

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«Национальный исследовательский
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»**

**МЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ.
ЧАСТЬ 1**

Учебно-методическое пособие

Рекомендовано методической комиссией Института биологии и биомедицины
для студентов ННГУ, обучающихся по специальностям 31.05.01 «Лечебное
дело» и 31.05.03 «Стоматология»

Нижегород
2022

УДК 53.082, 61:577.3

ББК 22.3

М42

М42 МЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ.
ЧАСТЬ 1. Составители: Юдинцев А.В., Шерстнева О.Н., Пескова Н.Н., Герасимова С.А.: Учебно-методическое пособие. — Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2022. — 54 с.

Рецензент: к.ф.-м.н. П.А. Шилягин

В настоящем учебно-методическом пособии изложены краткие теоретические основы отдельных разделов физики, включая механику и оптику. Дано описание лабораторных работ, посвященных изучению гармонических колебаний, оптических свойств глаза, устройству и принципу работы рефрактометра.

Учебно-методическое пособие составлено в соответствии с учебными планами дисциплины «Физика. Медицинская физика» и предназначено для студентов 1 курса ННГУ, обучающихся по специальностям 31.05.01 «Лечебное дело» и 31.05.03 «Стоматология».

Ответственный за выпуск
председатель методической комиссии Института биологии и биомедицины
ННГУ, к.б.н. **Е.Л. Воденеева**

УДК 53.082, 61:577.3

ББК 22.3

Содержание

Введение	4
Лабораторная работа № 1. Математический маятник.....	5
Лабораторная работа №2. Основные понятия геометрической оптики. Определение показателя преломления оптических материалов	20
Лабораторная работа № 3. Основные понятия геометрической оптики. Глаз как оптическая система.....	35

ВВЕДЕНИЕ

Медицинская физика представляет собой комплекс разделов прикладной физики, рассматривающих физические законы, явления и процессы, которые могут быть применимы при решении задач медицины.

Прежде всего, знание физики необходимо для понимания устройства и функционирования приборов, используемых в медицине. Отсутствие или недостаток фундаментальных представлений о физических методах часто не позволяет полноценно использовать не только новейшее (такое как хирургический робот или система для радиохирургии и лучевой терапии), но и имеющееся в доступе простое (весы, вискозиметры, стетоскопы, аппараты Панченкова, рефрактометры) медицинское оборудование.

Понимание физических принципов функционирования организма, позволяет точнее вникнуть в суть явлений, возникающих в теле, найти тонкий подход для проведения диагностики и выбрать оптимальный из возможных методов воздействия. Хорошо подкованный в физике доктор видит потенциальные возможности и ограничения каждого применяемого им физического метода.

Овладение практическими навыками работы с экспериментальным оборудованием и освоение методов анализа полученных данных являются главными задачами лабораторного практикума по медицинской физике. Практикум охватывает задачи, покрывающие такие разделы физики, как механика, оптика и электродинамика, которые имеют большое применение в медицине как в диагностических, так и в терапевтических целях.

В настоящем учебно-методическом пособии рассматриваются первые три лабораторные работы, входящие в состав практикума по медицинской физике. В первой работе большое внимание уделяется изучению теоретических принципов, лежащих в основе гармонических колебаний. Это связано с широким применением понятия о гармонических колебаниях в медицине. При этом представленный в пособии теоретический материал сопровождается комментариями, позволяющими читателю лучше разобраться с математическими выкладками, используемыми при описании физических законов. Последние две лабораторные работы посвящены применению основ геометрической оптики в медицине.

Для удобства в данном учебно-методическом пособии материалы по теории приводятся перед описанием каждой из лабораторных работ.

Учебно-методическое пособие дополняет теоретический материал по курсу «Физика. Медицинская физика» и может быть полезно для студентов медицинских и медико-биологических специальностей.

Лабораторная работа № 1. Математический маятник

Цель: Изучение гармонических колебаний на примере малых колебаний математического маятника.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Повторяющиеся во времени движения или изменения физического состояния называют **колебаниями**. Примерами колебаний являются электрический ток, движения маятника, работа сердца и т.п.

Колебательным движением механической системы называется периодическое движение системы в окрестности положения равновесия. Всем колебаниям независимо от их природы присущи общие закономерности. В среде колебания распространяются в виде волн.

Колебания могут иметь различную природу: механическую, электромагнитную, электромеханическую и др.

В зависимости от характера воздействия на колеблющуюся систему различают: свободные (или собственные), затухающие, вынужденные, а также автоколебания и параметрические колебания.

Свободными или **собственными** называются такие колебания, которые происходят в системе, предоставленной самой себе после того, как она была выведена из положения равновесия.

Свободные колебания совершаются под действием внутренних сил системы после того, как система была выведена из состояния равновесия. Примером свободных колебаний могут служить колебания груза на пружине или колебания маятника, выведенного из положения равновесия.

Вынужденными называются такие колебания, в процессе которых колеблющаяся система подвергается воздействию внешней периодически изменяющейся силы.

Автоколебания, как и вынужденные колебания, сопровождаются воздействием на колеблющуюся систему внешней силы; однако моменты времени, когда осуществляются эти воздействия, задаются самой колеблющейся системой — **система сама управляет внешним воздействием**.

При **параметрических** колебаниях за счет внешнего воздействия происходит периодическое изменение какого-либо параметра системы.

Гармонические колебания

Наиболее простой формой колебаний являются **гармонические колебания**, при которых колеблющаяся величина изменяется по закону синуса или косинуса (рис. 1).

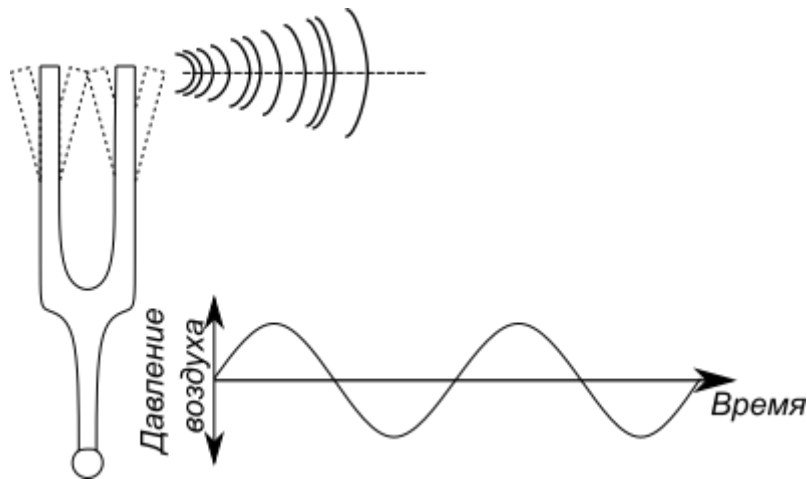


Рис. 1. Пример гармонических колебаний — звуковая волна

Этот вид колебаний особенно важен, поскольку часто изменения физических параметров имеют характер, очень близкий к гармоническим колебаниям.

Периодические процессы, имеющие более сложную зависимость от времени, могут быть представлены как наложение нескольких гармонических колебаний (рис. 2).

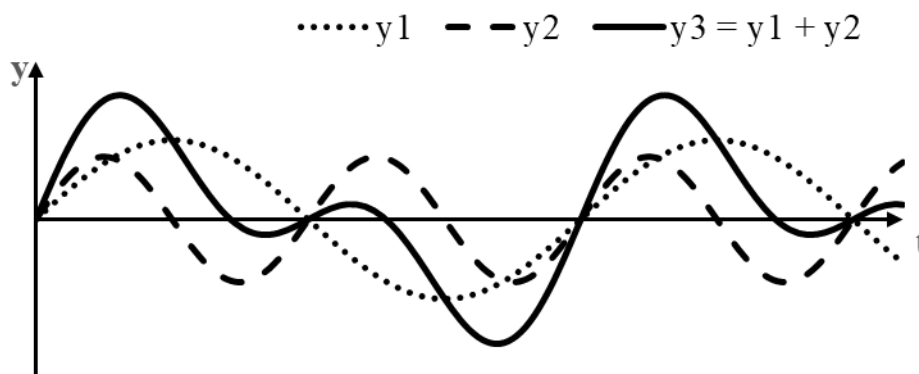


Рис. 2. Наложение двух волн, имеющих различные амплитуды и длины волн. Результирующая волна получается в результате векторного суммирования амплитуд обеих волн в каждой точке среды для данного момента времени

Гармонические незатухающие колебания описываются линейным дифференциальным уравнением второго порядка:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = 0, \quad (1)$$

где x — смещение от положения равновесия, ω — циклическая частота колебаний.

Решением этого уравнения являются тригонометрические функции, описывающие гармонические колебания:

$$x(t) = A \sin(\omega t + \alpha); \quad (2)$$

$$x(t) = A \cos(\omega t + \alpha); \quad (3)$$

где $x(t)$ — смещение; A — амплитуда колебаний (максимальное отклонение величины x от равновесного положения); α — начальная фаза колебаний; $\omega t + \alpha$ — фаза колебаний в некоторый текущий момент времени t .

В общем случае, $x(t)$ может быть представлена любой физической величиной, которая претерпевает периодические изменения: механическим смещением, электрическим зарядом, напряжением, давлением, температурой и т.п.

Следует отметить, что в реальной жизни строго гармонических колебаний не существует. Все периодические процессы, протекающие в природе, являются негармоническими. Однако, если амплитуда колебаний мала, отличия реальных колебаний от гармонических небольшие. Так что можно применять закономерности, характерные для гармонических колебаний.

В качестве примера колебательного движения, поясняющего физические условия, при которых совершаются гармонические колебания, может служить движение математического маятника.

Маятники

Маятником называется твердое тело, подвешенное в поле силы тяжести и совершающее механические колебания вокруг неподвижной точки или оси вращения под действием сил тяжести, упругости и трения.

Во время колебаний маятника происходит превращение энергии: кинетическая энергия превращается в потенциальную, потенциальная — в кинетическую. Часть кинетической энергии преобразуется в тепловую, за счет сил трения.

Рассмотрим свободные колебания математического маятника.

Математический маятник — это идеализированная система, состоящая из *невесомой* и *нерастяжимой* нити, на одном конце которой прикреплена масса, сосредоточенная в одной точке (материальная точка).

Приближением такой системы является небольшой тяжелый шарик, подвешенный на тонкой длинной нити, при условии, что радиус шарика много меньше длины нити l (рис. 3).

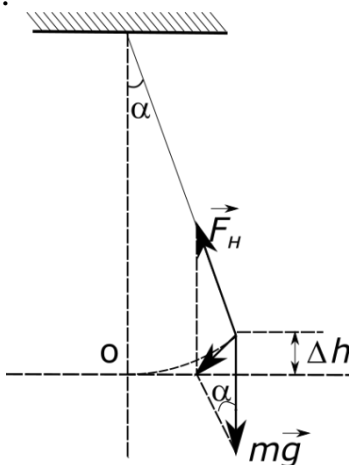


Рис. 3. Математический маятник

Вертикальное положение маятника соответствует его равновесному состоянию. Если маятник отклонить от положения равновесия на небольшой угол α (угол, образованный нитью с вертикалью) и отпустить его, предоставив систему самой себе, то маятник начнет совершать колебательные движения вокруг положения равновесия.

Когда математический маятник отклонен от положения равновесия на малый угол α , его траекторию можно считать прямой линией, направленной вдоль оси OX . В этом случае выполняется следующее соотношение:

$$\alpha \approx \sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha \approx \frac{x}{l}, \quad (4)$$

где x — смещение материальной точки относительно положения равновесия; l — длина нити маятника.

На грузик маятника действует сила тяжести $m\vec{g}$, направленная вертикально вниз и сила натяжения нити \vec{F}_H . Равнодействующая этих сил имеет две составляющие: тангенциальную, которая отвечает за изменение ускорения по величине, и нормальную — изменяющую ускорение по направлению. Нормальная составляющая ускорения в этом случае соответствует центростремительному ускорению, поскольку тело движется по дуге.

Поскольку угол наклона нити мал, тангенциальная составляющая равнодействующей силы (направленная по касательной к траектории) равна проекции силы тяжести на касательную к траектории движения: $ma_\tau = -mg \sin \alpha$.

Как известно из геометрии, величина угла в радианах¹ равна отношению длины дуги к радиусу. В случае математического маятника радиус равен длине нити подвеса. Тогда угол наклона нити равен: $\alpha = \frac{S}{l}$. С другой стороны, длина дуги малого угла приблизительно равна смещению: $S \approx x$, и $\sin \alpha \approx \alpha$.

Таким образом, для тангенциальной составляющей ускорения маятника получим следующее выражение:

$$a_\tau = -g \sin \alpha = -g \frac{S}{l} = -\frac{g}{l} x. \quad (5)$$

Для того, чтобы свободные колебания математического маятника совершались по гармоническому закону, необходимо, чтобы сила, стремящаяся вернуть тело в положение равновесия (рис. 4), была пропорциональна смещению тела из положения равновесия:

$$F = -kx, \quad (6)$$

где k — коэффициент пропорциональности.

¹ Радиан — это центральный угол, опирающийся на дугу, длина которой равна радиусу окружности. 1 радиан приблизительно равен 57 градусам.

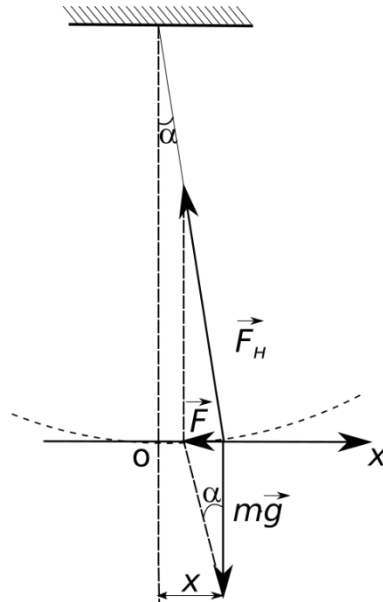


Рис. 4. Диаграмма сил, действующих на маятник

Знак минус в этом выражении показывает, что сила всегда направлена в сторону положения равновесия (противоположно отклонению x). То есть, если тело отклонилось вправо, равнодействующая сила будет направлена влево и наоборот.

С учетом вышесказанного, модуль равнодействующей всех сил, действующих на математический маятник, равен:

$$F = -mg \operatorname{tg} \alpha = -mg \frac{x}{l} = -kx, \quad (7)$$

где $k = \frac{mg}{l}$. Полезно сравнить полученное выражение для равнодействующей силы с уравнением Гука для силы упругости.

Равнодействующая сила, действующая на математический маятник, подобно упругой силе, пропорциональна смещению материальной точки и направлена в сторону к положению равновесия.

Такие силы, неупругие по своей природе, но аналогичные по свойствам силам, возникающим при малых деформациях упругих тел, называют **квазиупругими силами**.

Подставляя полученное для равнодействующей силы выражение в формулу для второго закона Ньютона ($\vec{F}_{\text{равн}} = m\vec{a}$), учитывая, что $a = \frac{d^2x}{dt^2}$, получим уравнение движения математического маятника (уравнение колебаний):

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx; \quad (8)$$

Разделим обе части уравнения на m и введем обозначение $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$. Перепишем дифференциальное уравнение второго порядка для ускорения в виде:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega_0^2 x. \quad (9)$$

С другой стороны, выше было показано, что $a_\tau = -\frac{g}{l}x$. Сравнивая последние два выражения видно, что $\omega_0^2 = g/l$ или $\omega_0 = \sqrt{g/l}$. Где ω_0 — циклическая частота колебаний математического маятника.

Решение уравнения колебаний маятника имеет вид:

$$x = x_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (10)$$

где $(\omega_0 t + \varphi_0)$ — фаза колебаний; φ_0 — начальная фаза (при $t = 0$); ω_0 — круговая частота колебаний (или собственная круговая частота колебаний, циклическая частота колебаний). x_0 — амплитуда колебаний. Амплитуда и начальная фаза колебаний определяются начальными условиями движения, т.е. положением и скоростью материальной точки в момент времени $t = 0$.

Система, совершающая колебания, описываемые последним уравнением, называется гармоническим осциллятором.

Материальная точка, подвешенная на нити, совершает гармонические колебания. Поскольку косинус изменяется в пределах от -1 до +1, значения x_0 лежат в пределах от $-x_0$ до $+x_0$.

Наибольшая величина отклонения от положения равновесия называется амплитудой колебаний (часто амплитуду колебаний обозначают буквой A).

Амплитуда колебаний (A) — это постоянная положительная величина, равная максимальному отклонению от положения равновесия ($A = x_{max}$).

Аргумент косинуса — величина $\varphi = \omega_0 t + \varphi_0$, называется **фазой колебаний**.

Постоянная величина φ_0 представляет собой значение фазы в момент времени $t = 0$ и называется **начальной фазой** колебаний. Значение начальной фазы определяется выбором начала отсчета времени.

Функции синуса и косинуса имеют период равный 2π . Следовательно, состояния гармонически колеблющейся системы повторяются через промежутки времени Δt , за которые фаза колебаний получает приращение $\Delta\varphi = \varphi + \varphi_0$, равное 2π .

Периодом гармонического колебания T называется такой промежуток времени, за который фаза колебаний получает приращение, равное 2π , т.е. совершается одно полное колебание.

То есть, если $\Delta\varphi = \omega_0 \Delta t = 2\pi$, и $\Delta t = T$ для полного колебания справедливо:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0}. \quad (11)$$

Величина $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ — называется **собственной циклической частотой** гармонических колебаний. Размерность ω_0 — [рад./сек]. Значение ω_0 показывает какое количество гармонических колебаний произошло за интервал времени 2π секунд.

Величина обратная периоду колебаний называется частотой колебаний:

$$\nu_0 = \frac{1}{T} = \frac{\omega_0}{2\pi}. \quad (12)$$

Величина ν_0 показывает число колебаний в единицу времени. За единицу частоты принимают Герц (Гц) — частоту такого колебания, период которого равен 1с:

$$1\text{Герц} = \left[\frac{1}{c} \right] = \frac{1\text{колебание}}{1\text{секунду}}. \quad (13)$$

Зависимость периода колебаний математического маятника от длины подвеса, амплитуды колебаний и массы маятника

Рассмотрим колебания математического маятника с точки зрения закона сохранения энергии.

Если Δh — это изменение высоты положения тела, массой m , изменение потенциальной энергии этого тела в поле силы тяжести (при изменении высоты на Δh) равно $\Delta E_p = mg\Delta h$,

$$\Delta E_p = mgh_1 - mgh_2 = mgl - mgl \cos \alpha = mgl(1 - \cos \alpha). \quad (14)$$

По мере подъема маятника — потенциальная энергия тела увеличивается и достигает наибольшего значения при максимальной амплитуде колебаний, соответствующей углу α_0 .

При отсутствии диссипативных процессов, полная механическая энергия E_0 системы остается неизменной и равной максимальной потенциальной (или максимальной кинетической энергии), то есть:

$$E_0 = mgl(1 - \cos \alpha_0). \quad (15)$$

Кинетическая энергия твердого тела равна арифметической сумме кинетических энергий всех точек системы:

$$E_k = \sum \frac{m_i v_i^2}{2}, \quad (16)$$

где m_i — элементарная масса точки тела; v_i^2 — квадрат скорости движения данной точки тела.

Движение математического маятника является движением по окружности с радиусом равным длине нити подвеса маятника. В этом случае, по законам кинематики, скорость точки, находящейся на расстоянии h_i от оси вращения равна

$$v_i = \omega h_i, \quad (17)$$

где ω — угловая скорость тела. Подставляя данное выражение в уравнение для кинетической энергии (16) получим:

$$E_k = \sum \frac{m_i v_i^2}{2} = \sum \frac{m_i \omega^2 h_i^2}{2} = \frac{1}{2} \omega^2 \sum \frac{m_i h_i^2}{2}. \quad (18)$$

Величина, стоящая по знаком суммы называется моментом инерции твердого тела I :

$$I = \sum \frac{m_i h_i^2}{2}. \quad (19)$$

Таким образом, кинетическая энергия математического маятника равна:

$$E_k = \frac{1}{2} I \omega^2, \quad (20)$$

Угловая скорость ω может быть выражена через угол наклона нити подвеса α (угловая скорость характеризует быстроту изменения угла поворота и равна производной от угла по времени):

$$\omega = \frac{d\alpha}{dt}. \quad (21)$$

Так как размер груза пренебрежимо мал по сравнению с расстоянием от точки подвеса до центра тяжести грузика, то момент инерции маятника равен:

$$I = ml^2, \quad (22)$$

где m — масса грузика маятника; l — расстояние от оси вращения (подвески) до центра груза.

Таким образом, полная механическая энергия рассматриваемой системы будет равна:

$$\begin{aligned} E_0 = mgl(1 - \cos \alpha_0) = E_k + E_p &= \frac{1}{2}I\omega^2 + mgl(1 - \cos \alpha) = \\ &= \frac{1}{2}ml^2 \left(\frac{d\alpha}{dt}\right)^2 + mgl(1 - \cos \alpha), \end{aligned} \quad (23)$$

где α — угол наклона нити подвеса в данный момент времени (амплитуда раскачивания); α_0 — максимально возможный угол отклонения маятника от положения равновесия. Преобразуем данное уравнение:

$$\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)^2 = \frac{2g}{l}(1 - \cos \alpha_0) - \frac{2g}{l}(1 - \cos \alpha) = \frac{2g}{l}(\cos \alpha - \cos \alpha_0), \quad (24)$$

Отсюда

$$\frac{d\alpha}{dt} = \sqrt{\frac{2g}{l}(\cos \alpha - \cos \alpha_0)}. \quad (25)$$

Разделим переменные:

$$dt = \frac{d\alpha}{\sqrt{\frac{2g}{l}(\cos \alpha - \cos \alpha_0)}} \quad (26)$$

Интегрирование данного выражения позволяет определить интервал времени, за который угол наклона нити маятника (по отношению к вертикали) изменяется от 0 до α_0 . Этот интервал времени — четвертая часть полного периода колебаний маятника. Таким образом, умножив интеграл на 4 получим выражение для полного периода колебаний маятника:

$$T = 4 \int_0^{\alpha_0} \frac{d\alpha}{\sqrt{\frac{2g}{l}(\cos \alpha - \cos \alpha_0)}} = 4 \sqrt{\frac{l}{2g}} \int_0^{\alpha_0} \frac{d\alpha}{\sqrt{\cos \alpha - \cos \alpha_0}}. \quad (27)$$

Преобразуем выражение, стоящее под знаком корня с учетом того, что $1 - \cos \alpha = 2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}$:

$$\cos \alpha - \cos \alpha_0 = (1 - \cos \alpha_0) - (1 - \cos \alpha) = 2 \left(\sin^2 \frac{\alpha_0}{2} - \sin^2 \frac{\alpha}{2} \right). \quad (28)$$

После подстановки получим следующее выражение:

$$T = 2 \sqrt{\frac{l}{g}} \int_0^{\alpha_0} \frac{d\alpha}{\sqrt{\sin^2 \frac{\alpha_0}{2} - \sin^2 \frac{\alpha}{2}}}. \quad (29)$$

Полученный интеграл относится к классу интегралов эллиптического типа, его решение может быть получено в виде сходящегося тригонометрического ряда².

Для вычисления данного интеграла сделаем замену переменных с помощью следующего равенства:

$$\sin \frac{\alpha}{2} = u \cdot \sin \frac{\alpha_0}{2}; u = \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\sin \frac{\alpha_0}{2}}. \quad (30)$$

Поскольку угол отклонения нити маятника может изменяться в пределах интервала $0 \leq \alpha \leq \alpha_0$, новая переменная u будет принадлежать интервалу от 0 до 1 ($0 \leq u \leq 1$). Продифференцировав выражения для $\sin \frac{\alpha}{2}$ получим:

$$\frac{1}{2} \cos \frac{\alpha}{2} d\alpha = \sin \frac{\alpha_0}{2} du; d\alpha = \frac{2 \sin \frac{\alpha_0}{2}}{\cos \frac{\alpha}{2}} du. \quad (31)$$

Подставим новую переменную в интеграл для определения периода колебаний и продолжим математические преобразования:

$$\begin{aligned} T &= 2 \sqrt{\frac{l}{g}} \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{\sin^2 \frac{\alpha_0}{2} - \sin^2 \frac{\alpha}{2}}} \cdot \frac{2 \sin \frac{\alpha_0}{2}}{\cos \frac{\alpha}{2}} du = 2 \sqrt{\frac{l}{g}} \int_0^1 \frac{2 \sin \frac{\alpha_0}{2}}{\cos \frac{\alpha}{2} \sqrt{\sin^2 \frac{\alpha_0}{2} - \sin^2 \frac{\alpha}{2}}} du = \\ &= 2 \sqrt{\frac{l}{g}} \int_0^1 \frac{2 \sin \frac{\alpha_0}{2} du}{\sqrt{1-u^2 \sin^2 \frac{\alpha_0}{2}} \cdot \sqrt{\sin^2 \frac{\alpha_0}{2} - \sin^2 \frac{\alpha}{2}}} = 4 \sqrt{\frac{l}{g}} \int_0^1 \frac{\sin \frac{\alpha_0}{2}}{\sqrt{1-u^2 \sin^2 \frac{\alpha_0}{2}} \cdot \sqrt{\sin^2 \frac{\alpha_0}{2} (1-u^2)}} du = \\ &= 4 \sqrt{\frac{l}{g}} \int_0^1 \frac{du}{\sqrt{1-u^2 \sin^2 \frac{\alpha_0}{2}} \cdot \sqrt{1-u^2}}. \end{aligned} \quad (32)$$

Введем обозначение $k = \sin \frac{\alpha_0}{2}$. Тогда получим выражение в новых переменных:

$$T = 4 \sqrt{\frac{l}{g}} \int_0^1 \frac{du}{\sqrt{(1-u^2) \cdot (1-k^2 u^2)}}. \quad (33)$$

Поскольку $k^2 u^2 < 1$ на всем интервале интегрирования, то функцию $(1 - k^2 u^2)^{-1/2}$ можно разложить в степенной ряд³:

$$\frac{1}{\sqrt{1-k^2 u^2}} = 1 + \frac{1}{2} k^2 u^2 + \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4} k^4 u^4 + \dots + \frac{1 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (2n-1)}{2 \cdot 4 \cdot \dots \cdot 2n} k^{2n} u^{2n} + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} c_n k^{2n} u^{2n}, \quad (34)$$

где $c_0 = 1, c_n = \frac{1 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (2n-1)}{2 \cdot 4 \cdot \dots \cdot 2n}, (n > 0)$.

² Решение интегралов выходит за рамки настоящего курса. Поэтому представленное ниже решение приводится для ознакомления.

³ Если функция $f(x)$ на некотором интервале содержащем точку a имеет непрерывные производные всех порядков (вплоть до $(n+1)$ -го порядка), то для разложения в степенной ряд к ней может быть применена **формула Тейлора**: $f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} f^{(n)}(a) \frac{(x-a)^n}{n!} = f(a) + \frac{f'(a)}{1!} (x-a) + \frac{f''(a)}{2!} (x-a)^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(a)}{n!} (x-a)^n + R_n$. Где R_n – остаточный член, определяемый выражением $R_n = \frac{f^{(n+1)}(\xi)(x-a)^{n+1}}{(n+1)!}, a < \xi < x$; $n!$ – обозначает факториал, рассчитываемый как $n! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot n$. Если $a = 0$, то такое разложение называется **рядом Маклорена**: $f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} f^{(n)}(0) \frac{x^n}{n!} = f(0) + \frac{f'(0)}{1!} x + \frac{f''(0)}{2!} x^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(0)}{n!} x^n + R_n$.

Перепишем выражение для периода колебаний с учетом того, что c и k — это числовые коэффициенты, которые можно вынести за знак интеграла:

$$T = 4 \sqrt{\frac{l}{g}} \int_0^1 \frac{du}{\sqrt{(1-u^2)(1-k^2u^2)}} = 4 \sqrt{\frac{l}{g}} \sum_{n=0}^{\infty} c_n k^{2n} \int_0^1 \frac{u^{2n} du}{\sqrt{1-u^2}}. \quad (35)$$

Для последнего интеграла известно равенство

$$\int_0^1 \frac{u^{2n} du}{\sqrt{1-u^2}} = c_n \frac{\pi}{2}. \quad (36)$$

С учетом этого выражение для периода колебаний примет вид:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \sum_{n=0}^{\infty} c_n^2 k^{2n} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left[1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \sin^2 \frac{\alpha_0}{2} + \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right)^2 \sin^4 \frac{\alpha_0}{2} + \dots + \left(\frac{1 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (2n-1)}{2 \cdot 4 \cdot \dots \cdot 2n}\right)^2 \sin^{2n} \frac{\alpha_0}{2} + \dots \right], \quad (37)$$

где $c_0 = 1$, $c_n = \frac{1 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (2n-1)}{2 \cdot 4 \cdot \dots \cdot 2n}$, ($n > 0$); $k = \sin \frac{\alpha_0}{2}$.

Ограничившись членами второго порядка малости, получим приближенное выражение для периода колебаний математического маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left\{ 1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \sin^2 \frac{\alpha_0}{2} \right\}. \quad (38)$$

Следует отметить, что период зависит не только от длины нити подвеса l , но и от амплитуды колебаний α_0 . Величина, стоящая в скобках в последних двух выражениях, позволяет оценить систематическую погрешность, возникающую при использовании упрощенной формулы для вычисления периода колебаний маятника с большими амплитудами. Действительно, при малых значениях максимального угла наклона нити подвеса приведенное выше равенство преобразуется в стандартную формулу (формулу Галилея):

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (39)$$

ХОД РАБОТЫ

Оборудование

Штатив лабораторный с двойными зажимами; линейка; транспортер; 3 стальных грузика с различной массой (55, 17 и 7 грамм, соответственно); шпагат с закрепленным магнитом на конце; секундомер

Задание 1. Исследование зависимости периода малых колебаний математического маятника от его массы.

1.1 Соберите установку как показано на рис. 5.

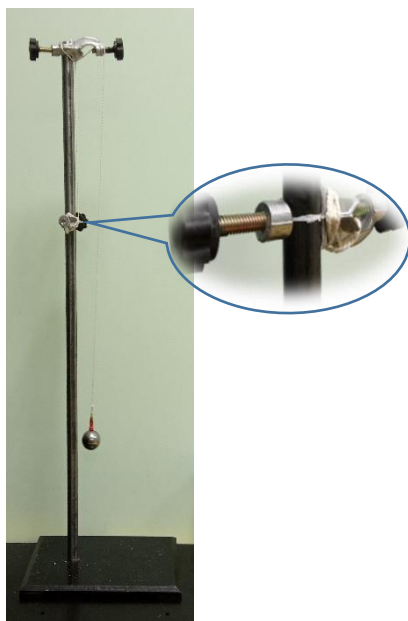


Рис. 5. Установка математический маятник

Для этого вверните стержень штатива в опорную плиту; установите двойные зажимы на стержне штатива один — в нижней, другой (с втулкой для шпагата) — в верхней части штатива. Отрежьте примерно 70-80 см шпагата и свяжите концы в маленькие петли. Прикрепите петлю на одном конце к нижнему зажиму и проденьте нить через втулку, установленную на верхнем двойном зажиме или перебросьте через горизонтальную ось, закрепленную в верхнем зажиме.

1.2. Закрепите 1 груз с массой 7 г на конце шнура при помощи петли и переместите нижний зажим так, чтобы длина маятника составляла 55 см (на задней стороне штатива нанесены деления с шагом 5 см; для выставления нужной длины нити подвеса совместите риску на зажиме с соответствующей меткой на штативе).

1.3. Отклоните маятник на угол $\alpha < 5^\circ$ и отпустите⁴. Измерьте время, за которое груз осуществит 10 полных колебаний и занесите результат в таблицу 1. Повторите измерение три раза.

1.4. Подвесьте второй груз с массой 17 г на маятник, сохранив длину нити подвеса и приведите его в движение на тот же угол, как и в п.3. Измерьте время для 10 колебаний и внесите результат в таблицу 1.

1.5. Повторите измерения с третьим грузом массой 55 г.

1.6. Для каждого измерения рассчитайте период колебаний T в секундах и внесите полученные значения в табл. 1.

⁴ Если установка не оборудована транспортом, для определения угла наклона нити α можно воспользоваться геометрическим представлением маятника в виде прямоугольного треугольника, диагональ которого равна длине нити l . Расстояние от вертикали подвеса a (катет, противолежащий углу α), на которое нужно отклонить нить маятника, чтобы достигнуть необходимый угол равно: $a = l \sin \alpha$.

1.7. Для каждого грузика рассчитайте среднее значение периода колебаний $\langle T \rangle$ в секундах и $\langle T \rangle^2$ в с^2 . Среднее значение периода малых колебаний рассчитывается по формуле:

$$\langle T \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i = \frac{1}{n} (T_1 + T_2 + T_3 + \dots + T_n) \quad (40)$$

где n — количество повторных измерений (в данном случае $n = 3$).

1.8. Рассчитайте погрешности измерения периода малых колебаний маятника по формуле⁵:

$$\Delta T = 4,3 \sqrt{\frac{(T_1 - \langle T \rangle)^2 + (T_2 - \langle T \rangle)^2 + (T_3 - \langle T \rangle)^2}{6}}. \quad (41)$$

Таблица 1

Результаты измерений периода колебаний маятника при различной массе грузика. Длина маятника $l = 0,55\text{м}$

Масса грузика m, кг	Длительность 10 колебаний, с			Период колебаний T, с				
	t_1	t_2	t_3	T_1	T_2	T_3	$\langle T \rangle$	ΔT
0,007								
0,017								
0,055								

1.9. Сравните периоды колебаний при одинаковой длине шнура. Сделайте вывод: зависит ли период колебаний от массы грузика?

Задание 2. Исследование зависимости периода малых колебаний математического маятника от его длины.

2.1. Установите маятник, как в первом задании. Используйте один грузик массой 55 г. Установите необходимую длину маятника $l = 55\text{ см}$.

2.2. Отклоните маятник на угол не более $(3-5^\circ)$ и отпустите грузик. Измерьте длительность N (см таблицу2) полных колебаний маятника.

2.3. Повторите измерения длительности N колебаний 3 раза. Результаты измерений длительности колебаний (t_1, t_2 и t_3 , для каждого измерения, соответственно) занесите в табл. 2.

⁵ Погрешности измерения периода малых колебаний маятника рассчитываются по формуле: $\Delta T = t_{p,f} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \langle T \rangle)^2}{n(n-1)}}$

где $t_{p,f}$ — коэффициенты Стьюдента⁵, зависящие от доверительной вероятности и количества измерений n . Коэффициент Стьюдента $t_{p,f}$ для количества повторных измерений $n = 3$ и доверительной вероятности $P=0.95$

равен $t_{p,f} = 4,3$. Следовательно, для трех повторных измерений $\Delta T = t_{p,f} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \langle T \rangle)^2}{n(n-1)}}$

$= 4,3 \sqrt{\frac{(T_1 - \langle T \rangle)^2 + (T_2 - \langle T \rangle)^2 + (T_3 - \langle T \rangle)^2}{6}}$.

2.4. Повторите измерение для других длин подвеса, указанных в Таблице 2. Внесите результаты измерений в табл. 2.

2.5. Для каждой длины нити подвеса рассчитайте среднее значение периода колебаний $\langle T \rangle$ в секундах и $\langle T \rangle^2$ в c^2 .

2.6. Рассчитайте погрешности измерения периода малых колебаний маятника ΔT .

Таблица 2

Результаты измерений периода колебаний маятника при различной длине подвеса. Масса грузика 0,055 кг

№		Длина маятника l , м					
		0,10	0,15	0,20	0,30	0,40	0,55
1	Количество колебаний N	20	20	10	10	10	10
2	Измеренное время N колебаний	t_1, c					
3		t_2, c					
4		t_3, c					
5	Период колебаний, с	$T_1 = t_1/N$					
6		$T_2 = t_2/N$					
7		$T_3 = t_3/N$					
8	Среднее значение периода $\langle T \rangle = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3}, c$						
	$\langle T \rangle^2, c^2$						
9	Погрешность измерения периода колебаний: $\Delta T = 4,3 \cdot \sqrt{\frac{(T_1 - \langle T \rangle)^2 + (T_2 - \langle T \rangle)^2 + (T_3 - \langle T \rangle)^2}{6}}, c$						
10	$g, m/c^2$						

2.7. Известно, что при малом угле, период колебаний T математического маятника выражается следующей формулой $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$, отсюда следует, что $T^2 = \frac{4\pi^2}{g} \cdot l$. Постройте график зависимости квадрата периода колебаний T^2 от длины шнура l (см. рис. 6). Сделайте линейную аппроксимацию полученной кривой, определите угловой коэффициент и ускорение свободного падения g^6 . Значение g запишите в табл. 2.

⁶ Линейная аппроксимация в общем случае основывается на уравнении прямой $y = kx + b$, где x и y – независимая (x , абсцисса) и зависимая (y , ордината, зависит от x) координаты, k – угловой коэффициент, равный

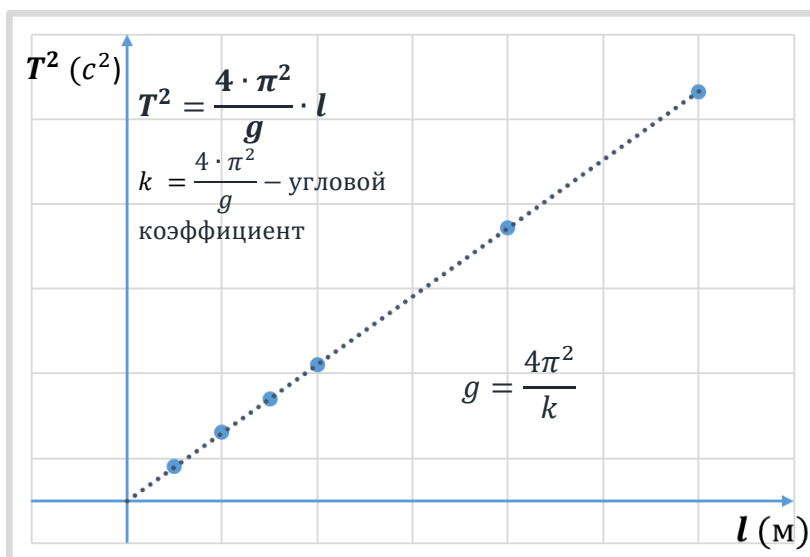


Рис. 6. Построение линейной аппроксимации зависимости $T^2(l)$

2.8. Сравните периоды колебаний при различной длине шнура. Сделайте вывод.

Задание 3. Исследование зависимости периода малых колебаний математического маятника от амплитуды колебаний (величины угла наклона нити)

3.1. Установить длину маятника l равной 30 см и измерить значения периода при 4 углах отклонения в интервале $10^\circ \leq \alpha_0 \leq 70^\circ$. Результаты измерения занести в табл. 3. Определить среднее значение периода колебаний $\langle T \rangle$ и ошибку измерений ΔT как в предыдущих заданиях.

Таблица 3

Зависимость периода математического маятника от амплитуды колебаний

№	Амплитуда (угол отклонения α_0)	$\sin^2 \frac{\alpha}{2}$	Период колебаний (сек)				
			T_1	T_2	T_3	$\langle T \rangle$	ΔT
1	10°						
2	30°						
3	50°						
4	70°						

тангенсу угла наклона кривой, b – отрезок отсекаемый графиком на оси ординат (y). Угловой коэффициент рассчитывается по кривой следующим образом: $k = \frac{y_k - y_n}{(x_k - x_n)}$, где y_n и y_k , x_n и x_k – начальная и конечная ордината и абсцисса, соответственно. В рассматриваемом случае (мы рассматриваем зависимость квадрата периода колебаний маятника от длины подвеса) угловой коэффициент равен $k = \frac{\Delta T}{\Delta l} = \frac{4 \cdot \pi^2}{g}$, отсюда $g = \frac{4 \pi^2}{k}$.

3.2. Пользуясь данными таблицы 3, на отдельном графике постройте, зависимость периода колебаний маятника от амплитуды колебаний (по оси абсцисс откладывать значения $\sin^2 \frac{\alpha}{2}$).

3.3. Сравните точность определения периода колебаний математического маятника в соответствии с методикой, изложенной в Задании 2 и Задании 3. Сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. Что такое свободные незатухающие гармонические колебания, каким уравнением они описываются?
2. Поясните, чем отличаются вынужденные, автоколебания и параметрические колебания? Приведите примеры.
3. Что такое собственная частота колебаний, от чего она зависит?
4. Что такое негармонические колебания?
5. Что такое спектр колебаний?
6. Что такое математический маятник? От чего зависит период колебаний математического маятника?

Литература

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики : учеб. пособие для студентов физ. специальностей вузов : [в 5 т.]. Т. 1 : Механика. - Изд. 6-е, стер. - М. : Физматлит, 2014. - 560 с.

<http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=482932&idb=0>.

2. Савельев И.В. Курс общей физики : учеб. пособие для вузов : [в 5 т.]. Т. 1 : Механика, - Изд. 7-е, стер. - Санкт-Петербург : Лань, 2022 — 340 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/187811>.

3. Фаддеев М.А. Элементарная обработка результатов эксперимента : учебное пособие / М.А. Фаддеев. — Нижний Новгород : ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2010. — 122 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/152927>.

<http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=729834&idb=0>

Лабораторная работа №2. Основные понятия геометрической оптики. Определение показателя преломления оптических материалов

Цель работы: определить показатель преломления растворов поваренной соли с помощью рефрактометра Аббе

Задачи:

- 1) Изучить основы метода рефрактометрии;
- 2) Измерить показатель преломления ряда водных растворов с различной концентрацией поваренной соли.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Геометрическая оптика — это раздел оптики, изучающий поведение света без учёта его волновых свойств, в частности, в ней не рассматриваются понятия дифракции и интерференции. Геометрическая оптика оперирует понятием отдельных световых лучей, которые подчиняются следующим основным законам:

Закон прямолинейного распространения света: в оптически однородной среде свет распространяется по прямым линиям. Опытным доказательством этого закона служат наблюдения над резкими тенями, даваемыми точечными источниками света, или получение изображений с помощью малых отверстий. С другой стороны, уменьшение размера отверстия до некоторых критических значений существенно снижает контрастность границ изображения. Такие отступления от данного закона рассматривает учение о дифракции.

Закон независимости световых пучков: эффект, производимый световым пучком при распространении в какой-либо среде, не зависит от того, есть ли в этой среде другие пучки света. При этом освещённость экрана при наложении нескольких световых пучков друг на друга равна сумме освещённостей, создаваемых каждым пучком в отдельности. Нарушения справедливости этого утверждения имеют место в явлениях интерференции света.

Закон отражения света: падающий и отражённый лучи, а также нормаль к отражающей поверхности (границе раздела) лежат в одной плоскости (рис. 7). При этом угол отражения равен углу падения.

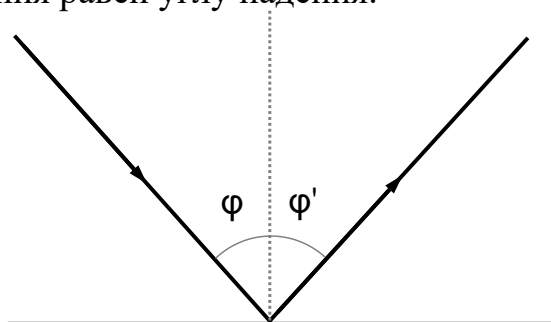


Рис. 7. Отражение света

Закон преломления света: падающий и преломленный лучи, а также нормаль к границе раздела лежат в одной плоскости (рис. 8). При этом углы падения и преломления луча связаны соотношением:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2} \quad (42)$$

где n_{12} — относительный показатель преломления второй среды относительно первой, n_1 и n_2 — абсолютные показатели преломления сред 1 и 2, φ_1 — угол падения, φ_2 — угол преломления.

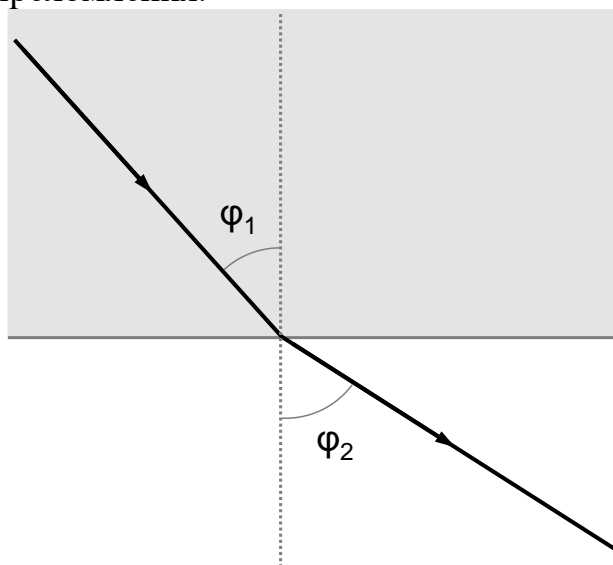


Рис. 8. Преломление света

Когда луч падает под углом 0° по отношению к нормали (перпендикулярно границе раздела), он не меняет своё направление, т.е. преломления не происходит.

Относительный показатель преломления двух сред показывает, во сколько раз изменяется скорость света при переходе из первой среды во вторую. Показатель преломления среды относительно вакуума, или **абсолютный показатель преломления**, определяется соотношением:

$$n = \frac{c}{v} \quad (43)$$

где c — скорость света в вакууме ($c = 3,10^8$ м/с), v — фазовая скорость света в среде. Показатель преломления вакуума равен единице.

Абсолютный показатель преломления показывает, во сколько раз скорость света в вакууме превосходит скорость распространения света в веществе.

Вещества в различных агрегатных состояниях имеют различные значения абсолютного показателя преломления. Газообразные вещества имеют показатель преломления близкий к единице. Например, показатель преломления воздуха при нормальном давлении и температуре равен $n = 1,000274$. На практике это значение округляют до 1. Жидкости имеют показатели преломления в диапазоне от 1,2 до 1,9. Твердые тела — от 1,3 до 4,0. Из приведенных примеров видно, что

оптически более плотная среда имеет более высокое значение абсолютного показателя преломления n .

Произведение абсолютного показателя преломления вещества на синус угла между нормалью и лучом при каждом преломлении есть величина постоянная:

$$n_1 \sin \varphi_1 = n_2 \sin \varphi_2. \quad (44)$$

Это соотношение называется **оптическим инвариантом**. Из него следует, что при переходе луча из оптически менее плотной среды в оптически более плотную (для которых справедливо, что $n_1 < n_2$) угол преломления меньше угла падения ($\varphi_1 > \varphi_2$).

Полное внутреннее отражение

Если переход луча происходит из оптически более плотной среды в оптически менее плотную ($n_1 > n_2$), угол преломления больше угла падения ($\varphi_2 > \varphi_1$). При увеличении угла падения увеличивается и угол преломления вплоть до его максимального значения, равного 90° по отношению к нормали к поверхности раздела сред. В этом случае преломленный луч будет скользить по поверхности раздела.

При дальнейшем увеличении угла падения падающий луч не преломляется, а полностью отражается от границы раздела сред (рис. 9).

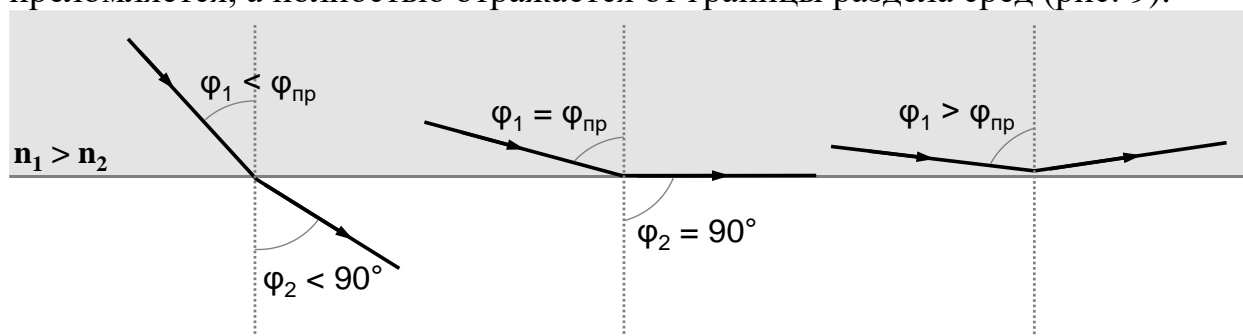


Рис. 9. Явление полного внутреннего отражения при ходе луча из оптически более плотной среды в оптически менее плотную ($n_1 > n_2$). $\varphi_{\text{пр}}$ — предельный угол полного внутреннего отражения

Угол падения, при котором угол преломления становится равным 90° называется **предельным углом полного внутреннего отражения** ($\varphi_{\text{пр}}$).

Сумма интенсивностей отраженного и преломленного лучей равна интенсивности падающего луча. При увеличении угла падения (φ_1) интенсивность отраженного луча растет, а интенсивность преломленного луча убывает и для предельного угла падения становится равной нулю.

Если угол падения превышает предельный для данных сред угол, то преломления на границе раздела не происходит и падающий свет отражается полностью.

Это явление называется **полным внутренним отражением** (наблюдается при переходе света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную).

Предельный угол падения луча рассчитывается исходя из соотношения:

$$\sin \varphi_{\text{пр}} = \frac{n_2}{n_1} = n, \text{ при } n_1 > n_2 \quad (45)$$

Если вторая среда, в которую входит луч является воздух ($n_2 = 1$), то $\sin \varphi_{\text{пр}} = 1/n_1$.

Предельный угол можно наблюдать в отраженном или проходящем (преломленном) свете (рис. 10).

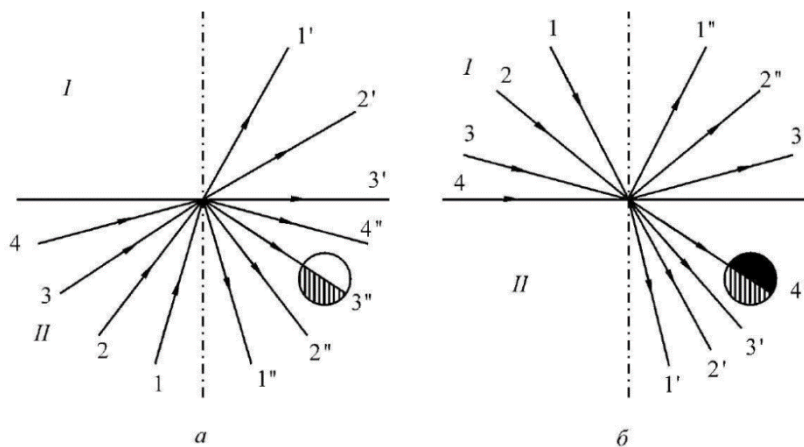


Рис. 10. Наблюдение границы освещенности поля зрения в отраженном (а) и преломленном (б) пучках лучей

При освещении некоторой точки на границе раздела двух сред пучком монохроматических лучей с углами падения от 0 до 90° , если этот пучок направлен со стороны оптически более плотной среды, то в отраженных лучах поле зрения будет иметь две части с различной освещенностью. Часть поля зрения, в которую попадают лучи, испытавшие частичное отражение и частичное преломление, будет менее освещена по сравнению с частью поля зрения, в которую попадают только отраженные лучи (лучи, падающие под углом, превышающим предельный угол для данной пары сред, претерпевают полное внутреннее отражение). Этот способ можно использовать и в случае, когда среда с меньшим показателем преломления мало прозрачна. Но при этом граница раздела светлой и темной областей будет неотчетливой из-за малых различий в освещенности обеих половин поля зрения.

При наблюдении в проходящем (преломленном) свете, если монохроматических пучок лучей следует из среды с меньшим показателем преломления, поле зрения будет разделено на полностью затененную и освещенную части. Граница светлой и темной областей в этом случае также определяется предельным углом. Крайний луч, через который проходит граница светлой и темной области соответствует лучу, падающему под углом 90° к границе раздела и после преломления на границе раздела идущему под предельным углом. Этот способ удобен тем, что граница светлой и темной областей видна очень отчетливо, но это возможно только при использовании прозрачных сред.

Дисперсия света

Если лучи, содержащиеся в падающем на границу раздела двух сред пучке света, имеют различные длины волн, то наблюдаемые явления отражения и преломления света дополнятся еще и дисперсией света.

Дисперсия — это разложение света в спектр. Возникновение дисперсии связано с зависимостью показателей преломления веществ от частоты падающего света. Для всех прозрачных веществ показано, что показатель преломления увеличивается с уменьшением длины волны (с увеличением частоты) света.

Дисперсия приводит к пространственному разделению лучей с различными длинами волн. Мерами измерения дисперсии, возникающей в приборах, являются угловая и линейная дисперсия.

Угловая дисперсия определяется как

$$\Theta = \frac{d\phi}{d\lambda}, \quad (46)$$

где $d\phi$ — разность углов между лучами, длины волн которых отличаются на $d\lambda$.

Линейная дисперсия определяется как отношение расстояния (dl) между положением спектральных линий, различающихся на $d\lambda$ по длинам волн: $\frac{dl}{d\lambda}$.

В связи с дисперсией лучи света с различными длинами волн будут иметь различные значения предельного угла (рис. 11).

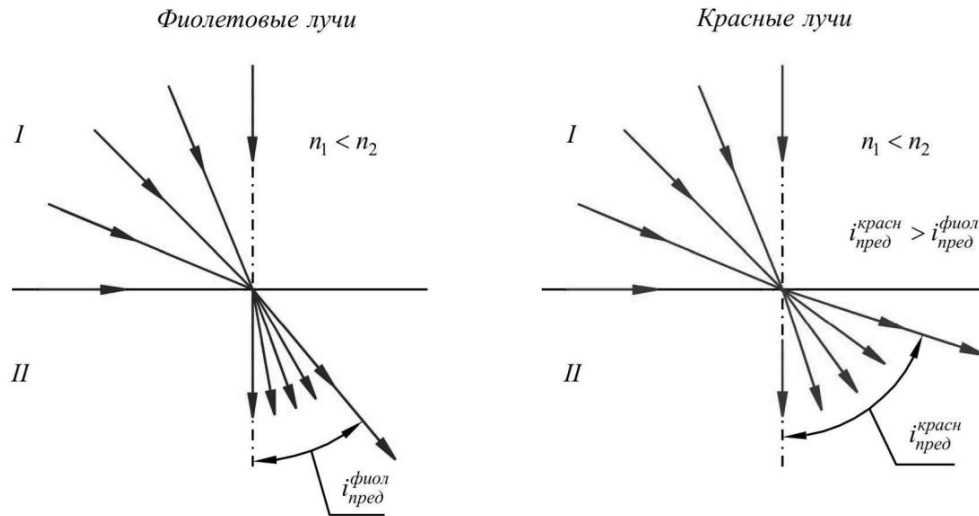


Рис. 11. Влияние дисперсии света на величину предельного угла преломления

Если при измерении предельного угла используется падающий белый свет, то в результате наложения лучей с различными длинами волн из-за дисперсии, граница раздела будет иметь окраску. Вблизи нормали (при малых углах преломления) будут находиться лучи белого света, далее по мере увеличения длины волны — фиолетовые, синие, голубые, зеленые, желтые, оранжевые и красные. Красные лучи будут располагаться на границе раздела освещенной и затененной областей поля зрения.

Таким образом, поскольку показатель преломления является постоянной величиной для данной среды только для света с определенной длиной волны,

предельный угол также должен измеряться только для монохроматического света.

Для характеристики сред принято использовать значение показателя преломления, измеренного для света, излучаемого газовой натриевой горелкой (для желтой D-линии натрия, длина волны которой $\lambda_D = 589,3$ нм. Иногда показатель преломления определяют для других спектральных линий (например, для красной (C) и голубой (F) линий водорода, $\lambda_C = 653,3$ нм, $\lambda_F = 486,1$ нм).

Приборы, предназначенные для определения показателя преломления веществ, называются **рефрактометрами**.

Принцип действия рефрактометра Аббе

Главным элементом рефрактометра Аббе является призмный блок Аббе (рис. 12). Он представляет собой две прямоугольные призмы, сложенные гипотенузными гранями друг ко другу.

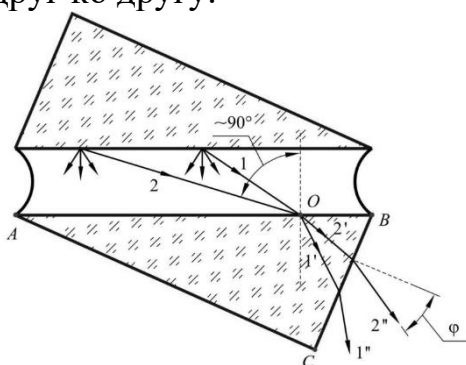


Рис. 12. Ход лучей света в призмном блоке Аббе

Исследуемая жидкость в виде тонкого слоя (подобно плоскопараллельной пластинке) помещается между верхней и нижней призмами. Верхняя призма служит для освещения исследуемой жидкости, поэтому ее нижняя грань матовая. Нижняя призма — измерительная — изготовлена из стекла с высокой оптической плотностью и показателем преломления ($n > 1,7$). Измерения проводятся для веществ, имеющих показатель преломления меньше показателя преломления измерительной призмы.

Рассеянный матовой поверхностью свет проходит через слой исследуемой жидкости и под разными углами падает на верхнюю грань нижней (измерительной) призмы. Угол падения скользких лучей (падающих под углом близким к 90°) на границу раздела исследуемой жидкости и измерительной призмы близок к предельному. Поэтому после преломления в измерительной призме эти лучи будут определять границу распространения света в призме. Выражение для предельного угла в этом случае имеет вид:

$$\sin \varphi_{\text{пред}} = \frac{n_{\text{ж}}}{n_{\text{призмы}}}; \quad (47)$$

где $\varphi_{\text{пред}}$ — предельный угол падения; $n_{\text{ж}}$ и $n_{\text{призмы}}$ — показатели преломления исследуемой жидкости и измерительной призмы.

Отсюда, показатель преломления исследуемой жидкости равен:

$$n_{\text{ж}} = n_{\text{призмы}} \sin \varphi_{\text{пред}} \quad (48)$$

На практике обычно измеряют угол выхода предельного луча из измерительной призмы в воздух (ϕ). Этот угол является наименьшим углом, под которым лучи выходят из измерительной призмы (рис. 12).

Угол ϕ измеряется при помощи зрительной трубы сфокусированной на бесконечность. При такой настройке лучи, приходящие с бесконечности, будут собираться трубой в фокальной плоскости. Таким образом, параллельные лучи, выходящие из грани CB призмы, соберутся зрительной трубой в соответствующих точках ее фокальной плоскости. Поскольку лучи выходят из измерительной призмы под разными углами, таких точек будет много: для каждого угла своя. Если направить оптическую ось трубы соосно направлению, заданному углом ϕ , то в нижней половине поля зрения будут находиться лучи, имеющие угол больший, чем ϕ , а в верхней — меньший ϕ . При этом в направлениях, имеющих угол меньший, чем ϕ свет распространяться не будет. Таким образом, наведя перекрестие окуляра зрительной трубы на границу раздела светлой и темной областей поля зрения, можно измерить угол ϕ .

Показатель преломления исследуемой жидкости связан с величиной угла ϕ следующим соотношением:

$$n_{\text{ж}} = \sin B \sqrt{n_{\text{призмы}}^2 - \sin \phi - \cos B \sin \phi} \quad (49)$$

где B — угол между преломляющими гранями AB и BC измерительной призмы. С учетом этой формулы выполняется градуировка шкалы рефрактометра.

Рефрактометры Аббе можно использовать для измерений показателя преломления белого света. Для этого данные приборы оснащены компенсатором дисперсии, устанавливаемым в зрительной трубе.

Главным элементом компенсатора дисперсии является призма Амичи (призма прямого видения), которая состоит из трех простых призм, изготовленных из стекол с различными характеристиками (рис. 13).

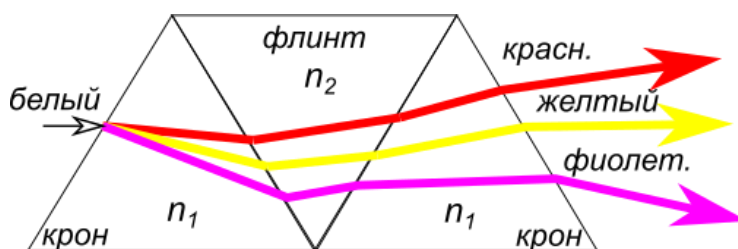


Рис. 13. Ход лучей различного цвета в призме Амичи. Крон — тип оптического стекла, имеющий высокий (больше 0,5) коэффициент средней дисперсии (число Аббе), и сравнительно низкий показатель преломления ($\sim 1,5$). Флинт — тип оптического стекла, для которого характерен низкий (меньше 0,5) коэффициент средней дисперсии и сравнительно высокий показатель преломления (1,55-1,6)

Материал и углы преломления призм подобраны таким образом, чтобы добиться отсутствия отклонения для выбранного, (например, среднего) луча. При этом дисперсия полностью не исчезает, но на выходе из призм получается

спектр, в котором средние лучи имеют направление падающего белого света. В призме Амичи составляющие подобраны так, чтобы лучи, соответствующие D-линии натрия, проходили систему призм без отклонения.

Компенсатор дисперсии работает следующим образом. Блок Аббе характеризуется некоторой угловой дисперсией: лучи света выходят из блока Аббе под разными углами, зависящими от показателей преломления исследуемого вещества и измерительной призмы. Призма Амичи устанавливается на пути этих лучей в рефрактометре так, чтобы ее угловая дисперсия была равна по величине и противоположна по знаку угловой дисперсии блока Аббе. Суммарная дисперсия при этом принимает значение равное нулю. Пучок цветных лучей собирается в белый луч, направление которого совпадает с направлением D-линии (желтого луча). При этом в поле зрения окуляра зрительной трубы видна резкая граница между светлой и темной частями поля зрения. Эта граничная линия соответствует линии полного внутреннего отражения, то есть положение границы соответствует предельному лучу D-линии натрия. Показания шкалы рефрактометра дают значения n_D .

Определение концентраций веществ методом рефрактометрии

Величина предельного угла зависит только от показателей преломления сред. На этом основан ***метод рефрактометрии***, в котором величина предельного угла и известное значение показателя преломления одной из сред используется для определения показателя преломления другой среды. Показатель преломления одной из сред можно определить, зная показатель преломления второй среды и значение предельного угла, которое можно получить, экспериментально определив величину относительного показателя преломления. Как правило, при проведении рефрактометрического анализа измеряют показатель преломления исследуемого вещества по отношению к воздуху ($n_{\text{возд}} = 1,000274$ при давлении $1,01 \cdot 10^5$ Па и температуре 20°C для длины волны $589,3$ нм). Этот метод подходит как для твёрдых, так и для жидких образцов.

В случае жидкостей показатель преломления раствора зависит от его концентрации. Для разбавленных растворов такая зависимость имеет вид:

$$n = n_0 + k \cdot C, \quad (50)$$

где n — показатель преломления раствора; n_0 — показатель преломления растворителя; C — концентрация раствора; k — инкремент показателя преломления, численно равный тангенсу угла наклона прямой, описывающей зависимость показателя преломления раствора от его концентрации (рис. 14).

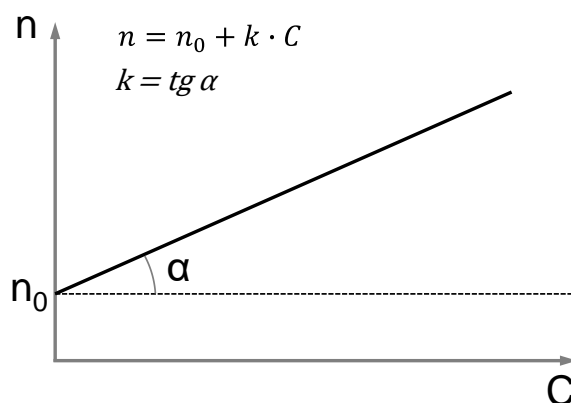


Рис. 14. Схематичное изображение зависимости показателя преломления (n) разбавленного раствора от его концентрации (C). n_0 — показатель преломления растворителя, α — угол наклона прямой по отношению к оси абсцисс

Метод рефрактометрического анализа получил широкое распространение в пищевой промышленности для контроля качества продукции и измерения содержания в ней сахара и сухих веществ по сахарозе, белка в молоке и молочных продуктах и др. Также с помощью рефрактометра осуществляется контроль концентрации различных продуктов химической промышленности, включая фармацевтическую химию, например, для контроля концентрации лекарственных препаратов. В медицине и ветеринарии рефрактометрический метод применяется для анализа биологических жидкостей, в том числе для определения белка в сыворотке крови, спинномозговой жидкости, измерения плотности мочи и др.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Оборудование и материалы

Рефрактометр ИРФ-454 Б2М, поваренная соль (NaCl), дистиллированная вода, раствор с неизвестной концентрацией соли, лабораторная посуда и принадлежности.

Описание рефрактометра ИРФ-454 Б2М

Внешний вид рефрактометра ИРФ-454 Б2М представлен на рис. 15.

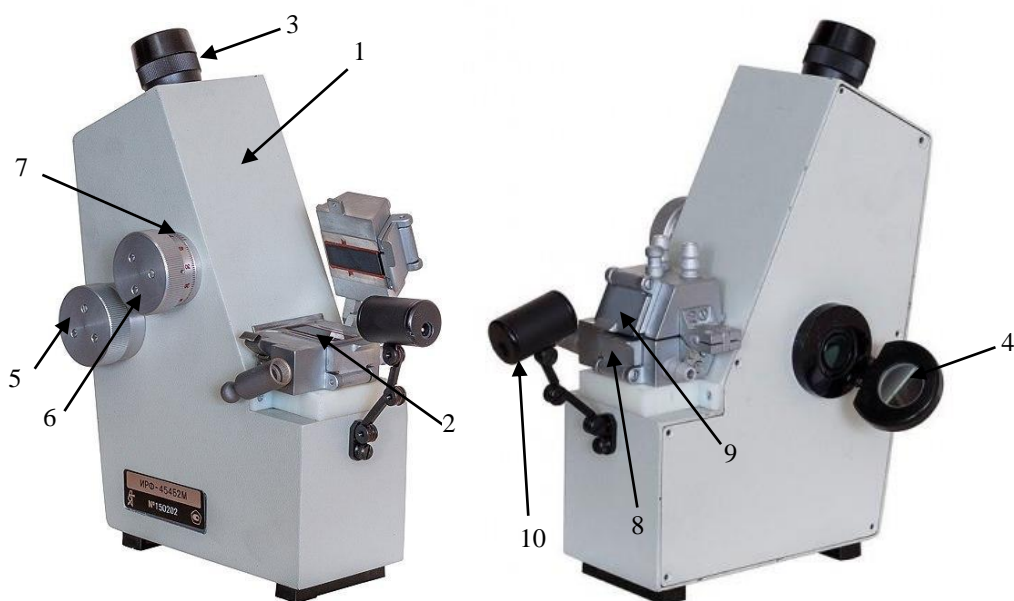


Рис. 15. Внешний вид рефрактометра ИРФ-454 Б2М. Термометр и провод питания съемного осветителя сняты, чтобы не заслонять основные части прибора. Описание в тексте

Рефрактометр ИРФ-454 Б2М устроен по типу Аббе. Основными частями рефрактометра являются (рис. 15): металлический корпус (1), измерительная головка (2) с измерительной (внизу) и осветительной призмами (вверху), зрительная труба с окуляром (3) и отсчетным устройством. Окуляр может перемещаться вдоль оптической оси для установления резкости в пределах ± 5 диоптрий.

В измерительной головке находится призмный блок Аббе, связанный со шкалой отсчетного устройства, которая располагается внутри корпуса. Шкала подсвечивается зеркалом 4 и проектируется специальной оптической системой в поле зрения трубы. Одновременно в поле зрения трубы видны перекрестие и граница раздела полей зрения с различной освещенностью, деления и визирный штрих шкалы. Маховик (5), установленный с правой стороны корпуса рефрактометра (связан с измерительным блоком Аббе) служит для перемещения изображения границы света и тени и совмещения ее с перекрестием. Маховик компенсатора дисперсии (6) служит для устранения окрашенности границы раздела светлого и темного полей зрения. Вместе с компенсатором вращается и барабан (7) со шкалой, по которой измеряется дисперсия вещества.

На оправе измерительной призмы на шарнире закреплена заслонка (9). Для подсвечивания измерительной призмы со стороны нижней грани на ее оправе установлено откидное зеркало (8). Подсветка исследуемого вещества осуществляется при помощи зеркала (8) дневным светом или при помощи электрической лампы накаливания съемного осветителя (10).

Оптическая схема рефрактометра ИРФ-454 Б2М

Принцип действия рефрактометра основан на явлении полного внутреннего отражения, описанного выше. Упрощённая оптическая схема прибора представлена на рис. 16.

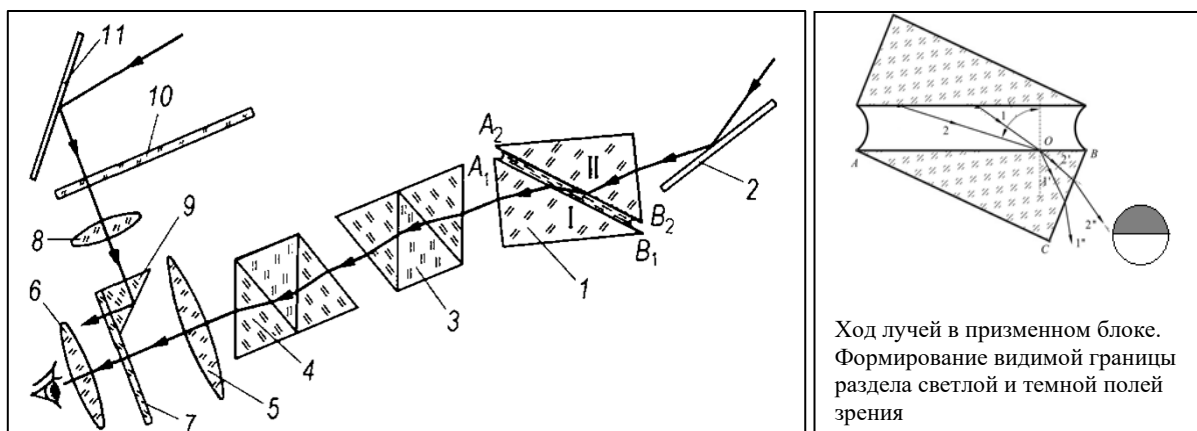


Рис. 16. Упрощённая оптическая схема рефрактометра ИРФ-454М

Пучок света направляется на осветительную призму II. Лучи, рассеянные на её матовой поверхности, под различными углами входят в исследуемую жидкость. Лучи, скользящие вдоль грани A_1B_1 измерительной призмы I преломляются под предельным углом, все остальные — под углом, превышающим предельный. Из измерительной призмы свет попадает на две дисперсионные призмы Амичи (3) и (4) и затем в зрительную трубу. Зрительная труба состоит из объектива (5), окуляра (6) и отсчетного приспособления (7), расположенного в фокальной плоскости объектива. В плоскости отсчетного приспособления свет образует светлое и темное поля зрения.

На одну из частей стеклянной пластинки отсчетного приспособления нанесены две пересекающиеся прямые (крест-накрест). При измерениях именно это перекрестие совмещают с границей раздела светлой и темной полей зрения (рис. 17).

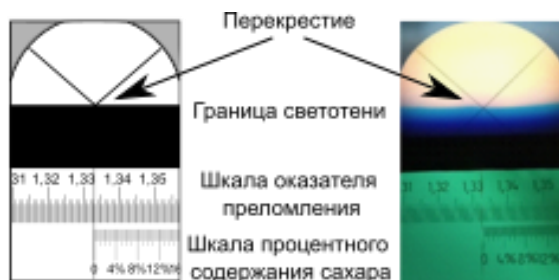


Рис. 17. Поле зрения, наблюдаемое в окуляр. Схема (слева) и фотография (справа). Верхняя часть шкалы градуирована в единицах показателя преломления. Нижняя часть шкалы градуирована в единицах массовой доли сахарозы в растворе

На другую часть при помощи линзы (8) и призмы (9) проецируется изображение шкалы (10). Шкала (10) освещается пучком света, направляемым с помощью зеркала (11).

Призмный блок Аббе (параллелепипед I) механически связан с пластинкой, на которую нанесена шкала (10), так что поворот параллелепипеда сопровождается одновременным сдвигом шкалы (10) и сдвигом её изображения в поле зрения окуляра. Когда граница светлой и темной областей совмещена с перекрестием, указатель шкалы показывает значение показателя преломления исследуемого вещества для монохроматического света (желтой D-линии натрия).

Если для освещения образца используется белый свет, в результате дисперсии света, возникающей в измерительной призме, наблюдаемая в окуляр граница раздела становится размытой и окрашенной. Устранение окраски и размытости производится при помощи дисперсионных призм прямого зрения. Дисперсия на выходе из компенсатора зависит от взаимной ориентации дисперсионных призм Амичи (3) и (4). Поворотом одной из призм видения можно добиться любой дисперсии от нулевой до двойной по сравнению с дисперсией одиночной призмы. Таким образом можно компенсировать дисперсию, возникшую в измерительной призме и устранить окраску и размытость.

Порядок проведения измерений показателя преломления прозрачных жидкостей на рефрактометре ИРФ-454 Б2М (все части рефрактометра указаны по рис. 15).

- 1) На чистую полированную поверхность измерительной призмы стеклянной палочкой или пипеткой осторожно, не касаясь призмы, нанести две-три капли исследуемой жидкости, осторожно опустить осветительную призму и прижать её застёжкой.
- 2) Пользуясь окном (9) убедиться, что жидкость полностью заполнила зазор между измерительной и осветительной призмами.
- 3) Настроить освещение образца.

Измерения прозрачных жидкостей проводить в проходящем свете. Для этого открыть окно осветительной призмы (9), а окно измерительной призмы закрыть зеркалом (8). Измерения окрашенных и мутных проб проводить в отраженном свете. Для этого закрыть заслонку (9) и откинуть зеркало (8), с помощью которого направить свет в измерительную призму, при этом темное и светлое поля поменяются местами.

- 4) Поворотом зеркала (4) добиться наилучшей освещенности шкалы.
- 5) Поворачивая маховик (5), и одновременно глядя в окуляр, границу светотени ввести в поле зрения окуляра.
- 6) Устранить окрашенность границы вращением маховика компенсатора дисперсии (6).
- 7) Наблюдая в окуляр, маховиком (5) точно совместить границу света и тени с перекрестием.
- 8) Снять значение показателя преломления по шкале показателей преломления (по верхней из двух видимых в окуляре шкал). Показатель преломления равен

тому делению шкалы, на которое показывает неподвижный вертикальный визирный штрих шкалы.

Цена деления шкалы $5 \cdot 10^{-4}$. Целые, десятые, сотые и тысячные доли отсчитываются по шкале, десятитысячные доли оцениваются на глаз.

- 9) После проведения измерений тщательно протереть рабочие поверхности блока Аббе мягкой тряпочкой или фильтровальной бумагой. Промыть призмы спиртом и просушить. После чего осторожно закрыть измерительную головку.

ХОД РАБОТЫ

Задание 1. Измерение показателей преломления водных растворов поваренной соли

- 1.1. Изучить устройство и порядок проведения измерений на рефрактометре ИРФ-454 Б2М.
- 1.2. Приготовить серию водных растворов (не менее трех) с линейно увеличивающейся концентрацией поваренной соли. (Количество точек и значения концентраций растворов взять по указанию преподавателя).
- 1.3. Настроить освещение прибора для измерений в проходящем свете, как показано в инструкции выше.
- 1.4. Открыть измерительную головку рефрактометра, подняв её верхний блок с осветительной призмой. Аккуратно, не касаясь призмы, нанести две-три капли дистиллированной воды пипеткой на поверхность измерительной призмы. Опустить осветительную призму и прижать ее застёжкой.
- 1.5. При необходимости увеличить резкость изображения перекрестия и шкалы в нижней части поля зрения поворотом окуляра.
- 1.6. Поворотом зеркала (4) добиться наилучшей освещенности шкалы.
- 1.7. Путем вращения маховика компенсатора дисперсии добиться резкости и исчезновения окраски граничной линии. Маховиком (5) навести границу светотени точно на перекрестие.
- 1.8. Определить относительный показатель преломления воды. Внести полученное значение в табл. 4.

Таблица 4

Результаты измерения показателя преломления воды

n_1	n_2	n_3	$\langle n \rangle$

- 1.9. Открыть измерительную головку прибора и аккуратно удалить капли воды с поверхностей осветительной и измерительной призм мягкой салфеткой.
- 1.10. Провести измерение показателя преломления дистиллированной воды 3 раза. Результаты занести в таблицу 1 протокола лабораторной работы.

1.11. По аналогичной схеме определить относительные показатели преломления растворов поваренной соли с заданными концентрациями и раствора соли с неизвестной концентрацией, занося полученные значения в табл. 5 и 6, соответственно.

Таблица 5

Результаты измерения показателя преломления водных растворов NaCl

Концентрация NaCl	n_1	n_2	n_3	$\langle n \rangle$

Таблица 6

Результаты измерения показателя преломления водного раствора с неизвестной концентрацией NaCl

n_1	n_2	n_3	$\langle n \rangle$

Задание 2. Обработка результатов измерений

- 2.1. Вычислить среднее значение относительного показателя преломления всех исследуемых образцов по результатам трёх измерений ($\langle n \rangle = \frac{n_1+n_2+n_3}{3}$).
- 2.2. Построить график зависимости среднего показателя преломления $\langle n \rangle$ от концентрации раствора соли C . По оси абсцисс отложить значения концентраций (C), а по оси ординат — значения показателя преломления n . На ось ординат также нанести значения показателя преломления, полученное для дистиллированной воды (n_0). Через полученные точки провести прямую, как показано на рисунке (рис. 18).

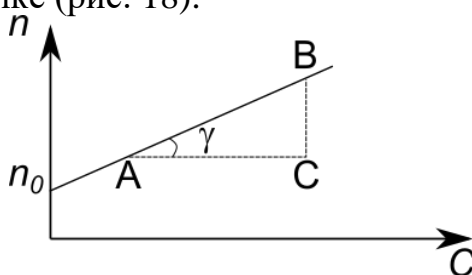


Рис. 18. Зависимость показателя преломления от концентрации раствора

- 2.3. По графику зависимости $n = f(C)$ найти значение k — инкремента показателя преломления:

$$k = \operatorname{tg} \gamma = \frac{BC}{AC} \quad (51)$$

где BC — разность показателей преломления, соответствующих точкам B и C ; AC — разность значений концентрации растворов, соответствующих точкам A и C . (Значения AC и BC берутся в единицах величин соответствующих осей!)

- 2.4. Записать аналитическую зависимость $n = f(C)$, используя формулу для линейной аппроксимации $n = n_0 + k \cdot C$ и подставляя вместо k и n_0 найденные значения.
- 2.5. Определить концентрацию раствора соли, подставив в полученное уравнение среднее значение его показателя преломления из табл. 3.
- 2.6. Сформулировать выводы.

Контрольные вопросы

1. На чём основан метод рефрактометрии?
2. Дайте определение относительного и абсолютного показателя преломления?
3. Что такое полное внутреннее отражение? Объясните понятие предельного угла отражения.
4. Как зависит показатель преломления от концентрации раствора?
5. Поясните оптическую схему рефрактометра типа Аббе.

Литература

1. Ландсберг Г.С. Оптика : Учеб. пособие. —М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017. — 852 с. <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=741022&idb=0>
2. Н.В. Никоноров, В.А. Асеев, А.М. Ефимов, С.Н. Жуков, В.М. Золотарев, А.И. Игнатъев, А.В. Клементьева, А.К. Пржевуский, А.С. Рохмин. «Оптическое материаловедение: методы исследования оптических материалов». Учебное пособие по выполнению лабораторного практикума. — СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. — 158 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/40783>. — Режим доступа: для авториз. пользователей.

Лабораторная работа № 3. Основные понятия геометрической оптики. Глаз как оптическая система.

Цель работы: построить оптическую модель глаза, основываясь на понятиях геометрической оптики.

Задачи:

- 1) Изучить основные понятия геометрической оптики на примере работы с линзами;
- 2) Изучить устройство глаза, построить оптическую модель здорового глаза;
- 3) Смоделировать близорукий и дальнозоркий глаз, «скорректировать зрение» с помощью линз.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.

Введение

Оптика (от др.-греч. *ὀπτική*, *optike'* — явление или взгляд; наука о зрительных восприятиях) — это раздел физики, в котором изучается оптическое излучение (электромагнитное излучение оптического диапазона), его распространение в пространстве и взаимодействие с веществом.

Оптику подразделяют на физическую, геометрическую и физиологическую.

Физическая оптика рассматривает фундаментальные вопросы о природе света и световых явлений, определяет границы применимости законов геометрической оптики.

Геометрическая оптика не касается вопросов о природе света, но рассматривает его распространение, основываясь на эмпирических законах. Свет представляется в виде лучей, прямолинейно распространяющихся в пределах оптически однородных сред и преломляющихся или отражающихся при переходе между ними.

Задачами **физиологической оптики** являются изучение строения и принципов функционирования аппарата зрения, включая регистрацию и анализ зрительной информации, восприятие цвета и интенсивности света.

Основные понятия геометрической оптики

Геометрическая оптика рассматривает распространение света в оптических средах. Под **оптической средой** понимают прозрачную однородную среду с известным значением показателя преломления. Примерами оптических сред являются воздух или вакуум ($n \approx 1$), оптические стекла ($n = 1,42 \div 2,0$), а также оптические кристаллы.

Совокупность оптических сред, разделенным между собой оптическими поверхностями, и элементами, ограниченными диафрагмами, образует

оптическую систему. Назначение оптических систем заключается в формировании изображений путем перераспределения электромагнитного поля в пространстве.

Основными функциональными элементами, из которых может состоять оптическая система, являются оптические среды и поверхности, зеркала, диафрагмы и дифракционные оптические элементы.

В геометрической оптике для описания процесса распространения света в пространстве применяется понятие светового луча — геометрическая линия нулевой толщины, показывающая направление распространения. С точки зрения физики световой луч — это нормаль, проведенная к фронту электромагнитной волны оптического диапазона. Свет в виде лучей распространяется во все стороны от источника излучения.

Совокупность световых лучей образует **световой пучок**.

Лучи, принадлежащие одному световому пучку, могут пересекаться в одной точке. Такой пучок называется **гомоцентрическим**.

Если лучи, принадлежащие пучку, расходятся из одной точки, такой пучок называется **расходящимся гомоцентрическим** пучком. Если лучи идут к одному центру — пучок называется **сходящимся гомоцентрическим** пучком. Когда центр гомоцентрического пучка лучей находится в бесконечности, его можно считать параллельным.

Направление и скорость распространения световых лучей зависят от типа среды и ее свойств, таких как оптическая плотность, однородность и прозрачность. При попадании на границу раздела сред, луч разделяется на два луча — отраженный и преломленный. Направления этих лучей определяются законами геометрической оптики. Рассмотрим некоторые из них.

В оптически однородной среде действует **закон прямолинейного распространения света**. Этот закон не применим при прохождении света через очень малые (соизмеримые с длиной световой волны) отверстия поскольку в этом случае будет наблюдаться отклонение от прямолинейного распространения света — дифракция, обусловленная волновыми свойствами света.

Распространение каждого отдельного луча не зависит от наличия других световых лучей — это правило носит название **закона независимости световых пучков**. В соответствии с этим законом, если поток света разбить на отдельные световые пучки (например, при помощи диафрагмы), то суммарный эффект от них будет равен сумме вкладов каждого из пучков света в отдельности. Однако, при интерференции световых лучей закон независимости световых пучков не выполняется.

Распространение лучей в оптических средах подчиняется законам отражения и преломления света.

Закон отражения света: отраженный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и перпендикуляром, проведенным к границе раздела двух сред в точке падения луча. При этом угол отражения (γ) равен углу падения (α). Углы отсчитываются от нормали к поверхности раздела сред.

Закон преломления света: падающий и преломленный лучи света, и перпендикуляр, проведенный к поверхности раздела в точке падения луча, лежат в одной плоскости. При этом отношение синуса угла падения к синусу угла преломления является постоянной величиной для данной пары оптических сред и равно отношению абсолютных показателей преломления второй среды к показателю преломления первой среды (**закон Снеллиуса**):

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad (52)$$

где n_1 и n_2 — абсолютные показатели преломления первой и второй среды (рис. 19); $\frac{n_2}{n_1} = n_{21}$ — относительный показатель преломления второй среды относительно первой.

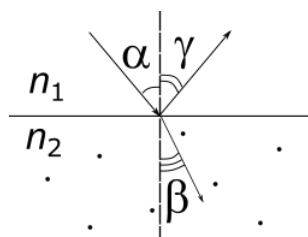


Рис. 19. Ход лучей на границе раздела двух сред

Оптическая система любого прибора представляет собой совокупность преломляющих и отражающих поверхностей.

Если центры кривизны всех поверхностей, составляющих оптическую систему лежат на одной прямой, такая система называется **центрированной** или **коаксиальной**.

Линия, на которой лежат центры кривизны оптических поверхностей называется **оптической осью системы**. **Луч, направленный вдоль оптической оси системы, проходит её без преломления.**

Оптическая система разделяет все пространство, в котором распространяются световые лучи, на **пространство предметов** и **пространство изображений**. Если после прохождения через оптическую систему световые пучки сохраняют свою гомоцентричность, то каждой точке предмета будет соответствовать одна точка изображения, а изображение всего предмета будет состоять из изображений всех его точек.

Точка, принадлежащая предмету, и точка, являющаяся её изображением, называются **сопряженными точками**.

Изображение точки называется **действительным**, если после прохождения через оптическую систему световые лучи гомоцентрического пучка пересекаются в их геометрическом центре (рис. 20, а).

Если после прохождения через оптическую систему образуется расходящийся пучок, а продолжения расходящихся лучей пересекаются в геометрическом центре — такое изображение называется **мнимым** (рис. 20, б).

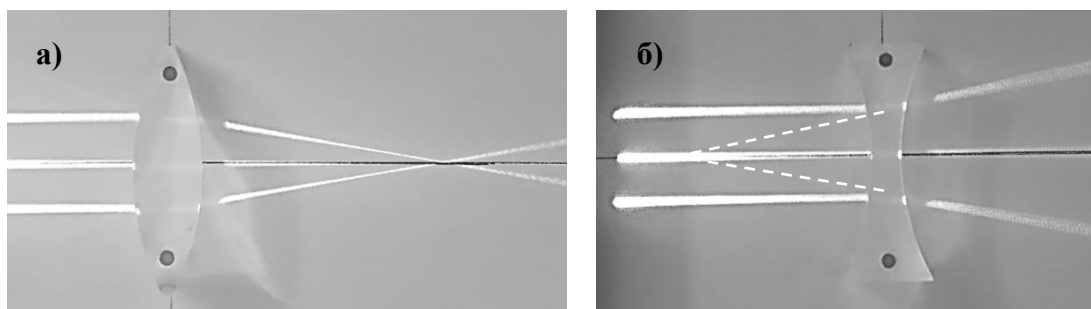


Рис. 20. Формирование изображений в собирающей (а) и рассеивающей (б) линзах. Параллельный пучок лучей после прохождения через собирающую линзу пересекается в точке фокуса. Рассеивающая линза отклоняет пучок параллельных лучей в сторону от главной оптической оси. Пунктиром показано продолжение хода лучей в рассеивающей линзе. Точка пересечения пунктирных линий соответствует мнимому фокусу рассеивающей линзы

Гомоцентричность оптического пучка не всегда сохраняется в реальных оптических системах. Пучок, лучи которого не пересекаются после выхода из оптической системы, называется астигматическим. Примеры нарушения гомоцентричности показаны на рис. 21.

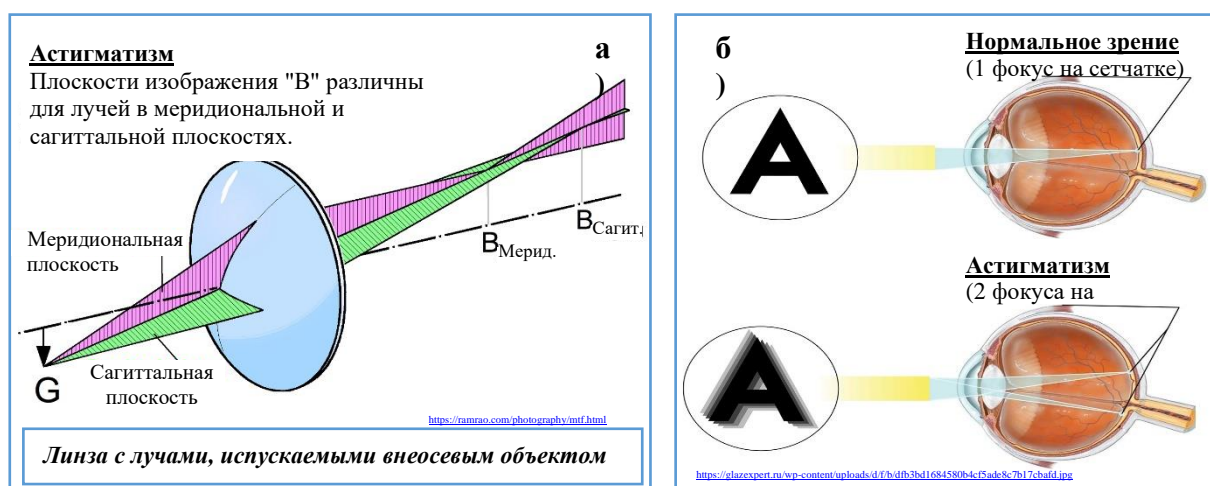


Рис. 21. Нарушение гомоцентричности пучка (а). Формирование фокуса в различных плоскостях. Астигматизм (б)

Формирование изображений сферическими поверхностями

Преломляющие сферические поверхности являются важной составляющей оптических систем. Линия, проходящая через центр кривизны сферической поверхности, называется её **оптической осью**.

Точка оптической оси, сопряженная с точкой, бесконечно удаленной в положительном направлении, называется **первым фокусом** преломляющей поверхности, а расстояние до нее — **первым фокусным расстоянием**. Другими словами, если объект расположен в точке, являющейся первым фокусом, то её изображение будет располагаться на бесконечности.

Точка оптической оси, сопряженная с точкой, бесконечно удаленной в отрицательном направлении, называется **вторым фокусом**, а расстояние до нее

— *вторым фокусным расстоянием*. То есть, когда объект расположен на бесконечности, его изображение располагается в точке, соответствующей положению второго фокуса.

Оптической силой сферической поверхности называется величина, равная $\Phi = \frac{n' - n}{r}$, где n и n' — показатели преломления сред перед и за преломляющей поверхностью, соответственно; r — радиус кривизны сферической поверхности. Единицей измерения оптической силы является диоптрий. Один диоптрий равен оптической силе, равной одному обратному метру. Оптическая сила сферической поверхности обратно-пропорциональна фокусному расстоянию: $f = -\frac{n}{\Phi}$; $f' = \frac{n'}{\Phi}$.

Если свет распространяется из оптически менее плотной среды в более плотную ($n' > n$), параллельный пучок лучей после прохождения через преломляющую поверхность сфокусируется в точке, соответствующей второму фокусу. Сформированное таким образом изображение, находящегося на бесконечности источника излучения будет называться *действительным*, а оптическая сила и фокусное расстояние будут положительными ($\Phi > 0, f' > 0$). В противоположном случае (если $n' < n$), параллельные лучи, идущие от располагающегося на бесконечности объекта, будут отклоняться преломляющей сферической поверхностью в разные стороны от оси и изображение источника лучей, сформированное такой системой, будет *мнимым*, то есть образованным на пересечении продолжений лучей. При этом оптическая сила и фокусное расстояние будут отрицательными ($\Phi < 0, f' < 0$) (рис. 22).

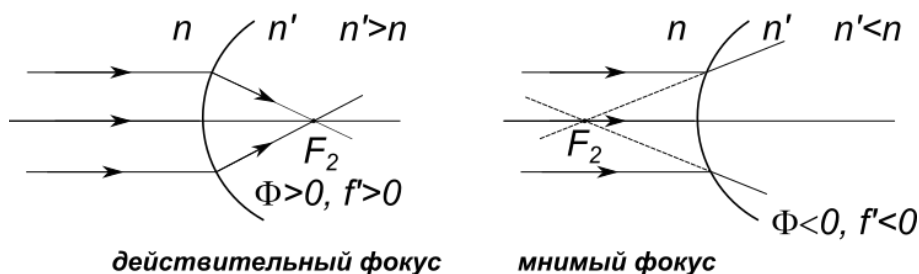


Рис. 22. Расположение фокусов сферических преломляющих поверхностей

Линейный размер источника излучения (объекта) задается принадлежащими ему двумя точками, отстоящими на максимальном расстоянии друг от друга в направлении, перпендикулярном оптической оси. Аналогично определяется и линейный размер изображения по сопряженным точкам.

Линейным увеличением оптической системы называется отношение линейного размера изображения (y') к размеру предмета (y):

$$\beta = \frac{y'}{y} \tag{53}$$

Преломление света на сферической поверхности приводит к изменению угла наклона лучей к направлению оптической оси.

Угловым увеличением называется отношение тангенса угла наклона между лучом и оптической осью в пространстве изображений ($\tan \alpha'$) к тангенсу угла наклона между сопряженным лучом в пространстве предметов и осью ($\tan \alpha$):

$$\gamma = \frac{\tan \alpha'}{\tan \alpha}. \quad (54)$$

В параксиальной области, расположенной бесконечно близко к оптической оси, углы наклона лучей малы, а угловое увеличение может быть рассчитано как отношение соответствующих углов:

$$\gamma = \frac{\tan \alpha'}{\tan \alpha} = \frac{\sin \alpha'}{\sin \alpha} = \frac{\alpha'}{\alpha}. \quad (55)$$

Линзы. Построение изображений в линзах

Главными элементами большинства оптических систем являются **сферические линзы** — прозрачные однородные тела, ограниченные, двумя сферическими поверхностями (или одной сферической и одной плоской поверхностями), имеющими общую ось.

Линза называется **тонкой**, если ее толщина (расстояние между вершинами преломляющих поверхностей) намного меньше радиусов кривизны ограничивающих поверхностей. Можно считать, что тонкая линза располагается в плоскости, перпендикулярной её оптической оси.

Оптическая сила тонкой линзы (Φ) равна сумме оптических сил её преломляющих поверхностей:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2, \quad (56)$$

где Φ_1 и Φ_2 — оптические силы преломляющих поверхностей линзы.

Ось, проходящая через центры кривизны обеих преломляющих поверхностей линзы, называется её **главной оптической осью**.

Точка пересечения главной оптической оси с плоскостью тонкой линзы называется **оптическим центром линзы**. Любая линия, проходящая через оптический центр тонкой линзы и не совпадающая с главной оптической осью, называется **побочной оптической осью**. Лучи света, проходящие через оптический центр тонкой линзы, не преломляются.

Пучок лучей, падающий на тонкую линзу параллельно главной оптической оси, соберется в одной точке, называемой **главным фокусом линзы**. Фокус может быть действительным или мнимым (рис. 20). Расстояние от оптического центра линзы до точки фокуса называется **фокусным расстоянием**.

Пусть произвольный точечный источник света (S) расположен на главной оптической оси линзы на расстоянии d от оси линзы (рис. 23).

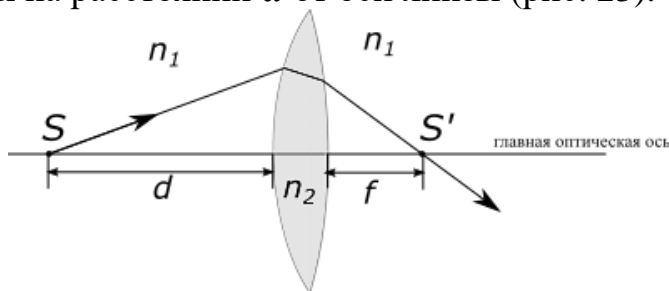


Рис. 23. Ход лучей в собирающей двояковыпуклой линзе. S — точечный источник света, S' — изображение точечного источника, n_1 и n_2 — показатели преломления среды и линзы

Произвольный луч, падающий от точечного источника на линзу под малым углом, после прохождения линзы и преломления на её поверхностях пересечет главную оптическую ось в точке S' , расположенной на расстоянии f от преломляющей поверхности линзы. Если показатель преломления среды перед и после линзы одинаков (среда одинаковая, например, воздух), то расстояния d и f будут связаны следующим соотношением:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (57)$$

где d — расстояние от источника (точки S) до первой преломляющей поверхности линзы; f — расстояние от задней преломляющей поверхности до изображения (точки S'); R_1 и R_2 — радиусы кривизны передней и задней преломляющей поверхности линзы; $n = \frac{n_{\text{линзы}}}{n_{\text{среды}}}$ — относительный показатель преломления линзы относительно среды; $n_{\text{линзы}}$ — абсолютный показатель преломления материала линзы, $n_{\text{среды}}$ — абсолютный показатель преломления среды.

Для всех параксиальных лучей (расположенных вблизи оптической оси) расстояние f не зависит от угла, под которым луч падает на линзу. Все лучи, исходящие от источника света, после преломления пройдут через точку S' , являющуюся изображением источника (светящейся точки S).

Если источник света находится очень далеко, так что расстояние $d \rightarrow \infty$, лучи, падающие на линзу после преломления в ней пройдут через одну точку F , являющуюся фокусом линзы.

С учётом этого, соотношение (57) примет вид:

$$\frac{1}{\infty} + \frac{1}{F} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (58)$$

Отсюда,

$$\frac{1}{F} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (59)$$

Величина, обратная фокусному расстоянию $\Phi = \frac{1}{F}$ называется оптической силой линзы. Единица измерения оптической силы в СИ — диоптрия (дптр).

Таким образом, для тонкой линзы выполняется следующее соотношение (**формула тонкой линзы**):

$$\pm \frac{1}{F} = \frac{1}{d} \pm \frac{1}{f}, \quad (60)$$

где F — фокусное расстояние линзы; d — расстояние от источника (объекта) до оптического центра линзы; f — расстояние от оптического центра линзы до изображения.

Если фокус мнимый, то фокусное расстояние принимается отрицательным ($F < 0$). Если линза дает мнимое изображение — то величина f принимается отрицательной ($f < 0$).

Оптическая сила системы, состоящей из двух или более тонких линз, расположенных вплотную друг ко другу, равна сумме оптических сил каждой из линз:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 + \dots \quad (61)$$

В реальности используются линзы не только тонкие.

Для толстой линзы, имеющей различные радиусы кривизны преломляющих поверхностей, характерно различие угла входа луча и угла выхода луча из линзы. То есть входящий и выходящий из линзы лучи находятся на различном расстоянии (r_1 и r_2) от главной оптической оси (рис. 24).

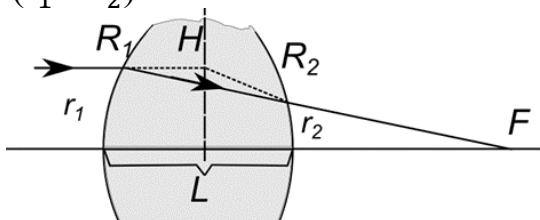


Рис. 24. Ход лучей в толстой линзе

Оптическая сила толстой линзы равна:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - \frac{\Phi_1 \Phi_2}{n_l} L, \quad (62)$$

где L — толщина линзы (расстояние между вершинами преломляющих поверхностей), Φ_1 и Φ_2 — Оптические силы преломляющих поверхностей линзы (поверхностей, ограничивающих линзу), n_l — относительный показатель преломления материала линзы. Для тонкой линзы $L = 0$ и $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$.

Фокусное расстояние толстой линзы, отсчитывается от главной плоскости (H) линзы (рис. 24). Рассчитать фокусное расстояние можно, зная оптическую силу:

$$\frac{1}{f} = \frac{\Phi}{n_0} = \frac{1}{n_0} \left(\Phi_1 + \Phi_2 - \frac{\Phi_1 \Phi_2}{n_l} L \right), \quad (63)$$

где $\Phi_1 = \frac{n_l - n_0}{R_1}$, $\Phi_2 = \frac{n_0 - n_l}{R_2}$ — оптические силы преломляющих поверхностей толстой линзы, имеющих радиусы кривизны R_1 и R_2 , соответственно.

Оптическая сила системы, состоящей из двух тонких линз (рис. 25) равна:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - \frac{\Phi_1 \Phi_2}{n_0} L, \quad (64)$$

где Φ_1 и Φ_2 — оптические силы каждой из линз; L — расстояние между линзами; n_0 — показатель преломления среды, в которой находятся линзы.

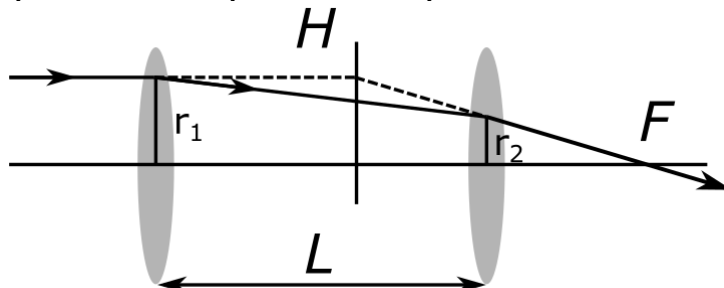


Рис. 25. Ход лучей в системе, состоящей из двух тонких собирающих линз, расположенных на одной оптической оси на расстоянии L друг от друга

Фокусное расстояние такой системы, отсчитываемое от главной плоскости системы Н (рис. 25) равно:

$$\frac{1}{F} = \frac{\Phi}{n_0} = \frac{1}{n_0} \left(\Phi_1 + \Phi_2 - \frac{\Phi_1 \Phi_2}{n_0} L \right). \quad (65)$$

Строение оптической системы глаза

Глаз представляет собой сложную оптическую систему, отвечающую за восприятие, обработку и передачу зрительной информации. Эта система состоит из множества элементов, предназначенных для выполнения различных функциональных задач (рис. 26).

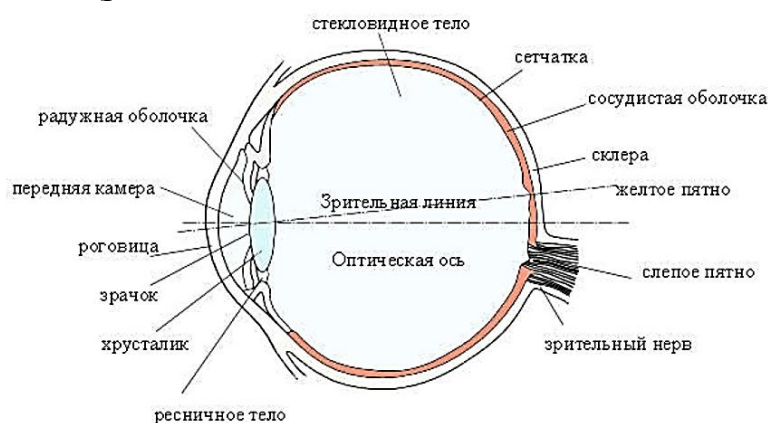


Рис. 26. Схема строения глаза. Показаны оболочки, имеющие наибольший вклад в формирование изображений

Все оптические элементы глаза расположены в пределах *глазного яблока* — шаровидного тела, почти полностью покрытого непрозрачной твердой оболочкой — *склерой*. Последняя не участвует в формировании изображения. В передней части глаза склера переходит в *роговицу*. Склера и роговица обуславливают форму глаза, к ним прикрепляются глазодвигательные мышцы. Диаметр глазного яблока составляет около 22-24 мм.

Проходящий в глаз поток лучей ограничивается расположенной позади роговицы сосудистой пластинкой — *радужной оболочкой*, выполняющей функции диафрагмы. Благодаря наличию в радужной оболочке большого количества пигментных клеток, она имеет характерный цвет. Отверстие в радужной оболочке носит название *зрачка*. Через него в глаз проникают только центральные лучи светового потока, все остальные поглощаются пигментным слоем радужной оболочки. Таким образом радужная оболочка, путём изменения диаметра зрачка, позволяет глазу приспосабливаться к различной интенсивности освещенности и отсеивает искажения, вызванные боковыми световыми лучами.

Дальнейшая фокусировка светового потока происходит на двояковыпуклой эластичной линзе глаза — *хрусталике*. Хрусталик крепится на мышцах ресничного тела, которые позволяют изменять его форму.

Расположенная между роговицей и хрусталиком полость, заполненная прозрачной жидкостью, называется *передней камерой*.

Позади хрусталика находится *задняя камера*, заполненная *стекловидным телом*. Внутренняя поверхность задней камеры глаза покрыта слоем светочувствительных элементов — *сетчаткой*. Падающие на сетчатку лучи вызывают раздражение светочувствительных элементов. Эти сигналы передаются по волокнам зрительного нерва в зрительные центры головного мозга, где формируются зрительные образы (зрительное восприятие).

Светочувствительные элементы сетчатки делятся на два типа: *палочки* и *колбочки*. Колбочки являются цветочувствительными элементами. Они преимущественно располагаются в центральной части сетчатки в области жёлтого пятна. В этой области сетчатки формируется наиболее отчетливое зрение.

Палочки, малочувствительны к свету, но при этом имеют высокую чувствительность к свету от слабых источников. Преимущественно палочки располагаются в периферических участках сетчатки. Это обуславливает боковое зрение.

Питание глаза осуществляется по сети кровеносных сосудов, образующих *сосудистую оболочку*, расположенную между сетчаткой и склерой.

Нервные волокна, отвечающие за восприятие изображения, собираются в зрительный нерв, который выходит из глаза в области сетчатки, называемой *слепое пятно*. Объект, изображение которого попадает в область слепого пятна, оказывается невидимым.

Участок сетчатки, на котором формируется наилучшее изображение называется *жёлтым пятном*. Линия, проходящая через центр хрусталика и центр жёлтого пятна, называется *зрительной осью*. Она повернута относительно оптической ось на угол около 5° .

Формирование изображения в глазу

Отраженный от наблюдаемого объекта поток света проходит через оптическую систему глаза и фокусируется на сетчатке, образуя на ней уменьшенное, перевернутое (обратное) изображение (рис. 27). В дальнейшем изображение переворачивается при обработке головным мозгом.

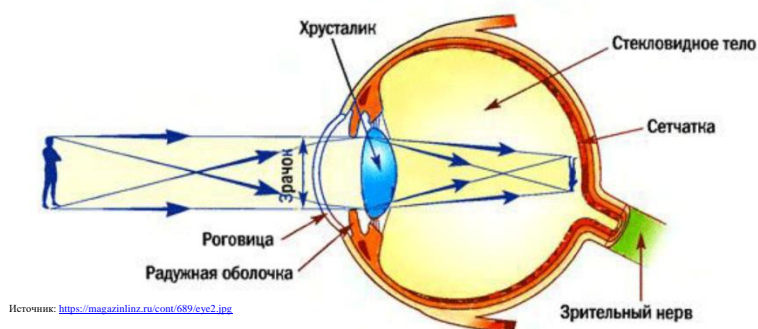


Рис. 27. Формирование изображения на сетчатке глаза

Глаз не является однородной оптической системой. Показатели преломления большинства элементов глаза выше показателя преломления

воздуха. В частности, показатель преломления стекловидного тела, где формируется изображение, близок к показателю преломления воды ($n \approx 1,33$). Это обуславливает несимметричность положения переднего и заднего фокусов глаза (переднее и заднее фокусное расстояние приблизительно равны 17 и 23 мм).

Преломление света прежде всего происходит на внешней оболочке глаза — роговице, и на поверхностях хрусталика. Хрусталик является динамической структурой, плотность и показатель преломления которой максимальны в центре и минимальны по краям. Благодаря этой особенности строения хрусталика уменьшается создаваемая им сферическая аберрация.

Ввиду сложности оптической системы глаза при расчетах обычно пользуются упрощенными схемами, эквивалентными истинному глазу. При моделировании оптических свойств глаз можно заменить модельной системой, называемой *приведенным глазом* (рис. 28), который имеет следующие характеристики (модель Гульстранда):

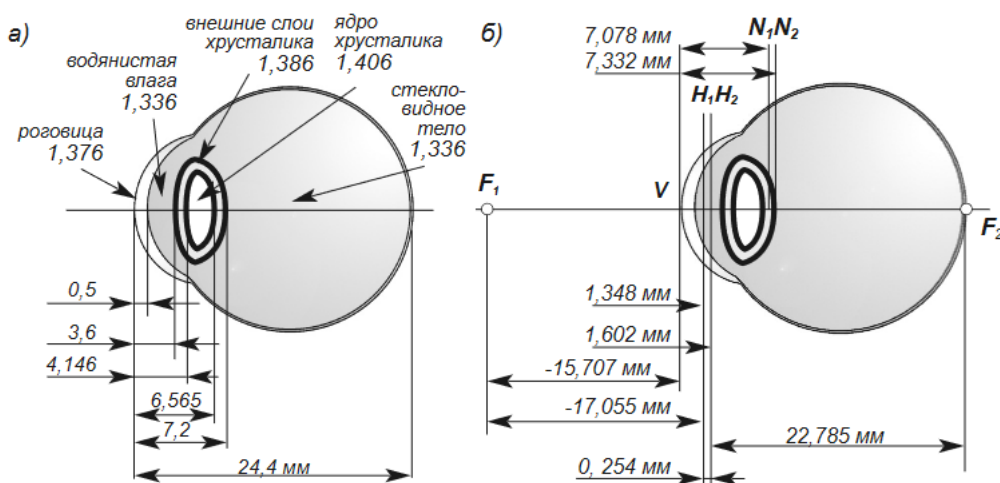


Рис. 28. Схема приведенного глаза (модель Гульстранда): а) показатели преломления различных сред глаза человека и расстояния от передней вершины сферической поверхности роговицы до преломляющих поверхностей (в мм); б) расположение главных оптических плоскостей (включая переднюю и заднюю фокусные плоскости, F_1 и F_2 , соответственно) относительно передней вершины роговицы V

Аккомодация

Способность глаза приспосабливаться к различению предметов, находящихся на различном расстоянии от глаза, называется **аккомодацией**. Подстройка оптической системы глаза осуществляется путем изменения кривизны хрусталика с помощью мышц ресничного тела. При увеличении натяжения мышц ресничного тела хрусталик вытягивается, при этом увеличиваются его радиусы кривизны. При расслаблении мышц, наоборот, увеличивается кривизна хрусталика.

Таким образом, в ненапряженном состоянии нормальный глаз лучше формирует изображения удаленных предметов, а в состоянии максимальной аккомодации — близко расположенных предметов.

Наибольшее расстояние, на котором ненапряженный глаз может сформировать четкое изображение предмета, называется **дальней точкой глаза**.

Наименьшее расстояние, на котором может сформироваться четкое изображение предмета на сетчатке при максимальном напряжении глаза, называется **ближней точкой глаза**.

При рассматривании предметов, расположенных вдали на горизонте (при аккомодации глаза на бесконечность) задний фокус совпадает с сетчаткой.

Величина, равная разности обратных величин расстояний между ближней и дальней точками глаза называется **диапазоном аккомодации глаза**. Диапазон аккомодации измеряется в единицах измерения оптической силы — в диоптриях.

Способность глаза к аккомодации уменьшается с возрастом. Случается, что к старости аккомодация совсем прекращается. Это явление называется **возрастной дальнозоркостью** или **пресбиопией**.

Наименьшее расстояние, на котором здоровый глаз испытывает наименьшее напряжение при рассматривании предмета (деталей предмета), называется **расстоянием наилучшего зрения**. Это расстояние для каждого человека может быть индивидуальным, но в среднем находится в диапазоне 25-30 см.

Исправление зрительных недостатков

Известно три основных типа нарушений или недостатков зрения: близорукость, дальнозоркость и астигматизм.

Близорукость (миопия) — это дефект зрения, при котором лучи от находящегося на бесконечности точечного источника фокусируются перед сетчаткой (рис. 29, 4). Близорукий глаз имеет большую оптическую силу по сравнению с нормальным глазом (рис. 29, 1). Этот дефект корректируется путем помещения рассеивающей линзы перед глазом, которая позволяет сместить точку фокуса в область сетчатки (рис. 29, 5).

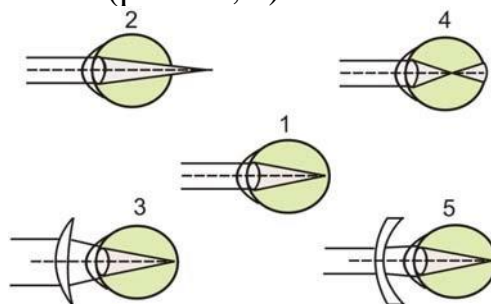


Рис. 29. Коррекция зрения с помощью линз. 1 — нормальный глаз; 2,3 — дальнозоркий; 4,5 — близорукий

Дальнозоркость (гиперметропия) — нарушение зрения, при котором точка фокусировки лучей, идущих от бесконечно удалённого предмета, находится позади сетчатки (рис. 29, 2). В отличие от близорукости, дальнозоркий глаз характеризуется меньшей оптической силой. Поэтому гиперметропия корректируется путем подбора собирающей линзы, способной

приблизить точку фокуса до момента формирования чёткого изображения на сетчатке (рис. 29, 3).

Астигматизм — нарушение зрения, при котором наблюдается различная преломляющая способность глаза в различных плоскостях, проходящих через оптическую ось глаза. Причиной такого дефекта может быть различная кривизна поверхности роговицы (выпуклость). Одним из способов коррекции астигматизма является использование тороидальных или цилиндрических линз.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Приборы и материалы: набор линз, осветитель; листы для составления оптических схем; линейка.

Используемые в работе приборы представлены на рис. 30.

При работе с источником света следует соблюдать осторожность и не допускать прямого попадания лучей в глаза.

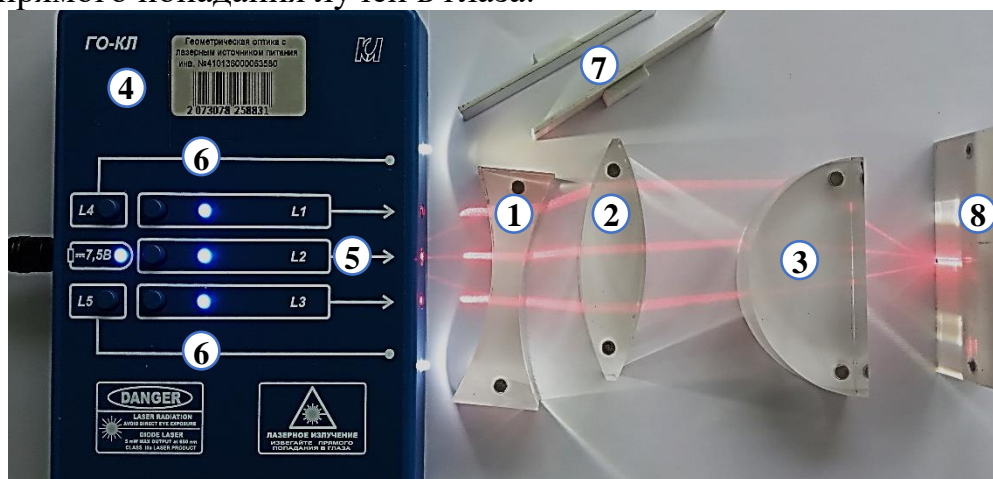
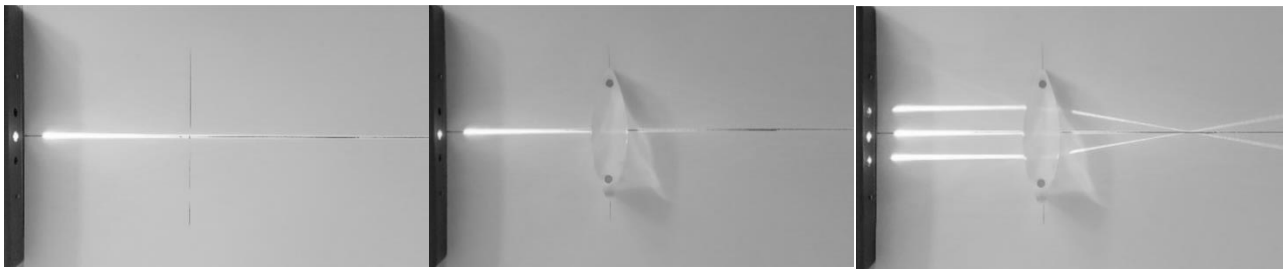


Рис. 30. Лабораторный набор приборов по геометрической оптике. стеклянные линзы (показатель преломления равен 1,52): двояковогнутая симметричная линза (1), двояковыпуклая симметричная линза (2), плосковыпуклая полукруглая линза (3); осветитель (4) с несколькими источниками, дающими направленный (5) и рассеянный свет (6); два плоских зеркала (7); экран (8)

ХОД РАБОТЫ

Задание 1. Определение положения фокуса для двояковыпуклой линзы

1.1. Расположите источник света на листе, таким образом, чтобы лазерный луч от среднего диода был направлен вдоль жирной линии, нанесенной на листе (рис. 31).



а)

б)

в)

Рис. 31. Определение фокуса собирающей линзы. Этапы: выравнивание направления центрального луча (а); установка линзы (б), определение фокуса линзы (в). Описание в тексте

- 1.2. Установите двояковыпуклую линзу перпендикулярно к жирной линии так, чтобы луч света (от среднего диода) проходил через линзу, не меняя направления (то есть проходил по исходной жирной линии).
- 1.3. Направьте на линзу параллельный пучок лучей. Для этого включите два боковых диодных источника света, не меняя положения источника света и линзы.
- 1.4. Измерьте расстояние от центра двояковыпуклой линзы до точки пересечения лучей. Запишите полученное значение фокусного расстояния F в табл. 7.
- 1.5. Рассчитайте оптическую силу линзы по формуле: $\Phi = \frac{1}{F}$. Запишите полученное значение в табл. 7.
- 1.6. Рассчитайте радиус кривизны линзы R по известным значениям показателя преломления, фокусного расстояния и оптической силы линзы, как показано ниже. Внесите полученное значение радиуса кривизны в табл. 7.

Для двояковыпуклой линзы оптическая сила равна $\Phi = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$, где n — показатель преломления материала линзы, R_1 и R_2 — радиусы кривизны поверхностей линзы. Если линза симметричная, то $R_1 = R_2 = R$, а оптическая сила $\Phi = \frac{(n-1)2}{R}$, откуда $R = \frac{2(n-1)}{\Phi}$, где n — показатель преломления материала, из которого изготовлена линза, $\Phi = \frac{1}{F}$ — оптическая сила линзы, значение которой получено в п.1.5 задания 1.

Таблица 7

Определение положения фокуса для двояковыпуклой линзы

	Фокусное расстояние F , м	Оптическая сила Φ , дптр	Радиус кривизны линзы R , м
Двояковыпуклая линза			

Задание 2. Нахождение оптического центра и определение положения фокуса плосковыпуклой линзы

2.1. Расположите источник света на листе, таким образом, чтобы луч света от среднего диода был направлен вдоль осевой линии, нанесенной на листе (рис. 32).

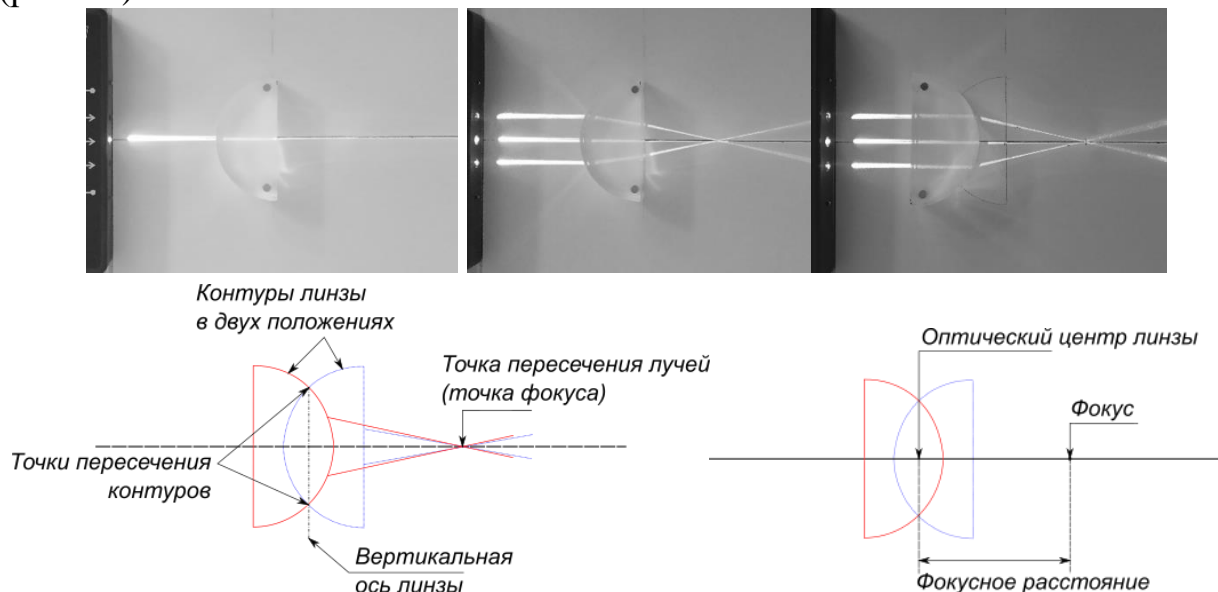


Рис. 32. Нахождение оптического центра и определение положения фокуса плосковыпуклой линзы. Описание в тексте

2.2. Установите плосковыпуклую линзу перпендикулярно к осевой линии, нанесенной на листе бумаги, выпуклой стороной к источнику света так, чтобы луч света (от среднего диода) проходил через линзу, не меняя направления (то есть проходил по исходной осевой линии).

2.3. Направьте на линзу параллельный пучок лучей. Для этого включите два боковых диодных источника света, не меняя положения источника света и линзы.

2.4. Отметьте на листе положение линзы (аккуратно обведите линзу по контуру, не допуская ее смещения) и точку пересечения лучей, прошедших через линзу. Обратите внимание: точка пересечения лучей должна лежать на главной оптической оси (на жирной линии, нанесенной на листе), если это не так, проверьте правильность установки источника света и линзы, согласно п.2.1 - 2.3.

2.5. Поверните линзу плоской стороной к источнику света. Расположите линзу перпендикулярно осевой линии, так, чтобы луч света от среднего диода проходил через линзу, не меняя направления.

2.6. Направьте параллельный пучок лучей на линзу. Для этого включите два боковых диодных источника света. Перемещая линзу вдоль горизонтальной осевой линии до тех пор, пока точка пересечения лучей не совпадет с точкой

фокуса нанесенной на осевой линии. Аккуратно обведите линзу по контуру, не допуская ее смещения.

2.7. Отключите источник света, снимите линзы с листа. Постройте отрезок, соединяющий пересечения двух полуокружностей (огibaющих линз). Измерьте расстояние от данного отрезка до точки фокуса, нанесенной на осевой линии. Это расстояние равно фокусному расстоянию исследуемой плосковыпуклой линзы. Запишите полученное значение в табл. 8.

Таблица 8

Нахождение оптического центра и определение положения фокуса
плосковыпуклой линзы

	Измеренное фокусное расстояние F , м	Оптическая сила линзы Φ , дптр	Измеренный радиус кривизны линзы R , м	Расчетное фокусное расстояние F_2 , м
Плосковыпуклая линза				

2.8. Линейкой измерьте радиус кривизны линзы R . Учитывая, что радиус кривизны плоской стороны равен бесконечности, рассчитайте фокусное расстояние F_2 плосковыпуклой линзы по формуле: $F_2 = \frac{R}{n-1}$, где R — радиус кривизны линзы, n — показатель преломления.

Внесите полученное значение фокусного расстояния в табл. 8.

2.9. Рассчитайте оптическую силу данной линзы по формуле $\Phi = \frac{n-1}{R_1}$.

Результат внесите в табл. 8.

Задание 3. Определение фокусного расстояния симметричной двояковогнутой линзы

2.1. Расположите источник света на листе, таким образом, чтобы луч света от среднего диода был направлен вдоль осевой линии, нанесенной на листе (рис.33).

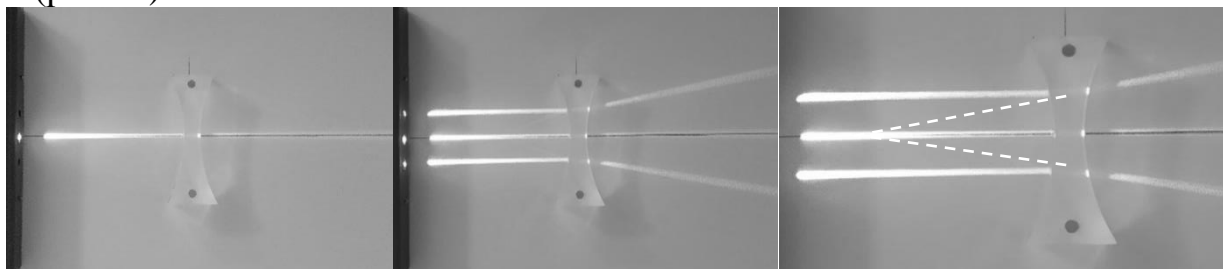


Рис. 33. Определение фокусного расстояния симметричной двояковогнутой линзы. Пунктиром показано продолжение хода лучей в рассеивающей линзе. Точка пересечения пунктирных линий соответствует мнимому фокусу рассеивающей линзы

- 2.2. Установите двояковогнутую линзу перпендикулярно к осевой линии, нанесенной на листе бумаги так, чтобы луч света (от среднего диода) проходил через линзу, не меняя направления (то есть проходил по исходной осевой линии).
- 2.3. Направьте на линзу параллельный пучок лучей. Для этого включите два боковых диодных источника света, не меняя положения источника света и линзы.
- 2.4. Отметьте на листе положение линзы (аккуратно обведите линзу по контуру, не допуская ее смещения). Несколькоими штрихами или точками обозначьте ход лучей, падающих на линзу и исходящих из нее, включая и направление среднего луча, соответствующее главной оптической оси линзы.
- 2.5. Отключить осветитель. Снимите линзу с листа. Начертите ход лучей через линзу.
- 2.6. Начертите продолжение лучей, рассеянных линзой. Найдите точку пересечения продолжений рассеянных лучей.
- 2.7. Измерьте расстояние от точки пересечения до центра линзы. Рассчитайте оптическую силу рассеивающей линзы. Внесите полученные значения фокусного расстояния и оптической силы в табл. 9.

Таблица 9

Определение фокусного расстояния симметричной двояковогнутой линзы

	Фокусное расстояние F , м	Оптическая сила Φ , дптр
Двояковогнутая линза		

Задание 4. Построение оптической модели глаза. Аккомодация.

- 4.1. Соберите схему согласно рис. 34. Используйте источник рассеянного излучения. На пути луча света установите плосковыпуклую линзу («хрусталик»), направьте её сферической стороной к осветителю.

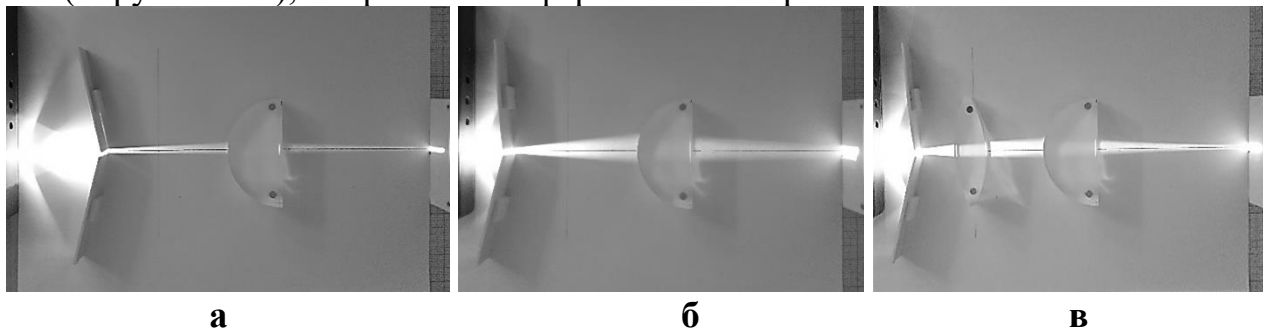


Рис. 34. Построение оптической модели глаза. Аккомодация. Описание в тексте

- 4.2. Установите диафрагму («зрачок») между источником света и «хрусталиком» (рис. 34, а). (В качестве диафрагмы можно использовать два плоских зеркала).
- 4.3. Установите экран («сетчатку») в точку фокуса лучей, прошедших через линзу. Построенная таким образом модель соответствует нормальному глазу.
- 4.4. Переместите осветитель ближе к «глазу», изображение на экране станет размытым (рис. 34, б). Установите еще одну собирающую линзу таким образом, чтобы сфокусировать лучи в плоскости «сетчатки» (рис. 34, в). (Не перемещайте экран, поскольку мы не можем двигать сетчатку!) Этим действием моделируется аккомодация глаза, осуществляемая путем увеличения толщины хрусталика. Сделайте выводы о механизме аккомодации глаза.

Задание 5. Коррекция зрения.

5.1. Соберите оптическую схему «здорового глаза» (рис. 35, а). Для этого установите плосковыпуклую собирающую линзу. Включите параллельный пучок лучей. Установите экран в точке фокусировки лучей.

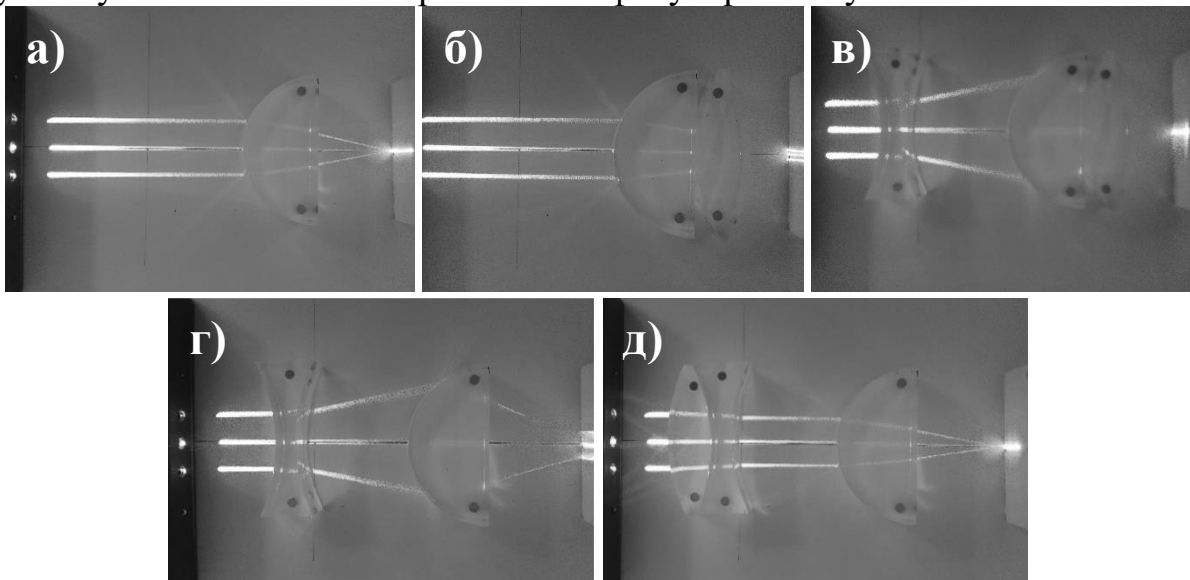


Рис. 35. Демонстрация основных типов дефектов зрения. а) Нормальный глаз; б) Близорукий глаз; г) Дальнозоркий глаз. в) Коррекция близорукости при помощи рассеивающей линзы; д) Коррекция дальнозоркости при помощи собирающей линзы

5.2. Соберите модель близорукого глаза (рис. 35, б) для этого к модели «здорового глаза», собранной в п.5.1 добавьте собирающую линзу, чтобы лучи были собраны перед экраном («сетчаткой»).

5.3. Скорректируйте «зрение». Для этого установите перед «глазом» рассеивающую линзу («очки») так, чтобы лучи фокусировались

приблизительно на прежнем расстоянии, соответствующем модели здорового глаза (рис. 35, в)

5.4. Соберите модель дальнозоркого глаза (рис. 35, г) для этого к модели «здорового глаза», собранной в п.5.1 добавьте рассеивающую линзу, чтобы лучи были собраны позади экрана («сетчатки»).

5.5. Скорректируйте «зрение». Для этого установите перед «глазом» собирающую линзу («очки») так, чтобы лучи фокусировались приблизительно на прежнем расстоянии, соответствующем модели здорового глаза (рис. 35, д).

5.6. Сделайте выводы.

Контрольные вопросы

1. Опишите строение глаза с точки зрения оптики.
2. Что такое аккомодация?
3. Какие дефекты зрения вам известны? Как их можно скорректировать?
4. Человек привык читать книгу, держа ее на расстоянии 45 см от глаз. Какова должна быть оптическая сила очков, которые должен носить человек, чтобы читать книгу, держа ее на расстоянии наилучшего зрения $d_0 = 25$ см?
5. Близорукий человек может читать книгу, держа ее на расстоянии не более 15 см от глаз. Какова должна быть оптическая сила очков, которые должен носить человек, чтобы читать книгу, держа ее на расстоянии наилучшего зрения $d_0 = 25$ см?

Литература

1. Матвеев А.Н. Оптика : учеб. пособие для физ. специальностей вузов. — М.: Высшая школа, 1985. — 351 с.

<http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=342145&idb=0>.

2. Ландсберг Г.С. Оптика : учеб. пособие для студентов физ. специальностей вузов. — 6-е изд., стер. — М. : Физматлит, 2003. — 848 с.

<http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=46237&idb=0>.

3. Гоголева, Е. М. Прикладная оптика : учебное пособие / Е. М. Гоголева, Е. П. Фарафонтова. — Екатеринбург : УрФУ, 2016. — 184 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/99062>. — Режим доступа: для авториз. пользователей.

МЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ.
ЧАСТЬ 1

Составители:

Андрей Владимирович **Юдинцев**
Оксана Николаевна **Шерстнева**
Нина Николаевна **Пескова** и др.

Учебно-методическое пособие

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский
государственный университет им. Н.И. Лобачевского».
603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.

Подписано в печать _____. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. _____. Уч.-изд. л. _____

Заказ № _____ Тираж экз. _____

Отпечатано в типографии Нижегородского госуниверситета
им. Н.И. Лобачевского
603000, г. Нижний Новгород, ул. Большая Покровская, 37
Лицензия ПД № 18-0099 от 14.05.01