

80. Во сколько раз изменится момент инерции сплошного цилиндра при увеличении его радиуса в 4 раза без изменения его массы?

81. Во сколько раз изменится момент инерции пустотелого шара при увеличении его радиуса в 4 раза без изменения его массы?

82. Во сколько раз изменится момент инерции пустотелого цилиндра (трубы) при увеличении его радиуса в 4 раза без изменения его массы?

83. Во сколько раз изменится момент инерции тонкого стержня при увеличении его радиуса в 4 раза без изменения его массы?

84. Во сколько раз изменится момент инерции тонкого стержня при увеличении его длины в 4 раза без изменения его массы?

85. Во сколько раз изменится момент инерции сплошного шара при увеличении его радиуса на 40 % без изменения плотности материала?

86. Во сколько раз изменится момент инерции сплошного цилиндра при увеличении его радиуса на 40 % без изменения плотности материала?

87. Во сколько раз изменится момент инерции пустотелого шара при увеличении его радиуса на 40 % без изменения плотности материала?

88. Во сколько раз изменится момент инерции пустотелого цилиндра (трубы) при увеличении его радиуса на 40 % без изменения плотности материала?

89. Во сколько раз изменится момент инерции тонкого стержня при увеличении его радиуса на 40 % без изменения плотности материала?

90. Во сколько раз изменится момент инерции тонкого стержня при увеличении его длины на 40 % без изменения плотности материала?

91. Во сколько раз изменится момент инерции сплошного шара при увеличении его радиуса на 40 % без изменения его массы?

92. Во сколько раз изменится момент инерции сплошного цилиндра при увеличении его радиуса на 40 % без изменения его массы?

93. Во сколько раз изменится момент инерции пустотелого шара при увеличении его радиуса на 40 % без изменения его массы?

94. Во сколько раз изменится момент инерции пустотелого цилиндра (трубы) при увеличении его радиуса на 40 % без изменения его массы?

95. Во сколько раз изменится момент инерции тонкого стержня при увеличении его радиуса на 40 % без изменения его массы?

96. Во сколько раз изменится момент инерции тонкого стержня при увеличении его длины на 40 % без изменения его массы?

97. На сколько процентов изменится момент инерции сплошного шара при увеличении его радиуса на 40 % без изменения плотности материала?

98. На сколько процентов изменится момент инерции сплошного цилиндра при увеличении его радиуса на 40 % без изменения плотности материала?

99. На сколько процентов изменится момент инерции пустотелого шара при увеличении его радиуса на 40 % без изменения плотности материала?

100. На сколько процентов изменится момент инерции пустотелого цилиндра (трубы) при увеличении его радиуса на 40 % без изменения плотности материала?

101. На сколько процентов изменится момент инерции тонкого стержня при увеличении его радиуса на 40 % без изменения плотности материала?

102. На сколько процентов изменится момент инерции тонкого стержня при увеличении его длины на 40 % без изменения плотности материала?

103. На сколько процентов изменится момент инерции сплошного шара при увеличении его радиуса на 40 % без изменения его массы?

104. На сколько процентов изменится момент инерции сплошного цилиндра при увеличении его радиуса на 40 % без изменения его массы?

105. На сколько процентов изменится момент инерции пустотелого шара при увеличении его радиуса на 40 % без изменения его массы?

106. На сколько процентов изменится момент инерции пустотелого цилиндра (трубы) при увеличении его радиуса на 40 % без изменения его массы?

107. На сколько процентов изменится момент инерции тонкого стержня при увеличении его радиуса на 40 % без изменения его массы?

108. На сколько процентов изменится момент инерции тонкого стержня при увеличении его длины на 40 % без изменения его массы?

109. Теорема Штейнера.

110. Связь линейной и угловой скорости.

111. Связь углового и тангенциального ускорения.

112. Основной закон динамики вращательного движения.

113. Кто быстрее скатится с горки – сплошной цилиндр или труба (при одинаковом радиусе)?

114. Чем мы пренебрегли при выводе формулы (11.25)?

115. Чем мы пренебрегли при выводе формулы (11.27)?

116. Чем мы пренебрегли при выводе формулы (11.28)?

117. Чем мы пренебрегли при выводе формулы (11.29)?

118. *Кто быстрее скатится с горки – большой шар или маленький шарик?

12. МОДУЛЬ КРУЧЕНИЯ ТЕЛА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ КРУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ КРУТИЛЬНОГО МАЯТНИКА

Материал данной главы пригодится вам при выполнении **экспериментального задания № 4-I [8].** Это задание является прекрасной экспериментальной иллюстрацией изложенного в настоящей главе теоретического материала.

Основы теории

Всякое изменение в относительном расположении частиц твердого тела, возникающее под влиянием внешних сил, называется ***деформацией тела.*** Упругой называется деформация, исчезающая с прекращением действия силы. Различают деформацию растяжения и сжатия, сдвига и кручения. Рассмотрим в данной работе деформацию сдвига и кручения и связь между ними.

Сдвигом называется деформация, при которой все слои тела, параллельные некоторой плоскости, смещаются друг относительно друга (рис. 12.1). При сдвиге объем деформируемого тела не меняется.

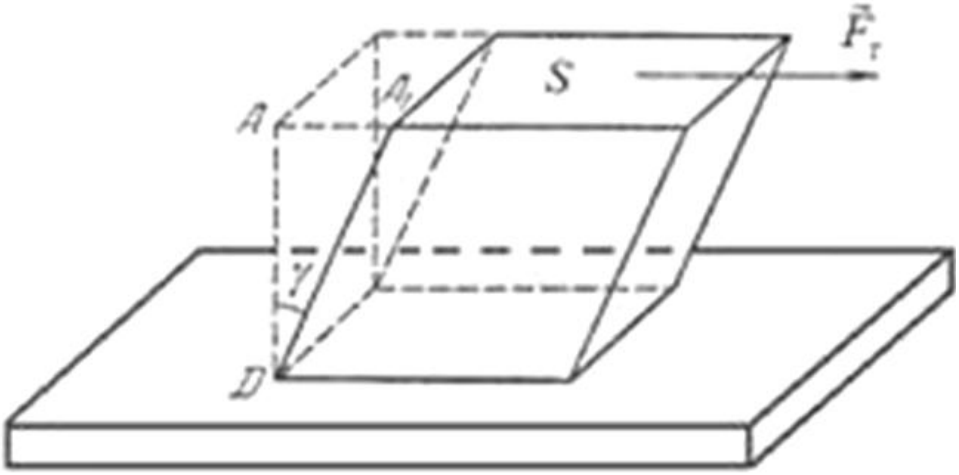


Рис. 12.1. Деформация типа сдвиг

Круче́нием называется деформация тела, которая возникает в том случае, если нагрузка прикладывается к телу в виде пары сил (момента) его поперечной плоскости (рис. 12.2). При этом в поперечных сечениях тела возникает только один внутренний силовой фактор – крутящий момент.

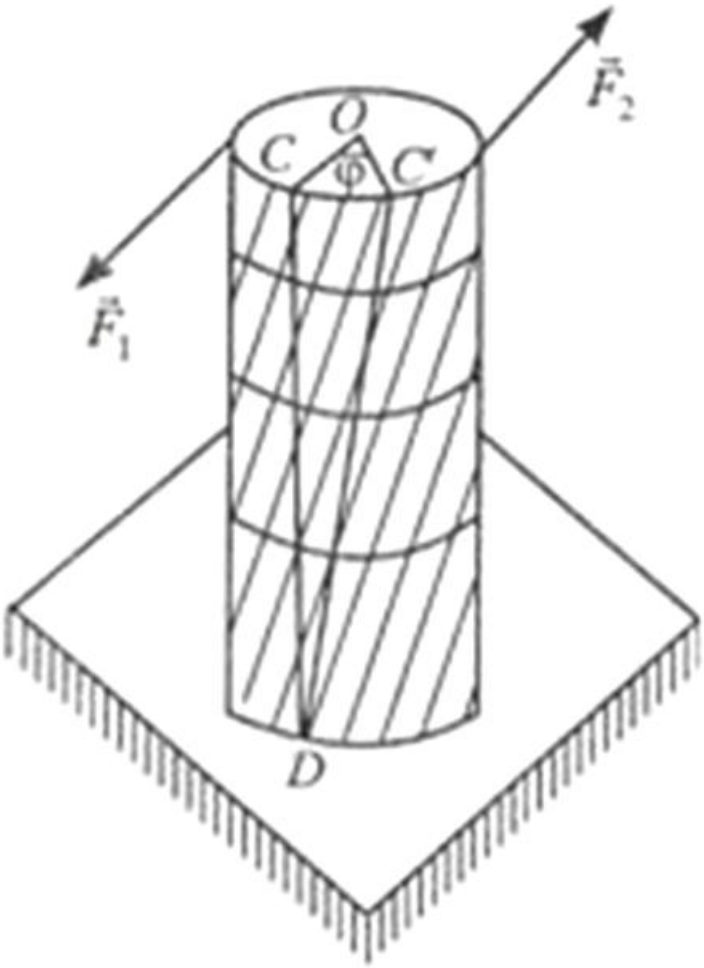


Рис. 12.2. Деформация цилиндра при закручивании

Модулями упругости называются величины, характеризующие упругие свойства материалов. В зависимости от типа деформации различают:

1. ***Модуль продольной упругости*** (***модуль Юнга***) ***E*** – в случае деформации растяжения.

2. ***Модуль сдвига N*** – в случае деформации сдвига.

3. ***Модуль кручения D*** – в случае деформации кручения.

Модуль продольной упругости ***E*** характеризует способность материалов сопротивляться деформации растяжения. Модуль сдвига ***N*** характеризует способность материалов сопротивляться деформации сдвига. Отличие модуля кручения ***D*** от модулей Юнга и сдвига состоит в том, что он зависит не только от свойств материала, но и от геометрических размеров тела: в случае цилиндра (стержня) – от его радиуса ***r*** и длины *L*.

Поскольку кручение сводится к неоднородному сдвигу, модуль кручения ***D*** оказывается зависимым от модуля сдвига ***N***.

Для определения модуля кручения и модуля сдвига в нашей лабораторной работе используется крутильный маятник. К вертикально висящей проволоке 1 крепится горизонтально висящий стержень 2 с двумя равными грузами 3 массой *m* каждый, которые можно перемещать вдоль стержня 2 (рис. 12.3).

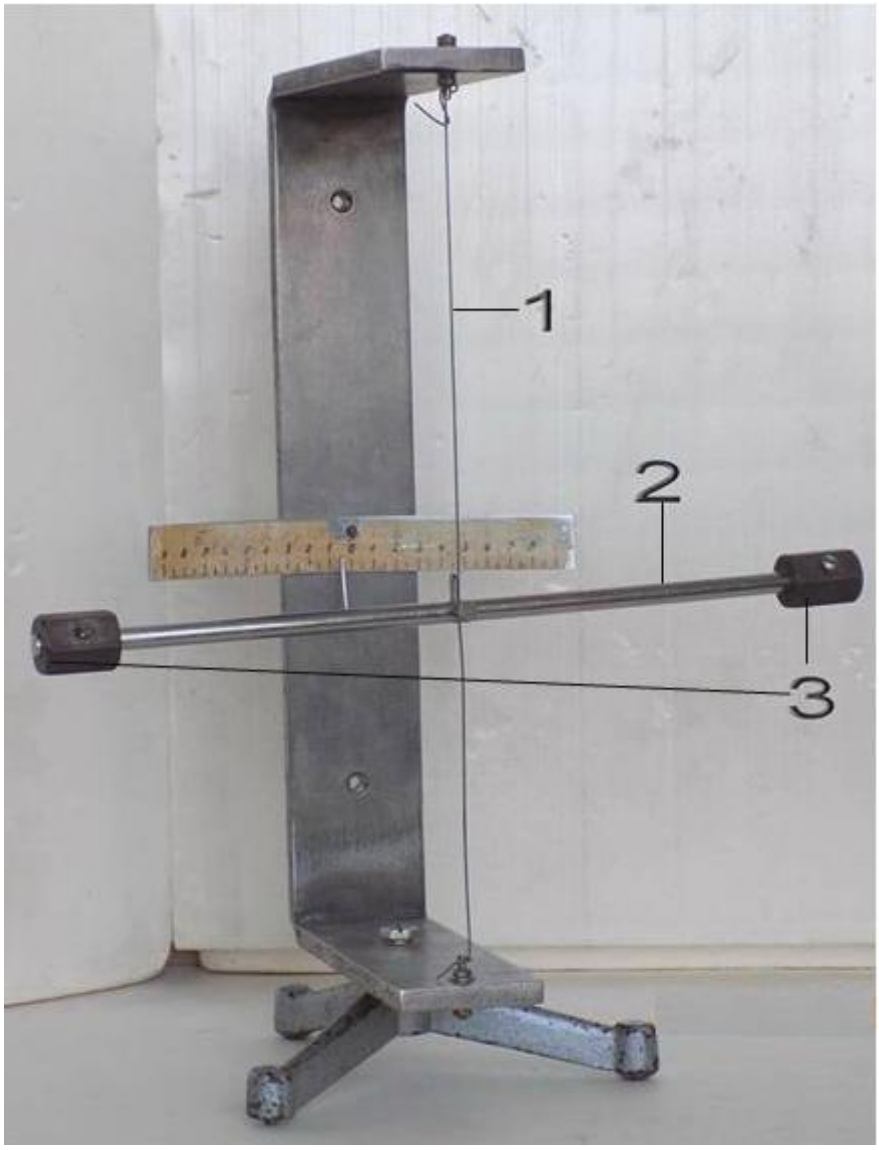


Рис. 12.3. Внешний вид установки для определения модуля кручения и сдвига

При крутильных колебаниях на маятник действует возвращающий момент, тормозящий возвращение тела от состояния равновесия и затем сообщающий ему обратное движение.

Возвращающий момент возникает при деформации кручения подвеса маятника. При малых углах поворота этот момент M прямо пропорционален углу кручения α ($M = -D \cdot \alpha$). Возвращающий момент найдем как произведение углового ускорения ε на момент инерции колеблющегося тела *J*:

$$M = J \cdot \varepsilon = -J \cdot \omega^2 \cdot \alpha = -D \cdot \alpha, \qquad (12.1)$$

где $\varepsilon = \alpha\omega^2$ – угловое ускорение, равное произведению угла поворота на квадрат круговой частоты. Из формулы (12.1) видно, что модуль кручения может быть найден по результатам измерения момента инерции и частоты собственных колебаний крутильного маятника по формуле $D = J \cdot \omega^2$. Выразив круговую частоту колебаний через их период, имеем $D = J \cdot \frac{4\pi^2}{T^2}$, или

$$T^2 = J \cdot \frac{4\pi^2}{D}. \qquad (12.2)$$

Для того чтобы обойтись без измерения момента инерции системы *J*, входящего в формулу (12.2), поступают следующим образом.

Устанавливают каждый из грузов 3 сначала на расстоянии l_1 от оси вращения, а потом на расстоянии l_2 и определяют периоды колебаний системы T_1 и T_2. Тогда согласно формуле (12.2) для этих величин можно записать:

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{J_1}{D}}, T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{J_2}{D}},$$

откуда

$$T_2^{\,2} - T_1^2 = \frac{4\pi^2}{D}\left(J_2 - J_1\right), \qquad (12.3)$$

где J_1 и J_2 – моменты инерции системы относительно оси, совпадающей с осью проволоки, при удалении от нее каждого подвижного груза соответственно на l_1 и l_2.

Согласно теореме Штейнера:

$$J_1 = J_0 + 2ml_1^2, J_2 = J_0 + 2ml_2^2. \qquad (12.4)$$

Найдя разность $J_2 - J_1 = 2m(l_2^2 - l_1^2)$ и подставляя в (12.3), получим:

$$D = \frac{8\pi^2 m(l_2^2 - l_1^2)}{T_2^2 - T_1^2}. \qquad (12.5)$$

Выражение (12.5) является расчетной формулой для определения модуля кручения проволоки. Зная модуль кручения ***D***, можно найти модуль сдвига ***N*** проволоки:

$$N = \frac{2DL}{\pi r^4}, \qquad (12.6)$$

где L – длина проволоки, r – ее радиус.

Подставив (12.5) в (12.6), окончательно получим:

$$N = \frac{16\pi mL(l_2^2 - l_1^2)}{r^4(T_2^2 - T_1^2)}. \qquad (12.7)$$

Порядок выполнения работы. Измерения и расчеты

Упражнение 1. Определение модуля кручения проволоки

1. Измерьте микрометром диаметр проволоки. Разделив его пополам, получите радиус проволоки. Значение занесите в табл. 12.1.

2. Измерьте длину проволоки L и занесите значение в табл. 12.1.

3. Закрепите грузы на одинаковом расстоянии l_1 от оси вращения маятника. Отклоните маятник на небольшой угол (4-5 см) и, отпустив маятник, по секундомеру определите время 50 колебаний t_1.

4. Закрепите грузы на максимальном расстоянии l_2 от оси вращения маятника. Отклоните маятник на небольшой угол (4-5 см) и, отпустив маятник, по секундомеру определите время 50 колебаний t_2.

5. Определите периоды T_1 *и* T_2 по формуле $T = \frac{t}{50}$ и запишите полученные результаты в табл. 12.1.

6. По формуле (12.5) рассчитайте модуль кручения проволоки. Масса грузов указана на установке.

7. Проделайте описанные в п.п. 1-6 измерения и вычисления три раза. После этого в вашей таблице появятся три разных значения одной и той же величины: D_1, D_2 и D_3. По формуле

$$\overline{D} = \frac{D_1 + D_2 + D_3}{3} \tag{12.8}$$

найдите среднее значение модуля кручения проволоки. Запишите этот результат в табл. 12.1.

8. По формуле

$$\Delta D_i = \left| D_i - \overline{D} \right|, \tag{12.9}$$

где i=1,2,3, найдите отклонение каждого отдельного измерения от эмпирического среднего и запишите полученные результаты в табл. 12.1.

9. По формуле

$$S_D = \sqrt{\frac{(\Delta D_1)^2 + (\Delta D_2)^2 + (\Delta D_3)^2}{6}} \tag{12.10}$$

рассчитайте стандартную ошибку для модуля кручения проволоки и запишите это значение в табл. 12.1.

10. По формуле

$$\Delta D = 1{,}312 \cdot S_D \tag{12.11}$$

найдите полуширину доверительного интервала при доверительной вероятности 68 %. Запишите это значение в табл. 12.1.

11. Запишите окончательный результат измерения в виде $D = \overline{D} \pm \Delta\overline{D}$.

Таблица 12.1

Расчет модуля кручения

№	r, м	L, м	l_1, м	l_2, м	T_1, с	T_2, с	D, Н·м	$\overline{D}$, Н·м	$\Delta\overline{D}$, Н·м	$\overline{D} \pm \Delta\overline{D}$, Н·м
1										
2										
3										

Упражнение 2. Определение модуля сдвига материала проволоки

1. Измерьте микрометром диаметр проволоки. Разделив его пополам, получите радиус проволоки. Значения занесите в табл. 12.2.

2. Измерьте длину проволоки L и занесите значение в табл. 12.2.

3. Закрепите грузы на одинаковом расстоянии l_1 от оси вращения маятника. Отклоните маятник на небольшой угол (4-5 см) и, отпустив маятник, по секундомеру определите время 50 колебаний t_1.

4. Закрепите грузы на максимальном расстоянии l_2 от оси вращения маятника. Отклоните маятник на небольшой угол (4-5 см) и, отпустив маятник, по секундомеру определите время 50 колебаний t_2.

5. Определите периоды T_1 *и* T_2 по формуле $T = \frac{t}{50}$ и запишите полученные результаты в табл. 12.2.

6. По формуле (12.7) рассчитайте модуль сдвига материала проволоки. Масса грузов указана на установке.

7. Проделайте описанные в п.п. 1-6 измерения и вычисления три раза. После этого в вашей таблице появятся три разных значения одной и той же величины: N_1, N_2 и N_3 По формуле

$$\overline{N} = \frac{N_1 + N_2 + N_3}{3}, \qquad (12.12)$$

где i=1,2,3, найдите среднее значение модуля сдвига материала проволоки. Запишите этот результат в табл. 12.2.

8. По формуле

$$\Delta N_i = \left| N_i - \overline{N} \right| \qquad (12.13)$$

найдите отклонение каждого отдельного измерения от эмпирического среднего и запишите полученные результаты в табл. 12.2.

9. По формуле

$$S_N = \sqrt{\frac{(\Delta N_1)^2 + (\Delta N_2)^2 + (\Delta N_3)^2}{6}} \qquad (12.14)$$

рассчитайте стандартную ошибку для модуля сдвига материала проволоки и запишите это значение в табл. 12.2.

10. По формуле

$$\Delta\overline{N} = 1{,}312 \cdot S_N \qquad (12.15)$$

найдите полуширину доверительного интервала при доверительной вероятности 68 %. Запишите это значение в табл. 12.2.

11. Запишите окончательный результат измерения в виде $N = \overline{N} \pm \Delta\overline{N}$.

Таблица 12.2

Расчет модуля сдвига

№	r, м	L, м	l_1, м	l_2, м	T_1, с	T_2, с	N, Па	$\overline{N}$, Па	$\Delta\overline{N}$, Па	$\overline{N} \pm \Delta\overline{N}$, Па
1										
2										
3										

Контрольные вопросы

1. Дайте определения деформации тела.
2. Что такое сдвиг?
3. Что мы называем кручением?
4. В чем заключается теорема Штейнера?
5. Как связаны между собой момент сдвига и момент кручения?
6. Получите расчетную формулу для момента сдвига.
7. В каких единицах измеряется момент сдвига?
8. Какова размерность момента кручения?
9. Что такое упругая деформация?
10. Получите формулу периода крутильных колебаний.
11. Всякая ли деформация кручения вызывает сдвиг? Объясните метод, используемый в работе для определения модуля сдвига.
12. Какие модули упругости вы знаете?
13. Какой физический смысл имеют модули сдвига и кручения?
14. Отчего зависит модуль кручения?
15. От чего зависит модуль сдвига?
16. Что называется моментом инерции? В чем измеряется?

17. Чему равен момент инерции материальной точки?

18. Как определить момент инерции неоднородного тела?

19. Какая величина называется моментом силы? В чем измеряется?

20. Что называется центром масс?

21. Сформулируйте и запишите закон динамики вращательного движения.

22. Почему к колеблющейся системе может быть применен основной закон вращательного движения?

23. Как направлено действие момента, создаваемого упругими силами материала проволоки в крутильных колебаниях?

24. Что такое период колебаний? В чем измеряется?

25. По какой формуле можно определить угловую частоту?

26. Какой маятник мы называем крутильным?

27. Во сколько раз изменится момент инерции крутильного маятника, если переместить грузы с края стержня на его середину?

28. Изменится ли период колебаний крутильного маятника, если переместить грузы с края стержня на его середину?

29. Изменится ли модуль кручения проволоки, если, не меняя диаметра проволоки, ее длину уменьшить в два раза?

30. Изменится ли модуль кручения проволоки, если, не меняя длины проволоки, ее диаметр увеличить в два раза?

31. Изменится ли модуль сдвига материала проволоки крутильного маятника, если ее длину увеличить в два раза, а диаметр уменьшить в два раза?

32. Предположим, что у вас имеется два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, стали) и имеющих одну и ту же длину (например, 50 см), но разный диаметр. Диаметр тонкого прутка 3 мм, а диаметр толстого – 4 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

33. Предположим, что у вас имеется два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, стали) и имеющих одну и ту же длину (например, 50 см), но разный диаметр. Диаметр тонкого

прутка 3 мм, а диаметр толстого – 5 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

34. Предположим, что у вас имеется два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, стали) и имеющих одну и ту же длину (например, 50 см), но разный диаметр. Диаметр тонкого прутка 3 мм, а диаметр толстого – 6 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

35. Предположим, что у вас имеется два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, стали) и имеющих одну и ту же длину (например, 50 см), но разный диаметр. Диаметр тонкого прутка 3 мм, а диаметр толстого – 10 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

36. Предположим, что у вас имеется два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, стали) и имеющих одну и ту же длину (например, 50 см), но разный диаметр. Диаметр тонкого прутка 3 мм, а диаметр толстого – 4 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

37. Предположим, что у вас имеется два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, стали) и имеющих одну и ту же длину (например, 50 см), но разный диаметр. Диаметр тонкого прутка 3 мм, а диаметр толстого – 5 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

38. Предположим, что у вас имеется два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, стали) и имеющих одну и ту же длину (например, 50 см), но разный диаметр. Диаметр тонкого прутка 3 мм, а диаметр толстого – 6 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

39. Предположим, что у вас имеется два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, латуни) и имеющих одну и ту же длину (например, 50 см), но разный диаметр. Диаметр тонкого прутка 3 мм, а диаметр толстого – 10 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

40. Предположим, что у вас имеется два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, латуни) и имеющих одну и ту же длину (например, 50 см), но разный диаметр. Диаметр тонкого прутка 3 мм, а диаметр толстого – 4 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

41. Предположим, что у вас имеется два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, латуни) и имеющих одну и ту же длину (например, 50 см), но разный диаметр. Диаметр тонкого прутка 3 мм, а диаметр толстого – 5 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

42. Предположим, что у вас имеется два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, латуни) и имеющих одну и ту же длину (например, 50 см), но разный диаметр. Диаметр тонкого прутка 3 мм, а диаметр толстого – 6 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

43. Предположим, что у вас имеется два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, латуни) и имеющих одну и ту же длину (например, 50 см), но разный диаметр. Диаметр тонкого прутка 3 мм, а диаметр толстого – 10 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

44. Предположим, что у вас имеется два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, молибдена) и имеющих одну и ту же длину (например, 50 см), но разный диаметр. Диаметр

тонкого прутка 3 мм, а диаметр толстого – 4 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

45. Предположим, что у вас имеется два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, молибдена) и имеющих одну и ту же длину (например, 50 см), но разный диаметр. Диаметр тонкого прутка 3 мм, а диаметр толстого – 5 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

46. Предположим, что у вас имеется два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, молибдена) и имеющих одну и ту же длину (например, 50 см), но разный диаметр. Диаметр тонкого прутка 3 мм, а диаметр толстого – 6 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

47. Предположим, что у вас имеется два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, молибдена) и имеющих одну и ту же длину (например, 50 см), но разный диаметр. Диаметр тонкого прутка 3 мм, а диаметр толстого – 10 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

48. Предположим, что у вас имеется два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, стали) и имеющих один и тот же диаметр (например, 10 мм), но разную длину. Длина короткого прутка 3 см, а длина длинного – 4 см. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

49. Предположим, что у вас имеется два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, стали) и имеющих один и тот же диаметр (например, 10 мм), но разную длину. Длина короткого прутка 3 см, а длина длинного – 5 см. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

50. Предположим, что у вас имеется два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, стали) и имеющих один и тот же диаметр (например, 5 мм), но разную длину. Длина короткого прутка 3 см, а длина длинного – 6 см. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

51. Предположим, что у вас имеется два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, стали) и имеющих один и тот же диаметр (например, 5 мм), но разную длину. Длина короткого прутка 3 см, а длина длинного – 10 см. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

52. Предположим, что у вас имеется два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, стали) и имеющих один и тот же диаметр (например, 5 мм), но разную длину. Длина короткого прутка 3 см, а длина длинного – 4 см. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

53. Предположим, что у вас имеется два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, стали) и имеющих один и тот же диаметр (например, 5 мм), но разную длину. Длина короткого прутка 3 см, а длина длинного – 5 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

54. Предположим, что у вас имеется два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, стали) и имеющих один и тот же диаметр (например, 5 мм), но разную длину. Длина короткого прутка 3 см, а длина длинного – 6 см. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

55. Предположим, что у вас имеется два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, латуни) и имеющих один и тот же диаметр (например, 5 мм), но разную длину. Длина короткого

прутка 3 см, а длина длинного – 10 см. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

56. Предположим, что у вас имеется два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, латуни) и имеющих один и тот же диаметр (например, 5 мм), но разную длину. Длина короткого прутка 3 см, а длина длинного – 4 см. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

57. Предположим, что у вас имеется два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, латуни) и имеющих один и тот же диаметр (например, 5 мм), но разную длину. Длина короткого прутка 3 см, а длина длинного – 5 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

58. Предположим, что у вас имеется два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, латуни) и имеющих один и тот же диаметр (например, 5 мм), но разную длину. Длина короткого прутка 3 см, а длина длинного – 6 см. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

59. Предположим, что у вас имеется два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, латуни) и имеющих один и тот же диаметр (например, 5 мм), но разную длину. Длина короткого прутка 3 см, а длина длинного – 10 см. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

60. Предположим, что у вас имеется два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, молибдена) и имеющих один и тот же диаметр (например, 5 мм), но разную длину. Длина короткого прутка 3 см, а длина длинного – 4 см. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

61. Предположим, что у вас имеется два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, молибдена) и имеющих один и тот же диаметр (например, 5 мм), но разную длину. Длина короткого прутка 3 см, а длина длинного – 5 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

62. Предположим, что у вас имеется два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, молибдена) и имеющих один и тот же диаметр (например, 5 мм), но разную длину. Длина короткого прутка 3 см, а длина длинного – 6 см. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

63. Предположим, что у вас имеется два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, молибдена) и имеющих один и тот же диаметр (например, 5 мм), но разную длину. Длина короткого прутка 3 см, а длина длинного – 10 см. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

13. МОДУЛЬ СДВИГА. ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОДУЛЯ СДВИГА НА КРУТИЛЬНОМ МАЯТНИКЕ

Материал данной главы пригодится вам при выполнении **экспериментального задания № 6-I [8].** Это задание является прекрасной экспериментальной иллюстрацией изложенного в настоящей главе теоретического материала.

Основы теории

Всякое изменение в относительном расположении частиц твердого тела, возникающее под влиянием внешних сил, называется **деформацией тела.** Упругой называется деформация, исчезающая с прекращением действия силы. Различают деформацию растяжения и сжатия, сдвига и кручения. По закону, установленному Гуком, величина деформации пропорциональна действующей силе. Рассмотрим в данной работе деформацию сдвиги и кручения и связь между ними.

Если один конец однородного стержня длиной L и радиусом r закрепить неподвижно (рис. 13.1), а к другому концу приложить пару сил F в плоскости сечения, перпендикулярной стержню, то момент этой пары сил составит

$$M = 2Fr.$$

Этот момент силы будет закручивать стержень. Отрезок ОА, отложенный вдоль одного из радиусов нижнего сечения, под влиянием закручивающего момента повернется на угол φ и займет положение ОВ. При достаточно малых углах кручения деформация будет упругой и по закону Гука угол кручения φ будет пропорционален закручивающему моменту пары сил M :

$$M = -D\varphi. \qquad (13.1)$$

Коэффициент пропорциональности D назовем модулем кручения.

Пологая угол кручения $\varphi = 1$ рад., находим $M = D$, т.е. модуль кручения численно равен моменту пары сил, под влиянием которой конец стержня закручивается на угол, равный одному радиану.

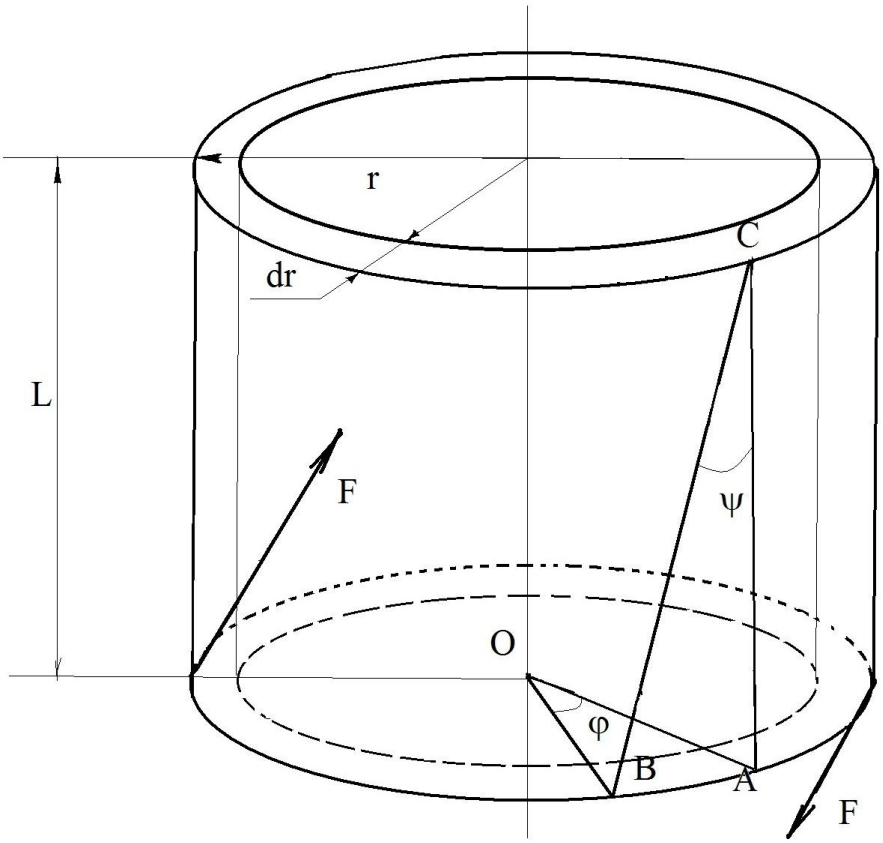


Рис. 13.1. Скручивание стержня под действием пары сил

При закручивании стержня его нижний конец испытывает сдвиг относительно верхнего; прямая CA принимает положение CB, при этом сдвигаясь на угол ψ . Закон Гука для деформации сдвига имеет вид

$$tg\psi = \frac{1}{N}\frac{F_\tau}{S}. \qquad (13.2)$$

Для малых углов сдвига (рис. 13.1) можно записать: $tg\psi = \psi = \frac{AB}{AC} = \frac{r\varphi}{L}$.

При описании деформации кручения можно представить сплошной стержень состоящим из тонкостенных цилиндрических слоев (трубок) с внутренним радиусом r и толщиной стенок dr. Элементарный вращающий момент силы, приложенный к такой трубке, запишется в виде

$$dM = rdF_\tau = rN\psi dS = \frac{Nr\varphi}{L}rdS. \qquad (13.3)$$

Площадь поперечного сечения элементарной трубки $dS = 2\pi \cdot rdr$, то $dM = \frac{2\pi N}{L}\varphi \cdot r^3 dr$. Интегрируя по всем трубкам, составляющим стержень, получим:

$$M = \frac{2\pi N\varphi}{L}\int_0^r r^3 dr = \frac{\pi N r^4}{2L}\varphi. \qquad (13.4)$$

Последнюю формулу удобнее переписать в виде: $\varphi = \frac{2ML}{\pi N r^4}$. Угол кручения прямо пропорционален длине стержня, моменту кручения и обратно пропорционален модулю сдвига материала и четверной степени радиуса стержня. С учетом формулы закона Гука для деформации кручения имеем

$$D = \frac{M}{\varphi} = \frac{\pi N r^4}{2L}. \qquad (13.5)$$

Данная формула устанавливает однозначную связь между деформацией кручения и сдвигом. В данной работе предлагается определить модуль кручения и по нему – модуль сдвига, измеряя период T крутильных колебаний.

Рассмотрим крутильные колебания груза на тонкой проволоке (рис. 13.2). Такое движение, как и любое другое вращательное движение, описывается основным уравнением вращательного движения:

$$M = I\frac{d^2\varphi}{dt^2}, \qquad (13.6)$$

где M – суммарный момент сил, действующий на тело, I – момент инерции тела относительно той же оси, что и вращающий момент; $\frac{d^2\varphi}{dt^2}$ – угловое ускорение. В нашем случае крутильные колебания происходят под действием только возвращающего момента, создаваемого силами упругости материала стержня, равного и направленного проти-

воположно закручивающему моменту. Трением и другими потерями пренебрегаем. Тогда, подставляя в (13.6) закон (13.1), получим:

$$I\frac{d^2\varphi}{dt^2} = -D\varphi, \text{ или } \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{D}{I}\varphi = 0. \qquad (13.7)$$

Полученное дифференциальное уравнение (13.7) является уравнением гармонического осциллятора. Решение имеет вид $\varphi = \varphi_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \theta_0\right)$ с периодом колебаний:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{D}}. \qquad (13.8)$$

Момент инерции произвольного тела теоретически очень сложно посчитать. Поэтому в лабораторной работе используется следующий метод: измеряется период колебаний двух крутильных маятников, момент инерции которых различается на известную величину. Это позволяет исключить неизвестный момент инерции системы.

Рассмотрим метод поподробнее: пусть I_0 – момент инерции подвижной системы, состоящей из проволоки и массивного неоднородного патрона, а T_0 – период колебаний этой системы. Тогда

$$T_0^2 = 4\pi^2\frac{I_0}{D}. \qquad (13.9)$$

Зажав в патроне однородный цилиндр с моментом инерции $I = \frac{mR^2}{2}$ (где m – масса цилиндра, R – его радиус), мы увеличим момент инерции системы, что приведет к увеличению периода колебаний:

$$T^2 = 4\pi^2\frac{I_0 + I}{D}. \qquad (13.10)$$

Вычитая почленно (13.9) из (13.10), получим:

$$T^2 - T_0^2 = \frac{4\pi^2 I}{D}. \qquad (13.11)$$

Таким образом, неизвестный момент инерции I_0 оказывается исключенным. Заменив момент инерции цилиндра в формуле (13.11), найдем, что

$$D = \frac{2\pi^2 mR^2}{T^2 - T_0^2}. \qquad (13.12)$$

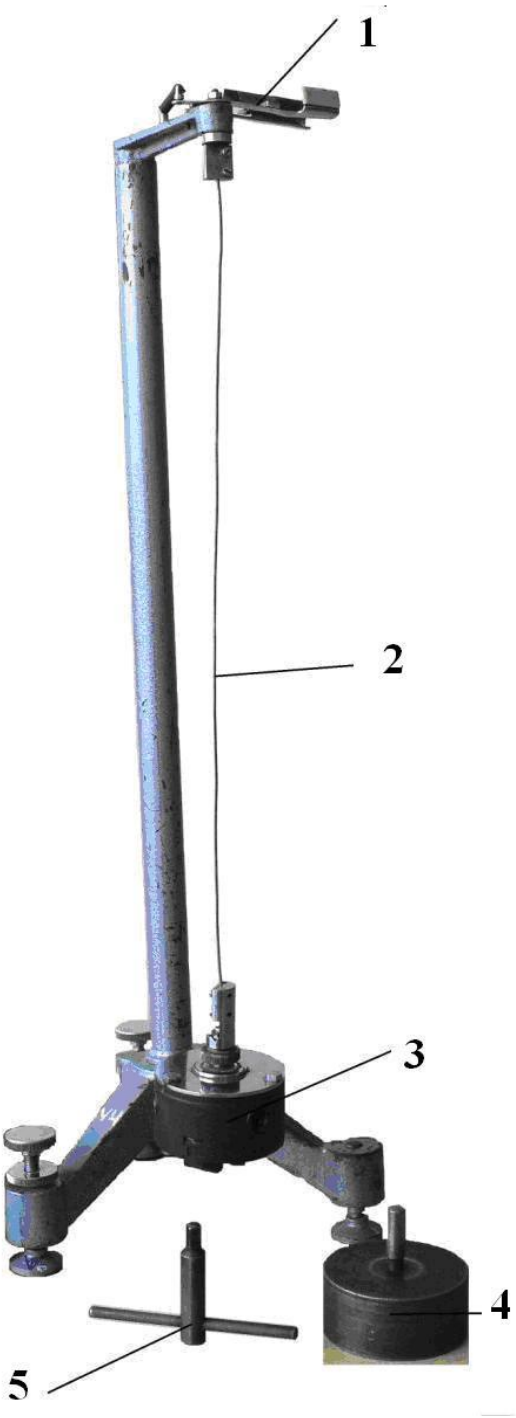


Рис. 13.2. Лабораторная установка:
1 – пружинный зажим; 2 – проволока; 3 – патрон;
4 – однородный цилиндр; 5 – ключ

Приравнивая правые части формул (13.5) и (13.12), получим формулу для нахождения момента сдвига, измеряя период крутильных колебаний:

$$N = \frac{4\pi L m R^2}{r^4 (T^2 - T_0^2)}. \qquad (13.13)$$

Осталось вспомнить, что масса однородного цилиндра находится по формуле $m = \rho V = \pi \rho R^2 h$. Тогда окончательно получим из (13.13):

$$N = \frac{4\pi^2 \rho h L R^4}{r^4 (T^2 - T_0^2)}. \qquad (13.14)$$

Порядок выполнения работы. Измерения и расчеты

1. Измерьте микрометром в трех местах диаметр проволоки. Разделив его пополам, получаем радиус проволоки (2 на рис. 13.2). Если все три значения получились одинаковые, то занесите его в табл. 13.1. Абсолютная погрешность измерения в этом случае будет равна систематической погрешности прибора, т.е. $\Delta r = 5 \cdot 10^{-6}$ м.

В противном случае надо оценить случайную погрешность. Найдите среднее значения радиуса

$$\bar{r} = \frac{r_1 + r_2 + r_3}{3}.$$

Вычислите полуширину доверительного интервала радиуса проволоки по формуле

$$\Delta \bar{r} = 1{,}312 \sqrt{\frac{(\bar{r} - r_1)^2 + (\bar{r} - r_2)^2 + (\bar{r} - r_3)^2}{6}}$$

(смотри формулу (7) введения, для трех измерений и для заданной вероятности 68 %). Занесите значение в табл. 13.1.

2. Измерьте длину проволоки L (от места закрепления проволоки до места закрепления к ней патрона). Значения заносите в табл. 13.1. Примите за величину ошибки измерения длины систематиче-

скую ошибку измерительной линейки, с помощью которой определяли длину проволоки: $\Delta\overline{L} = 5 \cdot 10^{-4}\,м$.

3. Измерьте штангенциркулем линейные размеры однородного цилиндра (4 на рис. 13.2.): R – радиус цилиндра и h – высота цилиндра. Значения занесите в табл. 13.1. За величину ошибки радиуса цилиндра и высоты примите систематическую ошибку штангенциркуля $\Delta\overline{R} = \Delta\overline{h} = 0{,}05\,мм = 5 \cdot 10^{-5}\,м$.

4. С помощью пружинного зажима (1 на рис. 13.2) приведите систему в крутильные колебания. Измерьте с помощью секундомера из вашего мобильника или секундомера, взятого у лаборанта, время 50 полных колебаний t_0 колебательной системы. Определите период колебаний $T_0 = \dfrac{t_0}{50}$ и запишите полученный результат в соответствующий столбец табл. 13.1. Согласно «Большой Советской Энциклопедии», время реакции человека колеблется от $\tau = 0{,}15$ секунд, до $\tau = 0{,}4$ секунд. Точнее этого времени простым секундомером нельзя определить временной интервал. Поэтому в лабораторной работе и приходится считать время 50 колебаний – ведь в этом случае за величину ошибки периода колебаний можно принять $\Delta T = \dfrac{\tau}{50} = 8 \cdot 10^{-3}$сек.

5. Зажмите цилиндр (4) в патрон (3) с помощью ключа (5) (рис. 13.2). Повторите измерения по п. 4 для системы из проволоки, патрона и цилиндра, записав значение периода T и величину ошибки в соответствующие ячейки табл. 13.1.

6. По формуле (13.14) вычислите модуль сдвига (в формуле все величины имеют среднее значения). Плотность стали примите равной $7800\dfrac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Модуль сдвига является косвенно измеряемой величиной, поэтому для вычисления его погрешности воспользуемся методами обработки результатов косвенных измерений (см. введение).

14. Согласно формуле (13.14), модуль сдвига зависит от 6 прямых измеряемых параметров: высоты, длины, периода системы и периода системы с цилиндром, радиуса проволоки и радиуса цилиндра. Относительная ошибка (по формуле (7) введения) имеет вид

$$\varepsilon = \frac{\Delta\overline{N}}{\overline{N}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta\overline{h}}{\overline{h}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\overline{L}}{\overline{L}}\right)^2 + \left(\frac{2\overline{T}_0\Delta\overline{T}_0}{\overline{T}^2 - \overline{T}_0^2}\right)^2 + \left(\frac{2\overline{T}\Delta\overline{T}}{\overline{T}^2 - \overline{T}_0^2}\right)^2 + \left(\frac{4\Delta\overline{r}}{\overline{r}}\right)^2 + \left(\frac{4\Delta\overline{R}}{\overline{R}}\right)^2},$$

где высота, длина, периоды и радиусы имеют среднее значения.

15. Вычислите абсолютную ошибку модуля сдвига по формуле $\Delta\overline{N} = \varepsilon\overline{N}$ (результат занесите в табл. 13.1).

Таблица 13.1

Измерение модуля сдвига

	r, м	L, м	T_0, с	T, с	h, м	R, м	N, ГПа
Среднее значение							
Ошибка измерения							

Контрольные вопросы

1. Что такое колебания?
2. Что такое крутильные колебания?
3. Дайте определения деформации тела.
4. Чем отличается деформация сжатия от деформации растяжения?
5. Чем отличается деформация сжатия от деформации типа сдвиг?
6. Напишите закон Гука для деформации типа сдвиг.
7. Всегда ли при деформации выполняется закон Гука?
8. Как называется деформация, для которой закон Гука справедлив?
9. Что такое модуль сдвига?
10. У какого вещества модуль сдвига больше: у стали или у дерева?
11. У какого вещества модуль сдвига больше: у меди или у стали?

12. У какого вещества модуль сдвига больше: у свинца или у алмаза?

13. Что такое относительная деформация при сдвиге?

14. Что такое угол деформации при сдвиге?

15. Как связаны между собой угол сдвига и относительная деформация при сдвиге?

16. Что такое момент инерции?

17. Рассчитайте момент инерции однородного цилиндра.

18. Что такое модуль кручения?

19. Как связаны между собой модуль кручения и момент кручения?

20. Получите расчетную формулу для модуля сдвига.

21. В каких единицах измеряется модуль сдвига?

22. Какова размерность момента кручения?

23. Получите формулу периода крутильных колебаний.

24. Как изменится период крутильных колебаний, если увеличить массу подвешенного цилиндра?

25. Как изменится период крутильных колебаний, если увеличить длину проволоки, на которой закреплен патрон и цилиндр?

26. Как изменится период крутильных колебаний, если увеличить диаметр проволоки, на которой закреплены патрон и цилиндр?

27. Во сколько раз изменится период колебаний крутильного маятника, если при неизменной массе груза удлинить проволоку, на которой закреплен груз, в два раза и увеличить её диаметр в 1,5 раза?

28. Во сколько раз изменится период колебаний крутильного маятника, если при неизменной массе груза укоротить проволоку, на которой закреплен груз, в два раза и увеличить её диаметр в 1,5 раза?

29. Во сколько раз изменится период колебаний крутильного маятника, если при неизменной массе груза укоротить проволоку, на которой закреплен груз, в два раза и уменьшить её диаметр в два раза?

30. Всякая ли деформация кручения вызывает сдвиг?

31. Предположим, что у вас имеются два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, стали) и имеющих одну и ту же длину (например, 70 см), но разный диаметр. Диаметр тонкого

прутка 3,5 мм, а диаметр толстого – 4 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

32. Предположим, что у вас имеются два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, стали) и имеющих одну и ту же длину (например, 70 см), но разный диаметр. Диаметр тонкого прутка 3,5 мм, а диаметр толстого – 5 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

33. Предположим, что у вас имеются два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, стали) и имеющих одну и ту же длину (например, 70 см), но разный диаметр. Диаметр тонкого прутка 3,5 мм, а диаметр толстого – 6 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

34. Предположим, что у вас имеются два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, стали) и имеющих одну и ту же длину (например, 70 см), но разный диаметр. Диаметр тонкого прутка 3,5 мм, а диаметр толстого – 10 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

35. Предположим, что у вас имеются два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, стали) и имеющих одну и ту же длину (например, 70 см), но разный диаметр. Диаметр тонкого прутка 3,5 мм, а диаметр толстого – 4 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

36. Предположим, что у вас имеются два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, стали) и имеющих одну и ту же длину (например, 70 см), но разный диаметр. Диаметр тонкого прутка 3,5 мм, а диаметр толстого – 5 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

37. Предположим, что у вас имеются два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, стали) и имеющих одну и ту же длину (например, 70 см), но разный диаметр. Диаметр тонкого прутка 3,5 мм, а диаметр толстого – 6 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

38. Предположим, что у вас имеются два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, латуни) и имеющих одну и ту же длину (например, 70 см), но разный диаметр. Диаметр тонкого прутка 3,5 мм, а диаметр толстого – 10 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

39. Предположим, что у вас имеются два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, латуни) и имеющих одну и ту же длину (например, 70 см), но разный диаметр. Диаметр тонкого прутка 3,5 мм, а диаметр толстого – 4 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

40. Предположим, что у вас имеются два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, латуни) и имеющих одну и ту же длину (например, 70 см), но разный диаметр. Диаметр тонкого прутка 3,5 мм, а диаметр толстого – 5 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

41. Предположим, что у вас имеются два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, латуни) и имеющих одну и ту же длину (например, 70 см), но разный диаметр. Диаметр тонкого прутка 3,5 мм, а диаметр толстого – 6 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

42. Предположим, что у вас имеются два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, латуни) и имеющих одну и ту же длину (например, 70 см), но разный диаметр. Диаметр тонкого

прутка 3,5 мм, а диаметр толстого – 10 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

43. Предположим, что у вас имеются два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, молибдена) и имеющих одну и ту же длину (например, 70 см), но разный диаметр. Диаметр тонкого прутка 3,5 мм, а диаметр толстого – 4 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

44. Предположим, что у вас имеются два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, молибдена) и имеющих одну и ту же длину (например, 70 см), но разный диаметр. Диаметр тонкого прутка 3,5 мм, а диаметр толстого – 5 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

45. Предположим, что у вас имеются два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, молибдена) и имеющих одну и ту же длину (например, 70 см), но разный диаметр. Диаметр тонкого прутка 3,5 мм, а диаметр толстого – 6 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

46. Предположим, что у вас имеются два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, молибдена) и имеющих одну и ту же длину (например, 70 см), но разный диаметр. Диаметр тонкого прутка 3,5 мм, а диаметр толстого – 10 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

47. Предположим, что у вас имеются два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, стали) и имеющих один и тот же диаметр (например, 10 мм), но разную длину. Длина короткого прутка 3 см, а длина длинного – 4 см. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

48. Предположим, что у вас имеются два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, стали) и имеющих один и тот же диаметр (например, 10 мм), но разную длину. Длина короткого прутка 3 см, а длина длинного – 5 см. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

49. Предположим, что у вас имеются два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, стали) и имеющих один и тот же диаметр (например, 5 мм), но разную длину. Длина короткого прутка 3 см, а длина длинного – 6 см. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

50. Предположим, что у вас имеются два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, стали) и имеющих один и тот же диаметр (например, 5 мм), но разную длину. Длина короткого прутка 3 см, а длина длинного – 10 см. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

51. Предположим, что у вас имеются два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, стали) и имеющих один и тот же диаметр (например, 5 мм), но разную длину. Длина короткого прутка 3 см, а длина длинного – 4 см. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

52. Предположим, что у вас имеются два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, стали) и имеющих один и тот же диаметр (например, 5 мм), но разную длину. Длина короткого прутка 3 см, а длина длинного – 5 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

53. Предположим, что у вас имеются два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, стали) и имеющих один и тот же диаметр (например, 5 мм), но разную длину. Длина короткого

прутка 3 см, а длина длинного – 6 см. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

54. Предположим, что у вас имеются два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, латуни) и имеющих один и тот же диаметр (например, 5 мм), но разную длину. Длина короткого прутка 3 см, а длина длинного – 10 см. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

55. Предположим, что у вас имеются два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, латуни) и имеющих один и тот же диаметр (например, 5 мм), но разную длину. Длина короткого прутка 3 см, а длина длинного – 4 см. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

56. Предположим, что у вас имеются два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, латуни) и имеющих один и тот же диаметр (например, 5 мм), но разную длину. Длина короткого прутка 3 см, а длина длинного – 5 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

57. Предположим, что у вас имеются два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, латуни) и имеющих один и тот же диаметр (например, 5 мм), но разную длину. Длина короткого прутка 3 см, а длина длинного – 6 см. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

58. Предположим, что у вас имеются два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, латуни) и имеющих один и тот же диаметр (например, 5 мм), но разную длину. Длина короткого прутка 3 см, а длина длинного – 10 см. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

59. Предположим, что у вас имеются два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, молибдена) и имеющих один и тот же диаметр (например, 5 мм), но разную длину. Длина короткого прутка 3 см, а длина длинного – 4 см. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

60. Предположим, что у вас имеются два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, молибдена) и имеющих один и тот же диаметр (например, 5 мм), но разную длину. Длина короткого прутка 3 см, а длина длинного – 5 мм. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

61. Предположим, что у вас имеются два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, молибдена) и имеющих один и тот же диаметр (например, 5 мм), но разную длину. Длина короткого прутка 3 см, а длина длинного – 6 см. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

62. Предположим, что у вас имеются два прутка, изготовленных из одного и того же материала (например, молибдена) и имеющих один и тот же диаметр (например, 5 мм), но разную длину. Длина короткого прутка 3 см, а длина длинного – 10 см. У которого из прутков больше модуль кручения и во сколько раз? У которого из прутков больше модуль сдвига и во сколько раз?

14. МОЛЕКУЛЯРНОЕ СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА И ЭФФЕКТИВНОГО ДИАМЕТРА МОЛЕКУЛ ВОЗДУХА

Материал данной главы пригодится вам при выполнении **экспериментального задания № 9-I [8].** Это задание является прекрасной экспериментальной иллюстрацией изложенного в настоящей главе теоретического материала.

Основы теории

Согласно основному положению молекулярно-кинетической теории газов, молекулы представляются как твердые шары определенного диаметра, находящиеся в состоянии хаотического движения, при котором они беспорядочно сталкиваются с друг с другом. Между двумя последовательными столкновениями молекулы проходят некоторый путь, который называется **длиной свободного пробега**. В общем случае длина свободного пробега между двумя последовательными столкновениями различна, так как мы имеем дело с огромным числом молекул в единице объема и они находятся в беспорядочном движении. Средний путь, проходимый молекулой между двумя последовательными соударениями, называется средней длиной свободного пробега молекул $\langle \lambda \rangle$.

Минимальное расстояние, на которое сближаются центры двух молекул при столкновении, называется эффективным диаметром молекул $d_{эф}$.

За одну секунду молекула проходит путь, в среднем равный средней скорости $\langle V \rangle$. Если за секунду она в среднем претерпевает $\langle Z \rangle$ столкновений, то средняя длина свободного пробега составит величину

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\langle V \rangle}{\langle Z \rangle}. \qquad (14.1)$$

Для того чтобы подсчитать $\langle Z \rangle$, предположим, что все молекулы, кроме данной, неподвижны. За секунду выбранная молекула пойдет

путь, равный $\langle V \rangle$. Очевидно, что число происходящих за это время соударений с неподвижными молекулами равно количеству молекул, попавших внутрь мысленно выделенного цилиндра длиной $\langle v \rangle$ и радиусом $d_{эф}$, объем которого равен $\pi d^2 \langle V \rangle$. Умножив этот объем на число молекул в единице объема n, получим среднее число столкновений за секунду движущейся молекулы с неподвижными:

$$Z' = \pi d^2 \langle V \rangle n. \qquad (14.2)$$

В действительности же все молекулы движутся, вследствие чего число соударений определяется средней скоростью движения молекул по отношению друг к другу. Как показывают расчеты, средняя скорость относительного движения молекул в $\sqrt{2}$ раз больше скорости $\langle v \rangle$ молекул относительно стенок сосуда, поэтому среднее число столкновений за секунду

$$\langle Z \rangle = \sqrt{2} \pi d^2 n \langle V \rangle. \qquad (14.3)$$

Подставив это выражение в (14.1), получим для средней длины свободного пробега:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n}. \qquad (14.4)$$

Выразив эффективный диаметр $d_{эф}$ через эффективное сечение рассеяния молекулы $\sigma = \frac{\pi d^2}{4}$, получим:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{1}{4\sqrt{2} \sigma n}. \qquad (14.5)$$

Связанные между собой величины $\langle \lambda \rangle$ и σ определяют явления переноса.

Явления переноса – это процессы установления равновесия в системе путем переноса массы при выравнивании концентрации (диффузия), переноса энергии при выравнивании температур (тепло-

проводность) и переноса импульса молекул (внутреннее трение, или вязкость). Все эти явления обусловлены хаотическим тепловым движением молекул.

При явлении вязкости наблюдается перенос импульса от молекул из слоев потока, которые двигаются быстрее, к более медленным. Например, в случае протекания жидкости или газа в прямолинейной цилиндрической трубе (капилляре) при малых скоростях потока течение является ламинарным, т.е. поток газа движется отдельными слоями, которые не смешиваются между собой. Эти слои представляют собой совокупность бесконечно тонких цилиндрических поверхностей, вложенных одна в другую, имеющих общую ось, совпадающую с осью трубы. Вследствие хаотического теплового движения молекулы непрерывно переходят из слоя в слой и при столкновении с другими молекулами обмениваются импульсами направленного движения. При переходе из слоя с большей скоростью направленного движения в слой с меньшей скоростью молекулы переносят в другой слой свой импульс направленного движения. В «более быстрый» слой переходят молекулы с меньшим импульсом. В результате первый слой тормозится, а второй ускоряется. Опыт показывает, что импульс dp, который передается от слоя к слою через поверхность S, пропорционален градиенту скорости $\frac{dV}{dy}$, площади S и времени переноса dt:

$$dp = -\eta \frac{dV}{dy} S \cdot dt, \tag{14.6}$$

где η − коэффициент вязкости или внутреннего трения; $\frac{dV}{dy}$ – градиент скорости, т.е. величина, показывающая, как быстро изменяется скорость движения газа dV в направлении y, перпендикулярном к поверхности, разделяющей слои.

В результате между слоями возникает сила внутреннего трения:

$$F = \left|\frac{dp}{dt}\right| = \eta \left|\frac{dV}{dy}\right| S. \tag{14.7}$$

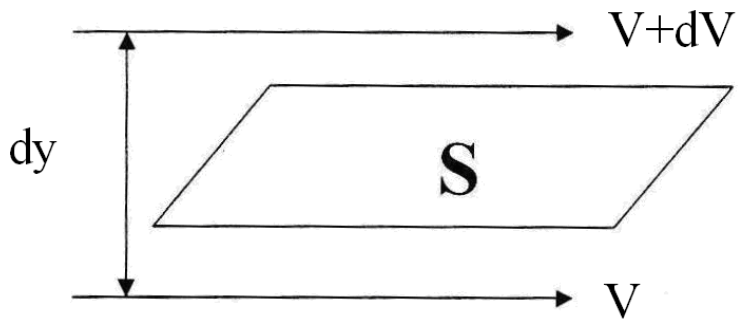


Рис. 14.1. Движение слоев жидкости

Динамическую вязкость можно определить, воспользовавшись известной формулой Пуазейля, которая устанавливает связь η с длиной L и радиусом r капиллярной трубки, по которой течет газ (жидкость) при разности давлений ΔP, возникающей на концах трубки:

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta P \tau}{8 V_{об} L}. \qquad (14.8)$$

Таким образом, вязкость газа можно легко определить экспериментально. Для этого нужно измерить $V_{об}$ объем газа (жидкости), прошедшего через капилляр с известной длиной L и радиусом r за определенное время t. Такое течение устанавливается на некотором расстоянии от входа в капилляр, поэтому для достижения достаточной точности эксперимента необходимо выполнение условия $r << L$.

Знание величины вязкости газа позволяет рассчитать длину свободного пробега молекул $\langle \lambda \rangle$.

Согласно молекулярно-кинетической теории,

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle V \rangle \langle \lambda \rangle. \qquad (14.9)$$

Коэффициент $\frac{1}{3}$ связан с тем, что при поступательном движении молекулы имеют три степени свободы и их импульс распределяется по трем направлениям.

Таким образом, приравнивая (14.8) и (14.9) и учитывая, что $\langle V \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$, имеем:

$$\langle \lambda \rangle = C \cdot \frac{\Delta P \tau}{V_{об}}, \qquad (14.10)$$

где $C = \frac{\pi r^4}{7{,}54 L\rho}\sqrt{\frac{\pi RT}{\mu}}$ – постоянная для данного опыта (ее значение указано на установке).

Зная $\langle \lambda \rangle$, можно определить эффективный диаметр молекулы газа $d_{эф}$, используя соотношение (14.4):

$$d_{эф} = \frac{1}{\sqrt{\sqrt{2}\pi n \langle \lambda \rangle}}.$$

Используя уравнение состояния идеального газа в виде $P = n\kappa T$, выражаем концентрацию:

$$n = \frac{P}{kT},$$

где k и T – константа Больцмана и абсолютная температура газа.

Окончательно имеем:

$$d_{эф} = \sqrt{\frac{kT}{\sqrt{2}\pi P \langle \lambda \rangle}}. \qquad (14.11)$$

Порядок выполнения работы. Измерения и расчеты

1. Наполняют баллон А (рис.14.2) примерно на три четверти водой.

2. Открывают кран В. Когда вода из баллона начнет капать, подставляют стакан D и одновременно включают секундомер, отметив на шкале уровень воды h_1.

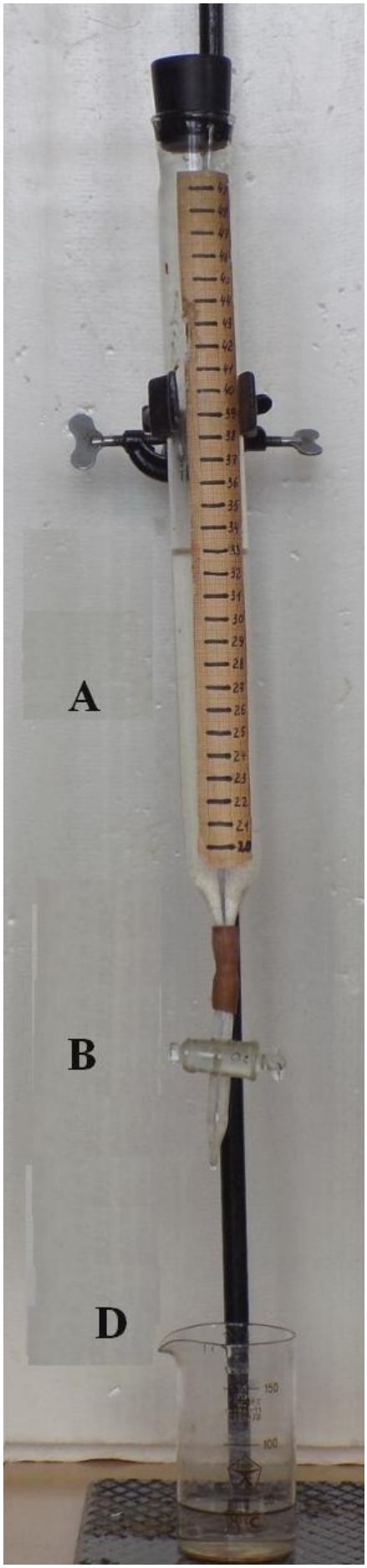


Рис. 14.2. Лабораторная установка

3. Набрав в стакан заданное лаборантом или преподавателем количество воды (по умолчания 20 мл), закрывают кран В, отмечают уровень h_2 и останавливают секундомер. Записывают время τ, h_1 и h_2 в табл. 14.1.

4. Разность давлений вычисляют по формуле

$$\Delta P = \rho g \frac{h_1 + h_2}{2}.$$

5. По формуле (14.10) подсчитывают $\langle\lambda\rangle$ для воздуха. Значение С указано на установке.

6. Опыт повторяют при другом объеме воды и других уровнях h_1 и h_2.

7. Определяют среднее (по проведенным измерениям) значение величины $\overline{\langle\lambda\rangle}$.

8. Подставляют среднее значение $\overline{\langle\lambda\rangle}$ в формулу (14.11) и подсчитывают эффективный диаметр молекулы воздуха. T и P – температура и давление, при которых протекает опыт – их измеряют настенный термометр и настенный барометр.

9. Определите и запишите в табл. 14.1 исправленную стандартную ошибку эмпирического среднего значения линейной плотности по формуле (7) введения:

$$s_\lambda = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n} \Delta\langle\lambda\rangle_i^2},$$

где $\Delta\langle\lambda\rangle_i = \langle\lambda\rangle_i - \overline{\langle\lambda\rangle}$ отклонение каждого отдельного измерения от их общего эмпирического среднего.

10. Определите полуширину доверительного интервала $\overline{\langle\lambda\rangle}$ по формуле $\Delta\overline{\langle\lambda\rangle} = s_\lambda t_{p,n}$, где $t_{p,n}$ – так называемые критические точки распределения Стьюдента с доверительной вероятностью p и числом степеней свободы n. Эти критические точки (для доверительных ве-

роятностей 68 %, 95 % и 99 % приведены в таблице 2 введения) запишите в табл. 14.1.

11. Окончательный результат запишите в виде $\langle\lambda\rangle = \overline{\langle\lambda\rangle} \pm \Delta\overline{\langle\lambda\rangle}$.

Таблица 14.1

Измерение длины свободного пробега молекулы воздуха и ее эффективного диаметра

№	h_1, м	h_2, м	τ, с	ΔP, Па	$V_{об}$, м^3	$\langle\lambda\rangle$, м	$\overline{\langle\lambda\rangle}$, м	$\Delta\overline{\langle\lambda\rangle}$, м	$d_{эф}$, м
1									
2									
3									
4									
5									

Контрольные вопросы

1. Что такое средняя длина свободного пробега молекулы? В чем она измеряется?
2. Что такое эффективный диаметр молекулы газа? Как его рассчитать?
3. В чем заключаются явления переноса?
4. Какое течение жидкости называется ламинарным?
5. Как рассчитать среднее число столкновений между молекулами?
6. Что такое градиент скорости?
7. Чему равна сила внутреннего трения между слоями жидкости? От чего она зависит?
8. Что такое вязкость жидкости? От чего она зависит? В каких единицах измеряется?
9. Если газ с молярной массой μ при некоторой температуре T имеет вязкость η, то чему будет равен диаметр его молекулы?
10. Как изменится длина свободного пробега молекулы, если в запаянном сосуде увеличить температуру газа в 4 раза?
11. Как изменится число столкновений в единицу времени молекул газа, если его объем изотермически увеличить в 2 раза?

12. Некоторый газ с молярной массой μ находится в сосуде при давлении P и температуре T и имеет вязкость η. Чему равна средняя длина свободного пробега молекул газа? По какой формуле определяется средняя длина свободного пробега молекулы?

13. В результате чего между слоями возникает сила внутреннего трения?

14. Выведите формулу для коэффициента вязкости из молекулярно-кинетической теории.

15. В чем заключается идея опыта по определению средней длины свободного пробега и эффективного диаметра молекулы?

16. Что такое диффузия? От чего она зависит?

17. Что такое теплопроводность? От чего она зависит?

18. По какой формуле рассчитывается средняя квадратичная скорость движения молекул газа?

19. Как рассчитать эффективное сечение рассеяния молекулы, зная ее эффективный диаметр?

20. Как рассчитать эффективное сечение молекулы газа, если известна его молярная масса μ, температура T и вязкость η?

21. Как изменится длина свободного пробега молекулы, если уменьшить концентрацию молекул газа?

22. Для чего нужна формула Пуазейля?

23. Запишите основное уравнение состояния идеального газа.

24. Как зависит длина свободного пробега от температуры?

25. Как зависит длина свободного пробега от давления?

26. Что произойдет с длиной свободного пробега, если, не меняя температуры газа, понизить его давление?

27. Запишите выражение для определения коэффициента внутреннего трения. От чего он зависит?

28. Как зависит вязкость газа от его давления?

29. При каком предположении число столкновений молекул в единицу времени выводится особенно просто? Чем отличается полученный результат от истинного?

30. Почему несмотря на большую скорость молекула за одну секунду уходит лишь на очень небольшое расстояние от того места, где она находилась?

15. ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА

Материал данной главы пригодится вам при выполнении **экспериментального задания № 10-I [8].** Это задание является прекрасной экспериментальной иллюстрацией изложенного в настоящей главе теоретического материала.

Основы теории

Вязкость жидкости

Внутренним трением называется свойство текучих тел (жидкостей и газов) оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой. Основной закон внутреннего трения был установлен Исааком Ньютоном в 1687 году. Он гласит, что сила внутреннего трения прямо пропорциональна площади, на которую она действует, и градиенту скорости, имеющему место в жидкости (рис. 15.1):

$$F = \eta \frac{\Delta V}{\Delta z} S . \qquad (15.1)$$

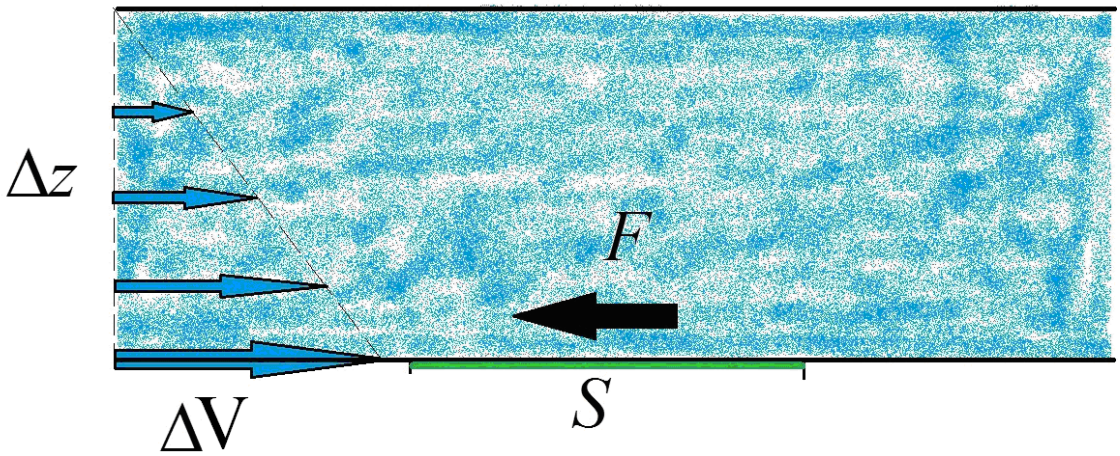


Рис. 15.1. Вязкость жидкости:

верхняя пластина покоится, нижняя двигается со скоростью ΔV вправо. Между ними – жидкость

Коэффициент пропорциональности в этом соотношении называется вязкостью жидкости. Единицей измерения вязкости является

$Па \cdot сек$ (Паскаль на секунду). Вязкости некоторых жидкостей приведены в табл. 15.1.

Таблица 15.1

Вязкость некоторых жидкостей при 25 ^{0}C

Вещество	**Вязкость (Па·сек)**
ацетон	$3{,}06 \cdot 10^{-4}$
бензол	$6{,}04 \cdot 10^{-4}$
кровь (при 37 °C)	$(3–4) \cdot 10^{-3}$
касторовое масло	0,985
кукурузный сироп	1,3806
этиловый спирт	$1.074 \cdot 10^{-3}$
этиленгликоль	$1{,}61 \cdot 10^{-2}$
глицерин (при 20 °C)	1,49
мазут	2,022
ртуть	$1{,}526 \cdot 10^{-3}$
метиловый спирт	$5{,}44 \cdot 10^{-4}$
моторное масло SAE 10 (при 20 °C)	0,065
моторное масло SAE 40 (при 20 °C)	0,319
нитробензол	$1{,}863 \cdot 10^{-3}$
жидкий азот (при 77K)	$1{,}58 \cdot 10^{-4}$
пропанол	$1{,}945 \cdot 10^{-3}$
оливковое масло	0,081
серная кислота	$2{,}42 \cdot 10^{-2}$
вода	$8{,}94 \cdot 10^{-4}$

На рис. 15.1 предполагается, что верхняя пластина неподвижна, а нижняя (расположенная на расстоянии Δz от нее) двигается вправо со скоростью ΔV; на ее участок площадью S влево действует сила F (черная стрелка). Если предположить, что жидкость вблизи пластин покоится относительно них (гипотеза Ньютона), то скорость жидкости вблизи верхней пластины равна 0, а вблизи нижней равна ΔV. Если расстояние между пластинами Δz достаточно мало, то величина скорости жидкости между пластинами (синие стрелки) изменяется по линейному закону.

Истинен ли закон внутреннего трения Ньютона? И да, и нет. Первое из его утверждений (о пропорциональности силы трения площади пластины) очевидно. Второе – о пропорциональности силы трения градиенту скорости имеет статус «закона Гука», то есть является неизбежным следствием того обстоятельства, что при отсутствии градиента скоростей трения нет. Это утверждение справедливо только при достаточно медленном движении, когда реальная зависимость силы трения от градиента скоростей может быть линеаризована. Кстати, это утверждение тоже иногда называют «гипотезой Ньютона», а жидкости, для которых не выполняется соотношение (15.1) – «неньютоновскими жидкостями». Такие есть, и их немало.

Для измерения вязкости жидкостей обычно применяют вискозиметры – приборы, принцип действия которых основан на зависимости скорости вытекания жидкости от ее вязкости («вязкость по Оствальду»; чем более вязкой является жидкость, тем медленнее она вытечет через отверстие фиксированных размеров).

Но мы воспользуемся другим методом («вязкость по Стоксу»). Этот метод основан на том, что при тела падении в вязкой среде скорость его движения зависит от вязкости жидкости – чем более вязкой является жидкость, тем сильнее она тормозит падение и тем медленнее падает тело. Чтобы разобраться в этом вопросе, надо вспомнить о жидком трении (оно же – вязкое трение).

Вязкое трение и сила Стокса

Трение – чрезвычайно сложный процесс, являющийся предметом изучения специальной дисциплины – трибологии. В механике обычно выделяют два существенно различающихся вида трения: сухое и жидкое (или вязкое). Силами сухого трения называются силы трения, не обращающиеся в ноль вместе с относительной скоростью трущихся тел. Силами жидкого трения называются силы трения, обращающиеся в ноль при обращении в ноль относительной скорости трущихся тел.

Типичным примером силы жидкого трения является сила сопротивления, которую испытывает медленно плывущая по воде лодка со

стороны воды или сила сопротивления, действующая на шарик, двигающийся в вязкой жидкости. Причиной силы жидкого трения является вязкость жидкости, которая не оказывает влияния на покоящееся (относительно жидкости) тело, но тормозит относительное перемещение любого тела относительно жидкости.

Основная особенность жидкого трения – отсутствие трения покоя. Это означает, что жидкое трение не способно предотвратить относительное перемещение трущихся тел, а может только тормозить его.

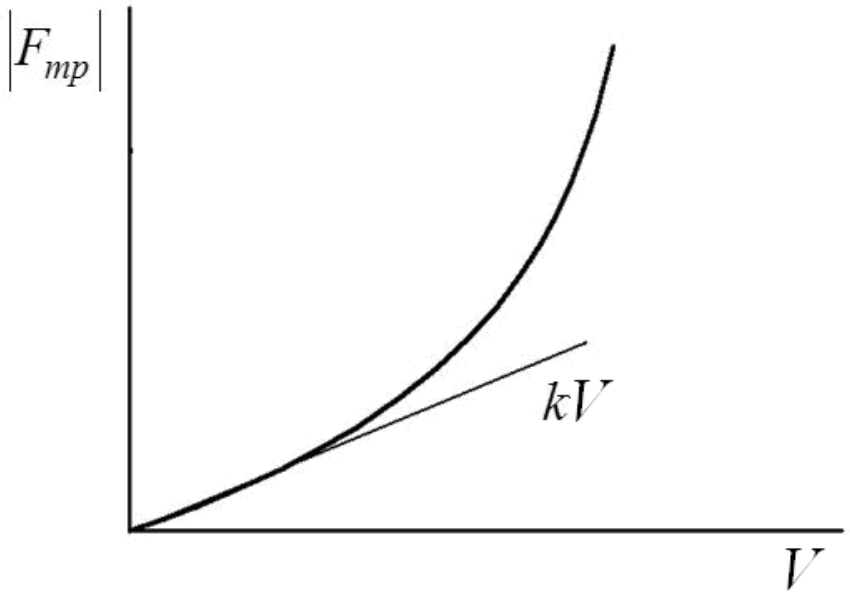


Рис. 15.2. Зависимость жидкого трения от скорости движения тела в жидкости

По этой причине зависимостью силы жидкого трения от скорости относительного движения пренебрегать нельзя. Действительно, при обращении в ноль относительной скорости трущихся тел сила жидкого трения обращается в ноль и если не учитывать ее увеличение с ростом скорости, то можно не учитывать ее вообще. Из общих соображений (точно так же, как в случае закона внутреннего трения Ньютона) следует, что при малой относительной скорости сила жидкого трения направлена противоположно относительной скорости и линейно зависит от ее величины:

$$\vec{F}_{тр} = -k\vec{V}. \qquad (15.2)$$

Разумеется, линейность имеет место лишь при достаточно малой скорости движения (рис. 15.2), как, впрочем, и во всех подобных случаях (закон Гука, закон Ома, закон трения Кулона, связь намагниченности и магнитной индукции, связь поляризации диэлектрика и напряженности электрического поля и так далее, и так далее, и так далее...). Коэффициент пропорциональности k зависит как от свойств среды (от ее вязкости), так и от свойств тела (в первую очередь от его размеров, формы и характера обработки поверхности). Как именно – можно выяснить с помощью теории подобия.

Для этого предположим, что для шарика, двигающегося в вязкой среде, имеет место формула

$$F_{тр} = Cr^{\alpha}V^{\beta}\rho^{\gamma}\eta^{\delta}, \tag{15.3}$$

где r – радиус шарика, V – скорость его движения, ρ – плотность жидкости, η – ее вязкость; $C, \alpha, \beta, \gamma, \delta$ – некоторые безразмерные константы. Почему мы взяли именно такую формулу именно с такими величинами? Да просто потому, что это – наиболее общая формула, которой может подчиняться медленное движение в несжимаемой жидкости. Ни от чего другого сила вязкого трения вроде бы зависеть просто не может. Взять, например, плотность шарика. Может ли она быть в формуле? Очевидно, нет – откуда омывающая шарик жидкость догадается, что у него внутри? Точно так же в формуле нет атмосферного давления, температуры замерзания жидкости и т.д.

Пока что мы «попали пальцем в небо» – ведь параметры $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ нам неизвестны. Но на самом деле они не независимы по одной простой причине – размерности правой и левой части формулы (15.3) должны совпадать. Переведя все эти размерности в метры, килограммы и секунды и учтя, что совпадение должно быть и по метрам, и по килограммам, и по секундам, мы получаем систему уравнений

$$\begin{cases} \gamma + \delta = 1; \\ \alpha + \beta - 3\gamma - \delta = 1; \\ -\beta - \delta = -2. \end{cases} \tag{15.4}$$

Полученная система является системой трех уравнений с четырьмя неизвестными и имеет бесконечно много решений. Но у нас есть «подсказка» – в случае достаточно медленных движений в соответствии с формулой (15.2) должно быть $\beta = 1$. После этого система решается без труда и мы имеем $\alpha = 1, \beta = 1, \gamma = 0, \delta = 1$. Это означает, что

$$F_{тр} = Cr\eta V, \tag{15.5}$$

то есть $k = Cr\eta$, где C – некоторая безразмерная константа, которая зависит от формы тела. Чтобы ее найти, приходится решить задачу целиком. Это сделал в 1851 году Джордж Стокс. Оказалось, что для шарика $C = -6\pi$, то есть

$$F_{тр} = -6\pi r\eta V. \tag{15.6}$$

Эта формула так и называется – формула Стокса.

А можно ли уточнить формулу (15.4)? Вы ведь знаете, что любая функция может быть разложена в ряд Тейлора вблизи нуля и что в общем случае должна быть справедлива формула

$$F_{тр} = -kV - k_2V^2 - ..... \tag{15.7}$$

Для определения коэффициента k_2 можно воспользоваться той же системой уравнений (15.4), но уже с «подсказкой» $\beta = 2$. В результате имеем $\alpha = 2, \beta = 2, \gamma = 1, \delta = 0$, то есть $F_{тр} = C_2r^2\rho V^2$, где C_2 – опять некоторый безразмерный коэффициент, зависящий от формы тела. В результате в общем случае произвольного тела с точностью до квадратичных по скорости движения членов имеем:

$$F_{тр} = Cr\eta V + C_2r^2\rho V^2. \tag{15.8}$$

Интересно сравнить два слагаемых в правой части этой формулы.

Во-первых, они по-разному зависят от размеров тела и скорости движения – первый член в любом случае доминирует при медленных движениях маленьких тел, а второй начинает доминировать с ростом скоростей движения и размеров тела.

Во-вторых, в первом члене начисто отсутствует плотность жидкости, а во втором – ее вязкость, причем это происходит не «по нашему приказу», а «само собой». Мы ведь в общем случае ввели в формулу (15.3) и вязкость, и плотность. Впрочем, отсутствие плотности жидкости в первом слагаемом «задним числом» вполне понятно – какое дело силе трения до плотности жидкости, о которую трется шарик? А вот отсутствие коэффициента вязкости во втором слагаемом – это «тонкий намек на толстые обстоятельства». Ведь в случае невязкой жидкости (при $\eta = 0$) первое слагаемое исчезает, а второе остается, то есть даже в невязкой среде шарик все равно испытывает сопротивление движению. Откуда же оно берется? А вот откуда. При движении в несжимаемой жидкости шарик вынужден ее раздвигать и «баламутить»; в результате за ним остается вихревой след двигающейся жидкости, которая имеет некоторую кинетическую энергию. Откуда же она берется или (другими словами) – кто платит за банкет? Очевидно, шарик – больше-то некому. А если шарик тратит энергию, то на него действует какая-то тормозящая сила. Теперь понятно, почему второй член в формуле (15.8) пропорционален плотности жидкости – ведь чем больше эта плотность, тем большую кинетическую энергию имеет взбаламученная жидкость.

Ясно, что формулой Стокса можно пользоваться не всегда, а только тогда, когда первый член в формуле (15.8) много больше второго. Их безразмерное отношение (без учета безразмерных констант) составляет $\frac{r\eta v}{r^2\rho V^2} = \frac{\eta}{r\rho V}$ и называется числом Рейнольдса. Обозначается оно Re:

$$\mathrm{Re} = \frac{\eta}{\rho r V}. \qquad (15.9)$$

В случае малых значений числа Рейнольдса сопротивление движению тела в жидкости в основном связано с вязкостью жидкости (в этом случае движение жидкости называют ламинарным и в нем нет особенных вихрей и «завитушек»). В случае больших значений числа

Рейнольдса сопротивление движению в основном связано с возникновением вихревых движений жидкости (в этом случае движение жидкости называют турбулентным и в нем полно сложных вихрей). Справедливости ради следует сказать, что реально переход от ламинарного течения жидкости к турбулентному обычно происходит не при $\mathrm{Re} = 1$, а при $\mathrm{Re} = 100 \ldots 10000$. Это – экспериментальный факт.

Определение вязкости жидкости по Стоксу

Пусть в вязкую жидкость бросили шарик. На него действует сила тяжести (вниз) $mg = \rho_{шар} V_{об} g = \rho_{шар} g \frac{4}{3}\pi r^3$, выталкивающая сила Архимеда (вверх) $m_{жид} g = \rho_{жид} V_{об} g = \rho_{жид} g \frac{4}{3}\pi r^3$ и сила Стокса (вверх) $F_{тр} = 6\pi r \eta V$. Первые две силы от скорости движения не зависят, а третья с ростом скорости растет. Поэтому (по второму закону Ньютона) шарик начинает двигаться ускоренно; его скорость нарастает, а вместе с ней нарастает и сила Стокса. Это происходит до тех пор, пока сила Стокса и сила Архимеда при некоторой скорости падения не уравновесят силу тяжести. После этого суммарная сила, действующая на шарик, станет равна нулю и он начнет двигаться равномерно. Для скорости установившегося равномерного движения имеем уравнение:

$$\rho_{шар} g \frac{4}{3}\pi r^3 = 6\pi r \eta V + \rho_{жид} g \frac{4}{3}\pi r^3. \qquad (15.10)$$

Решив его, получаем:

$$V = \frac{2}{9}\left(\rho_{шар} - \rho_{жид}\right)\frac{g r^2}{\eta}. \qquad (15.11)$$

Из формулы (15.11) видно, что скорость установившегося падения шарика в вязкой жидкости зависит от ее вязкости. Измерив эту скорость и зная радиус шарика, плотность жидкости и плотность материала, из которого изготовлен шарик, а также ускорение свободного падения, можно рассчитать и вязкость жидкости. На этом и основан метод измерения вязкости по Стоксу.

Рис. 15.3. Установка для определения вязкости по Стоксу

Описание установки

Установка для выполнения работы выглядит очень просто (рис. 15.3). Она состоит из заполненного жидкостью[41] цилиндрического сосуда, рядом с которым расположена линейка. Бросив в сосуд стальной шарик и дождавшись стабилизации его скорости (это происходит на расстоянии около 10 см от поверхности жидкости), можно измерить время, за которое шарик проходит некоторое расстояние по линейке, и найти установившуюся скорость его падения в жидкости. Поскольку эта скорость зависит от вязкости жидкости – см. (15.11), то, зная радиус шарика, его плотность и плотность жидкости, нетрудно рассчитать вязкость жидкости:

$$\eta = \frac{2}{9}\left(\rho_{шар} - \rho_{жид}\right)\frac{gr^2}{V}. \qquad (15.12)$$

Порядок выполнения работы. Измерения и расчеты

1. Получите у лаборанта три стальных шарика, микрометр и (если вы не умеете пользоваться секундомером на своем собственном мобильнике[42]) – механический «дедовский» секундомер.

2. Три раза измерьте микрометром (то есть с точностью до 0,01 мм) диаметр каждого шарика. Вычислите и запишите во второй столбец таблицы среднее значение радиуса каждого шарика r (в системе СИ, то есть в метрах; если, например, средний радиус шарика равен 1,56 мм, то запишите $1{,}56 \cdot 10^{-3}$ м). Не забудьте, что меряете вы диаметр, а в таблицу записываете радиус (он в два раза меньше). Троекратное измерение диаметра необходимо для уменьшения случайной ошибки измерения, а также для того, чтобы проверить, насколько ваш шарик шарообразен. Вычисление среднего радиуса каждого из трех шариков запишите отдельно – под ей.

---

[41] Эта жидкость – глицерин. По крайней мере теоретически она когда-то им была.

[42] Срам-то какой! Не уметь использовать собственный гаджет! В книге Марка Твена «Принц и нищий» оказавшийся на месте принца малолетний бомж спер Большую Королевскую Печать и приспособил для раскалывания орехов – очень хорошо подошла....

3. Бросьте первый шарик в сосуд и заметьте (по секундомеру, то есть с точностью 0,01 сек) время, за которое он проходит заданное расстояние между метками М1 и М2. Одно из возможных положений этих меток (М1=20 см, М2=90 см) показано на рис. 15.3. Этими метками следует пользоваться в случае, если лаборант не задал вам другие (для разнообразия). Запишите в табл. 15.2 (столбец 3) расстояние между метками l и (столбец 4) время спуска шарика t (в системе СИ, то есть в метрах и секундах!).

Проделайте то же самое с остальными двумя шариками.

4. Для каждого шарика рассчитайте скорость спуска $v = \frac{l}{t}$ и запишите ее в табл. 15.2 (столбец 5).

5. После этого для каждого шарика по формуле (15.12) рассчитайте наблюдаемое значение вязкости жидкости и запишите его в табл. 15.2 (столбец 6). В расчетах примите $\rho_{шар} = 7800 \frac{кг}{м^3}$ (шарик стальной), $\rho_{жид} = 1260 \frac{кг}{м^3}$ (жидкость – глицерин) и $g = 9{,}81 \frac{м}{с^2}$ («дело было на Земле» вообще и в Самаре в частности[43]).

6. Если вы не округляли безбожно ваши результаты и если не произошло чуда, то вы получите три разных значения для вязкости одной и той же жидкости. Ясно, что этого быть не может, если только в промежутке между бросаниями шарика неизвестный злодей тайно не разбавил глицерин. Тем не менее это – факт и он свидетельствует о том, что имеет место случайная ошибка измерений[44]. Для ее уменьшения следует найти среднее значение вязкости по формуле

$$\bar{\eta} = \frac{\eta_1 + \eta_2 + \eta_3}{3}. \qquad (15.13)$$

---

[43] Не шутка. В Санкт-Петербурге и Архангельске правильнее было бы брать 9,82, а в Махачкале – 9,80.

[44] А есть ли систематическая ошибка? Очевидно, есть. Но она наверняка меньше случайной – ведь ваш секундомер наверняка «врет» меньше, чем вы сами, когда нажимаете на кнопку чуть раньше или чуть позже, чем надо было бы. Поэтому систематической ошибкой мы пренебрегаем.

Запишите этот результат в седьмой столбец ы. Это значение – одно, оно «общее» для всех проделанных вами измерений.

4. По формуле

$$\Delta\eta_i = \left|\eta_i - \overline{\eta}\right|, \quad \text{где} \quad \mathrm{i} = 1,2,3, \tag{15.14}$$

найдите отклонение каждого отдельного измерения от эмпирического среднего и запишите полученные результаты в восьмой столбец табл. 15.2.

5. По формуле

$$s_\eta = \sqrt{\frac{(\Delta\eta_1)^2 + (\Delta\eta_2)^2 + (\Delta\eta_3)^2}{6}} \tag{15.15}$$

найдите стандартную ошибку для вязкости и запишите это значение в девятый столбец табл. 15.2.

6. По формуле

$$\Delta\eta = 1{,}312\, s_\eta \tag{15.16}$$

найдите полуширину доверительного интервала для вязкости при доверительной вероятности 68 % (1,312 – коэффициент Стьюдента при количестве измерений 3 и доверительной вероятности 0,68, см. табл. 2 введения). Запишите это значение в десятый столбец табл. 15.2.

7. Запишите отдельно под ей окончательный результат измерения вязкости в виде $\eta = (\overline{\eta} \pm \Delta\eta)\,Па \cdot сек$, проведя разумное округление полученных значений.

8. По формуле (15.9) с использованием только что найденного значения вязкости жидкости, ее плотности, скорости движения и радиуса шарика вычислите значение числа Рейнольдса для каждого из трех шариков. Запишите полученные значения в 11-й столбец табл. 15.2. Как вы думаете, можно ли было пользоваться формулой (15.6) при этих значениях числа Рейнольдса?

Таблица 15.2

Измерение вязкости жидкости [45]

№	r,м	l,м	t, сек	$V, \frac{м}{с}$	η, Па·с	$\overline{\eta}$, Па·с	$\Delta\eta_i$, Па·с	s_η, Па·с	$\Delta\eta$, Па·с	Re
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**
1.										
2.										
3.										

Контрольные вопросы

1. Что такое вязкость жидкости?
2. В каких единицах измеряется вязкость?
3. В чем заключается гипотеза Ньютона о вязкости? Всегда ли она справедлива?
4. В машинном масле (считайте машинное масло вязкой жидкостью) двигаются два шарика с одним и тем же радиусом. Первый шарик двигается в два раза быстрее второго. У которого из шариков шарика больше сила сопротивления и во сколько раз?
5. В машинном масле (считайте машинное масло вязкой жидкостью) двигаются два шарика. Радиус первого шарика в 1,5 раза больше радиуса второго. Первый шарик двигается в 2 раза быстрее второго. У которого из шариков шарика больше сила сопротивления и во сколько раз?
6. В машинном масле (считайте машинное масло вязкой жидкостью) двигаются два шарика. Диаметр первого шарика в 1,5 раза больше диаметра второго. Первый шарик двигается в два раза быстрее второго. У которого из шариков больше сила сопротивления и во сколько раз?
7. В машинном масле (считайте машинное масло вязкой жидкостью) с одной и той же скоростью двигаются два шарика одного и того же диаметра. Первый шарик изготовлен из стали, второй – из меди.

[45] Как видите, столбцов в таблице много, а строк мало. Поэтому в тетради нарисуйте ее «с разворотом».

У которого из шариков больше сила сопротивления и во сколько раз? Плотность меди и стали можете узнать в интернете или посмотреть в любом справочнике.

8. В машинное масло (считайте машинное масло вязкой жидкостью) брошены два стальных шарика. Диаметр первого шарика в 1,5 раза больше диаметра второго. Через некоторое время после начала движения скорости шариков перестали изменяться – шарики двигаются равномерно. Какой из шариков (первый или второй) двигается быстрее и во сколько раз?

9. В машинное масло (считайте машинное масло вязкой жидкостью) брошены два шарика одинакового диаметра – первый стальной, а второй – медный. Через некоторое время после начала движения скорости шариков перестали изменяться – шарики двигаются равномерно. Какой из шариков (первый или второй) двигается быстрее и во сколько раз? Нужны данные – найдите сами в справочниках или в интернете.

10. В глицерине (считайте глицерин вязкой жидкостью) двигаются два шарика с одним и тем же радиусом. Первый шарик двигается в два раза быстрее второго. У которого из шариков шарика больше сила сопротивления и во сколько раз?

11. В глицерине (считайте глицерин вязкой жидкостью) двигаются два шарика. Радиус первого шарика в 1,5 раза больше радиуса второго. Первый шарик двигается в два раза быстрее второго. У которого из шариков шарика больше сила сопротивления и во сколько раз?

12. В глицерине (считайте глицерин вязкой жидкостью) двигаются два шарика. Диаметр первого шарика в 1,5 раза больше диаметра второго. Первый шарик двигается в два раза быстрее второго. У которого из шариков шарика больше сила сопротивления и во сколько раз?

13. В глицерине (считайте глицерин вязкой жидкостью) с одной и той же скоростью двигаются два шарика одного и того же диаметра. Первый шарик изготовлен из стали, второй – из олова. У которого из шариков больше сила сопротивления и во сколько раз? Плотность олова и стали можете узнать в интернете или посмотреть в любом справочнике.

14. В глицерин (считайте глицерин вязкой жидкостью) брошены два стальных шарика. Диаметр первого шарика в 1,5 раза больше диаметра второго. Через некоторое время после начала движения скорости шариков перестали изменяться – шарики двигаются равномерно. Какой из шариков (первый или второй) двигается быстрее и во сколько раз?

15. В глицерин (считайте глицерин вязкой жидкостью) брошены два шарика одинакового диаметра – первый стальной, а второй – оловянный. Через некоторое время после начала движения скорости шариков перестали изменяться – шарики двигаются равномерно. Какой из шариков (первый или второй) двигается быстрее и во сколько раз? Нужны данные – найдите сами в справочниках или в интернете.

16. В воде (считайте воду невязкой жидкостью) двигаются два шарика. Радиус первого шарика в 1,5 раза больше радиуса второго. Первый шарик двигается в два раза быстрее второго. У которого из шариков больше сила сопротивления и во сколько раз?

17. В воде (считайте воду невязкой жидкостью) двигаются два шарика. Диаметр первого шарика в 1,5 раза больше диаметра второго. Первый шарик двигается в два раза быстрее второго. У которого из шариков больше сила сопротивления и во сколько раз?

18. В воде (считайте воду невязкой жидкостью) с одной и той же скоростью двигаются два шарика одного и того же диаметра. Первый шарик изготовлен из стали, второй – из дерева. У которого из шариков больше сила сопротивления и во сколько раз? Плотность дерева и стали можете узнать в интернете или посмотреть в любом справочнике.

19. В воду (считайте воду невязкой жидкостью) брошены два стальных шарика. Диаметр первого шарика в 1,5 раза больше диаметра второго. Через некоторое время после начала движения скорости шариков перестали изменяться – шарики двигаются равномерно. Какой из шариков (первый или второй) двигается быстрее и во сколько раз?

20. В воде (считайте воду невязкой жидкостью) брошены два шарика одинакового диаметра – первый стальной, а второй – деревянный. Через некоторое время после начала движения скорости ша-

риков перестали изменяться – шарики двигаются равномерно. Какой из шариков (первый или второй) двигается быстрее и во сколько раз? Нужны данные – найдите сами в справочниках или в интернете.

21. В машинном масле (считайте машинное масло вязкой жидкостью) двигаются два шарика с одним и тем же радиусом. Первый шарик двигается в четыре раза быстрее второго. У которого из шариков больше сила сопротивления и во сколько раз?

22. В машинном масле (считайте машинное масло вязкой жидкостью) двигаются два шарика. Радиус первого шарика в три раза больше радиуса второго. Первый шарик двигается в четыре раза быстрее второго. У которого из шариков больше сила сопротивления и во сколько раз?

23. В машинном масле (считайте машинное масло вязкой жидкостью) двигаются два шарика. Диаметр первого шарика в три раз больше диаметра второго. Первый шарик двигается в четыре раза быстрее второго. У которого из шариков больше сила сопротивления и во сколько раз?

24. В машинном масле (считайте машинное масло вязкой жидкостью) с одной и той же скоростью двигаются два шарика одного и того же диаметра. Первый шарик изготовлен из стали, второй – из дерева. У которого из шариков больше сила сопротивления и во сколько раз? Плотность дерева и стали можете узнать в интернете или посмотреть в любом справочнике.

25. В машинное масло (считайте машинное масло вязкой жидкостью) брошены два стальных шарика. Диаметр первого шарика в три раз больше диаметра второго. Через некоторое время после начала движения скорости шариков перестали изменяться – шарики двигаются равномерно. Какой из шариков (первый или второй) двигается быстрее и во сколько раз?

26. В машинное масло (считайте машинное масло вязкой жидкостью) брошены два шарика одинакового диаметра – первый стальной, а второй – деревянный. Через некоторое время после начала движения скорости шариков перестали изменяться – шарики двигаются

равномерно. Какой из шариков (первый или второй) двигается быстрее и во сколько раз? Нужны данные – найдите сами в справочниках или в интернете.

27. В глицерине (считайте глицерин вязкой жидкостью) двигаются два шарика с одним и тем же радиусом. Первый шарик двигается в четыре раза быстрее второго. У которого из шариков больше сила сопротивления и во сколько раз?

28. В глицерине (считайте глицерин вязкой жидкостью) двигаются два шарика. Радиус первого шарика в три раз больше радиуса второго. Первый шарик двигается в четыре раза быстрее второго. У которого из шариков больше сила сопротивления и во сколько раз?

29. В глицерине (считайте глицерин вязкой жидкостью) двигаются два шарика. Диаметр первого шарика в три раза больше диаметра второго. Первый шарик двигается в четыре раза быстрее второго. У которого из шариков больше сила сопротивления и во сколько раз?

30. В глицерине (считайте глицерин вязкой жидкостью) с одной и той же скоростью двигаются два шарика одного и того же диаметра. Первый шарик изготовлен из олова, второй – из меди. У которого из шариков больше сила сопротивления и во сколько раз? Плотность меди и олова можете узнать в интернете или посмотреть в любом справочнике.

31. В глицерин (считайте глицерин вязкой жидкостью) брошены два стальных шарика. Диаметр первого шарика в три раза больше диаметра второго. Через некоторое время после начала движения скорости шариков перестали изменяться – шарики двигаются равномерно. Какой из шариков (первый или второй) двигается быстрее и во сколько раз?

32. В глицерин (считайте глицерин вязкой жидкостью) брошены два шарика одинакового диаметра – первый оловянный, а второй – медный. Через некоторое время после начала движения скорости шариков перестали изменяться – шарики двигаются равномерно. Какой из шариков (первый или второй) двигается быстрее и во сколько раз? Нужны данные – найдите сами в справочниках или в интернете.

33. В воде (считайте воду невязкой жидкостью) двигаются два шарика. Радиус первого шарика в три раза больше радиуса второго. Первый шарик двигается в четыре раза быстрее второго. У которого из шариков больше сила сопротивления и во сколько раз?

34. В воде (считайте воду невязкой жидкостью) двигаются два шарика. Диаметр первого шарика в три раза больше диаметра второго. Первый шарик двигается в четыре раза быстрее второго. У которого из шариков шарика больше сила сопротивления и во сколько раз?

35. В воде (считайте воду невязкой жидкостью) с одной и той же скоростью двигаются два шарика одного и того же диаметра. Первый шарик изготовлен из стали, второй – из дерева. У которого из шариков больше сила сопротивления и во сколько раз? Плотность дерева и стали можете узнать в интернете или посмотреть в любом справочнике.

36. В воду (считайте воду невязкой жидкостью) брошены два стальных шарика. Диаметр первого шарика в три раза больше диаметра второго. Через некоторое время после начала движения скорости шариков перестали изменяться – шарики двигаются равномерно. Какой из шариков (первый или второй) двигается быстрее и во сколько раз?

37. В воду (считайте воду невязкой жидкостью) брошены два шарика одинакового диаметра – первый деревянный, а второй – золотой. Через некоторое время после начала движения скорости шариков перестали изменяться – шарики двигаются равномерно. Какой из шариков (первый или второй) двигается быстрее и во сколько раз? Нужны данные – найдите сами в справочниках или в интернете.

38. Рассчитайте скорость установившегося равномерного движения стального шарика диаметром 0,1 мм, падающего в глицерине. Нужны данные – найдите сами в справочниках или в интернете. Вычислите число Рейнольдса. Можно ли в этом случае считать среду вязкой?

39. Рассчитайте скорость установившегося равномерного движения стального шарика диаметром 0,5 мм, падающего в глицерине. Нужны данные – найдите сами в справочниках или в интернете. Вычислите число Рейнольдса. Можно ли в этом случае считать среду вязкой?

40. Рассчитайте скорость установившегося равномерного движения стального шарика диаметром 1 мм, падающего в глицерине. Нужны данные – найдите сами в справочниках или в интернете. Вычислите число Рейнольдса. Можно ли в этом случае считать среду вязкой?

41. Рассчитайте скорость установившегося равномерного движения стального шарика диаметром 2 мм, падающего в глицерине. Нужны данные – найдите сами в справочниках или в интернете. Вычислите число Рейнольдса. Можно ли в этом случае считать среду вязкой?

42. Рассчитайте скорость установившегося равномерного движения стального шарика диаметром 3 мм, падающего в глицерине. Нужны данные – найдите сами в справочниках или в интернете. Вычислите число Рейнольдса. Можно ли в этом случае считать среду вязкой?

43. Рассчитайте скорость установившегося равномерного движения медного шарика диаметром 0,1 мм, падающего в машинном масле. Нужны данные – найдите сами в справочниках или в интернете. Вычислите число Рейнольдса. Можно ли в этом случае считать среду вязкой?

44. Рассчитайте скорость установившегося равномерного движения медного шарика диаметром 0,5 мм, падающего в машинном масле. Нужны данные – найдите сами в справочниках или в интернете. Вычислите число Рейнольдса. Можно ли в этом случае считать среду вязкой?

45. Рассчитайте скорость установившегося равномерного движения медного шарика диаметром 1 мм, падающего в машинном масле. Нужны данные – найдите сами в справочниках или в интернете. Вычислите число Рейнольдса. Можно ли в этом случае считать среду вязкой?

46. Рассчитайте скорость установившегося равномерного движения медного шарика диаметром 2 мм, падающего в машинном масле. Нужны данные – найдите сами в справочниках или в интернете. Вычислите число Рейнольдса. Можно ли в этом случае считать среду вязкой?

47. Рассчитайте скорость установившегося равномерного движения медного шарика диаметром 3 мм, падающего в машинном масле. Нужны данные – найдите сами в справочниках или в интернете. Вычислите число Рейнольдса. Можно ли в этом случае считать среду вязкой?

48. Рассчитайте скорость установившегося равномерного движения водяной капли диаметром 0,1 мм, падающей в воздухе. Нужны данные – найдите сами в справочниках или в интернете. Вычислите число Рейнольдса. Можно ли в этом случае считать среду вязкой?

49. Рассчитайте скорость установившегося равномерного движения водяной капли диаметром 0,05 мм, падающей в воздухе. Нужны данные – найдите сами в справочниках или в интернете. Вычислите число Рейнольдса. Можно ли в этом случае считать среду вязкой?

50. Рассчитайте скорость установившегося равномерного движения водяной капли диаметром 0,01 мм, падающей в воздухе. Нужны данные – найдите сами в справочниках или в интернете. Вычислите число Рейнольдса. Можно ли в этом случае считать среду вязкой?

51. Рассчитайте скорость установившегося равномерного движения водяной капли диаметром 0,5 мм, падающей в воздухе. Нужны данные – найдите сами в справочниках или в интернете. Вычислите число Рейнольдса. Можно ли в этом случае считать среду вязкой?

52. Рассчитайте скорость установившегося равномерного движения водяной капли диаметром 1 мм, падающей в воздухе. Нужны данные – найдите сами в справочниках или в интернете. Вычислите число Рейнольдса. Можно ли в этом случае считать среду вязкой?

53. Рассчитайте скорость установившегося равномерного движения водяной капли диаметром 2 мм, падающей в воздухе. Нужны данные – найдите сами в справочниках или в интернете. Вычислите число Рейнольдса. Можно ли в этом случае считать среду вязкой?

54. Рассчитайте скорость установившегося равномерного движения водяной капли диаметром 3 мм, падающей в воздухе. Нужны данные – найдите сами в справочниках или в интернете. Вычислите число Рейнольдса. Можно ли в этом случае считать среду вязкой?

16. РАВНОУСКОРЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ

Материал данной главы пригодится вам при выполнении **экспериментального задания № 17-I [8].** Это задание является прекрасной экспериментальной иллюстрацией изложенного в настоящей главе теоретического материала.

Основы теории

Вблизи поверхности Земли все свободно падающие тела движутся с одинаковым постоянным ускорением. Этот факт установлен еще в 1583 году итальянским ученым Галилео Галилеем (см. гл. 2 данной книги). Это ускорение принято называть ускорением свободного падения.

Ускорение свободного падения $\vec{g}$ зависит от многих факторов. Существует целый раздел науки об измерении величин, характеризующих гравитационное поле Земли, и об использовании их для определения фигуры Земли, изучения её общего внутреннего строения, геологического строения её верхних частей, решения некоторых задач навигации и др., называемый «гравиметрия». Но мы ограничимся рассмотрением зависимости ускорения свободного падения только от суточного вращения Земли, ее массы и радиуса.

Итак, если не учитывать вращение Земли вокруг своей оси, то $\vec{g}$ будет зависеть только от гравитационного поля Земли, а если учесть вращение, то ускорение свободного падения можно представить как векторную сумму двух слагаемых: гравитационного ускорения и центробежного ускорения:

$$\vec{g} = \vec{g}_г + \vec{g}_ц. \qquad (16.1)$$

Центробежное ускорение является следствием вращения Земли вокруг своей оси, из-за чего связанные с Землёй системы отсчёта не являются инерциальными. В точке, находящейся на расстоянии R от оси вращения, центробежное ускорение составляет величину

$$g_ц = \omega^2 R = \frac{4\pi^2}{T^2} R, \qquad (16.2)$$

где ω – угловая скорость вращения Земли, T – время одного оборота Земли (звёздные сутки). Центробежное ускорение перпендикулярно оси вращения и направлено в сторону от неё. Вычислим зависимость центробежного ускорения $\vec{g}_ц$ от географической широты (рис. 16.1).

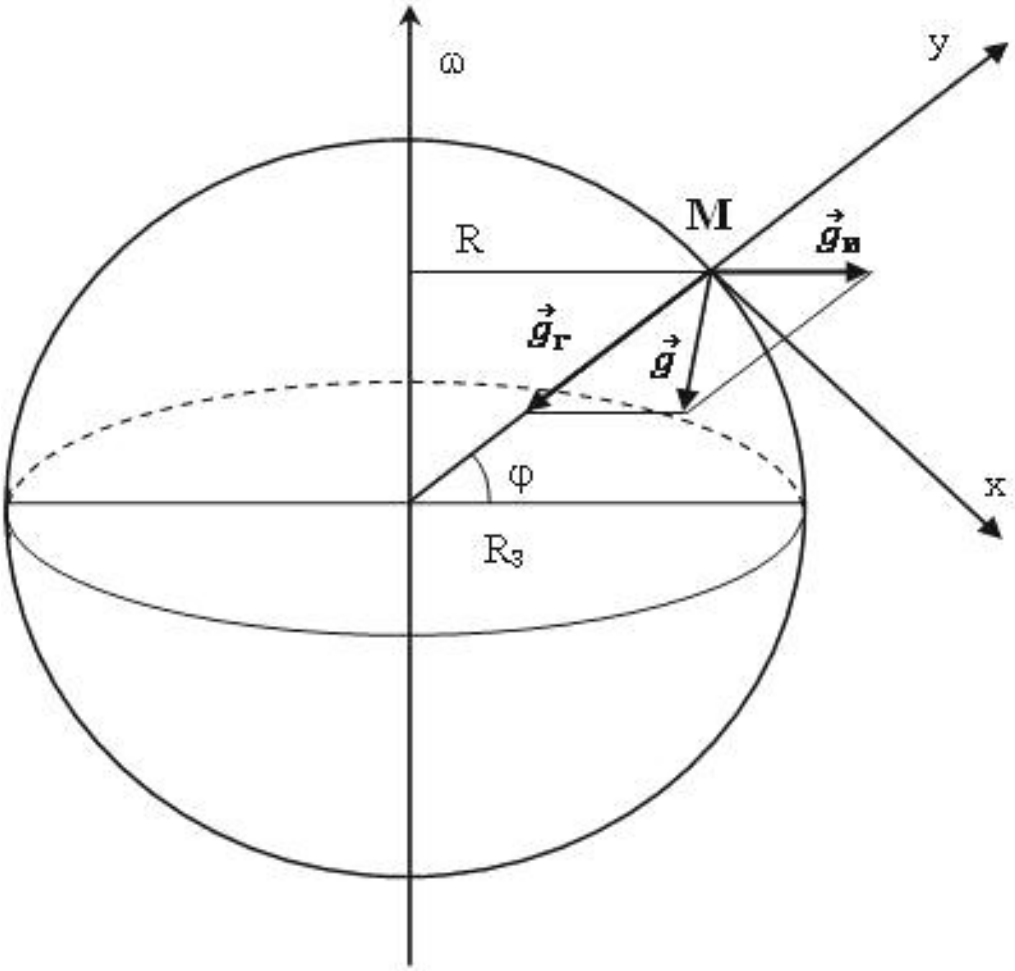


Рис. 16.1. Разложение вектора ускорения свободного падения на компоненты

Для определенности на поверхности Земли выберем точку M. Пусть оси системы координат с началом в точке M направлены по радиусу Земли (ось y) и по касательной к меридиану (ось x). Тогда проекции центробежного ускорения на эти оси составят:

$$g_{цx} = g_ц \sin\varphi,$$
$$g_{цy} = g_ц \cos\varphi, \qquad (16.3)$$

где φ – широтный угол. Тогда, учитывая, что $R = R_З \cos\varphi$ (здесь $R_З$ – радиус Земли), из формулы (16.3) получим:

$$g_{цх} = \frac{4\pi^2}{T^2} R \sin\varphi = \frac{4\pi^2}{T^2} R_З \cos\varphi \sin\varphi,$$
$$g_{цу} = \frac{4\pi^2}{T^2} R \cos\varphi = \frac{4\pi^2}{T^2} R_З \cos^2\varphi. \qquad (16.4)$$

Простой анализ (16.4) показывает, что на полюсах Земли, где $\varphi = \frac{\pi}{2}$, центробежное ускорение отсутствует. На экваторе, где $\varphi = 0$, центробежное ускорение максимально по модулю и направлено противоположно гравитационному ускорению. На остальных широтах оно непараллельно гравитационному ускорению, которое направлено к центру Земли.

Гравитационная составляющая ускорения свободного падения определяется законом всемирного тяготения:

$$\vec{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^3} \vec{r}, \qquad (16.5)$$

где $\vec{F}$ – сила притяжения, действующая на тело массой m_2 со стороны тела массой m_1, $\vec{r}$ – радиус-вектор, соединяющий первое и второе тело, $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11} \frac{Н \cdot м^2}{кг^2}$ – гравитационная постоянная. Математически можно доказать, что закон (16.5) справедлив не только для материальных точек, но и для однородных тел со сферической симметрией. Поэтому для гравитационной составляющей ускорения свободного падения справедлива следующая формула:

$$\vec{g}_г = -G \frac{M}{R_З^3} \vec{R}_З \text{ или } g_{гу} = -G \frac{M}{R_З^2}, \qquad (16.6)$$

где M и $R_З$ – масса и радиус Земли соответственно. Приведённое соотношение позволяет определить массу любой планеты, включая Землю, зная её радиус и гравитационное ускорение на её поверхно-

сти. Исторически масса Земли была впервые определена Генри Кавендишем, который провёл первые измерения гравитационной постоянной.

Подставляя в (16.1) выражения (16.4) и (16.6), запишем координаты ускорения свободного падения в нашей системе:

$$g_x = \frac{4\pi^2}{T^2} R_З \cos\varphi \sin\varphi,$$
$$g_y = -G\frac{M}{R_З^2} + \frac{4\pi^2}{T^2} R_З \cos^2\varphi. \qquad (16.7)$$

Стандартное («нормальное») значение, принятое при построении систем единиц, составляет $g = 9{,}8066\frac{м}{с^2}$. Стандартное значение g было определено как «среднее» в каком-то смысле на всей Земле, оно примерно равно ускорению свободного падения на широте 45,5° на уровне моря.

Пространственные изменения гравитационного поля Земли (гравитационные аномалии) связаны с неоднородностью её строения, что может быть использовано для поиска полезных ископаемых (гравиразведка). Типичной иллюстрацией являются, например, карстовые воронки, над которыми сила тяжести меньше. Напротив, над плотными породами (руда) сила тяжести возрастает.

Интересный факт: места рекордно низкого и высокого значения ускорения свободного падения несколько отличаются от рассмотренной нами простой модели. Так, самое низкое значение g зафиксировано на горе Уаскаран в Перу ($9{,}7639\frac{м}{с^2}$) в 1000 км южнее экватора, а самое большое ($9{,}8337\frac{м}{с^2}$) – в 100 км от северного полюса.

Из всевозможных способов измерения ускорения свободного падения рассмотрим два самых распространенных: маятниковый и баллистический.

Баллистический метод измерения ускорения свободного падения

Баллистический метод основан на измерении времени падения тела под действием силы тяжести. Если не учитывать сопротивление воздуха, то можно считать, что свободно падающее тело движется равноускорено. Как известно, такое движение описывается уравнением

$$y = y_0 + V_0 t + \frac{gt^2}{2}, \tag{16.8}$$

где V_0 – начальная скорость тела, y_0 – начальная координата тела, t – время падения. Если тело падает из состояния покоя, то несложно догадаться, что

$$g = \frac{2(y - y_0)}{t^2} = \frac{2h}{t^2}, \tag{16.9}$$

где h – высота падения.

Если начальная скорость неизвестна, то необходимо измерить время падения с разных высот, но с одной и той же начальной скоростью. Тогда получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} h_1 &= V_0 t_1 + \frac{gt_1^2}{2}, \\ h_2 &= V_0 t_2 + \frac{gt_2^2}{2}. \end{aligned} \tag{16.10}$$

Разделив обе части каждого уравнения на t_1 и t_2 соответственно и вычитая одно из другого, получаем

$$\frac{h_1}{t_1} - \frac{h_2}{t_2} = \frac{gt_1}{2} - \frac{gt_2}{2}, \tag{16.11}$$

откуда

$$g = 2\frac{\frac{h_1}{t_1} - \frac{h_2}{t_2}}{t_1 - t_2}. \tag{16.12}$$

Маятниковый метод измерения ускорения свободного падения

Физическим маятником называется любое твердое тело, совершающее колебания относительно единственной оси вращения. Подробным образом это движение рассмотрено в лабораторной работе № 3. Физический маятник, состоящий из материальной точки и невесомой нерастяжимой нити, называется математическим. Его период (см Л.р. № 3)

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}, \qquad (16.13)$$

где l – длина нити. Отсюда следует, что

$$g = \frac{4\pi^2}{T^2} l. \qquad (16.14)$$

Для точных измерений пользуются маятником с нитью разной длины. Тогда для двух измеренных периодов маятников T_1 и T_2 с длинами l_1 и l_2 соответственно формула для ускорения свободного падения имеет вид

$$g = 4\pi^2 \frac{l_2 - l_1}{T_2^2 - T_1^2}. \qquad (16.15)$$

Экспериментальная часть

Упражнение № 1. Схема установки для измерения ускорения свободного падения баллистическим методом приведена на рис. 16.2.

Порядок выполнения работы.

1. Убедитесь визуально в исправности установки.
2. Получив у преподавателя или лаборанта разрешение на выполнение работы, включите питание.
3. Спросите у преподавателя или лаборанта и запишите в табл. 16.1 высоты, с которых падает шарик (по умолчанию 0,9 м, 1.0 м, 1,1 м).
4. Проведите измерения времени падения.

a. Установите датчики включения секундомера на указанных высотах.

b. Включите тумблер T_M и закрепите шарик на магните.

c. Переключите тумблер T_M.

d. Время с секундомера занесите в таблицу.

e. Повторите п. 4 требуемое число раз.

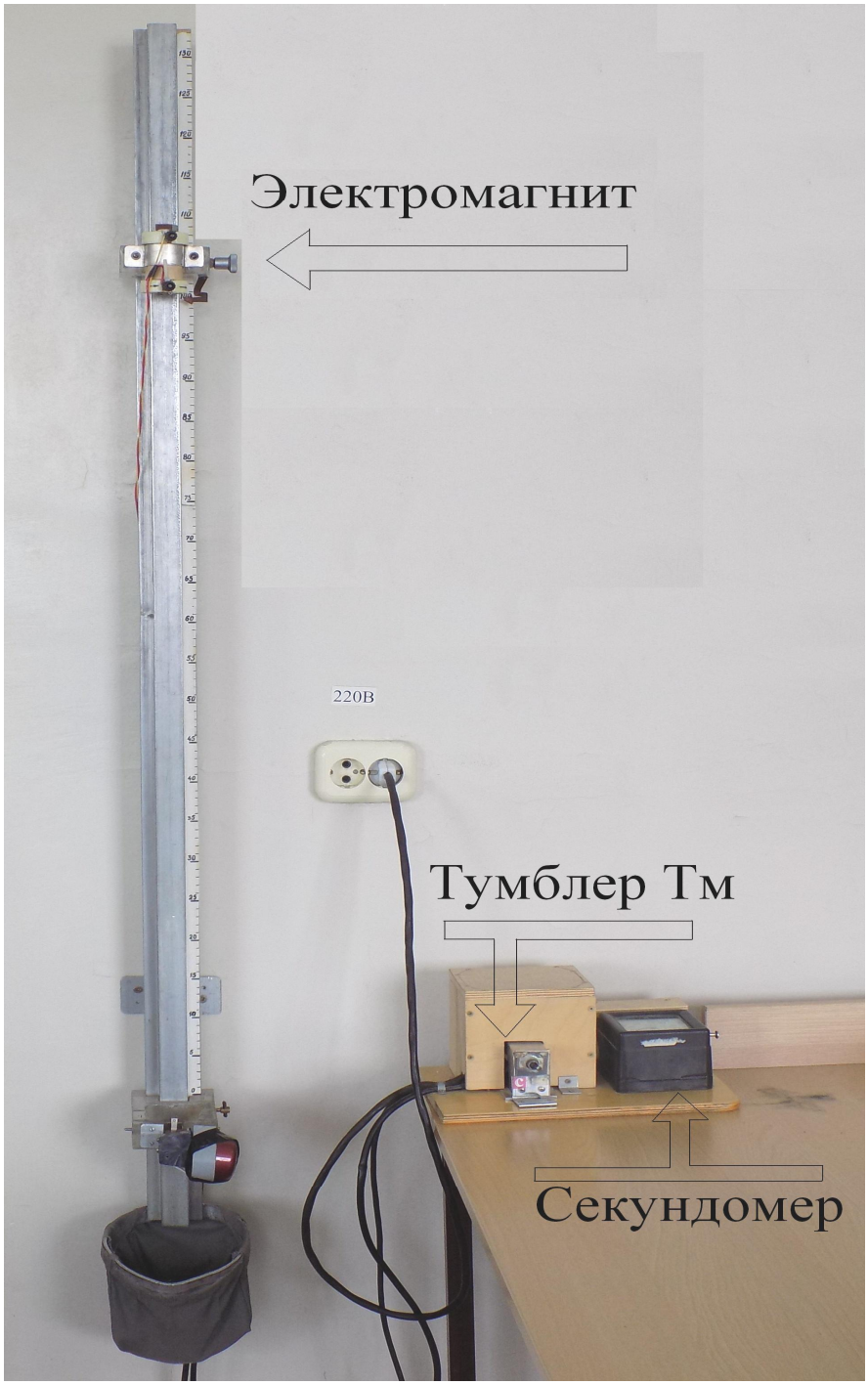


Рис. 16.2. Общий вид установки

Таблица 16.1

Измерение ускорения свободного падения баллистическим методом

№	h, м	t, с	$g, \frac{м}{с^2}$	$\bar{g}, \frac{м}{с^2}$	$s_g, \frac{м}{с^2}$	$\Delta g, \frac{м}{с^2}$	ε
1							
2							
…							
…							

5. По указанию преподавателя вычислите g по формуле (16.9) (по умолчанию) или (16.12). В случае использования формулы (16.12) в качестве h_1 и t_1 берутся результаты первого измерения, и первая строка в столбце g оставляется пустой. Результат занесите в табл. 16.1.

6. Вычислите полуширину доверительного интервала s_g для $\bar{g}$ при доверительной вероятности 68 % (1,312 – коэффициент Стьюдента при количестве измерений 3 и доверительной вероятности 0,68, см. табл. 2 введения) занесите результаты в табл. 16.1.

7. Подсчитайте абсолютную Δg и относительную ε погрешность.

8. Запишите результат в виде $g = \bar{g} \pm \Delta g$.

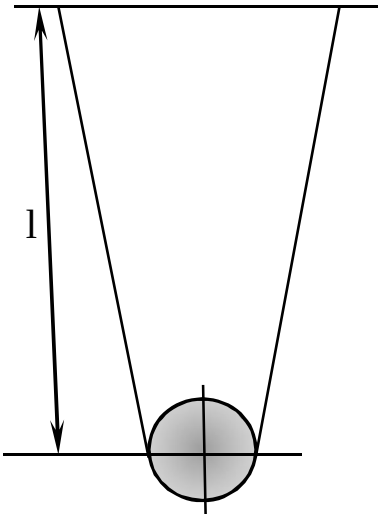


Рис. 16.3. Схема маятниковой установки

Упражнение № 2. Схема установки для измерения ускорения свободного падения маятниковым методом приведена на рис. 16.3.

Порядок выполнения работы.

1. Убедитесь визуально в исправности установки.

2. Запишите в табл. 16.2 длину подвеса маятника (спросите у преподавателя или лаборанта).

3. Отклонив грузик на небольшой угол, измерьте время t нескольких колебаний. Число колебаний N должно быть больше 15.

4. Вычислите период одного колебания $T = \frac{t}{N}$ и запишите в таблицу.

5. Повторите п.п. 4,5 указанное преподавателем число раз.

6. По указанию преподавателя вычислите g по формуле (16.14) или (16.15). Результат занесите в таблицу.

7. Вычислите полуширину доверительного интервала s_g для $\bar{g}$ при доверительной вероятности 68 % (1,312 – коэффициент Стьюдента при количестве измерений 3 и доверительной вероятности 0,68, см. табл. 2 введения) занесите результаты в табл. 16.2.

8. Посчитайте абсолютную Δg и относительную ε погрешность.

9. Запишите результат в виде $g = \bar{g} \pm \Delta g$

Таблица 16.2

Измерение ускорения свободного падения маятниковым методом

№	l, м	t, с	N	T, с	$g, \frac{м}{с^2}$	$\bar{g}, \frac{м}{с^2}$	$s_g, \frac{м}{с^2}$	$\Delta g, \frac{м}{с^2}$	ε
1									
2									
…									
…									

Контрольные вопросы и задания

1. Как зависит гравитационная составляющая ускорения свободного падения от высоты над поверхностью Земли?

2. На какой широте угол между $\vec{g}_г$ и $\vec{g}_ц$ минимальный, а на какой – максимальный?

3. Выведите формулу (16.15) и докажите, что g, найденное по этой формуле, точнее, чем по (16.14).

4. В международной гравиметрической системе IGSN 71 для нормального значения ускорения свободного падения принята формула с поправочными коэффициентами, определёнными по совокупности гравиметрических данных на 1967 г.

$$g = 9.780318(1 + 0.005302\sin^2\varphi - 0.0000059\sin^2 2\varphi)\left[\frac{м}{с^2}\right].$$

А какие коэффициенты (или формула) получатся у вас?

5. Сформулируйте закон всемирного тяготения.

6. В каких случаях закон всемирного тяготения справедлив, укажите область его применения.

7. Найдите силу взаимодействия двух свинцовых шаров радиусом 5 см с расстояния 5 см.

8. Найдите силу взаимодействия двух свинцовых шаров радиусом 5 см с расстояния 100 см.

9. Найдите силу взаимодействия двух свинцовых шаров радиусом 5 см с расстояния 1 км.

10. Найдите силу взаимодействия двух деревянных шаров радиусом 5 см с расстояния 15 см.

11. Чему равна сила притяжения между свинцовым кубиком с ребром 10 см и свинцовой дробинкой массой 1 мг, если между их центрами масс расстояние 1000 см?

12. Чему равна сила притяжения между свинцовым кубиком с ребром 10 см и свинцовой дробинкой массой 1 мг, если между их центрами масс расстояние 10 см?

13. Чему равна сила притяжения между свинцовым кубиком с ребром 10 см и свинцовой дробинкой массой 1 мг, если между их центрами масс расстояние 100 см?

14. Как направлена и какой модуль имеет сила взаимодействия между двумя пузырьками воздуха диаметром 1 мм в воде? Расстояние между пузырьками 10 см.

15. Как направлена и какой модуль имеет сила взаимодействия между двумя пузырьками воздуха диаметром 1 мм в воде? Расстояние между пузырьками 10 см.

16. Как направлена и какой модуль имеет сила взаимодействия между двумя пузырьками воздуха диаметром 1 мм в воде? Расстояние между пузырьками 100 см.

17. Как направлена и какой модуль имеет сила взаимодействия между двумя пузырьками воздуха диаметром 1 мм в воде? Расстояние между пузырьками 1 см.

18. И последний вопрос по закону всемирного тяготения, как будут взаимодействовать свинцовая дробинка и пузырек воздуха под водой?

19. Расскажите об отличии центростремительного ускорения от центробежного. Что общего, в чем разница между ними?

20. Что такое вес тела?

21. Меняется ли вес тела, если его перемещать по поверхности Земли? Как будет меняться вес тела?

22. Что показывают весы, на которых взвешивают различные тела?

23. Какие весы правильно определяют массу тела на Земле и на Луне?

24. Какие весы правильно определяют вес тела на Земле и на Луне?

25. Разве вопросы 11 и 12 спрашивают не об одном и том же?

26. Что такое ускорение свободного падения?

27. Чему приблизительно равно ускорение свободного падения на планете с радиусом в два раза больше земного? А в два раза меньше? Вращение не учитывать, плотность планеты равна земной.

28. На какой высоте над поверхностью Земли вес тела уменьшается в 4 раза?

29. На какой высоте над поверхностью Земли вес тела уменьшается в 6 раз?

30. На какой высоте над поверхностью Земли вес тела уменьшается в 8 раз?

31. На какой высоте над поверхностью Земли вес тела уменьшается в 2 раза?

32. Чему станет равен вес тела массой 10 кг в шахте глубиной в треть радиуса Земли?

33. Чему станет равен вес тела массой 15 кг в шахте глубиной в треть радиуса Земли?

34. Чему станет равен вес тела массой 15 кг в шахте глубиной в четверть радиуса Земли?

35. Чему станет равен вес тела массой 10 кг в шахте глубиной в одну пятую радиуса Земли?

36. Если бы в бесконечной вселенной существовала планета-оболочка, т.е. планета без ядра, то чему было бы равно ускорение свободного падения внутри этой планеты-оболочки?

37. Где ускорение свободного падения больше: на полюсе Земли или на экваторе? Почему?

38. Сколько весит килограмм гвоздей на полюсе? На 45 параллели?

39. Чему равнялись бы сутки на Земле, если бы ускорение на экваторе отличалось от ускорения на полюсе в 5 раз?

40. Может ли в бесконечной вселенной существовать планета, на которой вес тел на экваторе больше, чем на полюсе? Обоснуйте ответ.

41. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 50 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 50 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 50 км?

42. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 100 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 100 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 100 км?

43. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 150 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 150 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 150 км?

44. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 200 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 200 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 200 км?

45. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 250 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 250 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 250 км?

46. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 300 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 300 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 300 км?

47. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 350 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 350 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 350 км?

48. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 400 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 400 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 400 км?

49. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 500 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 500 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 500 км?

50. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 600 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 600 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 600 км?

51. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 700 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 700 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 700 км?

52. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 800 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 800 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 800 км?

53. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 900 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 900 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 900 км?

54. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1000 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 1000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 1000 км?

55. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1200 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 1200 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 1200 км?

56. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1500 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 1500 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 1500 км?

57. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 2000 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 2000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 2000 км?

58. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 3000 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 3000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 3000 км?

59. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 4000 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 4000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 4000 км?

60. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 5000 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 5000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 5000 км?

61. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 50 км над поверхностью Луны. Массу Луны, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Луны и на высоте 50 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Луны и на высоте 50 км?

62. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 100 км над поверхностью Луны. Массу Луны, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Луны и на высоте 100 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Луны и на высоте 100 км?

63. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 150 км над поверхностью Луны. Массу Луны, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Луны и на высоте 150 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Луны и на высоте 150 км?

64. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 200 км над поверхностью Луны. Массу Луны, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Луны и на высоте 200 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Луны и на высоте 200 км?

65. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 250 км над поверхностью Луны. Массу Луны, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Луны и на высоте 250 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Луны и на высоте 250 км?

66. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 300 км над поверхностью Луны. Массу Луны, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Луны и на высоте 300 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Луны и на высоте 300 км?

67. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 350 км над поверхностью Луны. Массу Луны, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Луны и на высоте 350 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Луны и на высоте 350 км?

68. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 400 км над поверхностью Луны. Массу Луны, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Луны и на высоте 400 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Луны и на высоте 400 км?

69. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 500 км над поверхностью Луны. Массу Луны, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Луны и на высоте 500 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Луны и на высоте 500 км?

70. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 600 км над поверхностью Луны. Массу Луны, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Луны и на высоте 600 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Луны и на высоте 600 км?

71. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 700 км над поверхностью Луны. Массу Луны, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Луны и на высоте 700 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Луны и на высоте 700 км?

72. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 800 км над поверхностью Луны. Массу Луны, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Луны и на высоте 800 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Луны и на высоте 800 км?

73. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 900 км над поверхностью Луны. Массу Луны, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Луны и на высоте 900 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Луны и на высоте 900 км?

74. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1000 км над поверхностью Луны. Массу Луны, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Луны и на высоте 1000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Луны и на высоте 1000 км?

75. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1200 км над поверхностью Луны. Массу Луны, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Луны и на высоте 1200 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Луны и на высоте 1200 км?

76. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1500 км над поверхностью Луны. Массу Луны, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Луны и на высоте 1500 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Луны и на высоте 1500 км?

77. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 2000 км над поверхностью Луны. Массу Луны, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Луны и на высоте 2000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Луны и на высоте 2000 км?

78. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 3000 км над поверхностью Луны. Массу Луны, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Луны и на высоте 3000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Луны и на высоте 3000 км?

79. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 4000 км над поверхностью Луны. Массу Луны, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Луны и на высоте 4000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Луны и на высоте 4000 км?

80. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 5000 км над поверхностью Луны. Массу Луны, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Луны и на высоте 5000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Луны и на высоте 5000 км?

81. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 50 км над поверхностью Луны. Массу Луны, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Луны и на высоте 50 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Луны и на высоте 50 км?

82. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 100 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 100 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 100 км?

83. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 150 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 150 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 150 км?

84. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 200 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 200 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 200 км?

85. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 250 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 250 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 250 км?

86. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 300 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 300 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 300 км?

87. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 350 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 350 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 350 км?

88. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 400 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 400 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 400 км?

89. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 500 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 500 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 500 км?

90. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 600 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 600 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 600 км?

91. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 700 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 700 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 700 км?

92. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 800 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 800 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 800 км?

93. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 900 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 900 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 900 км?

94. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1000 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 1000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 1000 км?

95. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1200 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 1200 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 1200 км?

96. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1500 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 1500 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 1500 км?

97. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 2000 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 2000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 2000 км?

98. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 3000 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 3000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 3000 км?

99. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 4000 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 4000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 4000 км?

100. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 5000 км над поверхностью Земли. Массу Земли, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Земли и на высоте 5000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Земли и на высоте 5000 км?

101. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 50 км над поверхностью Венеры. Массу Венеры, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Венеры и на высоте 50 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Венеры и на высоте 50 км?

102. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 100 км над поверхностью Венеры. Массу Венеры, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Венеры и на высоте 100 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Венеры и на высоте 100 км?

103. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 150 км над поверхностью Венеры. Массу Венеры, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Венеры и на высоте 150 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Венеры и на высоте 150 км?

104. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 200 км над поверхностью Венеры. Массу Венеры, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Венеры и на высоте 200 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Венеры и на высоте 200 км?

105. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 250 км над поверхностью Венеры. Массу Венеры, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Венеры и на высоте 250 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Венеры и на высоте 250 км?

106. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 300 км над поверхностью Венеры. Массу Венеры, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Венеры и на высоте 300 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Венеры и на высоте 300 км?

107. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 350 км над поверхностью Венеры. Массу Венеры, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Венеры и на высоте 350 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Венеры и на высоте 350 км?

108. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 400 км над поверхностью Венеры. Массу Венеры, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Венеры и на высоте 400 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Венеры и на высоте 400 км?

109. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 500 км над поверхностью Венеры. Массу Венеры, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Венеры и на высоте 500 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Венеры и на высоте 500 км?

110. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 600 км над поверхностью Венеры. Массу Венеры, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Венеры и на высоте 600 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Венеры и на высоте 600 км?

111. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 700 км над поверхностью Венеры. Массу Венеры, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Венеры и на высоте 700 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Венеры и на высоте 700 км?

112. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 800 км над поверхностью Венеры. Массу Венеры, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Венеры и на высоте 800 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Венеры и на высоте 800 км?

113. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 900 км над поверхностью Венеры. Массу Венеры, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Венеры и на высоте 900 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Венеры и на высоте 900 км?

114. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1000 км над поверхностью Венеры. Массу Венеры, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Венеры и на высоте 1000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Венеры и на высоте 1000 км?

115. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1200 км над поверхностью Венеры. Массу Венеры, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Венеры и на высоте 1200 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Венеры и на высоте 1200 км?

116. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1500 км над поверхностью Венеры. Массу Венеры, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Венеры и на высоте 1500 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Венеры и на высоте 1500 км?

117. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 2000 км над поверхностью Венеры. Массу Венеры, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Венеры и на высоте 2000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Венеры и на высоте 2000 км?

118. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 3000 км над поверхностью Венеры. Массу Венеры, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Венеры и на высоте 3000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Венеры и на высоте 3000 км?

119. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 4000 км над поверхностью Венеры. Массу Венеры, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Венеры и на высоте 4000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Венеры и на высоте 4000 км?

120. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 5000 км над поверхностью Венеры. Массу Венеры, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Венеры и на высоте 5000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Венеры и на высоте 5000 км?

121. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 50 км над поверхностью Марса. Массу Марса, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Марса и на высоте 50 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Марса и на высоте 50 км?

122. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 100 км над поверхностью Марса. Массу Марса, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Марса и на высоте 100 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Марса и на высоте 100 км?

123. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 150 км над поверхностью Марса. Массу Марса, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Марса и на высоте 150 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Марса и на высоте 150 км?

124. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 200 км над поверхностью Марса. Массу Марса, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Марса и на высоте 200 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Марса и на высоте 200 км?

125. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 250 км над поверхностью Марса. Массу Марса, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Марса и на высоте 250 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Марса и на высоте 250 км?

126. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 300 км над поверхностью Марса. Массу Марса, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Марса и на высоте 300 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Марса и на высоте 300 км?

127. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 350 км над поверхностью Марса. Массу Марса, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Марса и на высоте 350 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Марса и на высоте 350 км?

128. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 400 км над поверхностью Марса. Массу Марса, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Марса и на высоте 400 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Марса и на высоте 400 км?

129. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 500 км над поверхностью Марса. Массу Марса, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Марса и на высоте 500 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Марса и на высоте 500 км?

130. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 600 км над поверхностью Марса. Массу Марса, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Марса и на высоте 600 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Марса и на высоте 600 км?

131. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 700 км над поверхностью Марса. Массу Марса, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Марса и на высоте 700 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Марса и на высоте 700 км?

132. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 800 км над поверхностью Марса. Массу Марса, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Марса и на высоте 800 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Марса и на высоте 800 км?

133. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 900 км над поверхностью Марса. Массу Марса, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Марса и на высоте 900 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Марса и на высоте 900 км?

134. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1000 км над поверхностью Марса. Массу Марса, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Марса и на высоте 1000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Марса и на высоте 1000 км?

135. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1200 км над поверхностью Марса. Массу Марса, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Марса и на высоте 1200 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Марса и на высоте 1200 км?

136. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1500 км над поверхностью Марса. Массу Марса, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Марса и на высоте 1500 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Марса и на высоте 1500 км?

137. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 2000 км над поверхностью Марса. Массу Марса, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Марса и на высоте 2000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Марса и на высоте 2000 км?

138. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 3000 км над поверхностью Марса. Массу Марса, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Марса и на высоте 3000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Марса и на высоте 3000 км?

139. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 4000 км над поверхностью Марса. Массу Марса, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Марса и на высоте 4000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Марса и на высоте 4000 км?

140. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 5000 км над поверхностью Марса. Массу Марса, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Марса и на высоте 5000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Марса и на высоте 5000 км?

141. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 50 км над поверхностью Меркурия. Массу Меркурия, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Меркурия и на высоте 50 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Меркурия и на высоте 50 км?

142. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 100 км над поверхностью Меркурия. Массу Меркурия, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Меркурия и на высоте 100 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Меркурия и на высоте 100 км?

143. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 150 км над поверхностью Меркурия. Массу Меркурия, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Меркурия и на высоте 150 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Меркурия и на высоте 150 км?

144. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 200 км над поверхностью Меркурия. Массу Меркурия, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Меркурия и на высоте 200 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Меркурия и на высоте 200 км?

145. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 250 км над поверхностью Меркурия. Массу Меркурия, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Меркурия и на высоте 250 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Меркурия и на высоте 250 км?

146. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 300 км над поверхностью Меркурия. Массу Меркурия, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Меркурия и на высоте 300 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Меркурия и на высоте 300 км?

147. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 350 км над поверхностью Меркурия. Массу Меркурия, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Меркурия и на высоте 350 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Меркурия и на высоте 350 км?

148. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 400 км над поверхностью Меркурия. Массу Меркурия, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Меркурия и на высоте 400 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Меркурия и на высоте 400 км?

149. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 500 км над поверхностью Меркурия. Массу Меркурия, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Меркурия и на высоте 500 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Меркурия и на высоте 500 км?

150. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 600 км над поверхностью Меркурия. Массу Меркурия, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Меркурия и на высоте 600 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Меркурия и на высоте 600 км?

151. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 700 км над поверхностью Меркурия. Массу Меркурия, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Меркурия и на высоте 700 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Меркурия и на высоте 700 км?

152. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 800 км над поверхностью Меркурия. Массу Меркурия, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Меркурия и на высоте 800 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Меркурия и на высоте 800 км?

153. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 900 км над поверхностью Меркурия. Массу Меркурия, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Меркурия и на высоте 900 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Меркурия и на высоте 900 км?

154. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1000 км над поверхностью Меркурия. Массу Меркурия, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Меркурия и на высоте 1000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Меркурия и на высоте 1000 км?

155. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1200 км над поверхностью Меркурия. Массу Меркурия, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Меркурия и на высоте 1200 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Меркурия и на высоте 1200 км?

156. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1500 км над поверхностью Меркурия. Массу Меркурия, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Меркурия и на высоте 1500 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Меркурия и на высоте 1500 км?

157. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 2000 км над поверхностью Меркурия. Массу Меркурия, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Меркурия и на высоте 2000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Меркурия и на высоте 2000 км?

158. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 3000 км над поверхностью Меркурия. Массу Меркурия, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Меркурия и на высоте 3000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Меркурия и на высоте 3000 км?

159. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 4000 км над поверхностью Меркурия. Массу Меркурия, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Меркурия и на высоте 4000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Меркурия и на высоте 4000 км?

160. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 5000 км над поверхностью Меркурия. Массу Меркурия, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Меркурия и на высоте 5000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Меркурия и на высоте 5000 км?

161. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 50 км над поверхностью Юпитера. Массу Юпитера, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Юпитера и на высоте 50 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Юпитера и на высоте 50 км?

162. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 100 км над поверхностью Юпитера. Массу Юпитера, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Юпитера и на высоте 100 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Юпитера и на высоте 100 км?

163. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 150 км над поверхностью Юпитера. Массу Юпитера, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Юпитера и на высоте 150 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Юпитера и на высоте 150 км?

164. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 200 км над поверхностью Юпитера. Массу Юпитера, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Юпитера и на высоте 200 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Юпитера и на высоте 200 км?

165. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 250 км над поверхностью Юпитера. Массу Юпитера, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Юпитера и на высоте 250 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Юпитера и на высоте 250 км?

166. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 300 км над поверхностью Юпитера. Массу Юпитера, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Юпитера и на высоте 300 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Юпитера и на высоте 300 км?

167. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 350 км над поверхностью Юпитера. Массу Юпитера, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Юпитера и на высоте 350 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Юпитера и на высоте 350 км?

168. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 400 км над поверхностью Юпитера. Массу Юпитера, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Юпитера и на высоте 400 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Юпитера и на высоте 400 км?

169. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 500 км над поверхностью Юпитера. Массу Юпитера, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Юпитера и на высоте 500 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Юпитера и на высоте 500 км?

170. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 600 км над поверхностью Юпитера. Массу Юпитера, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Юпитера и на высоте 600 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Юпитера и на высоте 600 км?

171. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 700 км над поверхностью Юпитера. Массу Юпитера, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Юпитера и на высоте 700 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Юпитера и на высоте 700 км?

172. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 800 км над поверхностью Юпитера. Массу Юпитера, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Юпитера и на высоте 800 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Юпитера и на высоте 800 км?

173. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 900 км над поверхностью Юпитера. Массу Юпитера, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Юпитера и на высоте 900 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Юпитера и на высоте 900 км?

174. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1000 км над поверхностью Юпитера. Массу Юпитера, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Юпитера и на высоте 1000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Юпитера и на высоте 1000 км?

175. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1200 км над поверхностью Юпитера. Массу Юпитера, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Юпитера и на высоте 1200 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Юпитера и на высоте 1200 км?

176. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1500 км над поверхностью Юпитера. Массу Юпитера, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Юпитера и на высоте 1500 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Юпитера и на высоте 1500 км?

177. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 2000 км над поверхностью Юпитера. Массу Юпитера, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Юпитера и на высоте 2000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Юпитера и на высоте 2000 км?

178. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 3000 км над поверхностью Юпитера. Массу Юпитера, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Юпитера и на высоте 3000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Юпитера и на высоте 3000 км?

179. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 4000 км над поверхностью Юпитера. Массу Юпитера, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Юпитера и на высоте 4000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Юпитера и на высоте 4000 км?

180. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 5000 км над поверхностью Юпитера. Массу Юпитера, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Юпитера и на высоте 5000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Юпитера и на высоте 5000 км?

181. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 50 км над поверхностью Сатурна. Массу Сатурна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Сатурна и на высоте 50 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Сатурна и на высоте 50 км?

182. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 100 км над поверхностью Сатурна. Массу Сатурна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Сатурна и на высоте 100 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Сатурна и на высоте 100 км?

183. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 150 км над поверхностью Сатурна. Массу Сатурна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Сатурна и на высоте 150 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Сатурна и на высоте 150 км?

184. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 200 км над поверхностью Сатурна. Массу Сатурна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Сатурна и на высоте 200 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Сатурна и на высоте 200 км?

185. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 250 км над поверхностью Сатурна. Массу Сатурна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Сатурна и на высоте 250 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Сатурна и на высоте 250 км?

186. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 300 км над поверхностью Сатурна. Массу Сатурна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Сатурна и на высоте 300 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Сатурна и на высоте 300 км?

187. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 350 км над поверхностью Сатурна. Массу Сатурна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Сатурна и на высоте 350 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Сатурна и на высоте 350 км?

188. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 400 км над поверхностью Сатурна. Массу Сатурна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Сатурна и на высоте 400 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Сатурна и на высоте 400 км?

189. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 500 км над поверхностью Сатурна. Массу Сатурна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Сатурна и на высоте 500 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Сатурна и на высоте 500 км?

190. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 600 км над поверхностью Сатурна. Массу Сатурна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Сатурна и на высоте 600 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Сатурна и на высоте 600 км?

191. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 700 км над поверхностью Сатурна. Массу Сатурна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Сатурна и на высоте 700 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Сатурна и на высоте 700 км?

192. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 800 км над поверхностью Сатурна. Массу Сатурна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Сатурна и на высоте 800 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Сатурна и на высоте 800 км?

193. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 900 км над поверхностью Сатурна. Массу Сатурна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Сатурна и на высоте 900 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Сатурна и на высоте 900 км?

194. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1000 км над поверхностью Сатурна. Массу Сатурна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Сатурна и на высоте 1000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Сатурна и на высоте 1000 км?

195. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1200 км над поверхностью Сатурна. Массу Сатурна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Сатурна и на высоте 1200 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Сатурна и на высоте 1200 км?

196. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1500 км над поверхностью Сатурна. Массу Сатурна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Сатурна и на высоте 1500 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Сатурна и на высоте 1500 км?

197. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 2000 км над поверхностью Сатурна. Массу Сатурна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Сатурна и на высоте 2000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Сатурна и на высоте 2000 км?

198. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 3000 км над поверхностью Сатурна. Массу Сатурна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Сатурна и на высоте 3000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Сатурна и на высоте 3000 км?

199. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 4000 км над поверхностью Сатурна. Массу Сатурна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Сатурна и на высоте 4000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Сатурна и на высоте 4000 км?

200. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 5000 км над поверхностью Сатурна. Массу Сатурна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Сатурна и на высоте 5000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Сатурна и на высоте 5000 км?

201. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 50 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 50 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 50 км?

202. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 100 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 100 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 100 км?

203. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 150 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 150 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 150 км?

204. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 200 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 200 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 200 км?

205. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 250 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 250 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 250 км?

206. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 300 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 300 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 300 км?

207. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 350 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 350 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 350 км?

208. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 400 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 400 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 400 км?

209. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 500 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 500 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 500 км?

210. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 600 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 600 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 600 км?

211. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 700 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 700 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 700 км?

212. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 800 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 800 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 800 км?

213. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 900 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 900 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 900 км?

214. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1000 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 1000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 1000 км?

215. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1200 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 1200 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 1200 км?

216. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1500 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 1500 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 1500 км?

217. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 2000 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 2000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 2000 км?

218. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 3000 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 3000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 3000 км?

219. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 4000 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 4000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 4000 км?

220. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 5000 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 5000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 5000 км?

221. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 50 км над поверхностью Урана. Массу Урана, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Урана и на высоте 50 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Урана и на высоте 50 км?

222. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 100 км над поверхностью Урана. Массу Урана, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Урана и на высоте 100 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Урана и на высоте 100 км?

223. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 150 км над поверхностью Урана. Массу Урана, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Урана и на высоте 150 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Урана и на высоте 150 км?

224. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 200 км над поверхностью Урана. Массу Урана, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Урана и на высоте 200 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Урана и на высоте 200 км?

225. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 250 км над поверхностью Урана. Массу Урана, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Урана и на высоте 250 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Урана и на высоте 250 км?

226. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 300 км над поверхностью Урана. Массу Урана, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Урана и на высоте 300 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Урана и на высоте 300 км?

227. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 350 км над поверхностью Урана. Массу Урана, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Урана и на высоте 350 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Урана и на высоте 350 км?

228. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 400 км над поверхностью Урана. Массу Урана, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Урана и на высоте 400 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Урана и на высоте 400 км?

229. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 500 км над поверхностью Урана. Массу Урана, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Урана и на высоте 500 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Урана и на высоте 500 км?

230. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 600 км над поверхностью Урана. Массу Урана, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Урана и на высоте 600 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Урана и на высоте 600 км?

231. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 700 км над поверхностью Урана. Массу Урана, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Урана и на высоте 700 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Урана и на высоте 700 км?

232. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 800 км над поверхностью Урана. Массу Урана, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Урана и на высоте 800 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Урана и на высоте 800 км?

233. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 900 км над поверхностью Урана. Массу Урана, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Урана и на высоте 900 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Урана и на высоте 900 км?

234. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1000 км над поверхностью Урана. Массу Урана, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Урана и на высоте 1000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Урана и на высоте 1000 км?

235. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1200 км над поверхностью Урана. Массу Урана, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Урана и на высоте 1200 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Урана и на высоте 1200 км?

236. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1500 км над поверхностью Урана. Массу Урана, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Урана и на высоте 1500 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Урана и на высоте 1500 км?

237. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 2000 км над поверхностью Урана. Массу Урана, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Урана и на высоте 2000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Урана и на высоте 2000 км?

238. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 3000 км над поверхностью Урана. Массу Урана, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Урана и на высоте 3000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Урана и на высоте 3000 км?

239. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 4000 км над поверхностью Урана. Массу Урана, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Урана и на высоте 4000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Урана и на высоте 4000 км?

240. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 5000 км над поверхностью Урана. Массу Урана, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Урана и на высоте 5000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Урана и на высоте 5000 км?

241. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 50 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 50 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 50 км?

242. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 100 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 100 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 100 км?

243. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 150 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 150 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 150 км?

244. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 200 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 200 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 200 км?

245. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 250 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 250 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 250 км?

246. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 300 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 300 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 300 км?

247. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 350 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 350 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 350 км?

248. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 400 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 400 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 400 км?

249. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 500 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 500 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 500 км?

250. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 600 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 600 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 600 км?

251. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 700 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 700 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 700 км?

252. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 800 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 800 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 800 км?

253. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 900 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 900 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 900 км?

254. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1000 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 1000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 1000 км?

255. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1200 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 1200 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 1200 км?

256. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1500 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 1500 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 1500 км?

257. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 2000 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 2000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 2000 км?

258. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 3000 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 3000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 3000 км?

259. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 4000 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 4000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 4000 км?

260. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 5000 км над поверхностью Нептуна. Массу Нептуна, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Нептуна и на высоте 5000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Нептуна и на высоте 5000 км?

261. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 50 км над поверхностью Плутона. Массу Плутона, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Плутона и на высоте 50 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Плутона и на высоте 50 км?

262. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 100 км над поверхностью Плутона. Массу Плутона, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Плутона и на высоте 100 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Плутона и на высоте 100 км?

263. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 150 км над поверхностью Плутона. Массу Плутона, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Плутона и на высоте 150 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Плутона и на высоте 150 км?

264. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 200 км над поверхностью Плутона. Массу Плутона, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Плутона и на высоте 200 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Плутона и на высоте 200 км?

265. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 250 км над поверхностью Плутона. Массу Плутона, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Плутона и на высоте 250 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Плутона и на высоте 250 км?

266. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 300 км над поверхностью Плутона. Массу Плутона, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Плутона и на высоте 300 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Плутона и на высоте 300 км?

267. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 350 км над поверхностью Плутона. Массу Плутона, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Плутона и на высоте 350 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Плутона и на высоте 350 км?

268. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 400 км над поверхностью Плутона. Массу Плутона, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Плутона и на высоте 400 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Плутона и на высоте 400 км?

269. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 500 км над поверхностью Плутона. Массу Плутона, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Плутона и на высоте 500 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Плутона и на высоте 500 км?

270. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 600 км над поверхностью Плутона. Массу Плутона, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Плутона и на высоте 600 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Плутона и на высоте 600 км?

271. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 700 км над поверхностью Плутона. Массу Плутона, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Плутона и на высоте 700 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Плутона и на высоте 700 км?

272. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 800 км над поверхностью Плутона. Массу Плутона, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Плутона и на высоте 800 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Плутона и на высоте 800 км?

273. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 900 км над поверхностью Плутона. Массу Плутона, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Плутона и на высоте 900 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Плутона и на высоте 900 км?

274. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1000 км над поверхностью Плутона. Массу Плутона, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Плутона и на высоте 1000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Плутона и на высоте 1000 км?

275. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1200 км над поверхностью Плутона. Массу Плутона, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Плутона и на высоте 1200 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Плутона и на высоте 1200 км?

276. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1500 км над поверхностью Плутона. Массу Плутона, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Плутона и на высоте 1500 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Плутона и на высоте 1500 км?

277. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 2000 км над поверхностью Плутона. Массу Плутона, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Плутона и на высоте 2000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Плутона и на высоте 2000 км?

278. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 3000 км над поверхностью Плутона. Массу Плутона, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Плутона и на высоте 3000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Плутона и на высоте 3000 км?

279. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 4000 км над поверхностью Плутона. Массу Плутона, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Плутона и на высоте 4000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Плутона и на высоте 4000 км?

280. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 5000 км над поверхностью Плутона. Массу Плутона, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Плутона и на высоте 5000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Плутона и на высоте 5000 км?

281. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 50 км над поверхностью Ио. Массу Ио, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ио и на высоте 50 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ио и на высоте 50 км?

282. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 100 км над поверхностью Ио. Массу Ио, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ио и на высоте 100 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ио и на высоте 100 км?

283. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 150 км над поверхностью Ио. Массу Ио, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ио и на высоте 150 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ио и на высоте 150 км?

284. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 200 км над поверхностью Ио. Массу Ио, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ио и на высоте 200 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ио и на высоте 200 км?

285. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 250 км над поверхностью Ио. Массу Ио, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ио и на высоте 250 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ио и на высоте 250 км?

286. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 300 км над поверхностью Ио. Массу Ио, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ио и на высоте 300 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ио и на высоте 300 км?

287. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 350 км над поверхностью Ио. Массу Ио, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ио и на высоте 350 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ио и на высоте 350 км?

288. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 400 км над поверхностью Ио. Массу Ио, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ио и на высоте 400 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ио и на высоте 400 км?

289. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 500 км над поверхностью Ио. Массу Ио, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ио и на высоте 500 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ио и на высоте 500 км?

290. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 600 км над поверхностью Ио. Массу Ио, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение сво-

бодного падения на поверхности Ио и на высоте 600 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ио и на высоте 600 км?

291. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 700 км над поверхностью Ио. Массу Ио, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ио и на высоте 700 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ио и на высоте 700 км?

292. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 800 км над поверхностью Ио. Массу Ио, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ио и на высоте 800 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ио и на высоте 800 км?

293. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 900 км над поверхностью Ио. Массу Ио, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ио и на высоте 900 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ио и на высоте 900 км?

294. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1000 км над поверхностью Ио. Массу Ио, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ио и на высоте 1000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ио и на высоте 1000 км?

295. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1200 км над поверхностью Ио. Массу Ио, радиус, гравитационную

постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ио и на высоте 1200 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ио и на высоте 1200 км?

296. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1500 км над поверхностью Ио. Массу Ио, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ио и на высоте 1500 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ио и на высоте 1500 км?

297. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 2000 км над поверхностью Ио. Массу Ио, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ио и на высоте 2000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ио и на высоте 2000 км?

298. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 3000 км над поверхностью Ио. Массу Ио, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ио и на высоте 3000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ио и на высоте 3000 км?

299. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 4000 км над поверхностью Ио. Массу Ио, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в

каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ио и на высоте 4000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ио и на высоте 4000 км?

300. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 5000 км над поверхностью Ио. Массу Ио, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ио и на высоте 5000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ио и на высоте 5000 км?

301. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 50 км над поверхностью Ганимеда. Массу Ганимеда, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ганимеда и на высоте 50 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ганимеда и на высоте 50 км?

302. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 100 км над поверхностью Ганимеда. Массу Ганимеда, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ганимеда и на высоте 100 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ганимеда и на высоте 100 км?

303. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 150 км над поверхностью Ганимеда. Массу Ганимеда, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте,

какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ганимеда и на высоте 150 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ганимеда и на высоте 150 км?

304. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 200 км над поверхностью Ганимеда. Массу Ганимеда, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ганимеда и на высоте 200 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ганимеда и на высоте 200 км?

305. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 250 км над поверхностью Ганимеда. Массу Ганимеда, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ганимеда и на высоте 250 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ганимеда и на высоте 250 км?

306. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 300 км над поверхностью Ганимеда. Массу Ганимеда, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ганимеда и на высоте 300 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ганимеда и на высоте 300 км?

307. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 350 км над поверхностью Ганимеда. Массу Ганимеда, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли от-

личается ускорение свободного падения на поверхности Ганимеда и на высоте 350 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ганимеда и на высоте 350 км?

308. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 400 км над поверхностью Ганимеда. Массу Ганимеда, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ганимеда и на высоте 400 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ганимеда и на высоте 400 км?

309. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 500 км над поверхностью Ганимеда. Массу Ганимеда, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ганимеда и на высоте 500 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ганимеда и на высоте 500 км?

310. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 600 км над поверхностью Ганимеда. Массу Ганимеда, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ганимеда и на высоте 600 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ганимеда и на высоте 600 км?

311. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 700 км над поверхностью Ганимеда. Массу Ганимеда, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ганимеда и

на высоте 700 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ганимеда и на высоте 700 км?

312. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 800 км над поверхностью Ганимеда. Массу Ганимеда, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ганимеда и на высоте 800 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ганимеда и на высоте 800 км?

313. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 900 км над поверхностью Ганимеда. Массу Ганимеда, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ганимеда и на высоте 900 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ганимеда и на высоте 900 км?

314. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1000 км над поверхностью Ганимеда. Массу Ганимеда, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ганимеда и на высоте 1000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ганимеда и на высоте 1000 км?

315. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1200 км над поверхностью Ганимеда. Массу Ганимеда, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности

Ганимеда и на высоте 1200 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ганимеда и на высоте 1200 км?

316. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 1500 км над поверхностью Ганимеда. Массу Ганимеда, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ганимеда и на высоте 1500 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ганимеда и на высоте 1500 км?

317. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 2000 км над поверхностью Ганимеда. Массу Ганимеда, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ганимеда и на высоте 2000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ганимеда и на высоте 2000 км?

318. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 3000 км над поверхностью Ганимеда. Массу Ганимеда, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ганимеда и на высоте 3000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ганимеда и на высоте 3000 км?

319. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 4000 км над поверхностью Ганимеда. Массу Ганимеда, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности

Ганимеда и на высоте 4000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ганимеда и на высоте 4000 км?

320. Рассчитайте ускорение свободного падения на высоте 5000 км над поверхностью Ганимеда. Массу Ганимеда, радиус, гравитационную постоянную и прочие справочные данные найдите в интернете или в каком-нибудь физическом справочнике. Перед этим подумайте, какие именно данные вам действительно необходимы. Сильно ли отличается ускорение свободного падения на поверхности Ганимеда и на высоте 5000 км? Сильно ли отличается сила тяжести на поверхности Ганимеда и на высоте 5000 км?

17. АБСОЛЮТНАЯ И ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ВЛАЖНОСТЬ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

Материал данной главы пригодится вам при выполнении **экспериментального задания № 19-I [8].** Это задание является прекрасной экспериментальной иллюстрацией изложенного в настоящей главе теоретического материала.

Основы теории

Окружающая нас атмосфера состоит из сложной смеси различных газов – азота, кислорода, углекислого и некоторых других газов. Среди этих «других» самым важным для нас является водяной пар. Основные источники водяного пара в атмосфере – испарение с поверхности водоемов, почвы, растений. Содержание водяного пара в атмосфере непостоянно и может значительно изменяться в зависимости от географического положения точки наблюдения и ее высоты над уровнем моря, сезона, времени суток и погоды. Существенно, что количество водяного пара в окружающем нас воздухе напрямую влияет как на наше самочувствие, так и на «самочувствие» созданных нами механизмов и конструкций. Поэтому для характеристики содержания водяного пара в атмосфере введено несколько физических величин. Важнейшими из них являются абсолютная и относительная влажность.

Влажностью воздуха (точнее – абсолютной влажностью воздуха, потому что есть еще и относительная влажность) называется физическая величина, характеризующая количество водяного пара в воздухе. Эта физическая величина ρ по определению равна количеству водяного пара (в кг или г) в 1 кубическом метре воздуха, то есть, по существу, абсолютная влажность – это просто плотность водяного пара:

$$\rho = \frac{m_{вод.пара}}{V_{возд}}. \qquad (17.1)$$

Измеряется абсолютная влажность, естественно, в кг/м^3 и может изменяться от 0 (полная сушь) до более чем 30 г/м^3 (влажная жара в

тропиках). Часто вместо (или вместе с) абсолютной влажности используют так называемое парциальное давление водяного пара $p_{вод.пара}$, то есть ту часть суммарного атмосферного давления, которая обусловлена содержащимся в воздухе водяным паром. Если вспомнить уравнение Менделеева – Клапейрона $pV = \frac{m}{\mu}RT$, то нетрудно найти связь между абсолютной влажностью и парциальным давлением водяного пара:

$$\rho = \frac{m_{вод.пара}}{V_{возд}} = \frac{p_{вод.пара}\mu_{воды}}{RT}. \qquad (17.2)$$

Подставив в (17.2) значения молярной массы воды и универсальной газовой постоянной, нетрудно получить расчетную формулу:

$$\rho\left[\text{г/м}^3\right] = \frac{217 \times p_{вод.пара}\left[\text{гПа}\right]}{T\left[K\right]}. \qquad (17.3)$$

Можно заметить, что при фиксированной температуре абсолютная влажность (то есть плотность водяного пара) и парциальное давление водяного пара прямо пропорциональны друг другу, поэтому парциальное давление водяного пара (измеренное в Па) тоже часто называют абсолютной влажностью, хоть это и не совсем верно.

Разумеется, абсолютная влажность полностью характеризует количество водяного пара в воздухе, но она практически ничего не говорит о том, каким нам покажется этот воздух – влажным или, напротив, сухим. Так, например, воздух с абсолютной влажностью 9 г/м^3 будет казаться нам весьма влажным при температуре 10 °С и довольно сухим при температуре 30 °С.

Для того чтобы понять, почему так происходит, следует рассмотреть процессы, протекающие вблизи свободной поверхности жидкости. Этих процессов два: парообразование и конденсация. Парообра-

зование заключается в переходе находящихся вблизи поверхности жидкости молекул из жидкой фазы в газовую, а конденсация – наоборот, в переходе молекул из газовой фазы в жидкость (рис. 17.1).

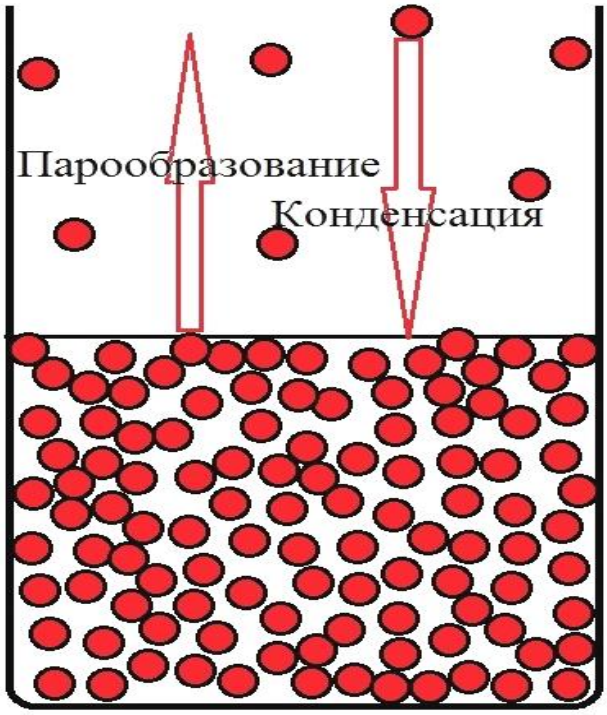


Рис. 17.1. Парообразование и конденсация

Интенсивность перехода молекул из жидкой фазы в газовую практически зависит только от температуры жидкости и быстро растет с ростом этой температуры – ведь для выскакивания молекулы из жидкости необходимо, чтобы она имела кинетическую энергию, достаточную для совершения работы выхода из жидкости, и при нагревании жидкости доля таких молекул быстро растет. Интенсивность же перехода молекул из газовой фазы в жидкость, напротив, от температуры пара практически не зависит (жидкость «примет» любую, даже очень медленную, молекулу), зато сильно зависит от концентрации пара – ведь для перехода из газовой фазы в жидкую молекула должна находиться в газовой фазе и если над жидкостью нет ее паров, то конденсироваться просто нечему.

Поэтому при любой фиксированной температуре и любой концентрации паров над жидкостью одновременно идет и процесс парообразования, и процесс конденсации, причем при низкой концентра-

ции паров доминирует парообразование (имеет место испарение жидкости), а при высокой – конденсация (имеет место конденсация жидкости). При некоторой же промежуточной концентрации паров процессы парообразования и конденсации идут с одинаковой интенсивностью и компенсируют друг друга – в результате количество жидкости не меняется и она «не испаряется». Именно эта промежуточная концентрация пара, при которой процессы парообразования и конденсации компенсируют друг друга, и называется концентрацией насыщенного пара; соответствующая плотность называется плотностью (или, что то же самое, абсолютной влажностью) насыщенного пара, давление – давлением (или, что то же самое, упругостью) насыщенного пара и так далее. Ясно, что все эти параметры зависят от температуры – ведь с ее ростом интенсивность парообразования растет; поэтому с ростом температуры и концентрация, и плотность, и упругость насыщенного водяного пара быстро растут (табл. 17.1[46]).

Для того чтобы оценить степень влажности воздуха не «вообще», а «для нас», используется понятие относительной влажности воздуха. По определению, относительной влажностью воздуха f называется отношение упругости находящегося в воздухе водяного пара к упругости насыщенного водяного пара при данной температуре. Поскольку при данной температуре плотность водяных паров и их упругость пропорциональны друг другу – см. (17.1), относительная влажность одновременно равна отношению плотности находящегося в воздухе водяного пара и плотности насыщенного водяного пара при данной температуре:

$$f = \frac{\rho}{\rho_{нас}} = \frac{p_{вод.пара}}{p_{насыщ.вод.пара}}. \qquad (17.4)$$

Относительная влажность воздуха – безразмерная величина; обычно она изменяется от 0 до 1 (или, что то же самое, от 0 % до

[46] Те ячейки таблицы, на которые имеются ссылки в тексте, выделены жирным шрифтом и подчеркиванием (чтобы вам было удобно их находить).

100 %). При низкой относительной влажности воздуха упругость водяного пара гораздо меньше упругости насыщенного водяного пара и находящийся в воздухе пар практически не мешает парообразованию – в результате мокрые предметы интенсивно сохнут. При высокой относительной влажности воздуха упругость находящегося в воздухе водяного пара практически равна упругости насыщенного водяного пара и в результате парообразование затруднено – мокрые предметы сохнут очень медленно.

Теперь понятно, почему для нас важна именно относительная влажность воздуха, а не абсолютная. Дело в том, что мы ощущаем отнюдь не воздух, а только самих себя[47] и реагируем именно на возможность – или невозможность – испарения, а эта возможность или невозможность контролируется именно относительной влажностью. Действительно, при низкой относительной влажности выделяемый нами на жаре пот быстро испаряется (принося нам желанную прохладу), мы с удовлетворением замечаем – «Сухая жара переносится легче»; при высокой же относительной влажности пот не испаряется и мы ходим мокрые, перегретые и злые, жалуясь – «Какая духота!».

Относительная влажность зависит не только от реального содержания водяного пара в воздухе (то есть от абсолютной влажности), но и – весьма существенно – от температуры. Действительно, с ростом температуры упругость насыщенного водяного пара быстро растет, поэтому относительная влажность (при заданной абсолютной) быстро уменьшается. Именно поэтому воздух с абсолютной влажностью 9 г/м^3 будет казаться нам весьма влажным при температуре 10 °С (плотность насыщенного пара при этой температуре равна 9,4 г/м^3, поэтому относительная влажность – почти 100 %) и довольно сухим

[47] Хочется вспомнить известную физическую загадку – «Чью температуру измеряет термометр?». Правильный ответ – «свою собственную». Ничего другого ни один термометр измерить принципиально не в состоянии и любое измерение температуры любого тела начинается именно с создания условий, при которых мы могли бы быть уверены, что температура термометра совпадает с температурой интересующего нас тела...

при температуре 30 °С (плотность насыщенного пара при этой температуре равна 9,4 г/м^3, поэтому относительная влажность около 30 %).

Таким образом, относительная влажность одного и того же воздуха с одним и тем же содержанием водяного пара (то есть с фиксированной абсолютной влажностью) может быть разной – в зависимости от температуры. Как это проявляется на практике?

Таблица 17.1

Давление (упругость) и плотность (абсолютная влажность) насыщенного водяного пара при разных температурах[48]

°С	***p, мм рт.ст.***	***p, кПа***	***ρ, г/м^3***	***°С***	***p, мм рт.ст.***	***p, кПа***	***ρ, г/м^3***
-20,0	0,8	0,10	1,5	40,0	55,3	7,38	51,2
-19,0	0,9	0,11	1,5	41,0	58,3	7,78	53,8
-18,0	0,9	0,12	1,6	42,0	61,5	8,20	56,5
-17,0	1,0	0,14	1,7	43,0	64,8	8,64	59,4
-16,0	1,1	0,15	1,8	44,0	68,3	9,10	62,3
-15,0	1,2	0,17	**1,9**	45,0	71,9	9,58	65,4
-14,0	1,4	0,18	2,0	46,0	75,7	10,09	68,6
-13,0	1,5	0,20	2,2	47,0	79,6	10,61	72,0
-12,0	1,6	0,22	2,3	48,0	83,7	11,16	75,5
-11,0	1,8	0,24	2,4	49,0	88,0	11,74	79,1
-10,0	1,9	0,26	2,6	50,0	92,5	12,33	82,8
-9,0	2,1	0,28	2,8	51,0	97,2	12,96	86,8
-8,0	2,3	0,31	2,9	52,0	102,1	13,61	90,8
-7,0	2,5	0,34	3,1	53,0	107,2	14,29	95,1
-6,0	2,8	0,37	3,3	54,0	112,5	15,00	99,5
-5,0	3,0	0,40	3,6	55,0	118,0	15,73	104,0
-4,0	3,3	0,44	3,8	56,0	123,8	16,51	108,8
-3,0	3,6	0,48	4,0	57,0	129,8	17,31	113,7
-2,0	3,9	0,52	4,3	58,0	136,1	18,15	118,8
-1,0	4,2	0,56	4,6	59,0	142,6	19,01	124,1
0,0	4,6	0,61	4,9	60,0	149,4	19,92	129,5
1,0	4,9	0,66	5,3	61,0	156,4	20,85	135,2

[48] Жирным шрифтом и подчеркиванием выделены ячейки, данные из которых используются в тексте.

°C	p, мм рт.ст.	p, кПа	ρ, г/м³	°C	p, мм рт.ст.	p, кПа	ρ, г/м³
2,0	5,3	0,71	5,6	62,0	163,8	21,84	141,1
3,0	5,7	0,76	6,0	63,0	171,4	22,85	147,2
4,0	6,1	0,81	6,4	64,0	179,3	23,91	153,5
5,0	6,5	0,87	6,8	65,0	187,5	25,00	160,1
6,0	7,0	0,93	7,3	66,0	196,1	26,15	166,8
7,0	7,5	1,00	7,7	67,0	205,0	27,33	173,9
8,0	8,1	1,07	8,3	68,0	214,2	28,56	181,1
9,0	8,6	1,15	8,8	69,0	223,7	29,83	188,6
10,0	9,2	1,23	**9,4**	70,0	233,7	31,16	196,4
11,0	9,8	1,31	10,0	71,0	243,9	32,52	204,4
12,0	10,5	1,40	10,6	72,0	254,6	33,95	212,7
13,0	11,2	1,50	11,3	73,0	265,7	35,43	221,3
14,0	12,0	1,60	12,0	74,0	277,2	36,96	230,1
15,0	12,8	1,71	12,8	75,0	289,1	38,55	239,3
16,0	13,6	1,82	13,6	76,0	301,4	40,19	248,7
17,0	14,5	1,94	14,4	77,0	314,1	41,88	258,5
18,0	15,5	2,06	15,3	78,0	327,3	43,64	268,6
19,0	16,5	2,20	16,3	79,0	341,0	45,47	279,0
20,0	17,5	2,34	17,3	80,0	**355,1**	47,35	289,7
21,0	18,7	2,49	18,3	81,0	369,7	49,29	300,8
22,0	19,8	2,64	19,4	82,0	384,9	51,32	312,2
23,0	21,1	2,81	20,5	83,0	400,6	53,41	324,0
24,0	22,4	2,98	21,7	84,0	416,8	55,57	336,2
25,0	23,8	3,17	**23,0**	85,0	433,6	57,81	348,7
26,0	25,2	3,36	24,3	86,0	450,9	60,12	361,6
27,0	26,7	3,57	25,7	87,0	468,7	62,49	374,9
28,0	28,4	3,78	27,2	88,0	487,1	64,95	388,6
29,0	30,0	4,01	28,8	89,0	506,1	67,48	402,8
30,0	31,8	4,24	**30,4**	90,0	525,8	70,10	417,3
31,0	33,7	4,49	32,0	91,0	546,1	72,81	432,3
32,0	35,7	4,75	33,8	92,0	567,0	75,60	447,7
33,0	37,7	5,03	35,7	93,0	588,6	78,48	463,6
34,0	39,9	5,32	37,6	94,0	610,9	81,45	480,0

°C	p, мм рт.ст.	p, кПа	ρ, г/м³	°C	p, мм рт.ст.	p, кПа	ρ, г/м³
35,0	42,2	5,62	39,6	95,0	633,9	84,52	496,8
36,0	44,6	5,94	41,7	96,0	657,6	87,68	514,1
37,0	47,1	6,28	43,9	97,0	682,1	90,94	531,9
38,0	49,7	6,62	46,2	98,0	707,3	94,30	550,2
39,0	52,4	6,99	48,6	99,0	733,2	97,76	569,1
40,0	55,3	7,38	51,2	100,0	760,0	101,33	588,5

Пусть на дворе зима и относительная влажность воздуха (при температуре -15 °C) составляет 50 % (вполне нормальный влажный воздух). Его же абсолютная влажность (табл. 17.1) – $\rho = 1.9 \times 0.5 = 0{,}85 г/м^3$. Если мы откроем форточку (для проветривания) и этот воздух попадет в помещение, то он прогреется – например, до 25^0. Количество водяного пара при этом не изменится – абсолютная влажность останется равной величине $\rho = 0{,}85 г/м^3$. Но относительная влажность при этом составит уже всего $f = 0{,}85/23{,}0 = 0{,}037 = 3{,}7\%$ (табл. 17.1). Приятен ли такой воздух для жизни? Конечно, нет. Сахара какая-то! При такой низкой влажности у многих людей начинают пересыхать слизистые носоглотки («сохнет нос») и начинается кашель. Что делать? Увлажнять воздух в помещении с помощью любого способа, но лучше всего фабричным «увлажнителем воздуха» – например таким (рис. 17.2). Типичный увлажнитель воздуха – это устройство для «холодного» испарения воды[49], предназначенное именно для увлажнения воздуха в помещениях зимой, когда без него воздух в помещениях чрезмерно сух.

А что произойдет в тех же условиях с «комнатным» воздухом, попавшим наружу зимой? Пусть, например, у нас в комнате все прекрасно – температура 25 °C и влажность 40 %. Это означает, что абсолютная влажность (табл. 17.1) $\rho = 23{,}0 \times 0.4 = 9{,}2 г/м^3$. При попада-

[49] Строго говоря, сам по себе увлажнитель воздуха не испаряет воду, а просто распыляет ее, создавая туман. В сухом воздухе капельки этого тумана быстро испаряются и влажность воздуха растет.

нии на улицу водяной пар из воздуха никуда не денется, но температура воздуха понизится до -15^0. При этом относительная влажность воздуха станет равной величине (табл. 17.1) $f = 9{,}2/1{,}9 = 4{,}84 = 484\%$. Возможно ли это? В принципе – да. Такой водяной пар называется переохлажденным и он может существовать в природе, но только при полном отсутствии центров конденсации, где могли бы зародиться мельчайшие водяные капельки, на которые после этого «бегом» сконденсировалась бы (и сразу замерзла, разумеется) вся «лишняя» вода («лишнего» водяного пара в нашем воздухе немало – 484 %-100 %=384 %). Обычно мелких пылинок и прочих «кандидатов» в центры конденсации в воздухе очень много, и происходит выделение лишнего водяного пара в виде мельчайших капелек – образуется туман.

Рис. 17.2. Увлажнитель воздуха. В левом верхнем углу видна струйка «пара». Слово «пар» взято в кавычки потому, что это не пар, а туман (взвесь микроскопических водяных капелек). Он прохладный и влажный. В него очень приятно сунуть нос и немного подышать

Именно по этому механизму (охлаждение влажного воздуха с повышением относительной влажности выше 100 %) происходит образование тумана, росы, облаков и так далее (имейте в виду – сам по себе водяной пар, в отличие от тумана, прозрачен, поэтому на самом

деле открытый на морозе канализационный люк не «парит», а «туманит»). Подумайте сами, как это происходит. Подумайте также над вопросом о разнице сауны (суховоздушная баня) и русской бани (влажная баня). Где легче выдерживать жару? Что происходит в русской бане при 80^0, если кто-нибудь от души «поддаст» и давление водяного пара станет равно давлению насыщенного водяного пара (355 мм ртутного столба – примерно половина атмосферного давления)?

Влажность измеряют гигрометрами и психрометрами; в настоящее время быстро развиваются и дистанционные методы измерения влажности с помощью лазерных и радиометрических приборов (в том числе установленных на самолетах или на метеорологических спутниках) – по поглощению и рассеянию оптического или радиоизлучения молекулами воды.

Существует много типов гигрометров; тем не менее принцип их действия одинаков – их работа основана на зависимости тех или иных параметров (размеров, массы, сопротивления) тех или иных тел (волос, пленки, слоя электролита) от влажности окружающего воздуха.

Что же касается психрометров[50], то все они (несмотря на различия в конструкции) работают по одному и тому же принципу. Дело в том, что при прочих равных условиях скорость испарения жидкости зависит от влажности воздуха (это первое) и при испарении жидкости происходит ее охлаждение (за счет поглощения скрытой теплоты парообразования) (это второе). Поэтому влажный (смоченный) термометр всегда показывает более низкую температуру, чем сухой, причем разность этих температур зависит от влажности воздуха – чем суше воздух, тем интенсивнее идет испарение и тем больше разность температур. На этом и основан принцип действия любого психрометра – по температуре сухого термометра (это – истинная температура воздуха) и разности температур сухого и смоченного термометра с помощью психрометрической таблицы влажность воздуха просто «прочитывается» на пересечении нужной строчки (температура сухого термометра) и столбца (разность температур сухого и смоченного термометра) (рис. 17.3). Обычно считается, что психрометры – более

[50] Их часто называют психрометрическими гигрометрами и тоже считают одним из типов гигрометров. Дело вкуса...

точные приборы, чем гигрометры. Именно с работой психрометра вам и предстоит познакомиться при выполнении данной лабораторной работы.

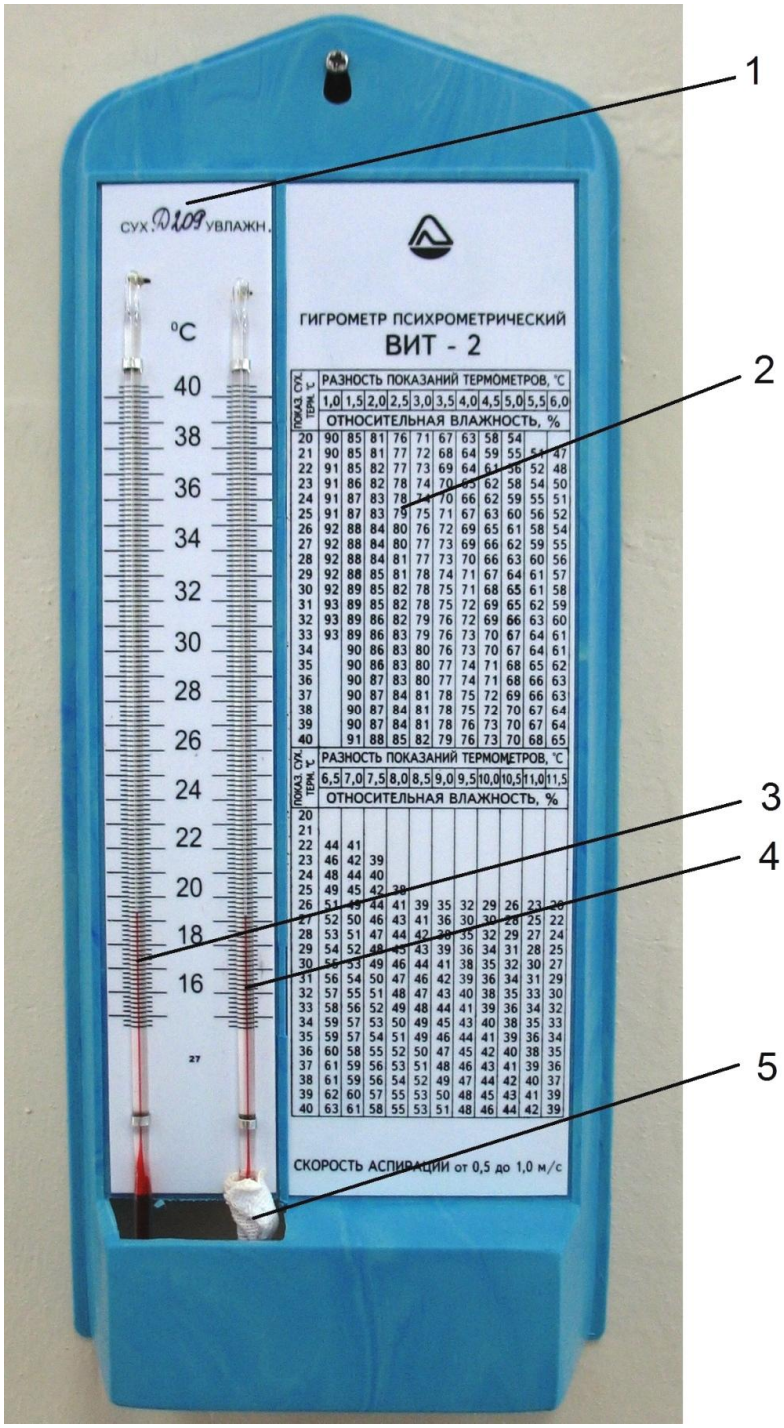


Рис. 17.3. Психрометр ВИТ-2:

1 – заводской номер (в данном случае – Д209),
2 – психрометрическая а (вам она не нужна – такая же имеется в нашем пособии на рис. 4; на психрометре она имеется «на всякий случай» для раззяв, которые потеряют паспорт и описание прибора, потому что без этой таблицы психрометр абсолютно бесполезен), 3 – сухой термометр, 4 – влажный термометр,
5 – фитиль для увлажнения влажного термометра

Описание установки

Установка для выполнения работы выглядит очень просто (рис. 17.3). Это – просто стандартный психрометр ВИТ-2, производящийся на заводах в промышленных масштабах по отработанной технологии. В справочном материале к лабораторной работе приведены заводская инструкция по эксплуатации и паспорта этих приборов. Обязательно прочитайте эти документы! Во-первых, чтение подобных текстов – обычная работа инженера, к которому «пришел прибор, надо разобраться». Обратите внимание на штампики и подумайте, кто из них кто и кто что означает. Во-вторых, данные из этих документов (не все, правда) вам потребуются при выполнении работы. И, наконец, в-третьих – подобное чтение возвышает душу и закаляет характер.

Гигрометр ВИТ-2
психрометрическая таблица
скорость аспирации от 0,5 до 1,0 м/с

Показ. сухого термом °С	Разность показаний термометров, °С																					
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5
	Относительная влажность, %																					
20	90	85	81	76	71	67	63	58	54													
21	90	85	81	77	72	68	64	59	55	51	47											
22	91	85	82	77	73	69	64	61	56	52	48	44	41									
23	91	86	82	78	74	70	65	62	58	54	50	46	42	39								
24	91	87	83	78	74	70	66	62	59	55	51	48	44	40								
25	91	87	83	79	75	71	67	63	60	56	52	49	45	42	38							
26	92	88	84	80	76	72	69	65	61	58	54	51	49	44	41	39	35	32	29	26	23	20
27	92	88	84	80	77	73	69	66	62	59	55	52	50	46	43	41	36	33	30	28	25	22
28	92	88	84	81	77	73	70	66	63	60	56	53	51	47	44	42	38	35	32	29	27	24
29	92	88	85	81	78	74	71	67	64	61	57	54	52	48	45	43	39	36	34	31	28	25
30	92	89	85	82	78	75	71	68	65	61	58	55	53	49	46	44	41	38	35	32	30	27
31	93	89	85	82	78	75	72	69	65	62	59	56	54	50	47	46	42	39	36	34	31	29
32	93	89	86	82	79	76	72	69	66	63	60	57	55	51	48	47	43	40	38	35	33	30
33	93	89	86	83	79	76	73	70	67	64	61	58	56	52	49	48	44	41	39	36	34	32
34		90	86	83	80	76	73	70	67	64	61	59	57	53	50	49	45	43	40	38	35	33
35		90	86	83	80	77	74	71	68	65	62	59	57	54	51	49	46	44	41	39	36	34
36		90	87	83	80	77	74	71	68	66	63	60	58	55	52	50	47	45	42	40	38	35
37		90	87	84	81	78	75	72	69	66	63	61	59	56	53	51	48	46	43	41	39	36
38		90	87	84	81	78	75	72	70	67	64	61	59	56	54	52	49	47	44	42	40	37
39		90	87	84	81	78	76	73	70	67	65	62	60	57	55	53	50	48	45	43	41	39
40		91	88	85	82	79	76	73	70	68	65	63	61	58	55	53	51	48	46	44	42	39

Рис. 17.4. Психрометрическая а для психрометра ВИТ-2

Наш психрометр состоит из двух термометров – «сухого» и «влажного». Оба они совершенно одинаковы, но первый – это «просто термометр», а второй – термометр, у которого на резервуаре (рис. 17.3) имеется матерчатый фитиль, частично погруженный в жидкость (дистиллированная вода). Эта вода постепенно испаряется и охлаждает «влажный» термометр, поэтому его температура немного ниже температуры «сухого» термометра. Насколько – зависит от влажности воздуха. При низкой влажности разница температур будет больше, при высокой – меньше. Поэтому, измерив температуру сухого и влажного термометра, можно найти и его влажность по так называемой психрометрической таблице (рис. 17.4).

Гигрометр ВИТ-2
психрометрическая таблица
скорость аспирации от 0,5 до 1,0 м/с

Показ. сухого термом °С	Разность показаний термометров, °С																					
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5
	Относительная влажность, %																					
20	90	85	81	76	71	67	63	58	54													
21	90	85	81	77	72	68	64	59	55	51	47											
22	91	85	82	77	73	69	64	61	56	52	48	44	41									
23	91	86	82	78	74	70	65	62	58	54	50	46	42	39								
24	91	87	83	78	74	70	66	62	59	55	51	48	44	40								
25	91	87	83	79	75	71	67	63	60	56	52	49	45	42	38							
26	92	88	84	80	76	72	69	65	61	58	54	51	49	44	41	39	35	32	29	26	23	20
27	92	88	84	80	77	73	69	66	62	59	55	52	50	46	43	41	36	33	30	28	25	22
28	92	88	84	81	77	73	70	66	63	60	56	53	51	47	44	42	38	35	32	29	27	24
29	92	88	85	81	78	74	71	67	64	61	57	54	52	48	45	43	39	36	34	31	28	25
30	92	89	85	82	78	75	71	68	65	61	58	55	53	49	46	44	41	38	35	32	30	27
31	93	89	85	82	78	75	72	69	65	62	59	56	54	50	47	46	42	39	36	34	31	29
32	93	89	86	82	79	76	72	69	66	63	60	57	55	51	48	47	43	40	38	35	33	30
33	93	89	86	83	79	76	73	70	67	64	61	58	56	52	49	48	44	41	39	36	34	32
34		90	86	83	80	76	73	70	67	64	61	59	57	53	50	49	45	43	40	38	35	33
35		90	86	83	80	77	74	71	68	65	62	59	57	54	51	49	46	44	41	39	36	34
36		90	87	83	80	77	74	71	68	66	63	60	58	55	52	50	47	45	42	40	38	35
37		90	87	84	81	78	75	72	69	66	63	61	59	56	53	51	48	46	43	41	39	36
38		90	87	84	81	78	75	72	70	67	64	61	59	56	54	52	49	47	44	42	40	37
39		90	87	84	81	78	76	73	70	67	65	62	60	57	55	53	50	48	45	43	41	39
40		91	88	85	82	79	76	73	70	68	65	63	61	58	55	53	51	48	46	44	42	39

Рис. 17.5. Определение влажности с помощью психы

Пусть, например, температура по сухому термометру равна 25 °С, а по влажному 21 °С, то есть разность температур составляет 4 градуса. На пересечении соответствующей строки и столбца (они

выделены на рис. 17.5) мы читаем показания: 67 %. Это и есть относительная влажность в данном месте в данное время.

Впрочем, обычно все не бывает так просто. Дело в том, что есть два усложняющих жизнь измерителя фактора – систематические ошибки прибора и неточное совпадение измеренных данных со значениями, приведенными в психрометрической таблице. Обсудим их по порядку.

Начнем с систематических ошибок. В соответствии с заводским паспортом (см. приложение 2) абсолютная погрешность психрометра ВИТ-2 при температуре от 10 до 30 градусов Цельсия составляет 6 %, а при температуре от 30 до 40 градусов – 5 %, причем при скорости аспирации (скорость ветра вблизи психрометра) от 0,5 до 1 м/с. Обычно скорость ветра в помещении примерно такая[51]. Но для достижения этой точности необходимо измерять температуру сухого и влажного термометров с точностью 0,1 °С. Обеспечивают ли такую точность термометры? Да, но только в случае учета индивидуальных (для каждого термометра) поправок, которые измерены при заводской поверке психрометра и приведены в его паспорте[52]. Для каждого

[51] В соответствии с метеорологической шкалой силы ветра (см. приложение 3) это – не полный штиль, а очень слабый ветерок. А если скорость ветра в помещении другая – например, кто-то поставил психрометр под вентилятор? В этом случае показаниям психрометра, строго говоря, верить нельзя. Впрочем, это не страшно. Ведь человек – это тоже своего рода психрометр, и он оценивает влажность окружающего воздуха по тем же самым признакам (интенсивность испарения с влажной кожи и слизистых), по которым ее оценивает психрометр. Поэтому психрометр под вентилятором, конечно, показывает не ту влажность, которая реально имеет место, но зато он показывает именно ту (органолептическую) влажность, которую мы «ощущаем своей кожей» (разумеется, сидя под тем же вентилятором).

[52] В приборостроении эта хитрость используется очень часто. Дело в том, что изготовить термометр, который всегда ошибается меньше, чем на одну десятую градуса, можно, но довольно сложно. Прибор будет достаточно дорогой. Гораздо дешевле изготовить термометр, который ошибается немного больше (но все время одинаково) и сравнить (при поверке) его показания с показаниями очень дорогого и очень точного «поверочного термометра». При этом выяснится, когда и насколько «врет» наш дешевый термометр. Эти данные можно записать в его паспорт и в дальнейшем просто вводить соответствующие поправки в его показания. Получается «дешево и сердито».

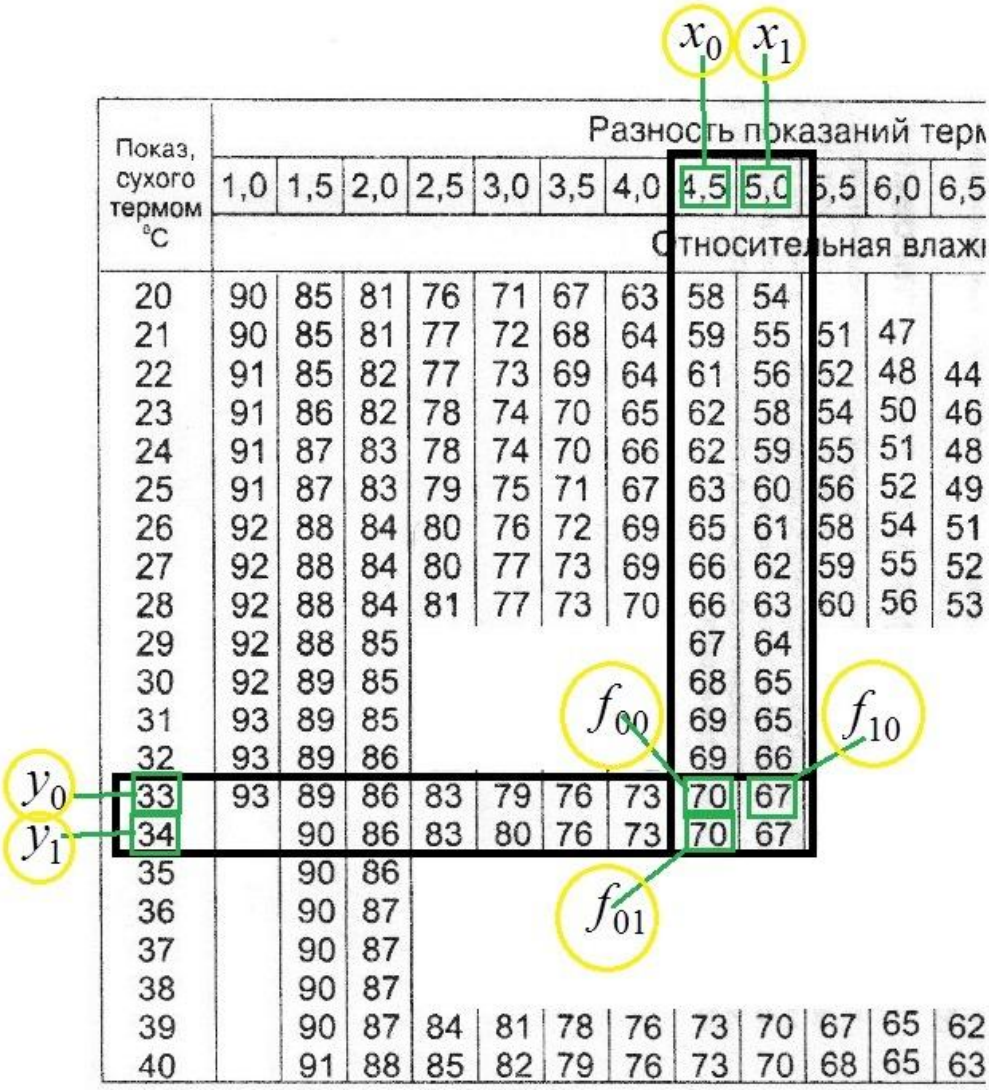
экземпляра прибора они разные. Корректировочные графики для наших двух психрометров, построенные по данным их паспортов, приведены на рис. 17.6 (для психрометра Д003) и рис. 17.7 (для психрометра Д216).

Рис. 17.6. Корректировочный график для психрометра Д003

Рис. 17.7. Корректировочный график для психрометра Д216

Как ими пользоваться? Пусть, например, вы работаете на психрометре Д216 и измеренная температура по «сухому» термометру

оказалась равна 23,4 градуса, а по «влажному» 18,6 градусов. Поправка для «сухого» термометра (по графику рис. 17.7) равна примерно «-0,03 градуса», а для «мокрого» – «-0,1 градуса». Значит, истинная температура «сухого» термометра (с точностью до одной десятой градуса) составляет 23,4-0,03=23,4 градуса, а истинная температура «влажного» термометра равна 18,6-0,1=18,5 градуса.



Показ. сухого термом °С	Разность показаний терм											
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
	Относительная влажн											
20	90	85	81	76	71	67	63	58	54			
21	90	85	81	77	72	68	64	59	55	51	47	
22	91	85	82	77	73	69	64	61	56	52	48	44
23	91	86	82	78	74	70	65	62	58	54	50	46
24	91	87	83	78	74	70	66	62	59	55	51	48
25	91	87	83	79	75	71	67	63	60	56	52	49
26	92	88	84	80	76	72	69	65	61	58	54	51
27	92	88	84	80	77	73	69	66	62	59	55	52
28	92	88	84	81	77	73	70	66	63	60	56	53
29	92	88	85					67	64			
30	92	89	85					68	65			
31	93	89	85					69	65			
32	93	89	86					69	66			
33	93	89	86	83	79	76	73	70	67			
34		90	86	83	80	76	73	70	67			
35		90	86									
36		90	87									
37		90	87									
38		90	87									
39		90	87	84	81	78	76	73	70	67	65	62
40		91	88	85	82	79	76	73	70	68	65	63

Рис. 17.8. Интерполяция в психрометрической таблице

Теперь пора заняться второй сложностью. Пусть, например, мы и впрямь выяснили, что температура влажного термометра равна 28,4 градуса, а температура сухого – 33,3 градуса. Значит, разность показаний сухого и влажного термометров составляет 33,3-28,4=4,9 гра-

дусов. Теперь надо бы найти в психрометрической таблице строку «33,3 градуса», столбец «4,9 градусов» и на их пересечении прочитать влажность воздуха. Только вот ведь беда – нет в таблице ни такой строки, ни такого столбца. Есть чуть больше, есть чуть меньше (33 градуса и 34 градуса, 4,5 градусов и 5 градусов), но в точности таких нет. Что делать? Интерполировать[53], конечно. В данном случае речь идет о восстановлении неизвестного при некоторых значениях аргументов (x, y) значения функции двух переменных $f(x, y)$ по ее же значениям при некоторых других значениях аргументов – $f(x_0, y_0) = f_{00}$, $f(x_1, y_0) = f_{10}$ и $f(x_0, y_1) = f_{01}$. Ответ в математике давно есть – это простейшая (хотя и не самая точная, конечно) формула линейной интерполяции:

$$f(x, y) = f_{00} + (f_{10} - f_{00})\frac{x - x_0}{x_1 - x_0} + (f_{01} - f_{00})\frac{y - y_0}{y_1 - y_0}. \qquad (17.5)$$

В данном конкретном случае (рис. 17.8) у нас «за иксы» идет разность температур сухого и влажного термометра (раз уж она в таблице по горизонтали), «за игреки» – температура сухого термометра (раз она в таблице «по вертикали»), а «за функцию» – влажность воздуха. В любом месте таблицы у нас $x_1 - x_0$=0,5, а $y_1 - y_0$=1, поэтому общую формулу (17.5) можно упростить:

$$f(x, y) = f_{00} + 2(f_{10} - f_{00})(x - x_0) + (f_{01} - f_{00})(y - y_0). \qquad (17.6)$$

Имеем:

$$x_0 = 4{,}5;\ x_1 = 5{,}0;\ x = 4{,}9;\ y_0 = 33;\ y_1 = 34;\ y = 33{,}3;\ f_{00} = 70;\ f_{01} = 70;\ f_{10} = 67.$$

Подставив эти данные в формулу (17.5), нетрудно получить $f(4{,}9; 33{,}3) = 67{,}6 \approx 68$ %. Окончательный ответ (с учетом заводских паспортных данных о погрешности данного прибора) $f = (68 \pm 5)\%$.

[53] Интерполяция – это способ определять по ряду данных величин какого-либо математического выражения промежуточные его величины; так, напр., по дальности полета ядра при угле возвышения оси пушечного канала в 1°, 2°, 3°, 4° и т. д. можно определить помощью интерполяции его дальность при 1,5, 2,33, 3,25 и т. д. градусах.

Порядок выполнения работы. Измерения и расчеты

1. Подойдите к прибору и убедитесь, что им можно пользоваться – прибор исправен, находится не на прямом солнечном свете, в испарителе имеется вода.

2. Считайте (с точностью до 0,1 °С) первичные показания сухого и влажного термометров. Учтите, что цена деления термометров равна 0,2 °С. Запишите эти показания в тетрадь: $t_{сух.изм.} = ...$ и $t_{вл.изм.} = ...$

3. Графически определите поправки к первичным показаниям (в соответствии с графиками на рис. 17.6 для психрометра Д207 или рис. 17.7 для психрометра Д209). Прибавив эти поправки к первичным показаниям термометров, найдите их истинные температуры с точностью 0,1 °С. Запишите эти температуры в тетрадь: $t_{сух.ист.} = ...$ и $t_{вл.ист.} = ...$

4. Найдите разность истинных температур сухого и влажного термометров (с точностью 0,1 °С). Запишите ее в тетрадь: $\Delta t = ...$.

5. Войдите в психрометрическую таблицу (рис. 17.4) с известными вам значениями температуры сухого термометра $t_{сух.ист.} = y$ и разности температур сухого и влажного термометра $\Delta t = x$. По психрометрической таблице найдите ближайшие к истинной температуре сухого термометра y табличные значения снизу и сверху y_0 и y_1, а также ближайшие к истинной разности температур сухого и влажного термометров x табличные значения снизу и сверху x_0 и x_1. Запишите эти значения в тетрадь: $x_0 = ...; y_0 = ...$

6. По психрометрической таблице найдите значения влажностей f_{00}; f_{01}; f_{10}. Запишите эти значения в тетрадь: $f_{00} = ...; f_{01} = ...; f_{10} = ...$.

7. По формуле (6) рассчитайте относительную влажность воздуха в помещении.

8. Запишите ответ (с указанием погрешности): $f = ... \pm ...$.

Справочный материал к лабораторной работе № 17. Заводская инструкция по эксплуатации гигрометра психрометрического ВИТ

ПАО "Стеклоприбор"

ГИГРОМЕТР ПСИХРОМЕТРИЧЕСКИЙ ВИТ

ИНСТРУКЦИЯ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ

Мб.2.844.000.ИЭ

1. ВСТУПЛЕНИЕ

1.1. Инструкция определяет методы безопасности при работе с гигрометром, подготовку его к работе и порядок работы, характерные неисправности и техническое обслуживание гигрометра.
1.2. Технические характеристики гигрометра, поправки к термометрам гигрометров, гарантии изготовителя приводятся в паспорте.

2. ТРЕБОВАНИЯ ПО БЕЗОПАСНОСТИ

2.1. При работе с гигрометром запрещается:
1) поддавать гигрометр резким ударам как при монтаже, так и при эксплуатации;
2) протирать шкалу термометров и психрометрическую таблицу растворителями, кислотами и другими аналогичными жидкостями;
3) перегревать термометры гигрометра ВИТ-1 больше 45°С и гигрометра ВИТ-2 больше 60°С. При перегреве происходит разрушение резервуара термометров.

3. СТРОЕНИЕ И ПРИНЦИП РАБОТЫ

3.1. Гигрометр состоит с пластмассового основания к которому крепятся два термометра с шкалой, психрометрическая таблица, стеклянный питатель. Резервуар термометра с надписью "Увлажненный", увлажняется водой с питателя с помощью батистового или шифонового фитиля.
3.2. Метод измерения относительной влажности гигрометром психрометрическим основывается на зависимости между влажностью воздуха и психрометрической разницей - разницей показаний "сухого" и "увлажненного" термометров, что состоят в термодинамическом равновесии с окружающей средой.
Снять показания термометров и после ввода поправок к их показаниям, определить разность показаний термометров. Затем по показаниям "сухого" термометра и разности показаний "сухого" термометра и "увлажненного" определить относительную влажность воздуха по психрометрической таблице.

4. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

4.1. Распакуйте гигрометр и убедитесь в комплектности прибора в соответствии с паспортом.
4.2. Снимите питатель с основания. Заполните питатель дистиллированной водой. Заполение происходит путем погружения питателя в сосуд с водой запаяным концом вниз.
4.3. Установите питатель на основание, чтобы от края открытого конца питателя к резервуару термометра было расстояние не менше 20 мм, а фитиль не касался к стенкам окрытого конца питателя.
4.4. Установите гигрометр в вертикальном положении. В местах установки гигрометра не должно быть вибраций, источника тепла или холода, которые создают разность температур между нижним основным резервуаром и верхнем запасным больше чем в 2°С.
4.5. Психрометрическая таблица, которая закреплена на основании гигрометра, действительна при определенной скорости вертикальных воздушных потоков (скорости аспирации,) которые омывают гигрометр. Скорость аспирации указана на таблице. Полная таблица для гигрометра приведена в данной инструкции.

4.6. Перед измерением относительной влажности измерьте скорость аспирации непосредственно под гигрометром. Измерение скорости аспирации проводите с помощью анемометра крыльчатого У5 по ГОСТ 6376-74. Последовательность проведения измерений - в соответствии с паспортом на анемометр. Измеренная по анемометру скорость аспирации округляеться до десятых долей м/с.

4.7. Измерения относительной влажности гигрометром проводите только после установления показаний термометров гигрометров.

Минимальное время выдержки гигрометров в измеряемой среде 30 минут.

5. ПОРЯДОК РАБОТЫ

5.1. Снимите показания по "сухому" и "увлажненному" термометрам.

5.2. Определите температуру по термометрам с точностью до 0,1 °С, вводя в отмеченные показания поправки к термометрам, приведенные в паспорте на гигрометр. Вычислите разность температур по "сухому" и "увлажненному" термометрам. Поправки вводятся путем алгебраического сложения.

5.3. При отсуствии в паспорте поправок для проведения отсчетов по "сухому" и "увлажненному" термометрам, вычислите поправки линейной интерполяцией по двум поправкам, что относятся к температурам между которыми лежит отсчет по термометрам.

5.4. Определите относительную влажность воздуха по психрометрической таблице. Искомая относительная влажность будет на пересечении строк температуры по "сухому" термометру и разности температур по "сухому" и "увлажненному" термометру.

5.5. При отсуствии в таблице полученной разности температур по "сухому" и "увлажненному" термометрам для определения влажности примените интерполяцию. При отсутствии в таблице температуры по сухому термометру, для определения влажности применяйте итерполяцию только для тех частей психрометрической таблици, в которых измерения температуры по "сухому" термометру на 1°С даёт изменения относительной влажности больше чем на 1%. Для остальных частей таблицы значение температуры по "сухому" термометру округлите к ближайшему табличному значению по правилу арифметического округления.

5.6. Пример определения относительной влажности интерполяцией.

5.6.1. Определяем температуры по "сухому" и "увлажненному" термометрам и разность между этимы температурами.

Термометры	Измеряемые температуры, °С	Поправки к температурам по паспорту, °С	Температура после введения поправок, °С
"сухой" "увлажненный"	T_c=22,5 T_y=16,1	-0,15 +0,20	22,35 16,3

Принимаем T_c=22,4 разность температуры (T_c-T_y) равна:22,4-16,3=6,1

5.6.2. Определяем относительную влажность для T_c=22,4 °С, для чего интерполируем значение относительной влажности по таблице для T_c от 22 до 23 °С. При увелечении температуры на 1°С влажность увеличивается на 2%, а при увеличении температуры на 0,4°С влажность увеличивается на 0,4x2=0,8% 48+0,8=48,8.

5.6.3. Определяем относительную влажность для T_c=22,4°С и T_c-T_y=6,1°С, для чего интерполируем значение относительной влажности при разности показаний от 6,0 до 6,5°С. При увеличении T_c-T_y на 0,5°С относительная влажность уменьшается на 4%, а при увеличении T_c-T_y на 0,1°С уменьшается относительная влажность на (0,1x4,0):0,5=0,8%.

Следовательно, влажность "фи" при температуре 22,4 и T_c-T_y=6,1°С будет равна 48,8-0,8=48%.

6. ХАРАКТЕРНЫЕ НЕИСПРАВНОСТИ И МЕТОДЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ

6.1. В конструкцию гигрометра входят детали из стекла, поэтому берегите гигрометр от падения и резких ударов.

6.2. Разрывы термометрической жидкости в термометрах устраняются путем осторожного подогрева резервуаров до температур, указаных в п.2.1 3) данной инструкции.

7. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ

7.1. Питатель всегда должен быть заполнен дистиллированной водой. Воду добавляйте вовремя лучше всего за 30 мин. до начала измерений влажности.

7.2. Допускается применение кипяченой воды, время кипячения не меньше 15 мин. Питатель заполняйте водой, предварительно охлажденной до температуры окружающего воздуха.

7.3. Фитиль на резервуаре "увлажненного" термометра должен быть всегда чистым, мягким и влажным. При запылении воздуха до 5мг/м^3 производить замену фитиля один раз в две недели, при большой запыленности - по мере загрязнения фитиля.

7.4. Перед заменой удалите загрязненный фитиль с резервуара термометра. Протрите резерву тампоном ваты, смоченным теплой водой.

7.5. Возьмите фитиль с комплекта гигрометра. Намочите фитиль дистиллированной или кипяченой водой и наденьте его на резервуар термометра так, чтобы была возможность завязат его нитью над резервуаром. Конец завязанного фитиля над резервуаром должен быть не менее 7мм.

7.6. Подготовьте две петли с ниток. Одной петлей туго затяните фитиль над резервуаром термометра и завяжите нитку. Другую петлю наденьте на фитиль под резервуаром и постепенн стягивайте ее, все время расправляя фитиль так, чтобы он плотно прилегал к резервуару. Петлю затяните не туго, а так чтобы она не преграждала капилярному смачиванию ткани фитиля на резервуаре термометра.

7.7. Для изготовления нового фитиля используйте шифон хлопчатобумажный, отбеленный, гладкокрашеный, технический или батист отбеленный, мерсеризованный.

7.8. Другие виды шифона или батиста перед изготовлением фитиля обработайте следующим способом: стирать в горячей воде (10г соды на 1л воды), кипятить в растворе такой же концентрации на протяжении 1,5-2 часов, полоскать в гарячей воде, воду менять до тех пор, пока она не будет чистой, сушить и гладить.

7.9. Фитиль сшить по диаметру резервуара термометра простым машинным швом. После обрезания шов по высоте не должен быть больше 1,5мм.

8. ПРАВИЛА ХРАНЕНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ

8.1. Гигрометры храните в закрытых сухих помещениях в вертикальном положении в соответствии с надписью "Верх" на коробке. Не допускается хранить гигрометры на расстоянии меньше 1м от источника тепла (устройств отопления, разных нагревателей и т.п.).

8.2. Гигрометры в транспортной таре транспортируются любым видом транспорта с учетом температуры п.8.1 и при условии соблюдения правил транспортировки грузов для соответствующего вида транспорта.

Паспорта используемых нами гигрометров
(заводские номера Д207 и Д209)

ПАО "Стеклоприбор"

ГИГРОМЕТР ПСИХРОМЕТРИЧЕСКИЙ
ВИТ
ТУ 3 Украины 14307481.001-92

ПАСПОРТ
Мб.2.844.000 ПС

1. НАЗНАЧЕНИЕ ИЗДЕЛИЯ

1.1. Гигрометр психрометрический ВИТ предназначен для измерения относительной влажности и температуры воздуха.

2.ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

2.1. Технические характеристики гигрометра в зависимости от исполнения указаны в таблице 1.

Таблица 1

Испол-нение	Диапазон измерения относительной влажности, %	Температурный диапазон измерений влажности, °С	Диапазон измерений температуры, °С
ВИТ-1	От 20 до 90	От 5 до 25	От 0 до 25
ВИТ-2	От 54 до 90 От 40 до 90 От 20 до 90	От 20 до 23 От 23 до 26 От 26 до 40	От 15 до 40 От 15 до 40 От 15 до 40

2.2. Цена деления шкалы термометров 0,2 °С.

2.3. Абсолютная погрешность термометров гигрометра с учетом введения поправок не должна превышать ±0,2 °С.

2.4. Предел абсолютной погрешности гигрометра при скорости аспирации от 0,5 до 1 м/с указан в таблице 2.

Таблица 2

Температура по "сухому" термометру, °С	У,%
От 5 до 10 вкл.	±7
Свыше 10 до 30 вкл.	±6
Свыше 30 до 40 вкл.	±5

2.5. Габаритные размеры, мм, не более - 325x120x50.

2.6. Масса, г, не более - 350.

3. КОМПЛЕКТ ПОСТАВКИ

3.1 Комплект поставки гигрометра приведен в таблице 3.

Таблица 3

Обозначение	Наименование	К-тво	Примечание
Мб.2.844.000	Гигрометр в сборе	1 шт.	
Мб.2.844.000ПС	Паспорт	1 экз.	
Мб.2.844.000 ИЭ	Инструкция по эксплуатации	1 экз.	
Мб.7.062.016	Фитиль	1 шт.	
Мб.6.876.247	Коробка	1 шт.	

4. ПОПРАВКИ К ТЕРМОМЕТРАМ

Таблица 4

Термометры	Исполнение гигрометра									
	ВИТ-1					ВИТ-2				
	Калибровочные отметки, °С									
	0	10	15	20	25	15	20	25	30	40
	Поправки, °С									
"Сухой"						0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
"Увлажненный"						0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0

Проверено ОТК 04 ЯНВ 2016

Т 022К

5. СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПРИЕМКЕ

Гигрометр психрометрический ВИТ № 1207 соответствует требованиям технических условий ТУ 3 Украины 14307481.001-92 и признан годным к эксплуатации.

Поверка проведена представителем
ГП "Полтавастандартметрология"
Клеймо поверки

РП 7 А 6 7 ВЦ

Гигрометры психрометрические ВИТ-1 и ВИТ-2 подлежат поверке во время выпуска с производства, в эксплуатации гигрометры подлежат поверке или калибровке в зависимости от области применения. Межповерочный интервал - не более 2 лет.

6. ГАРАНТИЙНЫЕ ОБЯЗАТЕЛЬСТВА

6.1. Предприятие - изготовитель гарантирует соответствие гигрометра требованиям технических условий ТУ 3 Украины 14307481.001-92 при соблюдении потребителем условий транспортирования, хранения и эксплуатации.

6.2. Гарантийный срок эксплуатации гигрометра - 12 месяцев с даты продажи.

3. КОМПЛЕКТ ПОСТАВКИ

3.1 Комплект поставки гигрометра приведен в таблице 3.

Таблица 3

Обозначение	Наименование	К-тво	Примечание
Мб.2.844.000	Гигрометр в сборе	1 шт.	
Мб.2.844.000ПС	Паспорт	1 экз.	
Мб.2.844.000 ИЭ	Инструкция по эксплуатации	1 экз.	
Мб.7.062.016	Фитиль	1 шт.	
Мб.6.876.247	Коробка	1 шт.	

4. ПОПРАВКИ К ТЕРМОМЕТРАМ

Таблица 4

Термометры	Исполнение гигрометра									
	ВИТ-1					ВИТ-2				
	Калибровочные отметки, °С									
	0	10	15	20	25	15	20	25	30	40
	Поправки, °С									
"Сухой"						-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	0.0
"Увлажненный"						-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2

Проверено ОТК 04 ЯНВ 2016

Т 022К

5. СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПРИЕМКЕ

Гигрометр психрометрический ВИТ № 9208 соответствует требованиям технических условий ТУ 3 Украины 14307481.001-92 и признан годным к эксплуатации.

Поверка проведена представителем
ГП "Полтавастандартметрология"
Клеймо поверки

РП 7 А 6 7 ВВ

Гигрометры психрометрические ВИТ-1 и ВИТ-2 подлежат поверке во время выпуска с производства, в эксплуатации гигрометры подлежат поверке или калибровке в зависимости от области применения. Межповерочный интервал - не более 2 лет.

6. ГАРАНТИЙНЫЕ ОБЯЗАТЕЛЬСТВА

6.1. Предприятие - изготовитель гарантирует соответствие гигрометра требованиям технических условий ТУ 3 Украины 14307481.001-92 при соблюдении потребителем условий транспортирования, хранения и эксплуатации.

6.2. Гарантийный срок эксплуатации гигрометра - 12 месяцев с даты продажи.

Контрольные вопросы

1. Что такое абсолютная влажность воздуха? В чем она измеряется? В каких пределах она может изменяться?
2. Что такое относительная влажность воздуха? В чем она измеряется? В каких пределах она может изменяться?
3. Что такое упругость водяного пара? В чем она измеряется?
4. Что такое туман и чем он отличается от водяного пара?
5. Что такое насыщенный водяной пар?
6. Что происходит с относительной влажностью воздуха при его нагревании?
7. Что происходит с относительной влажностью воздуха при его охлаждении?
8. Может ли относительная влажность воздуха быть меньше 100 %? Больше 100 %?
9. Что такое переохлажденный водяной пар?
10. Как образуется туман?
11. Как образуется роса?
12. Что такое гигрометр? Что он измеряет?
13. Что такое психрометр? Что он измеряет?
14. Как найти абсолютную влажность по относительной?
15. Как найти относительную влажность по абсолютной?
16. Что такое увлажнитель воздуха? Зачем он нужен? Когда используется?
17. Температура воздуха за окном -30 °С, относительная влажность – 50 %. Воздух запустили в комнату, где он прогрелся до +20 °С. Какова будет влажность воздуха в комнате? Нужен ли в такой ситуации увлажнитель воздуха?
18. Температура воздуха за окном -35 °С, относительная влажность – 50 %. Воздух запустили в комнату, где он прогрелся до +20 °С. Какова будет влажность воздуха в комнате? Нужен ли в такой ситуации увлажнитель воздуха?
19. Температура воздуха за окном -25 °С, относительная влажность – 50 %. Воздух запустили в комнату, где он прогрелся до

+20 °С. Какова будет влажность воздуха в комнате? Нужен ли в такой ситуации увлажнитель воздуха?

20. Температура воздуха за окном -20 °С, относительная влажность – 50 %. Воздух запустили в комнату, где он прогрелся до +20 °С. Какова будет влажность воздуха в комнате? Нужен ли в такой ситуации увлажнитель воздуха?

21. Температура воздуха за окном -30 °С, относительная влажность – 50 %. Воздух запустили в комнату, где он прогрелся до +25 °С. Какова будет влажность воздуха в комнате? Нужен ли в такой ситуации увлажнитель воздуха?

22. Температура воздуха за окном -25 °С, относительная влажность – 50 %. Воздух запустили в комнату, где он прогрелся до +25 °С. Какова будет влажность воздуха в комнате? Нужен ли в такой ситуации увлажнитель воздуха?

23. Температура воздуха за окном -20 °С, относительная влажность – 50 %. Воздух запустили в комнату, где он прогрелся до +25 °С. Какова будет влажность воздуха в комнате? Нужен ли в такой ситуации увлажнитель воздуха?

24. Температура воздуха за окном -30 °С, относительная влажность – 50 %. Воздух запустили в комнату, где он прогрелся до +15 °С. Какова будет влажность воздуха в комнате? Нужен ли в такой ситуации увлажнитель воздуха?

25. Температура воздуха за окном -25 °С, относительная влажность – 50 %. Воздух запустили в комнату, где он прогрелся до +15 °С. Какова будет влажность воздуха в комнате? Нужен ли в такой ситуации увлажнитель воздуха?

26. Температура воздуха за окном -20 °С, относительная влажность – 50 %. Воздух запустили в комнату, где он прогрелся до +15 °С. Какова будет влажность воздуха в комнате? Нужен ли в такой ситуации увлажнитель воздуха?

27. Температура воздуха за окном -30 °С, относительная влажность – 75 %. Воздух запустили в комнату, где он прогрелся до

+20 °С. Какова будет влажность воздуха в комнате? Нужен ли в такой ситуации увлажнитель воздуха?

28. Температура воздуха за окном -25 °С, относительная влажность – 75 %. Воздух запустили в комнату, где он прогрелся до +20 °С. Какова будет влажность воздуха в комнате? Нужен ли в такой ситуации увлажнитель воздуха?

29. Температура воздуха за окном -20 °С, относительная влажность – 75 %. Воздух запустили в комнату, где он прогрелся до +20 °С. Какова будет влажность воздуха в комнате? Нужен ли в такой ситуации увлажнитель воздуха?

30. Температура воздуха за окном -30 °С, относительная влажность – 75 %. Воздух запустили в комнату, где он прогрелся до +25 °С. Какова будет влажность воздуха в комнате? Нужен ли в такой ситуации увлажнитель воздуха?

31. Температура воздуха за окном -25 °С, относительная влажность – 75 %. Воздух запустили в комнату, где он прогрелся до +25 °С. Какова будет влажность воздуха в комнате? Нужен ли в такой ситуации увлажнитель воздуха?

32. Температура воздуха за окном -20 °С, относительная влажность – 75 %. Воздух запустили в комнату, где он прогрелся до +25 °С. Какова будет влажность воздуха в комнате? Нужен ли в такой ситуации увлажнитель воздуха?

33. Температура воздуха за окном -30 °С, относительная влажность – 75 %. Воздух запустили в комнату, где он прогрелся до +15 °С. Какова будет влажность воздуха в комнате? Нужен ли в такой ситуации увлажнитель воздуха?

34. Температура воздуха за окном -25 °С, относительная влажность – 75 %. Воздух запустили в комнату, где он прогрелся до +15 °С. Какова будет влажность воздуха в комнате? Нужен ли в такой ситуации увлажнитель воздуха?

35. Температура воздуха за окном -20 °С, относительная влажность – 75 %. Воздух запустили в комнату, где он прогрелся до

+15 °С. Какова будет влажность воздуха в комнате? Нужен ли в такой ситуации увлажнитель воздуха?

36. Температура воздуха за окном -30 °С, относительная влажность – 85 %. Воздух запустили в комнату, где он прогрелся до +20 °С. Какова будет влажность воздуха в комнате? Нужен ли в такой ситуации увлажнитель воздуха?

37. Температура воздуха за окном -25 °С, относительная влажность – 85 %. Воздух запустили в комнату, где он прогрелся до +20 °С. Какова будет влажность воздуха в комнате? Нужен ли в такой ситуации увлажнитель воздуха?

38. Температура воздуха за окном -20 °С, относительная влажность – 85 %. Воздух запустили в комнату, где он прогрелся до +20 °С. Какова будет влажность воздуха в комнате? Нужен ли в такой ситуации увлажнитель воздуха?

39. Температура воздуха за окном -30 °С, относительная влажность – 85 %. Воздух запустили в комнату, где он прогрелся до +25 °С. Какова будет влажность воздуха в комнате? Нужен ли в такой ситуации увлажнитель воздуха?

40. Температура воздуха за окном -25 °С, относительная влажность – 85 %. Воздух запустили в комнату, где он прогрелся до +25 °С. Какова будет влажность воздуха в комнате? Нужен ли в такой ситуации увлажнитель воздуха?

41. Температура воздуха за окном -20 °С, относительная влажность – 85 %. Воздух запустили в комнату, где он прогрелся до +25 °С. Какова будет влажность воздуха в комнате? Нужен ли в такой ситуации увлажнитель воздуха?

42. Температура воздуха за окном -30 °С, относительная влажность – 85 %. Воздух запустили в комнату, где он прогрелся до +15 °С. Какова будет влажность воздуха в комнате? Нужен ли в такой ситуации увлажнитель воздуха?

43. Температура воздуха за окном -25 °С, относительная влажность – 85 %. Воздух запустили в комнату, где он прогрелся до

+15 °С. Какова будет влажность воздуха в комнате? Нужен ли в такой ситуации увлажнитель воздуха?

44. Температура воздуха за окном -20 °С, относительная влажность – 85 %. Воздух запустили в комнату, где он прогрелся до +15 °С. Какова будет влажность воздуха в комнате? Нужен ли в такой ситуации увлажнитель воздуха?

45. Температура воздуха за окном -20 °С, в комнате – +20 °С. Влажность воздуха в комнате – 50 %. Воздух из комнаты выпустили на улицу. Какова станет его влажность после того, как он охладится? Возможно ли это? Как при этом будет выглядеть этот воздух за окном?

46. Температура воздуха за окном +10 °С, в комнате – +20 °С. Влажность воздуха в комнате – 50 %. Воздух из комнаты выпустили на улицу. Какова станет его влажность после того, как он охладится? Возможно ли это? Как при этом будет выглядеть этот воздух за окном?

47. Температура воздуха за окном 0 °С, в комнате – +20 °С. Влажность воздуха в комнате – 50 %. Воздух из комнаты выпустили на улицу. Какова станет его влажность после того, как он охладится? Возможно ли это? Как при этом будет выглядеть этот воздух за окном?

48. Температура воздуха за окном -10 °С, в комнате – +20 °С. Влажность воздуха в комнате – 50 %. Воздух из комнаты выпустили на улицу. Какова станет его влажность после того, как он охладится? Возможно ли это? Как при этом будет выглядеть этот воздух за окном?

49. Температура воздуха за окном -15 °С, в комнате – +20 °С. Влажность воздуха в комнате – 50 %. Воздух из комнаты выпустили на улицу. Какова станет его влажность после того, как он охладится? Возможно ли это? Как при этом будет выглядеть этот воздух за окном?

50. Температура воздуха за окном -20 °С, в комнате – +20 °С. Влажность воздуха в комнате – 50 %. Воздух из комнаты выпустили на улицу. Какова станет его влажность после того, как он охладится? Возможно ли это? Как при этом будет выглядеть этот воздух за окном?

51. Температура воздуха за окном -25 °С, в комнате – +20 °С. Влажность воздуха в комнате – 50 %. Воздух из комнаты выпустили на

улицу. Какова станет его влажность после того, как он охладится? Возможно ли это? Как при этом будет выглядеть этот воздух за окном?

52. Температура воздуха за окном -30 °С, в комнате – +20 °С. Влажность воздуха в комнате – 50 %. Воздух из комнаты выпустили на улицу. Какова станет его влажность после того, как он охладится? Возможно ли это? Как при этом будет выглядеть этот воздух за окном?

53. Температура воздуха за окном -35 °С, в комнате – +20 °С. Влажность воздуха в комнате – 50 %. Воздух из комнаты выпустили на улицу. Какова станет его влажность после того, как он охладится? Возможно ли это? Как при этом будет выглядеть этот воздух за окном?

54. Температура воздуха за окном -40 °С, в комнате – +20 °С. Влажность воздуха в комнате – 50 %. Воздух из комнаты выпустили на улицу. Какова станет его влажность после того, как он охладится? Возможно ли это? Как при этом будет выглядеть этот воздух за окном?

55. Температура воздуха за окном -20 °С, в комнате – +20 °С. Влажность воздуха в комнате – 40 %. Воздух из комнаты выпустили на улицу. Какова станет его влажность после того, как он охладится? Возможно ли это? Как при этом будет выглядеть этот воздух за окном?

56. Температура воздуха за окном +10 °С, в комнате – +20 °С. Влажность воздуха в комнате – 40 %. Воздух из комнаты выпустили на улицу. Какова станет его влажность после того, как он охладится? Возможно ли это? Как при этом будет выглядеть этот воздух за окном?

57. Температура воздуха за окном 0 °С, в комнате – +20 °С. Влажность воздуха в комнате – 40 %. Воздух из комнаты выпустили на улицу. Какова станет его влажность после того, как он охладится? Возможно ли это? Как при этом будет выглядеть этот воздух за окном?

58. Температура воздуха за окном -10 °С, в комнате – +20 °С. Влажность воздуха в комнате – 40 %. Воздух из комнаты выпустили на улицу. Какова станет его влажность после того, как он охладится? Возможно ли это? Как при этом будет выглядеть этот воздух за окном?

59. Температура воздуха за окном -14 °С, в комнате – +20 °С. Влажность воздуха в комнате – 40 %. Воздух из комнаты выпустили на

улицу. Какова станет его влажность после того, как он охладится? Возможно ли это? Как при этом будет выглядеть этот воздух за окном?

60. Температура воздуха за окном -20 °С, в комнате – +20 °С. Влажность воздуха в комнате – 40 %. Воздух из комнаты выпустили на улицу. Какова станет его влажность после того, как он охладится? Возможно ли это? Как при этом будет выглядеть этот воздух за окном?

61. Температура воздуха за окном -24 °С, в комнате – +20 °С. Влажность воздуха в комнате – 40 %. Воздух из комнаты выпустили на улицу. Какова станет его влажность после того, как он охладится? Возможно ли это? Как при этом будет выглядеть этот воздух за окном?

62. Температура воздуха за окном -30 °С, в комнате – +20 °С. Влажность воздуха в комнате – 40 %. Воздух из комнаты выпустили на улицу. Какова станет его влажность после того, как он охладится? Возможно ли это? Как при этом будет выглядеть этот воздух за окном?

63. Температура воздуха за окном -34°С, в комнате – +20 °С. Влажность воздуха в комнате – 40 %. Воздух из комнаты выпустили на улицу. Какова станет его влажность после того, как он охладится? Возможно ли это? Как при этом будет выглядеть этот воздух за окном?

64. Температура воздуха за окном -40 °С, в комнате – +20 °С. Влажность воздуха в комнате – 40 %. Воздух из комнаты выпустили на улицу. Какова станет его влажность после того, как он охладится? Возможно ли это? Как при этом будет выглядеть этот воздух за окном?

65. Температура воздуха за окном -20 °С, в комнате – +20 °С. Влажность воздуха в комнате – 30 %. Воздух из комнаты выпустили на улицу. Какова станет его влажность после того, как он охладится? Возможно ли это? Как при этом будет выглядеть этот воздух за окном?

66. Температура воздуха за окном +10 °С, в комнате – +20 °С. Влажность воздуха в комнате – 30 %. Воздух из комнаты выпустили на улицу. Какова станет его влажность после того, как он охладится? Возможно ли это? Как при этом будет выглядеть этот воздух за окном?

67. Температура воздуха за окном 0 °С, в комнате – +20 °С. Влажность воздуха в комнате – 30 %. Воздух из комнаты выпустили на ули-

цу. Какова станет его влажность после того, как он охладится? Возможно ли это? Как при этом будет выглядеть этот воздух за окном?

68. Температура воздуха за окном -10 °С, в комнате – +20 °С. Влажность воздуха в комнате – 30 %. Воздух из комнаты выпустили на улицу. Какова станет его влажность после того, как он охладится? Возможно ли это? Как при этом будет выглядеть этот воздух за окном?

69. Температура воздуха за окном -13 °С, в комнате – +20 °С. Влажность воздуха в комнате – 30 %. Воздух из комнаты выпустили на улицу. Какова станет его влажность после того, как он охладится? Возможно ли это? Как при этом будет выглядеть этот воздух за окном?

70. Температура воздуха за окном -20 °С, в комнате – +20 °С. Влажность воздуха в комнате – 30 %. Воздух из комнаты выпустили на улицу. Какова станет его влажность после того, как он охладится? Возможно ли это? Как при этом будет выглядеть этот воздух за окном?

71. Температура воздуха за окном -23 °С, в комнате – +20 °С. Влажность воздуха в комнате – 30 %. Воздух из комнаты выпустили на улицу. Какова станет его влажность после того, как он охладится? Возможно ли это? Как при этом будет выглядеть этот воздух за окном?

72. Температура воздуха за окном -30 °С, в комнате – +20 °С. Влажность воздуха в комнате – 30 %. Воздух из комнаты выпустили на улицу. Какова станет его влажность после того, как он охладится? Возможно ли это? Как при этом будет выглядеть этот воздух за окном?

73. Температура воздуха за окном -33 °С, в комнате – +20 °С. Влажность воздуха в комнате – 30 %. Воздух из комнаты выпустили на улицу. Какова станет его влажность после того, как он охладится? Возможно ли это? Как при этом будет выглядеть этот воздух за окном?

74. Температура воздуха за окном -40 °С, в комнате – +20 °С. Влажность воздуха в комнате – 30 %. Воздух из комнаты выпустили на улицу. Какова станет его влажность после того, как он охладится? Возможно ли это? Как при этом будет выглядеть этот воздух за окном?

18. ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ

Материал данной главы пригодится вам при выполнении **экспериментального задания № 3-II.** Это задание является прекрасной экспериментальной иллюстрацией изложенного в настоящей главе теоретического материала.

Основы теории

Проводники – это вещества, проводящие электрический ток благодаря наличию в них большого количества зарядов, способных свободно перемещаться. Они бывают первого и второго рода. К проводникам второго рода относятся соли и щелочи в кристаллическом, растворенном или расплавленном состоянии, также растворы кислот и оснований в воде и в некоторых других растворителях. В них прохождение тока связано с химическими процессами и обусловлено движением положительных и отрицательных ионов. Как следствие – осуществляется перенос вещества. Электропроводность проводников первого рода не сопровождается химическими процессами, она обусловлена движением свободных электронов. К проводникам первого рода относятся: чистые металлы, т.е. металлы без примесей, сплавы, некоторые соли, оксиды и ряд органических веществ.

В проводниках первого рода свободные электроны участвуют в тепловом хаотическом движении. Если к участку проводника приложена разность потенциалов, то на хаотическое движение электронов накладывается упорядоченное движение со скоростью, намного меньшей, чем тепловая. Докажем это утверждение.

Рассмотрим постоянный ток в металлическом проводнике. Пусть сечение провода $S = 1\ мм^2$, и по проводу течет ток $I = 10\ A$. Учитывая, что концентрация электронов примерно равна концентрации атомов, можно принять ее $n = 10^{28}\ м^{-3}$. Известно, что плотность тока

в металлах определяется формулой $j = en\overline{V}$, где $j = \frac{I}{S}$ – плотность тока, e – элементарный заряд, а $\overline{V}$ – скорость упорядоченного движения электронов. Тогда для скорости упорядоченного движения получаем:

$$\overline{V} = \frac{j}{en} = \frac{I}{enS} = \frac{10}{1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{28} \cdot 10^{-6}} = 6{,}25 \cdot 10^{-3}\ \frac{м}{с}. \qquad (18.1)$$

Оценим теперь скорость теплового движения электронов, воспользовавшись формулой для среднеквадратичной скорости молекул идеального газа при комнатной температуре:

$$V_{кв} = \sqrt{\frac{3kT}{m_e}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{9.1 \cdot 10^{-31}}} = 11{,}6 \cdot 10^4\ \frac{м}{с} = 116\ \frac{км}{с}. \qquad (18.2)$$

Несмотря на то, что распределение электронов по энергиям в металле описывается квантовой статистикой Ферми – Дирака, полученный нами результат хорошо согласуется с экспериментом, а значит наше утверждение об отношении скоростей упорядоченного и теплового движения верны.

Как же зависит сопротивление металлического проводника от температуры? Хорошо известна эмпирическая формула

$$R = R_0(1 + \gamma t), \qquad (18.3)$$

где R_0 – сопротивление проводника про нуле градусов Цельсия, R – сопротивление проводника при температуре t, а γ – термический коэффициент сопротивления. В формуле (18.3) не учитывается зависимость γ от температуры и пренебрегается расширением тел при нагреве. Тем не менее эта закономерность выполняется в широком интервале температур – от -50 до +150 °С практически для всех металлов.

Хотя коэффициент γ много меньше единицы, учет зависимости сопротивления от температуры при расчете нагревательных приборов совершенно необходим. Так, сопротивление вольфрамовой нити лам-

пы накаливания увеличивается при прохождении по ней тока более чем в 10 раз. У некоторых сплавов, например у сплава меди с никелем (константан), температурный коэффициент сопротивления очень мал: $\gamma = 10^{-5}\ K^{-1}$. Такие сплавы используют для изготовления эталонных сопротивлений и добавочных сопротивлений к измерительным приборам, т. е. в тех случаях, когда требуется, чтобы сопротивление заметно не менялось при колебаниях температуры.

Существуют и такие металлы, например никель, олово, платина и др., температурный коэффициент которых существенно больше: $\gamma = 10^{-3}\ K^{-1}$. Зависимость их сопротивления от температуры можно использовать для измерения самой температуры, что и осуществляется в термометрах сопротивления.

При понижении температуры зависимость $R(t)$ перестает быть линейной и для некоторых проводников сопротивление может стать равным нулю. Это явление называется сверхпроводимость. Материалы, обнаруживающие способность переходить при некоторых температурах, отличных от абсолютного нуля, в сверхпроводящее состояние, называются сверхпроводниками. Первым открытым сверхпроводником была ртуть. Нидерландский ученый Камерлинг-Оннес обнаружил, что при понижении температуры ртути до 4,1 К ее удельное сопротивление скачком уменьшается до нуля.

В 1986 г. была открыта высокотемпературная сверхпроводимость керамик – соединений лантана, бария, меди и кислорода. Сверхпроводимость таких керамик сохраняется до температур около 100 К.

Описание установки

Задача нашего исследования заключается в экспериментальном определении термического коэффициента сопротивления у медной проволоки. Фотография установки приведена на рис. 18.1. Здесь 1 – электрическая плитка, печка или нагреватель (как больше нравится), 2 – пробирка с машинным маслом, в которое помещен исследуемый образец (масло необходимо по нескольким причинам. Попробуйте самостоятельно их найти), 3 – термопара, 4 – мультиметр, или тестер.

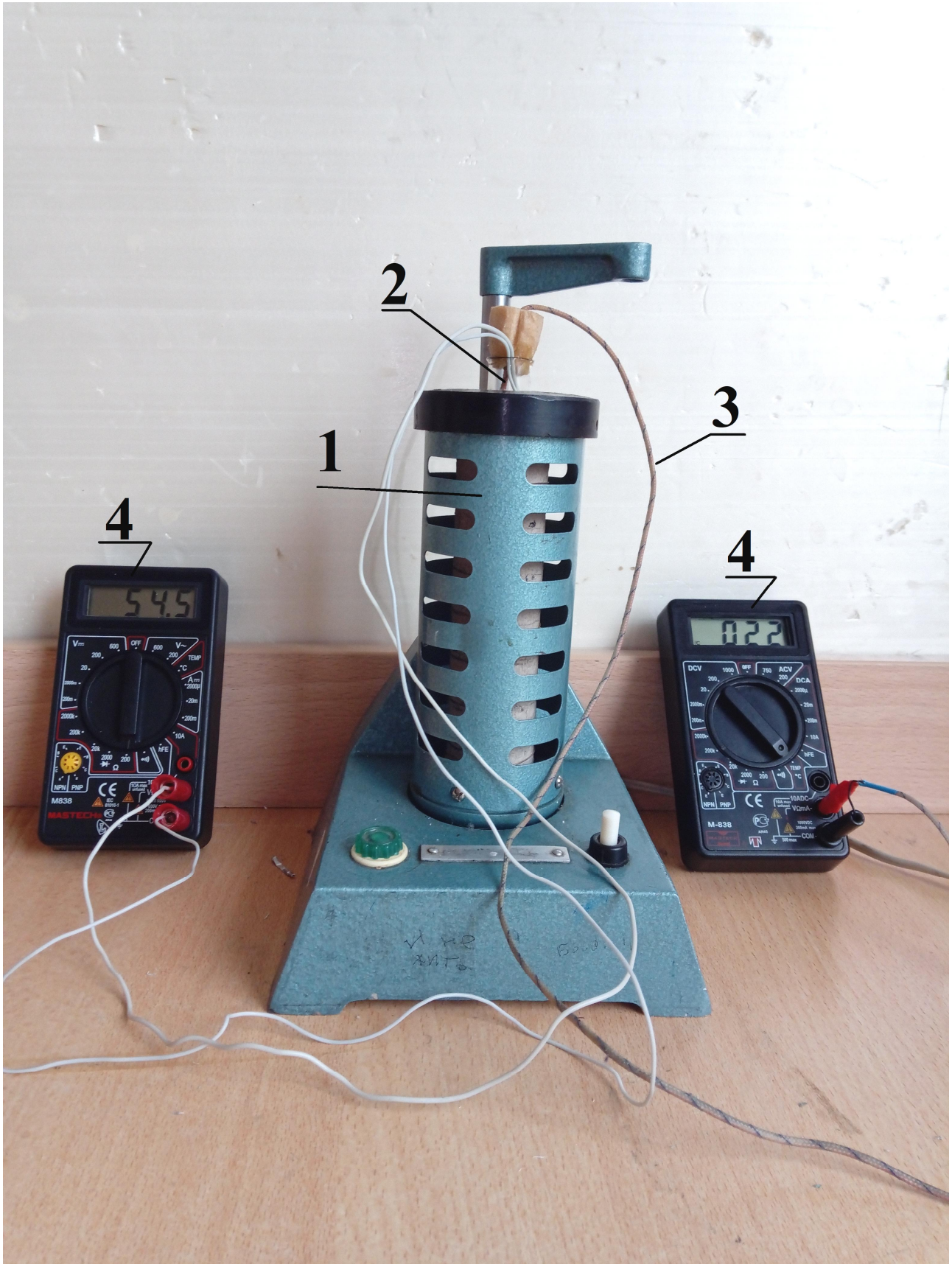


Рис. 18.1. Установка для измерения
термического коэффициента сопротивления

Порядок выполнения работы. Измерения и расчеты

1. Убедитесь в исправности установки, целостности проводов, в отсутствии повреждений изоляции. Включив мультиметры, убедитесь, что батарейки не разряжены.

2. Подсоедините исследуемый образец проводника к мультиметру и установите переключатель в положение омметра с пределом « __».

3. Подсоедините термопару к другому мультиметру, установив переключатель в положение «темп». Убедитесь, что оба прибора показывают реальные значения измеряемых величин.

4. Включите нагреватель. Убедитесь, что температура увеличивается.

5. Записывайте в табл. 18.1 значение сопротивления через каждые 5 °С.

6. При достижении температуры 75–85 °С выключите питание нагревателя. Образец нагреется по инерции еще на несколько градусов. Делайте записи в табл. 18.1 до окончания нагрева. Если образец нагревается при помощи колбы с водой, то необходимо выключить нагреватель после закипания воды.

7. По данным из табл. 18.1 постройте график зависимости сопротивления от температуры. Для этого выберите масштаб таким образом, чтобы значения сопротивления и температуры располагались по всей длине оси. Так как в теории зависимость сопротивления от температуры линейная, проведите прямую так, чтобы она проходила через максимальное число экспериментальных значений, а остальные точки равномерно располагались бы сверху и снизу прямой на минимальном расстоянии.

8. Выберите на полученной прямой две любые точки, желательно на максимально возможном расстоянии друг от друга. Подставьте полученные значения в формулу (18.3). Запишите систему уравнений:

$$R_1 = R_0\left(1+\gamma\, t_1\right), \tag{18.4}$$

$$R_2 = R_0\left(1+\gamma\, t_2\right) \tag{18.5}$$

и решите ее. Здесь R_1 – сопротивление при температуре t_1, а R_2 – сопротивление при t_2.

9. Запишите в ответ R_0 и γ.

Таблица 18.1

Зависимость сопротивления от температуры

t, °C										
R, Ом										

Контрольные вопросы

1. Что такое проводники первого и второго рода? Чем они отличаются?

2. Каково соотношение между скоростями теплового и упорядоченного движения?

3. Почему у проводников первого рода сопротивление увеличивается с ростом температуры?

4. Что такое сверхпроводимость?

5. Объясните, почему лампы накаливания чаще всего перегорают при включении?

6. Можно ли написать формулу (18.3) для удельного сопротивления металла? Объясните.

7. Вы нашли R_0, решив систему (18.4)–(18.5). А как ещё можно найти R_0? Сравните результаты.

8. Как можно оценить погрешность графического метода, используемого в этой работе? Сделайте это, оцените погрешность измерений!

9. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити до включения лампочки 0 °C, а после включения 2200 °C?

10. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити до включения лампочки 100 °C, а после включения 2200 °C?

11. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити до включения лампочки 100 °С, а после включения 2500 °С?

12. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1000 до 2500 °С?

13. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1100 до 2500 °С?

14. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1200 до 2500 °С?

15. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1300 до 2500 °С?

16. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1400 до 2500 °С?

17. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1500 до 2500 °С?

18. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1000 до 2400 °С?

19. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1100 до 2400 °С?

20. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1200 до 2400 °С?

21. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1300 до 2400 °С?

22. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1400 до 2400 °С?

23. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1500 до 2400 °С?

24. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1000 до 2300 °С?

25. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1100 до 2300 °С?

26. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1200 до 2300 °С?

27. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1300 до 2300 °С?

28. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1400 до 2300 °С?

29. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1500 до 2300 °С?

30. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1000 до 2200 °С?

31. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1100 до 2200 °С?

32. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1200 до 2200 °С?

33. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1300 до 2200 °С?

34. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1400 до 2200 °С?

35. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1500 до 2200 °С?

36. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1000 до 2100 °С?

37. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1100 до 2100 °С?

38. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1200 до 2100 °С?

39. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1300 до 2100 °С?

40. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1400 до 2100 °С?

41. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1500 до 2100 °С?

42. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1000 до 2000 °С?

43. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1100 до 2000 °С?

44. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1200 до 2000 °С?

45. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1300 до 2000 °С?

46. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1400 до 2000 °С?

47. Найдите, во сколько раз изменится сопротивление вольфрамовой нити лампочки накаливания, если температура нити лампочки изменилась от 1500 до 2500 °С?

19. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Материал данной главы пригодится вам при выполнении **экспериментального задания № 7-II.** Это задание является прекрасной экспериментальной иллюстрацией изложенного в настоящей главе теоретического материала.

Основы теории

Природа магнитного поля Земли сложна и в настоящее время до конца не выяснена. Полюса магнитного поля Земли находятся вблизи географических полюсов (в Северном полушарии расположен южный магнитный полюс, в Южном – северный магнитный полюс) и с течением времени медленно изменяют свое положение (рис. 19.1).

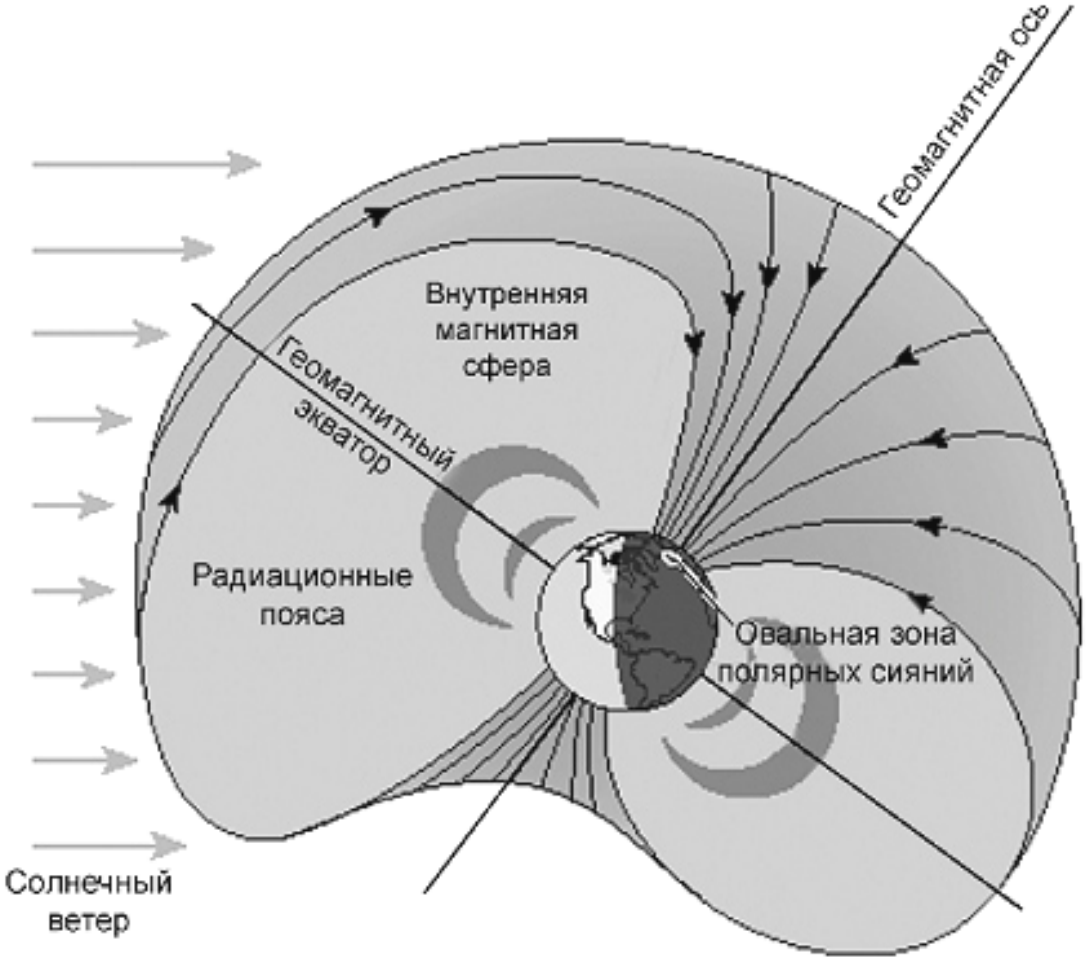


Рис. 19.1. Строение магнитного поля Земли

Магнитное поле простирается до высоты около 100 000 км. Оно отклоняет или захватывает частицы солнечного ветра, губительные для всех живых организмов. Эти заряженные частицы образуют радиационный пояс Земли, а вся область околоземного пространства, в которой они находятся, называют магнитосферой (рис. 19.2). С освещенной Солнцем стороны Земли магнитосфера ограничена сферической поверхностью с радиусом примерно 10–15 радиусов Земли, а с противоположной стороны она вытянута подобно кометному хвосту на расстояние вплоть до нескольких тысяч радиусов Земли, образуя геомагнитный хвост. Магнитосфера отделена от межпланетного поля переходной областью.

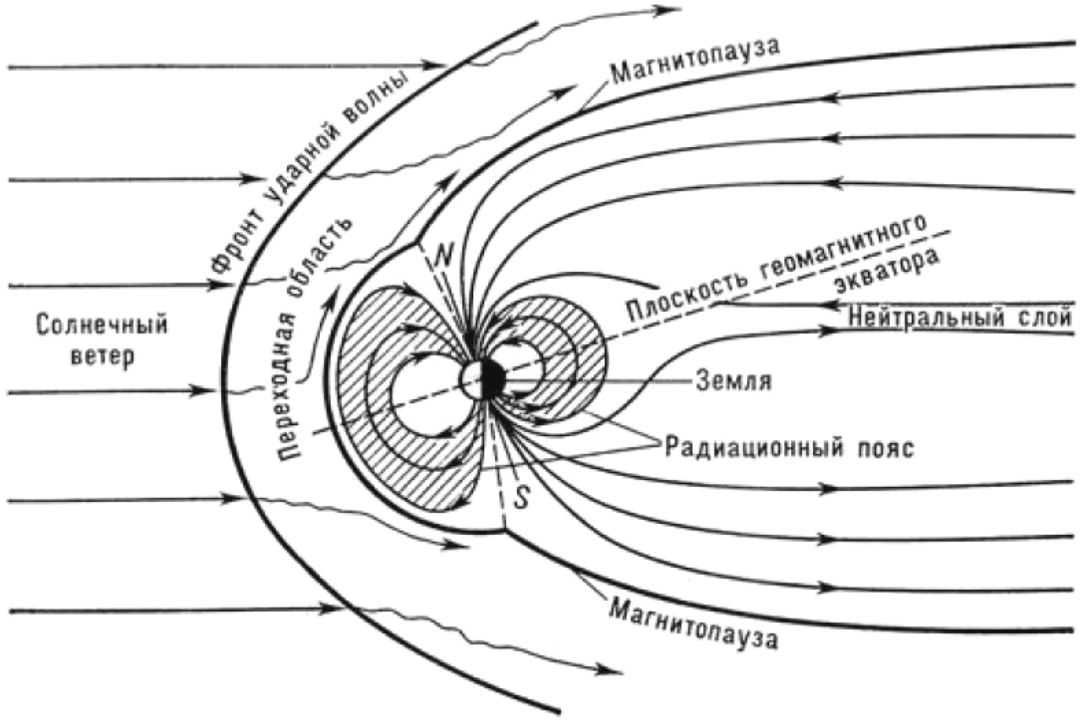


Рис. 19.2. Строение магнитосферы Земли

Ось земного магнита наклонена по отношению к оси вращения Земли на 12°. Она располагается примерно на 400 км в стороне от центра Земли. Точки, в которых эта ось пересекает поверхность планеты, называются магнитными полюсами. Магнитные полюса Земли не совпадают с истинными географическими полюсами. В настоящее время координаты магнитных полюсов следующие: северный – 77° с.ш. и 102° з.д.; южный – (65° ю.ш. и 139° в.д.).

Линии напряженности магнитного поля Земли, идущие от одного магнитного полюса к другому, лежат в плоскости магнитного меридиана. Между плоскостью магнитного и географического меридиана образуется угол, называемый магнитным склонением. Каждое место на Земле имеет свой угол склонения. В районе Самары угол склонения равен около 11° к востоку, а в Якутске — около 17° к западу. Это значит, что северный конец стрелки компаса в Самаре отклоняется на 11° вправо от географического меридиана, проходящего через Самару, а в Якутске — на 17° влево от соответствующего меридиана.

Свободно подвешенная магнитная стрелка располагается горизонтально только на линии магнитного экватора, который, как нетрудно догадаться, не совпадает с географическим. Угол, образованный магнитной стрелкой и горизонтальной плоскостью, называют магнитным наклонением. Таким образом, магнитная стрелка показывает направление силовых линий магнитного ноля над земной поверхностью. На северном и южном магнитных полюсах магнитное наклонение равно 90°, а на широте Самары – 67°40′. (По материалам сайта http://www.grandars.ru). Величина проекции вектора напряженности магнитного поля Земли на горизонтальную плоскость называется горизонтальной составляющей магнитного поля Земли.

Свойство магнитной стрелки устанавливаться в плоскости магнитного меридиана используется для определения численного значения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли с помощью тангенс-буссоли. Тангенс-буссоль представляет собой плоскую вертикальную катушку радиусом R с числом витков N (рис. 19.3). В центре катушки в горизонтальной плоскости находится магнитная стрелка и лимб с делениями. При отсутствии тока в катушке магнитная стрелка располагается в плоскости магнитного меридиана Земли. В этой же плоскости должны быть расположены и витки катушки. Если по катушке пропустить ток, то магнитная стрелка отклонится от плоскости магнитного меридиана на некоторый угол α. Это объясняется тем, что на магнитную стрелку действуют два магнитных поля: магнитное поле Земли и магнитное поле, созданное полем катушки.

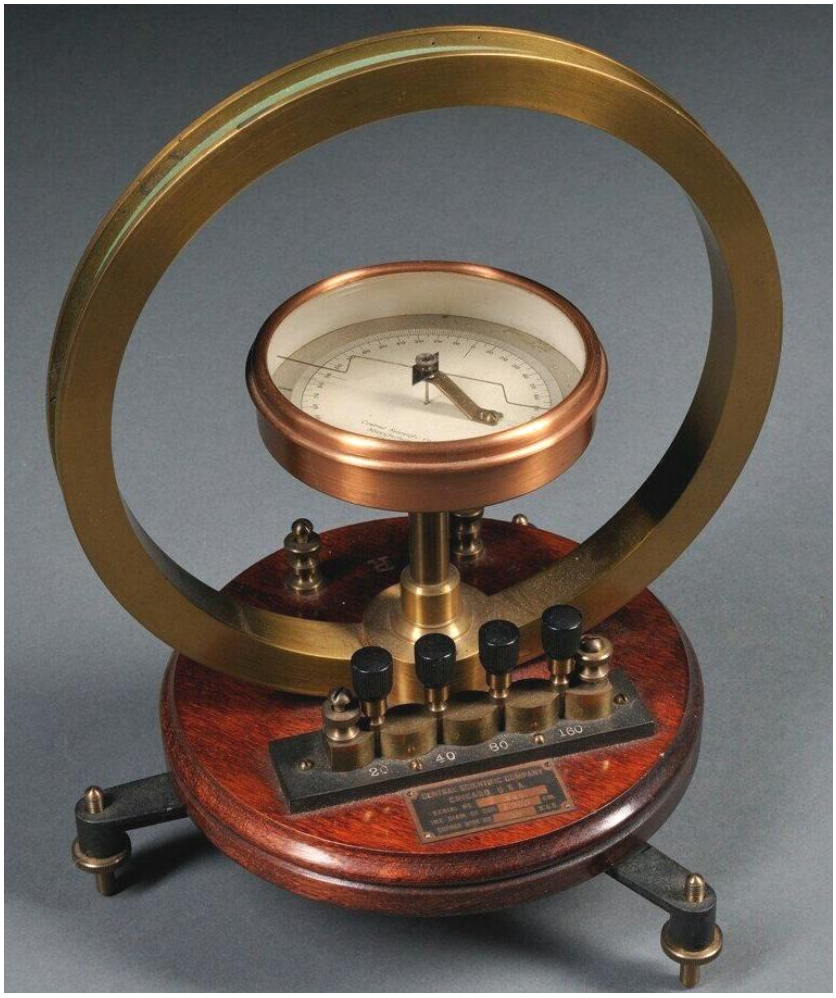


Рис. 19.3. Внешний вид тангенс-буссоли

Магнитная стрелка располагается вдоль равнодействующей силы этих двух магнитных полей (рис. 19.4). На рис. 19.4 буквами А и В обозначены сечения витков катушки тангенс-буссоли горизонтальной плоскостью. В сечении А ток в витках катушки направлен «к нам», а в сечении В – «от нас». Пунктирными окружностями со стрелками изображены линии и направления напряженности магнитного поля катушки с током. В соответствии с принципом суперпозиции вектор $\vec{H}$ – равнодействующая напряженность суммарного магнитного поля – равен векторной сумме горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли $\vec{H}_Г$ и напряженности магнитного поля катушки с током $\vec{H}_К$.

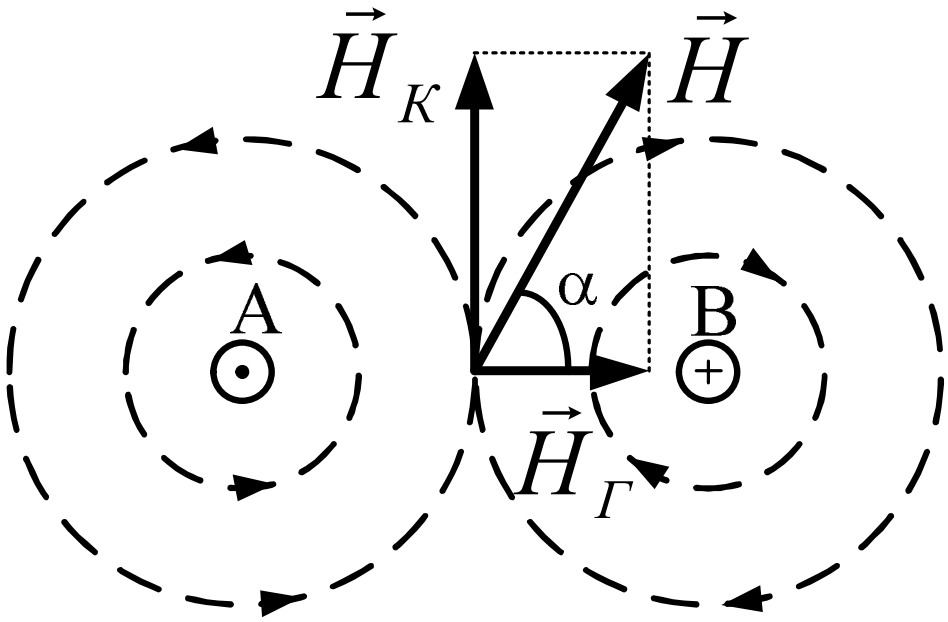


Рис. 19.4. Схема линий напряженности в тангенс-буссоли.

Из рис. 19.4 видно, что горизонтальная составляющая поля может быть вычислена по известным значениям угла α и поля катушки:

$$H_Г = \frac{H_K}{tg\alpha}. \qquad (19.1)$$

Величина напряженности магнитного поля в центре кругового тока $\vec{H}_K$ определяется по закону Био – Савара – Лапласа. Рассмотрим подробно этот закон.

Пусть магнитное поле в точка А создается током I, который течет по произвольному проводнику (рис. 19.5). Тогда элемент тока $I \cdot d\vec{l}$ создаст в точке А магнитное поле, напряженность которого описывается следующим законом (законом Био – Савара – Лапласа):

$$dH = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{Idl\sin\varphi}{r^2}, \qquad (19.2)$$

где r – модуль радиус-вектора, проведенного из элемента проводника в рассматриваемую точку А; φ – угол между элементом тока $I \cdot d\vec{l}$ и радиус-вектором $\vec{r}$ (рис. 19.5).

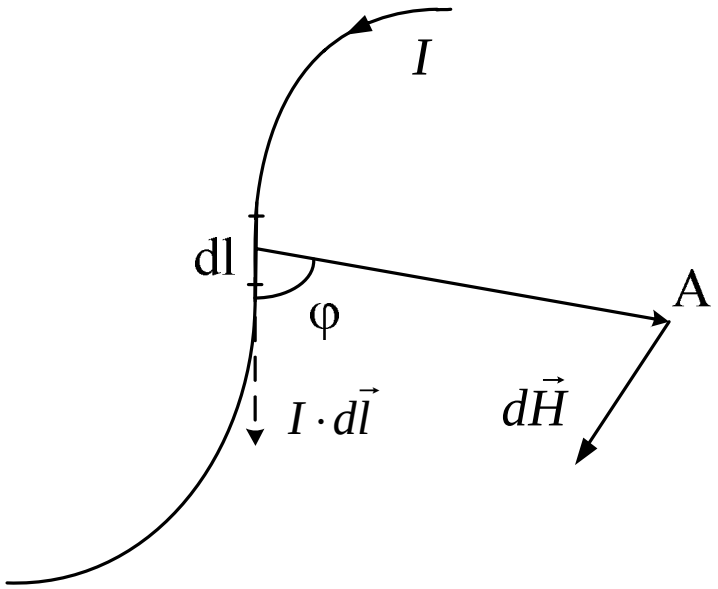


Рис. 19.5. Направление элемента тока и напряженности магнитного поля по закону Био – Савара – Лапласа

Вектор $d\vec{H}$ перпендикулярен плоскости, проходящей через векторы $I \cdot d\vec{l}$ и $\vec{r}$. Его направление определяется правилом правого винта. Направление линий напряженности магнитного поля и вектора $d\vec{H}$ совпадают с направлением вращения винта с правой резьбой, движущегося поступательно в направлении тока.

На основе этого закона определим напряженность магнитного поля в центре кругового тока. Разобьем круговой ток на бесконечно малые элементы тока $I \cdot d\vec{l}$. В этом случае $\sin\varphi = 1$, так как все элементы тока перпендикулярны радиус-вектору. Кроме того, длина бесконечно малого элемента тока равна $dl = R \cdot d\varphi$, где R – радиус кругового тока, $d\varphi$ – угол, опирающийся на рассматриваемую дугу. Все элементы тока создают магнитное поле, перпендикулярное плоскости витка, и поэтому напряженность магнитного поля в центре кругового тока составляет величину

$$H = \int dH = \frac{1}{4\pi}\int_0^{2\pi}\frac{Id\varphi}{R} = \frac{I}{2R}. \qquad (19.3)$$

Если катушка содержит N витков, то напряженность магнитного поля будет в N раз больше:

$$H = \frac{I}{2R} N . \qquad (19.4)$$

Из выражений (19.1) и (19.4) для горизонтальной составляющей магнитного поля Земли окончательно получим расчетное выражение:

$$H = \frac{I \cdot N}{2R \cdot tg\alpha} . \qquad (19.5)$$

Описание установки

Электрическая схема установки представлена на рис. 19.6. Здесь введены обозначения: ИП – источник питания, П – переключатель, ТБ – тангенс-буссоль, А – миллиамперметр. Особенность схемы в том, что с помощью переключателя П можно менять направление тока в тангенс-буссоли, не изменяя настроек источника тока.

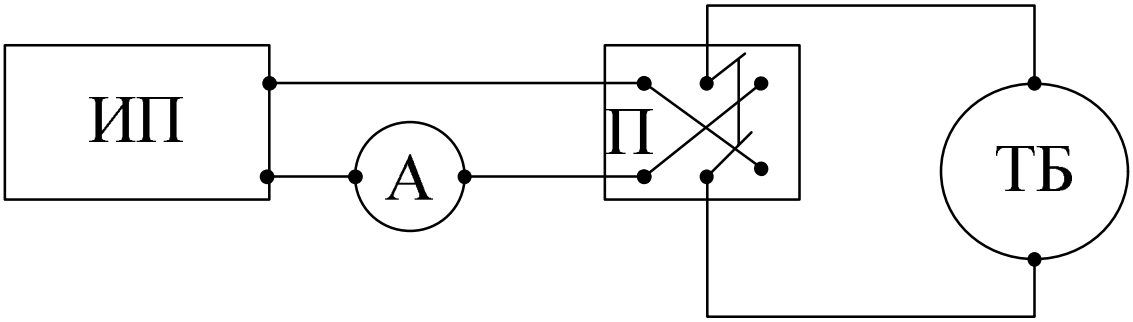


Рис. 19.6. Электрическая схема установки

Порядок выполнения работы. Измерения и расчеты

1. Проверьте правильность собранной схемы, надежность крепления контактов. Убедитесь в том, что ручка переключателя находится в вертикальном положении, а регуляторы источника питания установлены на минимальные значения тока и напряжения.

2. Установите тангенс-буссоль так, чтобы ее катушка находилась в плоскости магнитного меридиана. При этом конец магнитной стрелки должен совпадать с нулевым делением лимба.

3. Добейтесь горизонтального расположения столика тангенс-буссоли по уровню, вращая установочные винты.

4. После проверки электрической схемы лаборантом или преподавателем включите источник питания.

5. Установите ток в цепи катушки по указанию преподавателя (по умолчанию 10 мА). Измерьте углы отклонения концов магнитной стрелки α_1, α_2 и запишите их значения в табл. 19.1.

6. Измените переключателем направление тока в катушке, снова измерьте углы отклонения концов магнитной стрелки α_3, α_4 и запишите их значения в табл. 19.1.

7. Проделайте подобные измерения еще для четырех значений тока, которые укажет преподаватель (по умолчанию 20 мА, 30 мА, 40 мА и 50 мА) и все аккуратно занесите в табл. 19.1.

8. Вычислите среднее значение угла отклонения магнитной стрелки для каждого тока по формуле

$$\overline{\alpha} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4}{4}$$

и запишите в табл. 19.1.

9. Вычислите для каждого значения силы тока и угла отклонения магнитной стрелки горизонтальную составляющую магнитного поля Земли по формуле (19.5) и запишите результат в соответствующую ячейку табл. 19.1. (Если нет таблички на установке, радиус катушки и число витков уточните у лаборанта.)

10. По формуле

$$\overline{H}_Г = \sum_{i=1}^{5} H_{Гi}$$

вычислите среднее значение горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли и запишите его в табл. 19.1.

11. По формуле

$$S_H = \sqrt{\frac{1}{20}\sum_{i=1}^{5}\left(\overline{H}_Г - H_{Гi}\right)^2}$$

найдите стандартную ошибку для горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли и запишите ее в табл. 19.1.

12. Выберите в табл. 2 введения подходящий коэффициент Стьюдента $t_{p,n}$ и по формуле

$$\Delta\overline{H}_{Г} = S_{H} t_{p,n}$$

найдите полуширину доверительного интервала для горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли и запишите ее в табл. 19.1.

13. Запишите окончательный результат измерения горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли в виде $H_{Г} = \overline{H}_{Г} \pm \Delta\overline{H}_{Г}$, проведя разумное округление полученных значений.

Таблица 19.1

Измерение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли

№	α_1	α_2	α_3	α_4	$\overline{\alpha}$	$H_{Гi}\,\frac{А}{м}$	$\overline{H}_{Г}\,\frac{А}{м}$	$S_{H}\,\frac{А}{м}$	$\Delta\overline{H}_{Г}\,\frac{А}{м}$
1									
2									
3									
4									
5									

Контрольные вопросы

1. Что такое магнитное поле?
2. Какие магнитные явления вы знаете?
3. Что является источником магнитного поля?
4. Что собой представляет электромагнит, постоянный магнит?
5. Как называются физические величины, которые характеризуют магнитное поле? Каковы их размерности?
6. Сформулируйте принцип суперпозиции для магнитного поля.
7. Расскажите о магнитном поле Земли.

8. Что такое магнитное склонение?

9. Что такое магнитное наклонение?

10. Что такое горизонтальная составляющая магнитного поля Земли?

11. Напишите формулу, связывающую между собой следующие физические величины: напряженность магнитного поля Земли, магнитное наклонение, горизонтальную составляющую магнитного поля Земли.

12. Дайте определение географическому и магнитному меридиану.

13. Как вы считаете, есть ли на поверхности Земли точки с нулевым склонением и нулевым наклонением? Ответ обоснуйте.

14. Что такое магнитная постоянная?

15. Какова связь между напряженностью и индукцией магнитного поля?

16. Что такое элемент тока?

17. Что такое векторное произведение векторов? Как его посчитать?

18. С помощью закона Био – Савара – Лапласа найдите напряженность магнитного поля, которое создается круговым током, током текущим по прямому проводу.

19. Посчитайте величину напряженности магнитного поля в центре кругового тока. Радиус витка 10 см, ток – 5 А.

20. Посчитайте величину напряженности магнитного поля в центре кругового тока. Радиус витка 15 см, ток – 1,5 А.

21. Посчитайте величину напряженности магнитного поля в центре кругового тока. Радиус витка 5 см, ток – 0,5 А.

22. Посчитайте величину напряженности магнитного поля в центре кругового тока. Радиус витка 25 см, ток – 0,5 А.

23. Посчитайте величину напряженности магнитного поля в центре кругового тока. Радиус витка 50 см, ток – 15 А.

24. Посчитайте величину напряженности магнитного поля на оси кругового тока. Радиус витка 5 см, ток – 0,5 А, расстояние до центра витка 30 см.

25. Посчитайте величину напряженности магнитного поля на оси кругового тока. Радиус витка 15 см, ток – 0,5 А, расстояние до центра витка 20 см.

26. Посчитайте величину напряженности магнитного поля на оси кругового тока. Радиус витка 25 см, ток – 5 А, расстояние до центра витка 30 см.

27. Посчитайте величину напряженности магнитного поля на оси кругового тока. Радиус витка 50 см, ток – 15 А, расстояние до центра витка 10 см.

28. Посчитайте величину напряженности магнитного поля на оси кругового тока. Радиус витка 25 см, ток – 0,5 А, расстояние до центра витка 50 см.

29. Что такое магнитный компас? Как он устроен?

30. Почему название магнитного и географического полюсов, находящихся в одном полушарии, не совпадает?

31. Объясните принцип работы тангенс-буссоли.

32. Почему в лабораторной работе мы измеряем только горизонтальную составляющую магнитного поля Земли?

33. На какой угол отклонится магнитная стрелка в тангенс-буссоли, если горизонтальная составляющая магнитного поля в данной точке равна 10 $\frac{A}{м}$, сила тока в приборе 10 мА, радиус витков 15 см, число витков 100?

34. На какой угол отклонится магнитная стрелка в тангенс-буссоли, если горизонтальная составляющая магнитного поля в данной точке равна 10 $\frac{A}{м}$, сила тока в приборе 10 мА, радиус витков 10 см, число витков 150?

35. На какой угол отклонится магнитная стрелка в тангенс-буссоли, если горизонтальная составляющая магнитного поля в данной точке равна 10 $\frac{A}{м}$, сила тока в приборе 15 мА, радиус витков 10 см, число витков 100?

36. На какой угол отклонится магнитная стрелка в тангенс-буссоли, если горизонтальная составляющая магнитного поля в данной точке равна 10 $\frac{A}{м}$, сила тока в приборе 20 мА, радиус витков 15 см, число витков 150?

37. На какой угол отклонится магнитная стрелка в тангенс-буссоли, если горизонтальная составляющая магнитного поля в данной точке равна 10 $\frac{A}{м}$, сила тока в приборе 10 мА, радиус витков 20 см, число витков 200?

38. К чему приведет отклонение плоскости тангенс-буссоли от плоскости магнитного меридиана?

39. В какой точке Земной поверхности напряженность магнитного поля больше: на экваторе или на полюсе? А горизонтальная составляющая? Ответ поясните.

40. Зависит ли величина напряженности магнитного поля Земли от времени суток? Почему?

41. Расскажите о значении магнитосферы Земли.

42. Есть ли связь между полярными сияниями и магнитным полем Земли? В чем она заключается?

43. Кстати, в какое время года происходят полярные сияния? Почему?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучив приведенный в данном пособии теоретический материал и выполнив предложенные лабораторные работы, вы ознакомились с основными понятиями и законами механики, молекулярной физики, теории электричества, оптики и атомной физики.

Знакомство с физической механикой, молекулярной физикой, теорией электричества, оптикой и атомной физикой пригодится вам как при дальнейшем изучении общетехнических и специальных дисциплин, так и в практической работе в области строительства, потому что именно механика, молекулярная физика, теория электричества, оптика и атомная физика – основа любой инженерной деятельности.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Как измерять штангенциркулем и микрометром?

В различных областях практической деятельности человека приходится измерять расстояния и размеры предметов с той или иной степенью точности. Для этого применяются различные измерительные инструменты. В техническом черчении употребляется знакомая нам масштабная миллиметровая линейка. В геодезии при производстве топографических работ наиболее распространенными приборами для измерения расстояний служат стальные 20-метровые ленты, рулетки, оптические дальномеры. В слесарном деле используют штангенциркуль, который позволяет измерить размеры тел с точностью 0,05 мм. На предприятиях штангенциркуль является одним из основных инструментов для измерения линейных размеров различных деталей.

Высоконадежным является штангенциркуль с нониусом типа ШЦ-1 (рис. П1) с диапазоном измерений от 0 до 125 мм, что для большинства случаев вполне достаточно. Штангенциркуль дополнительно позволяет измерять диаметр отверстий и глубину.

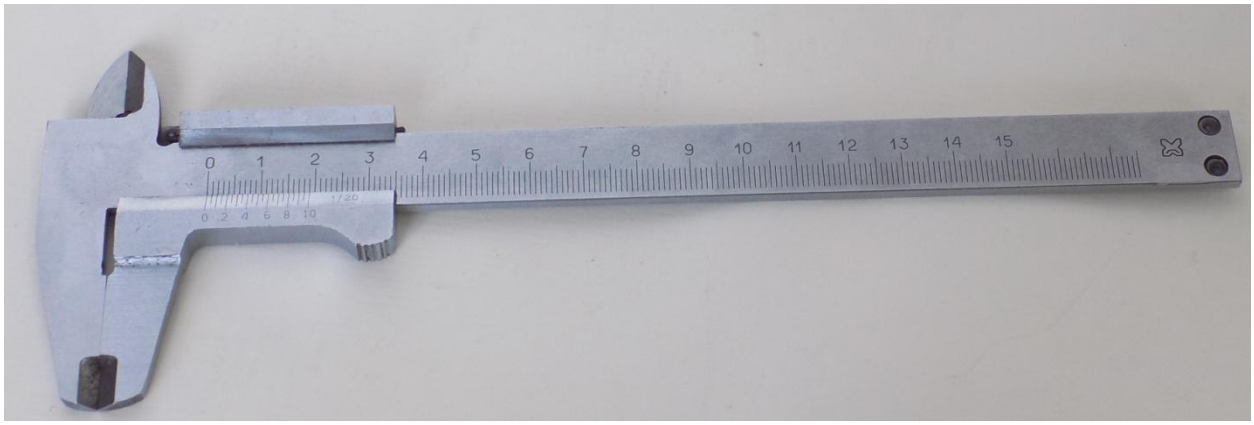


Рис. П1. Штангенциркуль ШЦ-1

Устроен штангенциркуль следующим образом (рис. П2):

На измерительной штанге (1) с помощью пазов установлена подвижная рамка (2). Для того чтобы рамка плотно сидела, внутри имеется плоская пружина и предусмотрен винт для жесткой ее фиксации (3). Фиксация необходима при проведении разметочных работ.

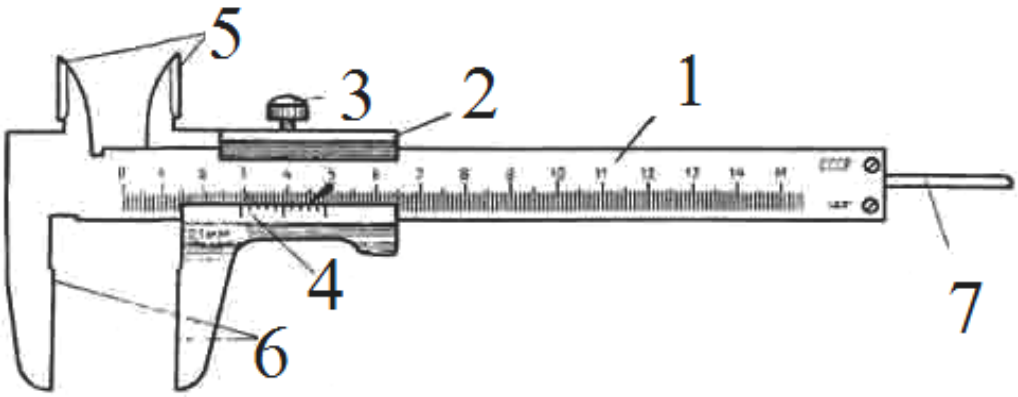


Рис. П2. Штангенциркуль:
1 – штанга, 2 – рамка, 3 – винт фиксации, 4 – нониус,
5 – губки для наружного измерения, 6 – губки для внутреннего измерения, 7 – глубиномер

На штанге нанесена метрическая шкала с шагом 1 мм и цифрами обозначены сантиметровые деления. На рамке нанесена дополнительная шкала (4). Шкала на рамке называется нониусом в честь ее изобретателя – португальского математика П. Нуниша. Штанга и рамка имеют измерительные губки для наружных (5) и внутренних измерений (6). К рамке дополнительно прикреплена линейка глубиномера (7) (рис. П3).

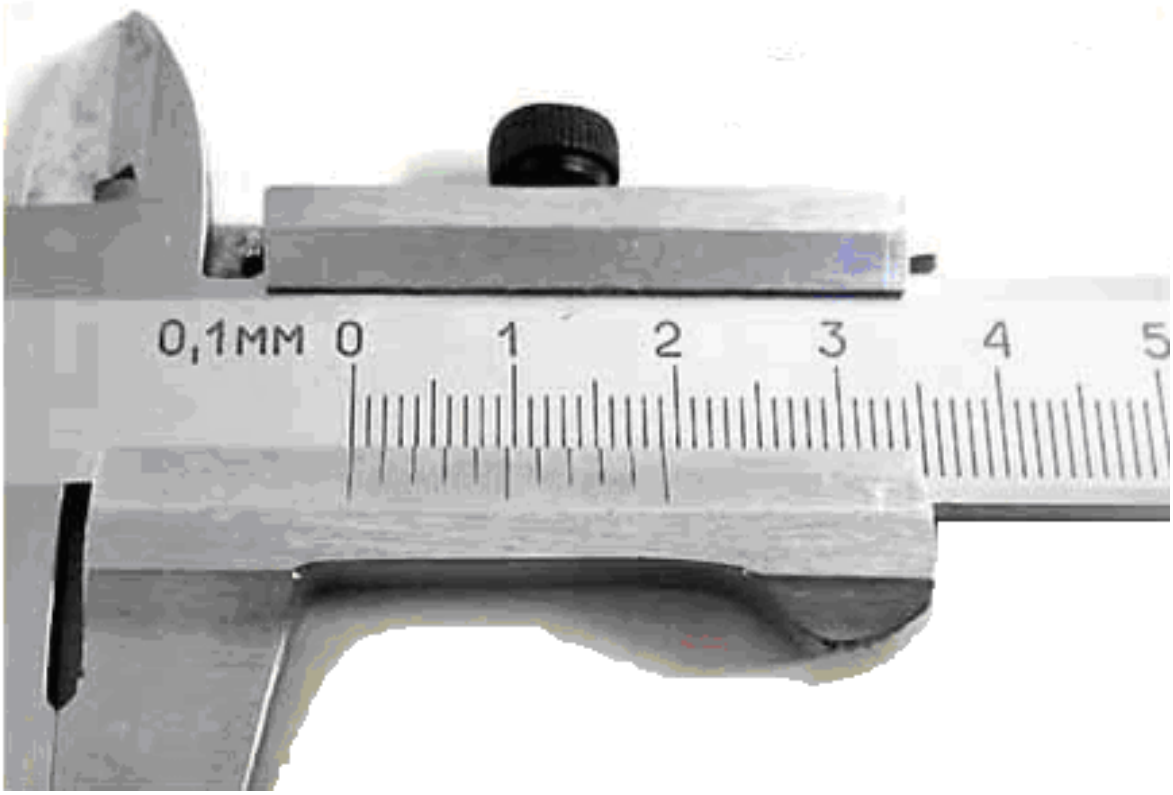


Рис. П3. Шкала штанги штангенциркуля и нониус

Измерения выполняются зажимом между губками детали. После зажима рамка фиксируется винтом (3) для того, чтобы она не сместилась и было удобно считать показания. Измеренные миллиметры отсчитываются непосредственно по шкале на штанге с ориентацией по первой риске нониуса. Десятые доли миллиметров отсчитываются непосредственно по нониусу (рис. П4).

Рис. П4. Измерения внешнего диаметра

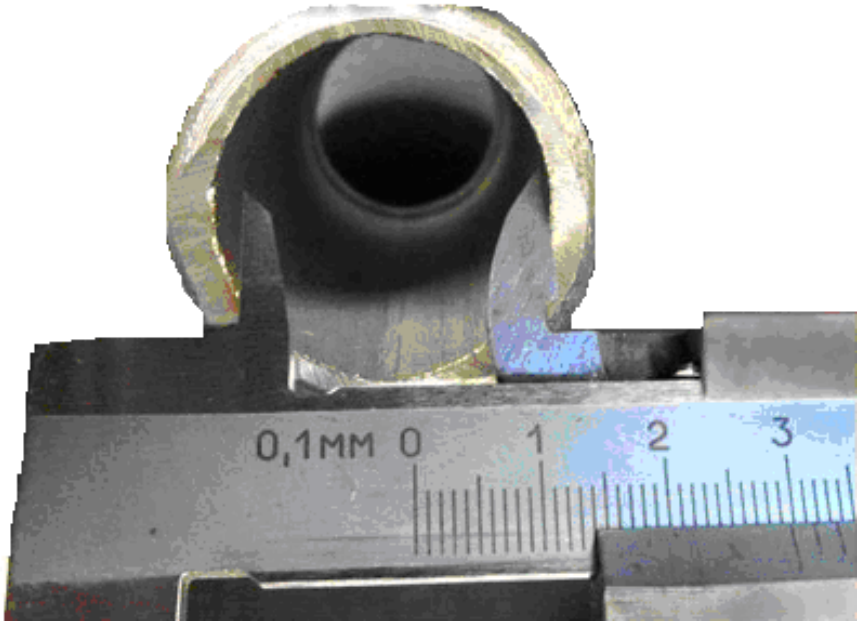


Рис. П5. Измерение внутреннего диаметра трубы

Для измерения толщины или диаметра предмета (рис. П5) нужно развести губки штангенциркуля, вставить в них предмет и свести губки до соприкосновения с поверхностью предмета. Надо просле-

дить, чтобы плоскости губок при смыкании были параллельны плоскости измеряемого предмета.

Внешний диаметр трубы измеряется точно так же, как и размер плоского предмета, только нужно, чтобы губки прикасались к диаметрально противоположным сторонам трубы. При измерении внутренних диаметров отверстий добиваются максимального показания, а при измерении в отверстии параллельных сторон добиваются минимальных показаний.

С помощью штангенциркуля, имеющего подвижную линейку глубиномера, можно измерять глубины отверстий в деталях (рис. П6). Для этого нужно полностью выдвинуть линейку глубиномера из штанги, вставить ее до упора в отверстие и подвести до упора в поверхность детали торца штанги штангенциркуля, при этом не допуская выхода линейки глубиномера из отверстия.

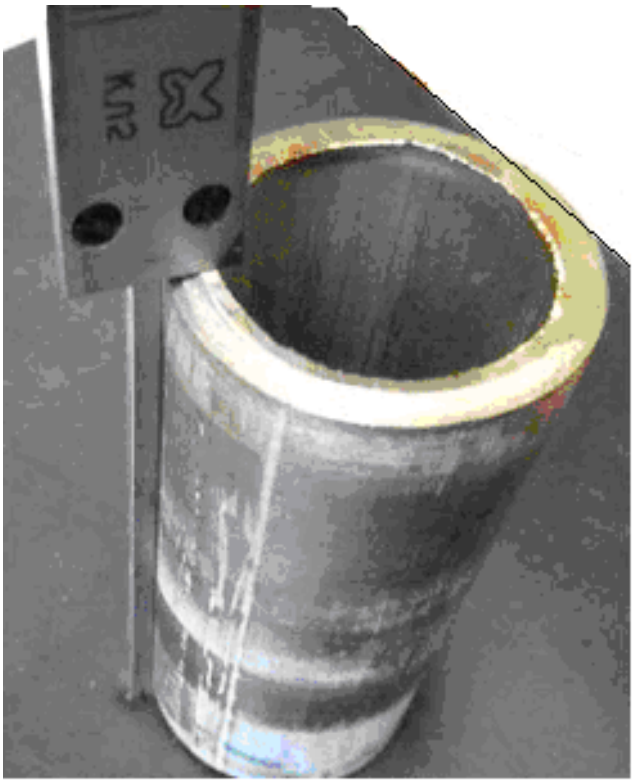


Рис. П6. Измерения глубины трубы

На рисунке для наглядности продемонстрировано измерение глубины отверстия путем приложения линейки глубиномера штангенциркуля к внешней стороне отрезка трубы.

Так каким же образом удается измерять десятые доли миллиметра, если шкала штангенциркуля имеет миллиметровые деления? Для этой цели служит вспомогательная шкала, называемая нониусом (4) (рис. П2). Длина нониуса 19 мм, поделен он на 10 равных частей, следовательно, цена каждого деления 1,9 мм. При сомкнутых губках нулевые штрихи шкалы штанги и нониуса совпадают (рис. П7), а десятый штрих нониуса совмещается с девятнадцатым штрихом миллиметровой шкалы.

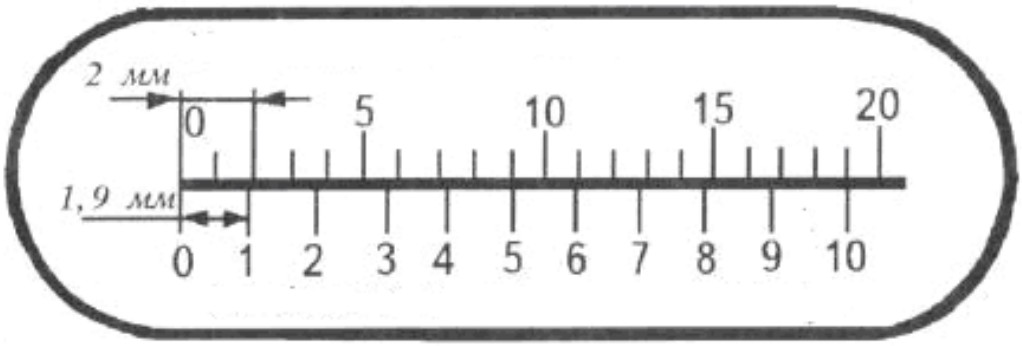


Рис. П7. Шкала нониуса

Обратите внимание на то, что первый штрих нониуса не доходит до второго штриха шкалы штанги ровно на 0,1 мм (2-1,9 = 0,1). Это и позволяет производить замеры с точностью до 0,1 мм.

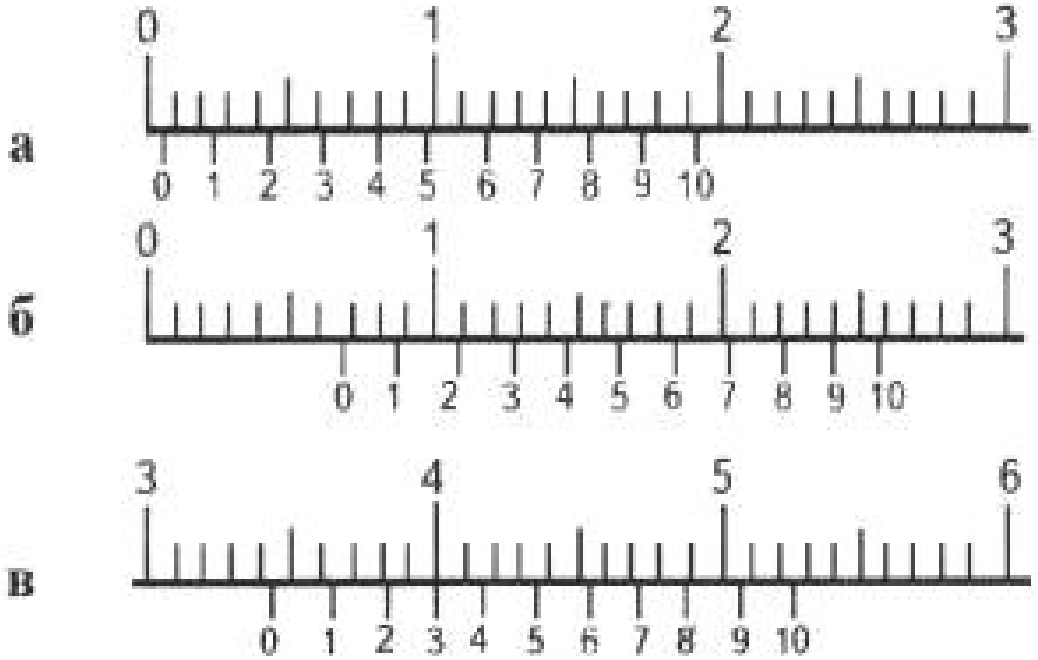


Рис. П8. Примеры взаимного расположения шкалы штанги и нониуса при измерении размеров: а – 0,4 мм; б – 6,9 мм; в – 34,3 мм

При измерении штангенциркулем целое число миллиметров отсчитывают по миллиметровой шкале штанги до нулевого штриха нониуса, а десятые доли миллиметра – по шкале нониуса от нулевой отметки до того штриха нониуса, который совпадает с каким-либо штрихом миллиметровой шкалы (рис. П8).

Помните, что штангенциркуль – это точный и дорогостоящий инструмент, требующий бережного обращения.

Порядок проведения измерений:

1. Измеряемый предмет устанавливаем между губками штангенциркуля.

Замечание. Держать инструмент следует левой рукой за неподвижные части внутренней и внешней губок.

2. Фиксируем подвижную рамку стоп-винтом.

3. Замеряем размер при помощи шкалы штанги до нониуса штангенциркуля в мм.

4. Определяем общий размер замеряемого объекта, уточняя значения десятых и сотых по делениям нониуса.

5. Освободив рамку, убираем предмет.

Пример измерения показан на рис. П9.

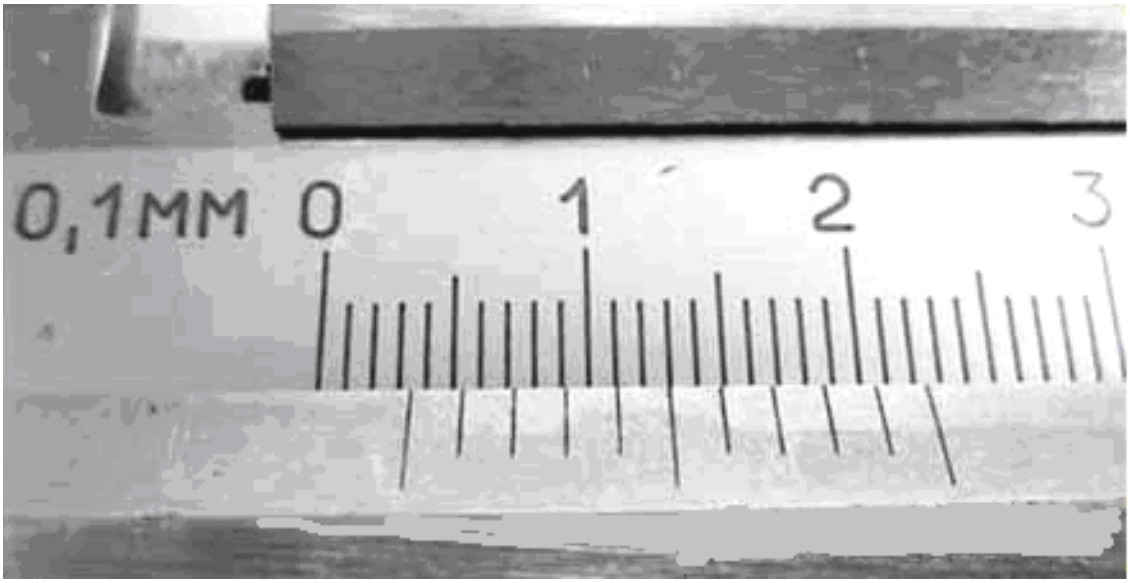


Рис. П9. Пример. Как видно из рисунка, измеренный размер составляет 3 полных деления (3 мм) и 0,5 мм на нониусе (совпала с пятая риска шкалы нониуса с риской миллиметрового деления штанги).

В результате сложения получаем: 3 мм+5·0,1 мм=3,5 мм

Однако часто и этой точности недостаточно. Тогда на помощь приходит микрометр (рис. П10).

Рис. П10. Микрометр с круговой шкалой для наружных измерений и диапазоном измерения 0–25 мм с ценой деления 0,01 мм

Микрометр – универсальный инструмент (прибор), предназначенный для измерений линейных размеров абсолютным контактным методом в области малых размеров с высокой точностью (до 5 мкм), преобразовательным механизмом которого является микропара «винт-гайка». Первый патент на микрометр как самостоятельное измерительное средство был выдан Пальмеру (Jean-Louis Palmer) в 1848 году (Франция).

Действие микрометра основано на перемещении винта вдоль оси при вращении его в неподвижной гайке (рис. П11). Перемещение пропорционально углу поворота винта вокруг оси. Полные обороты отсчитывают по шкале, нанесённой на стебле микрометра, а доли оборота – по круговой шкале, нанесённой на барабане.

Оптимальным является перемещение винта в гайке лишь на длину не более 25 мм из-за трудности изготовления винта с точным шагом на большей длине.

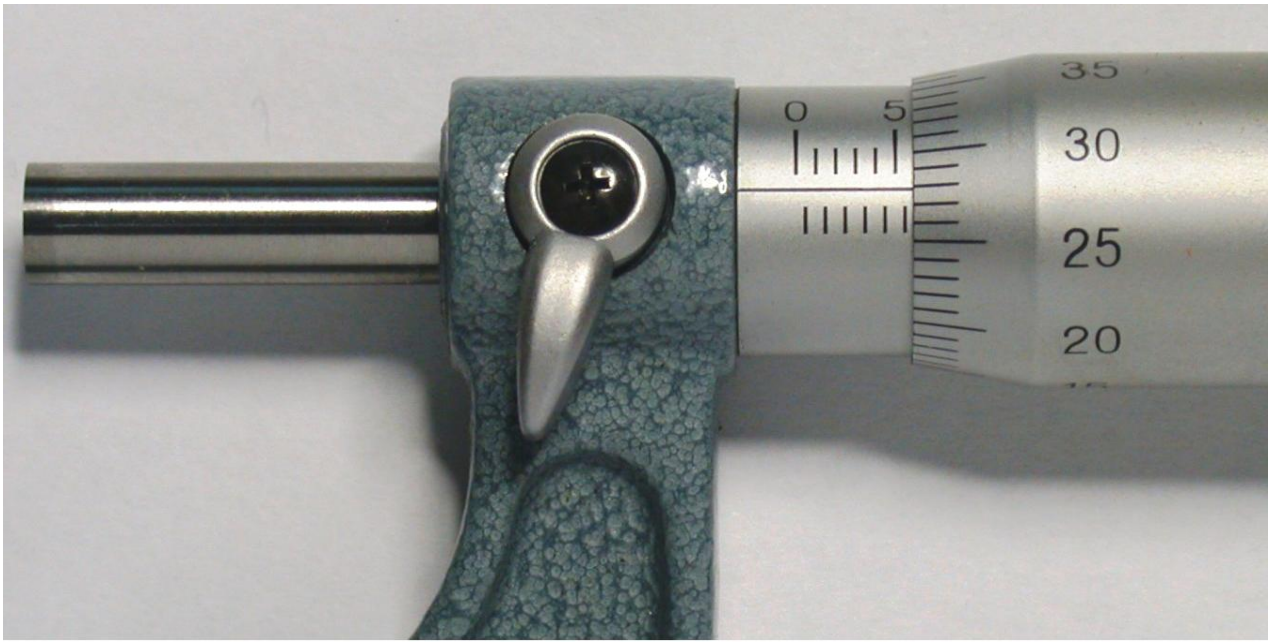


Рис. П11. Измерительные шкалы микрометра

При проведении измерений (рис. П12) предмет (2) зажимается между пяткой (1) и шпинделем микрометрического винта (3). На поверхности стебля, запрессованного в скобу (8), находятся две штриховые шкалы (5). Они смещены друг относительно друга на 0,5 мм и имеют цену деления 1 мм. Барабан (7) вращается вокруг круговой шкалы с ценой деления 0,01 мм. Микрометрический винт может быть зафиксирован в любом положении стопором (4). Винт оснащен механизмом – трещоткой (6) для обеспечения постоянства измерительного давления. При плотном соприкосновении измерительных поверхностей микрометра с поверхностью измеряемой детали трещотка начинает проворачиваться с лёгким треском, при этом вращение микровинта следует прекратить после двух-трёх щелчков.

На неподвижной части корпуса есть миллиметровая шкала, которую барабан закрывает или открывает при вращении. Для микрометров с пределами измерений от 0 до 25 мм при сомкнутых измерительных плоскостях пятки и микрометрического винта нулевой штрих шкалы барабана должен точно совпадать с продольным штрихом на стебле, а скошенный край барабана – с нулевым штрихом шкалы стебля.

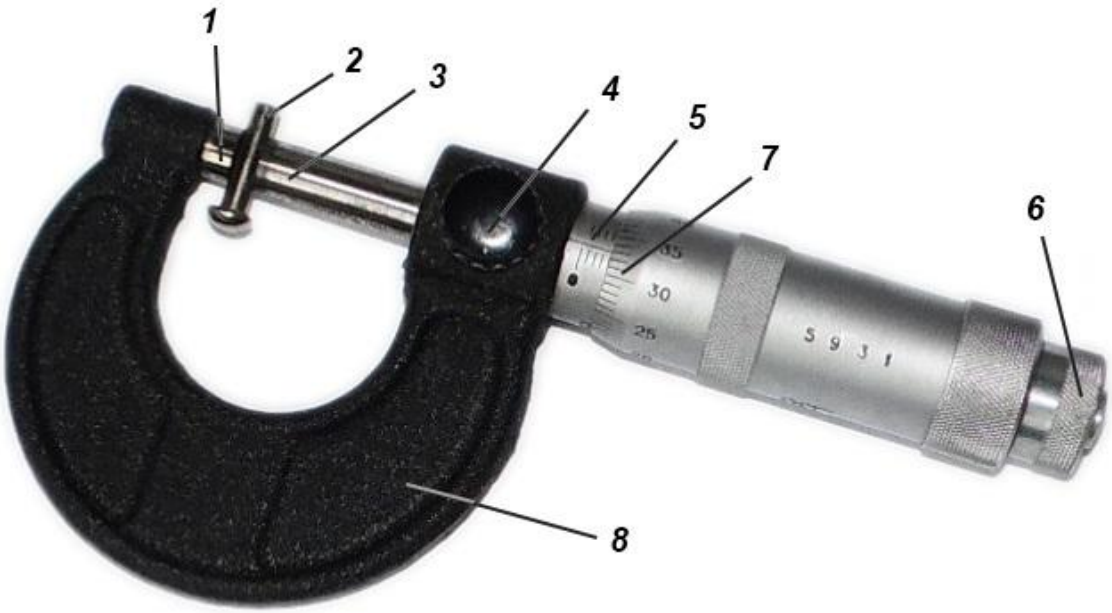


Рис. П12. Устройство микрометра:
1 – пятка, 2 – предмет, 3 – шпиндель микрометрического винта, 4 – стопор,
5 – основная штриховая шкала, 6 – трещотка, 7 – барабан, с круговой шкалой, 8 – скоба

Один оборот барабана равен 0,5 мм (барабан при этом открывает половину деления неподвижной шкалы), а цена одного деления на барабане – 0,01 мм. Поэтому при измерении предмета сначала отсчитывается целое число миллиметров по нижней (рис. П12) шкале, потом – дополнительные 0,5 мм по верхней шкале (если они есть, разумеется), а затем – число на барабане, соответствующее сотым долям миллиметра. (Не забывайте, что 1 миллиметр барабан проходит за 2 оборота, причем после первого оборота открывается полумиллиметровое деление на верхней шкале.)

Порядок проведения измерений:

1. Измеряемый предмет устанавливается между пяткой и микрометрическим винтом, при этом, вращая барабан, устанавливают шпиндель очень близко от предмета.

Замечание. Держать инструмент следует левой рукой за изоляционную часть скобы-дуги так, чтобы тепло руки не меняло размер дуги и не нарушало точность измерений.

2. Шпиндель осторожно приближают к измеряемому предмету до соприкосновения с ним.

ВНИМАНИЕ! Крутите против часовой стрелки (если смотреть с торца, где нарезка) барабан прибора, пока измеряемая деталь не зайдёт в зазор между измерительными торцами. Затем крутите по часовой стрелке до упора. Закручивать надо, только держа за нарезку на самом конце вращающегося барабана – тогда при упоре измерительных торцов в деталь эта часть барабана начнёт прокручиваться, издавая звук, как трещотка. Это значит, что измерительные торцы упёрлись в деталь и надо снимать показания. (Если крутить за большой барабан, то можно нечаянно перекрутить прибор и сорвать его.) Для более точного определения размеров предмет следует закрепить.

3. Замеряют размер в миллиметрах при помощи нониуса барабана, который соответствует горизонтальному указательному штриху шкалы стебля.

4. Определяют общий размер замеряемого объекта.

5. Вращая барабан в обратном направлении, освобождают предмет.

Пример измерения показан на рис. П13.

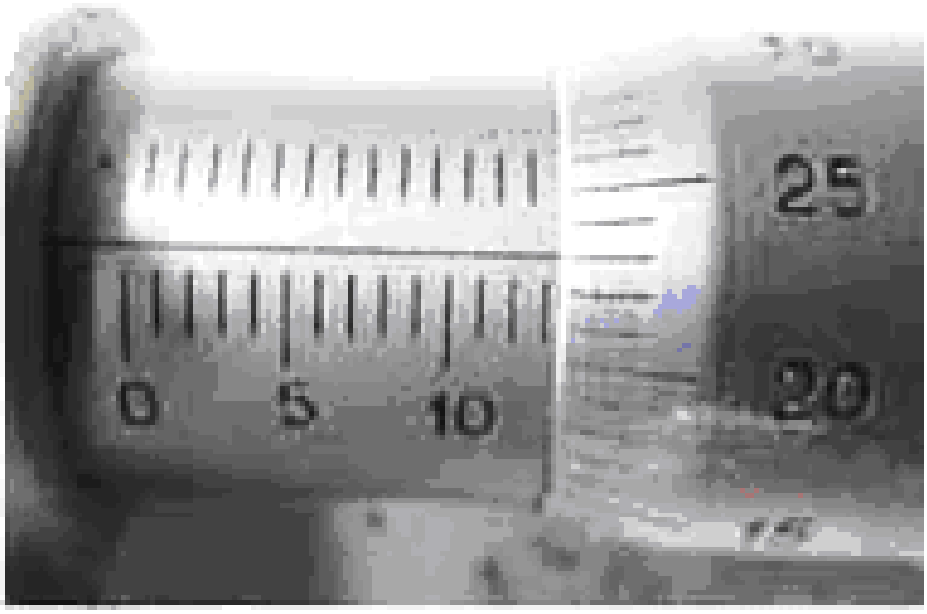


Рис. П13. Пример. Размер измеренной детали составляет: 13 мм по нижней шкале, на верхней шкале открытой метки, правее открытой на нижней шкале нет, значит, 0,5 мм добавлять не нужно, плюс 0,23 мм по шкале барабана, в результате сложения получаем: 13 мм+0 мм+0,23 мм=13,23 мм.

Контрольные вопросы

1. Для чего предназначен штангенциркуль?
2. Из каких частей состоит штангенциркуль?
3. Какие линейные размеры штангенциркуль может измерять?
4. Назовите основные элементы штангенциркуля ШЦ-1.
5. Как называется элемент штангенциркуля, предназначенный для измерения глубины отверстия?
6. В честь какого ученного названа дополнительная шкала штангенциркуля?
7. Как называется дополнительная «маленькая» шкала штангеля?
8. Какая шкала нанесена на штангу штангенциркуля?
9. Какова цена деления штанги штангенциркуля?
10. Как называются элементы штангеля, предназначенные для внутренних и внешних измерений?
11. Где отсчитываются миллиметры и сотые миллиметров на штанге?
12. Можно ли с помощью штангеля измерить глубину отверстия?
13. Какова длина нониуса?
14. Сколько делений имеет нониус штангеля?
15. Какова цена деления нониуса?
16. Какие штрихи нониуса совпадают со шкалой штанги штангеля?
17. С какой точностью можно производить измерения штангелем?
18. Как производится отсчет измеряемой величины с помощью штангеля?
19. Измерьте диаметр карандаша с помощью штангеля.
20. Что такое микрометр?
21. Для чего предназначен микрометр?
22. Кто впервые получил патент на использование микрометра?
23. Назовите основные элементы микрометра.
24. Где отсчитываются миллиметры и сотые миллиметров микрометра?
25. Какова цена деления шкал микрометра?

26. Насколько смещены относительно друг друга шкалы микрометра?

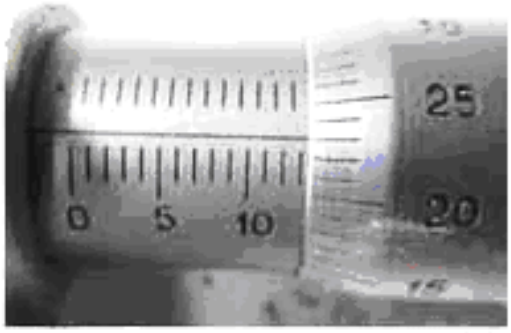
27. Какую роль выполняет трещотка микрометра?

28. Как производится отсчет измеряемой величины с помощью микрометра?

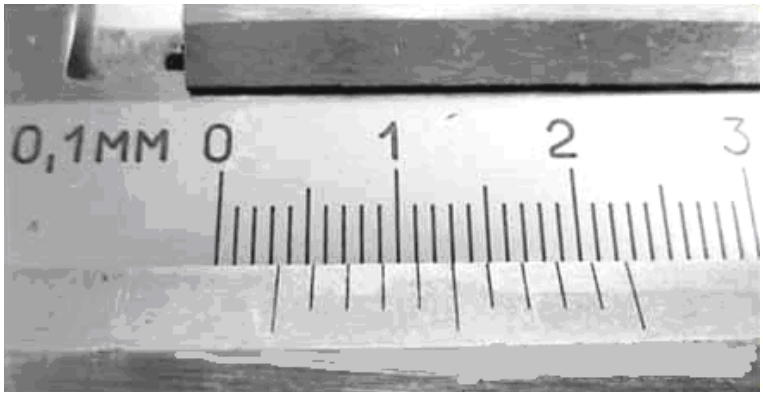
29. Какое максимальное значение измеряемой величины можно получить с помощью штангеля?

30. Какое максимальное значение измеряемой величины можно получить с помощью микрометра?

31. Снимите показания микрометра по рисунку.



32. Снимите показания штангеля по рисунку.



33. В честь какого ученного названа дополнительная шкала микрометра?

34. Как называется дополнительная «маленькая линеечка» микрометра?

35. Измерьте диаметр карандаша с помощью микрометра?

36. Какой из измерительных приборов (линейка, штангенциркуль и микрометр) обладают большей точностью измерения?

37. Сравните точность измерения высоты спичечного коробка с помощью линейкой и штангеля.

38. Сравните точность измерения высоты спичечного коробка с помощью линейкой и микрометра.

39. Сравните точность измерения высоты спичечного коробка с помощью микрометра и штангеля.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савельев, И.В. Курс физики: учеб. пособие для вузов по техн. и технолог. направлениям и спец. Т.1. Механика. Молекулярная физика / И.В. Савельев. – Изд. 4-е, стер. – М.: Лань, 2008. – 351с. – ISBN:978-5-8114-0684-5 (общ.) 978-5-8114-0685-2 (т. 1).

2. Савельев, И.В. Курс физики: учеб. пособие для вузов по техн. и технолог. направлениям и спец. Т.2. Электричество. Колебания и волны. Волновая оптика / И.В. Савельев. – Изд. 4-е., стер. – М.: Лань, 2008. – 467с. – ISBN:978-5-8114-0684-5 (общ.) 978-5-8114-0686-9 (т. 2).

3. Савельев, И.В. Курс физики: учеб. пособие для вузов по техн. и технолог. направлениям и спец. Т.3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц / И.В. Савельев. – Изд. 3-е,стер. – М.: Лань, 2007. – 302с. – ISBN:978-5-8114-0684-5 (общ.) 978-5-8114-0687-6 (т. 3).

4. Трофимова, Т.И. Курс физики: учеб. пособие для инж.-техн. спец. вузов / Т.И. Трофимова. – 14-е изд., стер. – М.: Academia, 2007. – 560 с. – ISBN:978-5-7695-3936-7.

5. Бухман, Н.С. Оптика и квантовая физика: лабораторный практикум / Н.С. Бухман и др.; под ред. Н.С. Бухмана. – Самара: СГАСУ, 2007. – 160 с.

6. Бухман, Л.М. Лабораторный практикум по курсу «Концепции современного естествознания»: учебное пособие для лабораторных занятий и самостоятельной работы студентов / Л.М. Бухман, Н.С. Бухман. – Самара: СГАСУ, 2011. – 252 с.

7. Бухман, Н.С. Концепции современного естествознания. Ч. 1. Физика и астрономия / Н.С. Бухман, Л.М. Бухман. – Самара: СГАСУ, 2012. – 104 с.

8. Механика и молекулярная физика: лабораторный практикум / Н.С. Бухман [и др.]; под ред. Н.С. Бухмана и А.В. Пашина. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2018. – 180 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3
Введение 7
1. Корпускулярная и континуальная картина мира. Магдебургские полушария и воздушный колокол 24
2. Свободное падение тел. Трубка Ньютона 39
3. Изучение затухающих колебаний 49
4. Магнетизм, рамка Эрстеда и великие объединения 89
5. Геометрическая оптика. Телескоп 104
6. Геометрическая оптика. Микроскоп 130
7. Поляризация света. Спин микрочастицы 184
8. Интерференция. Кольца Ньютона 207
9. Дифракция. Дифракционная решетка 223
10. Законы сохранения. Изучение столкновения тел 248
11. Динамика вращательного движения (Лабораторная работа № 2-I) 268
12. Модуль кручения тела. Определение модуля кручения с помощью крутильного маятника 296
13. Модуль сдвига. Определения модуля сдвига на крутильном маятнике 311
14. Молекулярное строение вещества. Определение средней длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул воздуха 326
15. Внутреннее трение. Определение вязкости жидкости методом Стокса 335
16. Равноускоренное движение. Определение ускорения свободного падения 355
17. Абсолютная и относительная влажность. Определение относительной влажности воздуха 437
18. Зависимость сопротивления проводников от температуры. Определение температурного коэффициента сопротивления 469
19. Магнитное поле земли. Определение горизонтальной составляющей магнитного поля земли 479
Заключение 491
Приложение 492
Список рекомендованной литературы 505

Учебное издание

Избранные главы курса физики

Под редакцией
Н.С. Бухмана и А.В. Пашина

Используемое программное обеспечение:
Microsoft Office 2003

Редактор *Е.С. Захарова*
Вёрстка *И.О. Миняева*
Выпускающий редактор *Ю.А. Петропольская*

Подписано к использованию 25.12.19
Объем 71 Мб
Тираж 15 CD-R. Рег. № Е14/19

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский государственный технический университет»
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Главный корпус