

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВЕРО-ОСЕТИНСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ МЕДИЦИНСКАЯ АКАДЕМИЯ»
Министерства здравоохранения Российской Федерации**

КАФЕДРА ХИМИИ И ФИЗИКИ

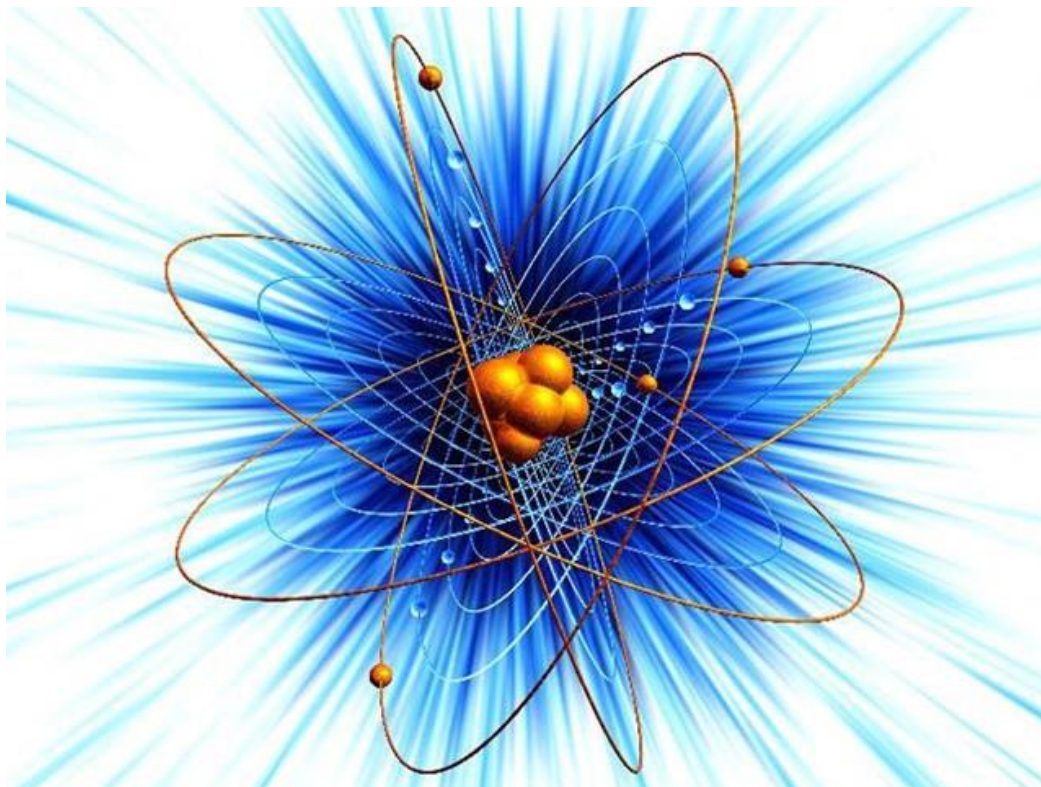
Методические материалы

по физике

Основной профессиональной образовательной программы высшего
образования-программы специалитета по специальности
33.05.01 Фармация, утвержденной 31.08.2020г.

Ф И З И К А

Учебно-методическое пособие



ВЛАДИКАВКАЗ - 2020

Составители:

канд. физ.-мат. наук, доцент *Боциев И.Ф.*,
канд. пед. наук, доцент *Боциева Н.И.*

Рецензенты:

зав. кафедрой физики конденсированного состояния
ФГБОУ ВО «Северо-Осетинский государственный университет
им. К.Л. Хетагурова» д.ф.-м.н., профессор *Магкоев Т.Т.*

зав. кафедрой биохимии ФГБОУ ВО СОГМА Минздрава России
к.м.н., доцент *Гурина А.Е.*

Пособие содержит учебно-методические материалы к лабораторным занятиям по физике.

Для студентов фармацевтического факультета

Рекомендовано к изданию ЦКУМС
ФГБОУ ВО СОГМА Минздрава России
«12» февраля 2020 г., протокол №3

СОДЕРЖАНИЕ:

Метрология. Вычисление погрешностей	3
Идентификация жидкостей по коэффициенту поверхностного натяжения	12
Идентификация жидкости по коэффициенту вязкости	22
Идентификация веществ по плотности	28
Определение частоты исследуемого напряжения по методу фигур Лиссажу.....	34
Изучение дисперсии электропроводности живой ткани.....	40
Определение концентрации раствора методом рефрактометрии.....	47
Определение размеров малых объектов с помощью микроскопа	54
Определение концентрации оптически активных веществ методом поляриметрии.....	64
Определение концентрации раствора методом колориметрии.....	74
Устройство и использование спектрофотометра.....	83

МЕТРОЛОГИЯ. ВЫЧИСЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ

1. Научно-методическое обоснование темы:

Одним из важнейших условий, необходимых для получения надежных результатов при выполнении лабораторных работ, является выполнение всех требуемых измерений с максимальным вниманием и тщательностью, использование в полной мере точности и чувствительности применяемой измерительной аппаратуры. Однако даже при наилучших условиях проведения эксперимента и при наличии очень точных и чувствительных приборов во всяком измерении неизбежно содержится некоторая неточность, погрешность, характер и причины которой могут быть различны.

Принято разделять погрешности или ошибки, получаемые в измерениях, на систематические и случайные. Важной характеристикой первых служит то, что они, как можно заключить из их названия, действуют всегда в одну сторону — либо увеличивая, либо уменьшая результат измерения. Случайные погрешности, напротив, с одинаковой вероятностью могут давать отклонение от истинного значения измеряемой величины как в сторону его увеличения, так и в сторону уменьшения.

2. Теория:

1. Основные понятия метрологии

Метрологией называют науку об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

Измерением называют нахождение значения физической величины опытным путем с помощью технических средств. Измерения позволяют установить закономерности природы и являются элементом познания окружающего нас мира.

Различают измерения *прямые*, при которых результат получается непосредственно из измерения самой величины (например, измерение температуры тела медицинским термометром, измерение длины предмета линейкой), и *косвенные*, при которых искомое значение величины находят по известной зависимости между ней и непосредственно измеряемыми величинами (например, определение массы тела при взвешивании с учетом выталкивающей силы, определение вязкости жидкости по скорости падения в ней шарика). Технические средства для производства измерений (средства измерений) могут быть разных типов. Наиболее известным читателю средством измерений является *измерительный прибор*, в котором измерительная информация представляется в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем (например, температура представлена в термометре длиной столбика ртути, сила тока — показанием стрелки амперметра или цифровым значением).

К средствам измерений относят также *меру*, которая предназначена для воспроизведения физической величины заданного размера (например, гиря определенной массы).

Одно из распространенных средств измерений — *измерительный преобразователь (датчик)*. Он предназначен для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения (например, температура может быть представлена электрическим сигналом).

Значение физической величины, полученное при измерении, отличается от истинного. Степень приближения результатов измерения к истинному значению измеряемой величины характеризуется *точностью измерений*.

Точность измерений является качественным показателем измерений. Количественная оценка результата измерений дается не его точностью, а *погрешностью* — отклонением результатов измерений от истинного значения измеряемой величины. *Чем меньше погрешность, тем выше точность измерений*.

Погрешности объясняются несовершенством средства измерений, неопытностью персонала, влиянием посторонних факторов и др. Из этих причин можно выделить те, которые проявляются нерегулярно и при повторных измерениях оказывают иное количественное воздействие на результат. Такие факторы приводят к *случайным погрешностям*. Это случайные

величины, поэтому их можно обработать, проанализировать и таким образом учесть, используя соответствующий математический аппарат: теорию вероятностей и математическую статистику.

Одним из основных метрологических понятий являются *единицы физических величин*. Единицей физической величины называют физическую величину, принятую по соглашению в качестве основы для количественной оценки соответствующей физической величины.

2. Виды погрешностей измерений

Рассмотрим наиболее существенные источники возможных погрешностей при выполнении измерений.

1. Погрешности, зависящие от метода измерения.

Эти погрешности имеют характер систематических и возникают вследствие недостаточно полного учета факторов, влияющих на измеряемую величину.

Такие погрешности можно устранить переходом к более совершенному методу измерения.

2. Систематические погрешности, связанные с применяемой аппаратурой.

Качество изготовления измерительного прибора или недостатки в его градуировке и регулировке также обуславливают возможность появления погрешностей, имеющих характер систематических. Так, при неправильной регулировке аналитических весов в результате взвешивания будет входить некоторая систематическая ошибка.

Таких систематических погрешностей в измерении можно избежать путем устранения недостатков в регулировке прибора или путем введения нужных поправок к его шкале.

3. Случайные погрешности, зависящие от аппаратуры.

Этот род погрешностей в измерениях присущ всякому измерительному прибору даже весьма высокого качества и связан с тем, что любой прибор всегда имеет лишь определенную чувствительность или определенную точность. Это значит, что измерительный прибор может реагировать лишь на такие изменения измеряемой величины, которые лежат в пределах его чувствительности, или в пределах точности разбивки его шкалы. Таким образом, в показании измерительного прибора скрыта погрешность, соответствующая; как говорят, его классу точности.

4. Индивидуальные погрешности наблюдателя.

Эти погрешности, связанные с процессом измерения и зависящие от экспериментатора — его внимания, тщательности выполнения измерений, опытности, обусловлены в общем ограниченностью органов чувств человека. Как правило, они являются случайными, так как с одинаковой вероятностью могут влиять на результат измерений как в сторону его увеличения, так и в сторону уменьшения.

5. Погрешности, связанные с изменением условий измерения.

К случайным следует отнести также погрешности, связанные с изменением условий опыта, не зависящим от экспериментатора, например, колебания температуры в комнате в процессе наблюдения, изменение давления, колебания сетевого напряжения, питающего электрическую схему и т.п. Такие погрешности могут быть учтены лишь постоянным контролем над изменяющейся величиной в течение опыта и установлением крайних значений, между которыми изменяется эта величина. Очевидно, что за величину погрешности в этом случае можно взять половину интервала, в пределах которого происходят изменения.

Так как случайные погрешности могут с одинаковой вероятностью давать как несколько преувеличенные, так и несколько преуменьшенные значения измеряемой величины, а в серии многократных измерений они могут взаимно уравниваться, то и погрешность результата серии многократных измерений будет меньше, чем погрешность, сделанная в каждом отдельном измерении.

Наряду с систематическими и случайными погрешностями в измерениях могут встречаться *промахи*. Так называются результаты измерения, резко отличающиеся от остальных измерений данной величины, или явно неверные

из-за недосмотра экспериментатора или нарушения нормальной работы измерительной аппаратуры. Промехи следует отбрасывать и заменять соответствующими повторными измерениями, проверив правильность действия аппаратуры.

3. Нахождение численного значения измеряемой величины, наиболее близкого к истинному, при прямых многократных измерениях

Так как любое отдельное измерение какой-либо величины, а следовательно, и результат серии многократных ее измерений неизбежно содержит некоторую погрешность, результаты подсчета по данным эксперимента не могут дать абсолютно точного истинного значения измеряемой величины, а являются лишь приближенными. Истинное значение лежит в пределах, определяемых погрешностями, которые имели место в измерениях. Так, если найдено, что погрешность в серии прямых измерений длины l какого-либо предмета составляет 0,5 мм, а среднее значение длины, найденное из опыта, равно 23,4 мм, то это значит, что истинное значение длины лежит между $23,4 - 0,5$ и $23,4 + 0,5$ мм:

$$22,9 \text{ мм} < l < 23,9 \text{ мм}.$$

Результаты измерения принято записывать следующим образом:

$$l = (23,4 \pm 0,5) \text{ мм}.$$

Пределы, в которых заключено истинное значение измеряемой величины, определяют точность ее измерения, надежность полученного результата. При оценке отклонения полученного результата от истинного значения будем предполагать, что все погрешности обусловлены случайными ошибками наблюдений, а систематические ошибки отсутствуют или соответствующим образом учтены.

1. Среднее арифметическое как наиболее вероятное значение измеряемой величины.

Случайные погрешности измерений с равной степенью вероятности могут давать отклонения от измеряемой величины как в ту, так и в другую сторону, и при достаточном количестве измерений они могут взаимно компенсироваться. Тогда наиболее вероятным значением будет *среднее арифметическое* всех сделанных измерений, вычисляемое по формуле

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (1)$$

где $\bar{x}$ — среднее арифметическое отдельных измерений, $x_1, x_2, \dots$ — результаты отдельных измерений, n — число измерений.

2. Абсолютная погрешность.

Для характеристики степени приближения к истинному значению вводится понятие абсолютной погрешности — величины, показывающей, насколько найденное численное значение может отличаться от истинного значения измеряемой величины. Абсолютная погрешность измеряется в тех же единицах, что и измеряемая величина. При многократных измерениях какой-либо величины различают среднюю абсолютную погрешность отдельного измерения и абсолютную погрешность среднего арифметического, полученного из всей серии многократных измерений. Результат, получаемый как среднее арифметическое из всей серии многократных измерений, тем надежнее, чем больше сделано измерений. Поэтому абсолютная погрешность результата ряда многократных измерений меньше абсолютной погрешности отдельного измерения, и тем меньше, чем больше число выполненных измерений.

Под средней абсолютной погрешностью отдельного измерения понимается среднее арифметическое из всех величин отклонений каждого отдельного измерения от среднего

арифметического. Если обозначить величины отклонений $x_{cp} - x_1 = \Delta x_1, \dots, x_{cp} - x_n = \Delta x_n$, то средняя абсолютная погрешность отдельного измерения в серии из n измерений выражается как

$$\overline{\Delta x} = \frac{|\Delta x_1| + |\Delta x_2| + |\Delta x_3| + \dots + |\Delta x_n|}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta x_i|}{n}, \quad (2)$$

где все величины $|\Delta x_i|$ представляют собой абсолютные значения отклонений от среднего арифметического, т. е. взятые все с положительными знаками.

Для средней абсолютной погрешности среднего арифметического серии многократных измерений теория приближенных вычислений дает выражение:

$$\overline{\Delta x_{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta x_i|}{n \sqrt{n}}, \quad (3)$$

показывающее, что с увеличением числа измерений эта погрешность уменьшается, будучи обратно пропорциональной квадратному корню из числа измерений.

При многократных измерениях чаще используется понятие средней квадратичной погрешности измерений, причем в этом случае также различают среднюю квадратичную погрешность отдельного измерения и среднюю квадратичную погрешность результата, полученного из серии всех измерений.

Средняя квадратичная погрешность для отдельного измерения (стандартное отклонение):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\Delta x_i)^2}{n-1}}, \quad (4)$$

Средняя квадратичная погрешность для результата серии измерений:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (\Delta x_i)^2}{n(n-1)}}, \quad (5)$$

3. Относительная погрешность.

Абсолютная погрешность еще не характеризует точности измерений.

Точность измерения характеризуется *относительной погрешностью*, показывающей, какую долю измеренной величины составляет абсолютная погрешность, и определяемой как отношение абсолютной погрешности к полученному в результате измерений численному значению измеренной величины:

$$\varepsilon = \frac{\overline{\Delta x_{cp}}}{x_{cp}}$$

Отсюда

$$\overline{\Delta x_{cp}} = \varepsilon x_{cp}, \quad (6)$$

4. Вычисление абсолютных и относительных погрешностей при косвенных измерениях

Часто для вычисления какой-либо величины требуется измерить ряд других величин. Так, мощность постоянного тока, измеряемая с помощью амперметра и вольтметра, вычисляется как

произведение $P = IU$. В таких случаях необходимо уметь вычислить погрешность в определении искомой величины, если известны погрешности непосредственно измеряемых величин, функцией которых она является. Очевидно, погрешность в таком косвенном измерении некоторой величины определенным образом складывается из погрешностей в величинах, измеряемых непосредственно.

Приведем примеры нахождения погрешностей в двух случаях — когда она является разностью двух измеряемых величин или их произведением.

1. Искомая величина — разность двух измеряемых величин: $N = a - b$. Напишем выражение разности между разностью измеренных величин с их погрешностями и разностью этих же величин без погрешностей. Но здесь следует положить, во избежание преуменьшения величины погрешности, что погрешности в измерении уменьшаемого и вычитаемого противоположны по знаку:

$$\Delta N = \Delta(a - b) = (a + \Delta a) - (b - \Delta b) - (a - b).$$

Отсюда получим

$$\Delta N = \Delta(a - b) = \Delta a + \Delta b, \quad (7)$$

Рассуждая аналогично, легко получить выражение абсолютной погрешности для случая, когда $N = a + b$:

$$\Delta N = \Delta(a + b) = \Delta a + \Delta b.$$

Таким образом, абсолютная погрешность суммы или разности двух измеряемых величин равна в обоих случаях сумме абсолютных погрешностей этих величин.

Относительная погрешность в этих случаях выразится так:

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta(a + b)}{a + b} = \frac{\Delta a + \Delta b}{a + b}; \quad \frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta(a - b)}{a - b} = \frac{\Delta a + \Delta b}{a - b}, \quad (8)$$

2. Искомая величина — произведение двух измеряемых величин: $N = a \cdot b$. В этом случае

$$\begin{aligned} \Delta N &= \Delta(a \cdot b) = (a + \Delta a) \cdot (b + \Delta b) - (a \cdot b) = \\ &= ab + b \Delta a + a \Delta b + \Delta a \Delta b - ab = b \Delta a + a \Delta b + \Delta a \Delta b. \end{aligned}$$

Так как величина $\Delta a \Delta b$ очень мала — она представляет собой произведение двух малых величин, — то ею можно пренебречь. Тогда абсолютная погрешность произведения выразится формулой

$$\Delta(a \cdot b) = b \Delta a + a \Delta b, \quad (9)$$

Относительная погрешность произведения

$$\frac{\Delta(a \cdot b)}{a \cdot b} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}, \quad (10)$$

т. е. равна сумме относительных погрешностей сомножителей. Аналогично можно получить выражение для относительной погрешности дроби (частного):

$$\frac{\Delta\left(\frac{a}{b}\right)}{\frac{a}{b}} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}, \quad (11)$$

т. е. она равна сумме относительных погрешностей числителя и знаменателя, подобно тому, как это было для произведения.

5. Построение графиков и определение погрешностей по ним

Во многих лабораторных работах оказывается, удобным изображать графически зависимость между изучаемыми величинами. Для того, чтобы построить график, необходимо на основании проделанных измерений составить таблицу, в которой каждому значению одной из величин соответствует определенное значение другой. Для правильного построения графика весьма важным является целесообразный выбор масштаба. Масштаб по каждой оси может быть свой, причем выбирать его следует так, чтобы пределы изменений обеих величин ограничивали на осях отрезки примерно одинаковые по величине, иначе график может оказаться очень сжатым по одной из осей и неудобным для пользования. Если первое значение измеряемой величины сильно отличается от нуля и, особенно, если изменение этой величины невелико, отсчет в начале координат нужно начинать не от нуля, а от какого-то значения, близкого к первому измеренному значению данной величины. Когда масштаб выбран, нужно разделить оси в выбранном масштабе на равные интервалы и надписать на осях значения этих интервалов (рис. 1). После этого на график наносят точки на основании данных таблицы и проводят через них прямую или плавную кривую линию.

Так как все измерения сделаны с той или иной ошибкой, то может иметь место некоторый разброс точек (они не укладываются точно на одной кривой). В этом случае линию нужно проводить между точками так, чтобы возможно большее число точек легло на эту линию, а остальные распределились примерно равномерно выше и ниже ее (рис. 1). С помощью полученного графика можно для любого промежуточного значения одной из величин найти соответствующее ему значение другой величины.

Если при построении графика наблюдается значительный разброс точек, то погрешность можно определить следующим образом. Нужно измерить отклонение каждой экспериментальной точки от линии графика по направлению, параллельному той оси, вдоль которой отложена интересующая нас величина, и найти среднее значение этого отклонения. В качестве примера рассмотрим вычисление погрешности по графику, изображенному на рис. 1.

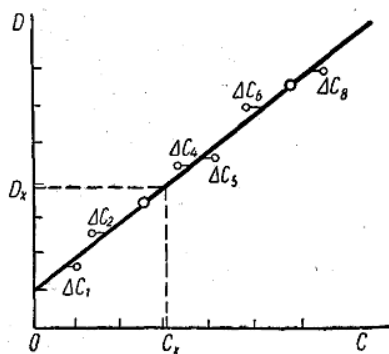


Рис.1

Такой способ нахождения погрешности удобен при наличии значительного разброса точек. Если же разброс точек невелик, что можно использовать другой способ определения погрешности по графику. На основании графика можно найти абсолютную ошибку в определении одной величины, если известна абсолютная ошибка в определении другой величины. Пусть график изображает зависимость величины y от величины x . Если какое-то значение величины x измерено с ошибкой Δx , то надо на соответствующей оси около этого значения x отложить отрезок Δx в выбранном масштабе и по графику найти соответствующий ему отрезок Δy на другой оси. Найденный отрезок Δy и будет представлять собой абсолютную ошибку в определении интересующего нас значения величины y . В случае прямолинейного

графика ошибка, определенная таким образом, во всех его точках одинакова. Если же график представляет собой кривую линию, то ошибка на разных его участках будет различной.

В качестве примера графического вычисления ошибки разберем определение концентрации окрашенного раствора по величине его оптической плотности. В этой работе сначала измеряется оптическая плотность D нескольких растворов с известной концентрацией C и на основании этих данных строится график зависимости оптической плотности от концентрации (рис. 2). Затем измеряется величина оптической плотности D_x раствора неизвестной концентрации. Пусть, она была измерена 3 раза и оказалась равной: 0,76, 0,78 и 0,75. Тогда среднее значение $D_{\text{хср}} = 0,76$, а средняя абсолютная ошибка $\Delta D_{\text{хср}} = 0,01$.

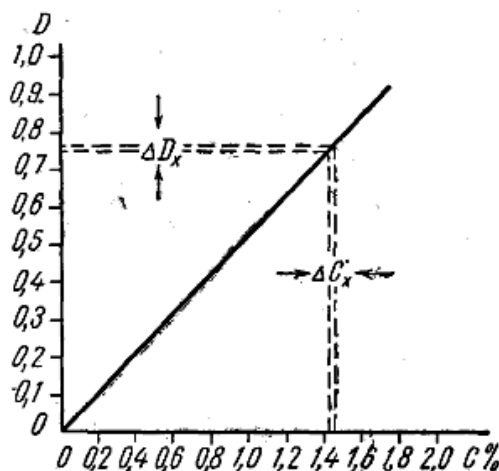


Рис.2

По графику находят значение концентрации, соответствующее среднему значению оптической плотности $D_{\text{хср}}$. В нашем случае C_x равно 1,42%. Около значения $D_{\text{хср}}$ на оси ординат откладывают отрезок, равный $\Delta D_{\text{хср}}$ и по графику находят, какой отрезок соответствует ему на другой оси. Этот отрезок и даст среднюю абсолютную ошибку в определении искомой концентрации. Как видно из рис. 2, ΔC_x равно 0,02. Тогда окончательный результат запишется так:

$$C_x = (1,42 \pm 0,02) \%$$

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Задание 1. При измерении силы тока в цепи получены следующие значения (в мА): 4,1; 4,2; 3,8; 4,3; 3,9; 4,0; 4,2. Вычислите абсолютную и относительную погрешности измерений.

Задание 2. При измерении коэффициента поверхностного натяжения исследуемой жидкости получены следующие результаты (в мН/м): 30,1; 30,3; 29,7; 31,0; 32; 28,5; 31,5. Оцените точность измерений.

Задание 3. При измерении периода колебания математического маятника получены следующие значения: 3,0; 2,8; 3,1; 3,0; 2,9; 3,1; 2,8 с. Оцените доверительный интервал для математического ожидания периода колебаний. Попадет ли в этот интервал теоретическое значение периода? Длина маятника 0,78 м.

Задание 4. При измерении гемоглобина в крови у двух пациентов получены следующие данные:

1 пациент

Содержание гемоглобина в крови, г/л	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
	128	127	126	122	128	126	129	125

2 пациент

Содержание гемоглобина в крови, г/л	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
	85	88	90	85	86	91	88	87

Оцените доверительный интервал для математического ожидания концентрации гемоглобина в крови для данных пациентов и сравните с нормой:

$$C_{\text{норм}} = 130 \pm 10 (\text{г/л})$$

Задание 5. При 12-кратном измерении температуры раствора серной кислоты получены следующие значения: 20,0; 20,3; 20,0; 20,2; 19,5; 20,5; 19,7; 20,0; 20,4; 20,0; 19,6; 19,8. Вычислите относительную погрешность измерения концентрации.

Задание 6. При 5-кратном измерении диаметра D и высоты H цилиндра получены следующие результаты (в см):

D	4,00	4,05	3,95	3,90	4,00
H	5,1	5,0	5,0	4,9	5,1

Вычислите относительную погрешность измерения объема.

3. Цель деятельности студентов на занятии:

Студент должен знать:

1. Виды погрешностей измерений, их происхождение и характерные особенности.
2. Формулы для вычисления абсолютной и относительной погрешности.
3. Графический метод определения погрешностей.

Студент должен уметь:

1. Вычислять погрешности прямых и косвенных измерений.
2. Проводить оценку погрешностей измерений.

4. Содержание обучения:

1. Прямые и косвенные измерения.
2. Виды погрешностей и их источники.
3. Абсолютная и относительная погрешности прямых многократных измерений.
4. Вычисление абсолютных и относительных погрешностей косвенных измерений.
5. Определение погрешностей по графикам.

5. Перечень вопросов для проверки исходного уровня знаний:

1. Какие виды измерений известны?
2. Чем характеризуется точность измерений?
3. Чем обусловлены систематические и случайные погрешности измерений?

6. Перечень вопросов для проверки конечного уровня знаний:

1. В чем состоят объективные причины возникновения систематических погрешностей?
2. Как влияют систематические и случайные погрешности на результаты измерений?
3. В результате чего возникают промахи?
4. Приведите формулы для вычисления: абсолютной погрешности отдельного измерения, средней арифметической погрешности, абсолютной погрешности, относительной погрешности.
5. Опишите графический метод определения погрешностей.

7. Хронокарта учебного занятия:

1. Организационный момент - 5 мин.
2. Текущий контроль знаний – 30 мин.
3. Пояснения к выполнению работы – 10 мин.
4. Выполнение и оформление работы - 70 мин.
5. Проверка работы и задание на дом - 20 мин.

8. Перечень учебной литературы к занятию:

1. Ремизов А.Н., Максина А.Г., Потапенко А.Я., Медицинская и биологическая физика. М., «Дрофа», 2008, §1.3.
3. Антонов В.Ф., Черныш А.М., Козлова Е.К., Коржуев А.В. Физика и биофизика. Практикум. М., «ГЭОТАР-Медиа», 2008, § 3.9.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЖИДКОСТЕЙ ПО КОЭФФИЦИЕНТУ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ

1. Научно-методическое обоснование темы:

Поверхностное натяжение биологических жидкостей в некоторых случаях может служить диагностическим признаком. Так, например, при заболевании желтухой поверхностное натяжение мочи резко уменьшается вследствие появления в моче желчных кислот. При диабете и некоторых других заболеваниях повышается содержание липазы в крови, о чем судят по изменению поверхностного натяжения раствора трибутилена при добавлении в него крови. Таким образом, изучение поверхностного натяжения имеет важное значение для медицины.

2. Теория:

Жидкое состояние вещества является промежуточным между газообразным и твердым и имеет черты, сходные и с тем, и с другим. Жидкость характеризуется упорядоченным расположением молекул в небольших объемах (так называемый *ближний порядок*). Молекулы, ближайšie к данной, располагаются относительно нее в определенном порядке, однако, по мере удаления от нее порядок меняется. Таким образом, *дальний порядок* расположения, характерный для твердых тел, у жидкостей не сохраняется. В некоторых жидкостях с удлиненной формой молекул возможна единообразная ориентация их по всему объему. Такие жидкости называются *жидкими кристаллами*, а их свойства отличаются от свойств обычных жидкостей. Подобно твердым телам жидкости не сжимаемы и обладают большой плотностью; подобно газам принимают форму сосуда, в котором находятся. Тепловое движение в жидкости состоит в том, что каждая молекула скачком меняет свое местоположение и совершает колебательное движение в новом месте. Таким образом, молекулы жидкости медленно перемещаются по всей массе. Этим объясняется более медленная диффузия в жидкостях, чем в газах.

Характерным свойством жидкостей является *поверхностное натяжение*, образующееся на свободной поверхности жидкости, т.е. на границе с газообразной средой (а также на границе с другой несмешивающейся жидкостью или с несмачиваемым твердым телом).

На каждую молекулу жидкости действуют силы притяжения со стороны окружающих молекул, удаленных от нее на расстояние, не превышающее $1,5 \cdot 10^{-7}$ см, т. е. находящихся (центрами) внутри сферы радиусом $R = 1,5 \cdot 10^{-7}$ см (рис.1).

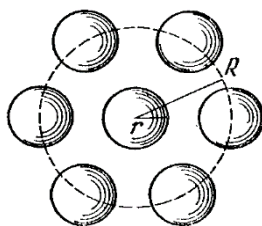


Рис.1

Эта сфера называется *сферой молекулярного действия*. Поскольку радиус r самих молекул составляет приблизительно $5 \cdot 10^{-8}$ см, то $R \approx 3r$, т. е. радиус сферы молекулярного действия приблизительно равен полутора диаметрам молекулы. Следовательно, каждая молекула жидкости взаимодействует только с непосредственно прилегающими к ней соседними молекулами.

Рассмотрим молекулу, расположенную внутри жидкости (а и б), налитой в сосуд (рис.2). Со всех сторон ее окружает в среднем одинаковое число молекул, поэтому результирующая сил притяжения, действующих на молекулу, в среднем равна нулю. Иначе обстоит дело с молекулой, лежащей на поверхности жидкости (в и г). Так как концентрация молекул в

расположенном над жидкостью газе мала по сравнению с концентрацией молекул в жидкости, то результирующая сил, действующих на молекулу, оказывается не равной нулю и направленной внутрь жидкости перпендикулярно ее поверхности.

В таком же положении будут находиться все молекулы, лежащие в поверхностном слое жидкости толщиной, приблизительно равной радиусу сферы молекулярного действия. Таким образом, поверхностный *мономолекулярный* слой жидкости толщиной $1,5 \cdot 10^{-7}$ см оказывает на всю жидкость давление, равное сумме результирующих сил, действующих на все молекулы, лежащие в одном квадратном метре этого слоя. Это давление называется *внутренним*, или *молекулярным*.

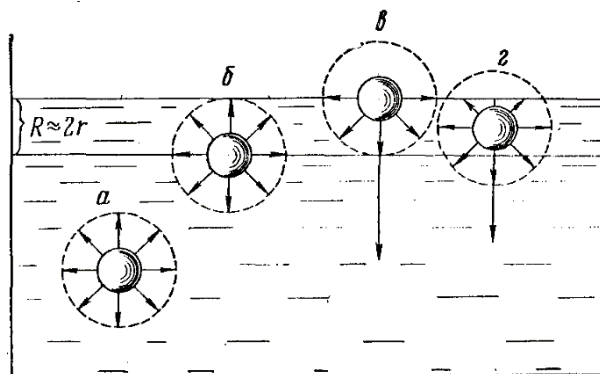


Рис.2

Благодаря тому что молекулы жидкости находятся близко друг от друга, жидкость оказывается трудносжимаемой: вступающие в действие на очень малых расстояниях силы отталкивания между молекулами препятствуют сжатию жидкости.

Так как внутреннее давление направлено перпендикулярно поверхности жидкости, то масса жидкости, не подверженная действию внешних сил (рис. 3, а) должна принять форму шара (рис. 3, б), ибо только в этом случае силы внутреннего давления взаимно уравниваются. Такое явление можно наблюдать на маленьких массах жидкости, для которых действие силы тяжести пренебрежимо мало по сравнению с действием сил внутреннего давления.

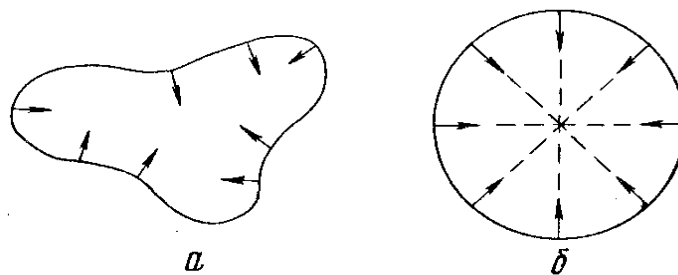


Рис.3

Сферическую форму принимают, например, мелкие дождевые капли, масло, налитое в смесь воды со спиртом, имеющую плотность, равную плотности масла (опыт Плато). В этом случае сила тяжести, действующая на масло, компенсируется, по закону Архимеда, выталкивающей силой воды, делая масло как бы невесомым. Форме шара соответствует, как известно, наименьшая поверхность при данном объеме. Следовательно, под влиянием молекулярных сил поверхность жидкости сокращается до минимально возможных размеров.

Это означает, что *поверхностный слой жидкости подобен эластичной растянутой пленке*, например оболочке резинового мяча.

Напряженное состояние поверхностного слоя жидкости называется *поверхностным натяжением*; оно вызвано силами сцепления между молекулами этого слоя. Выделим мысленно в поверхностном слое жидкости круговой контур длиной l (рис.4).

Молекулы жидкости, составляющие контур, притягиваются молекулами, расположенными внутри контура; *силы притяжения касательны к поверхности жидкости и перпендикулярны контуру.*

Сумма сил притяжения, действующих на контур, ограничивающий поверхность жидкости, называется *силой поверхностного натяжения* F . Эта сила пропорциональна числу молекул, прилегающих к контуру, которое в свою очередь пропорционально длине контура; следовательно,

$$F = \sigma l, \quad (1)$$

где σ — коэффициент пропорциональности, называемый *коэффициентом поверхностного натяжения*.

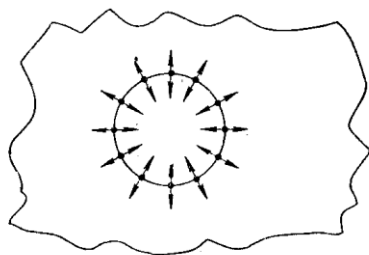


Рис.4

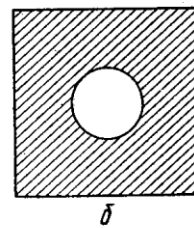
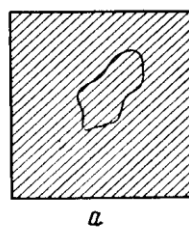


Рис.5

Очевидно, что с такой же силой поверхностного натяжения действуют на контур и молекулы, расположенные вне его. Поэтому контур находится в равновесии. Для того чтобы обнаружить действие силы поверхностного натяжения, надо устранить ограниченную им внутреннюю или внешнюю часть поверхности жидкости. Это можно сделать, например, следующим образом. «Натянув» на проволочную рамку пленку мыльной воды, надо положить на нее петлю (контур) из тонкой нитки (рис.5, а) и затем проткнуть пленку внутри петли (рис.5, б). Под действием силы поверхностного натяжения со стороны сохранившейся (внешней) части пленки контур немедленно растянется, приняв форму окружности.

Из формулы (1) следует, что

$$\sigma = F/l, \quad (2)$$

т. е. *коэффициент поверхностного натяжения жидкости равен силе поверхностного натяжения, действующей на единицу длины контура, ограничивающего поверхность жидкости.* Измеряется σ в Н/м. Коэффициент поверхностного натяжения жидкости имеет порядок $10^{-2} - 10^{-3}$ Н/м (см. табл.):

Жидкость	σ , Н/м	Жидкость	σ , Н/м
Вода	0,0725	Ртуть	0,47
Желчь	0,048	Спирт	0,022
Молоко	0,05	Сыворотка крови	0,06
Моча	0,066	Эфир	0,017

С повышением температуры коэффициент поверхностного натяжения уменьшается в связи с увеличением среднего расстояния между молекулами жидкости.

Для растяжения (увеличения) поверхности жидкости необходимо совершить работу против молекулярных сил. Действительно, растяжение поверхностного слоя сопровождается извлечением из глубинных слоев на поверхность новых молекул жидкости, чему препятствуют направленные внутрь жидкости результирующие сил притяжения «глубинных» молекул. Наоборот, при сокращении поверхности молекулярные силы сами совершают работу по

затягиванию «лишних» молекул с поверхности в глубь жидкости. Таким образом, при растяжении поверхности жидкости ее потенциальная энергия увеличивается, при сокращении — уменьшается.

Определим работу, совершаемую при сокращении поверхности жидкости. С этой целью «натянем» жидкую пленку на проволочную рамку, правая сторона которой, имеющая длину l , может свободно перемещаться влево от положения, зафиксированного на рис.6. Тогда под действием постоянной силы поверхностного натяжения эта сторона будет перемещаться влево, а поверхность пленки — сокращаться. Работа ΔA , совершенная при сокращении пленки в связи с перемещением стороны рамки на расстояние Δx , выразится формулой

$$\Delta A = F \cdot \Delta x = 2\sigma l \cdot \Delta x = \sigma \cdot \Delta S, \quad (3)$$

где $\Delta S = 2l \cdot \Delta x$ - изменение площади поверхности пленки. Множитель 2 обусловлен тем, что пленка имеет две поверхности.

Работа ΔA совершается за счет уменьшения потенциальной энергии поверхности пленки. Следует подчеркнуть, что при растяжении пленки потенциальная энергия молекул, извлекаемых на поверхность, увеличивается, а их кинетическая энергия (теплового движения) соответственно уменьшается. В результате при растяжении пленка несколько охлаждается. Очевидно, что при сокращении пленка будет нагреваться.

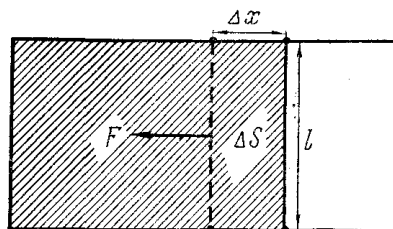


Рис.6

Изменение температуры пленки вызовет изменение коэффициента поверхностного натяжения. Чтобы обеспечить неизменность σ , необходимо вести процесс растяжения или сокращения пленки *изотермически*. Для этого надо растягивать или сокращать пленку *медленно*, так чтобы изменение ее температуры успевало компенсироваться путем теплообмена с окружающей средой.

Та часть потенциальной энергии поверхности жидкости, которая может перейти в работу по *изотермическому* сокращению поверхности жидкости, называется *свободной энергией* поверхности жидкости ΔW . Из формулы (3) следует, что

$$\Delta W = \Delta A = \sigma \cdot \Delta S$$

Очевидно, что свободная энергия всей поверхности жидкости равна произведению коэффициента поверхностного натяжения на площадь этой поверхности:

$$W = \sigma S, \quad (4)$$

Из формулы (4) следует другое определение σ :

$$\sigma = W/S, \quad (5)$$

т. е. коэффициент поверхностного натяжения равен свободной энергии единицы поверхности жидкости. Поэтому σ можно еще измерять и в Дж/м².

Существование поверхностной пленки можно легко обнаружить, если, например, аккуратно положить на воду лезвие безопасной бритвы: слегка прогнув поверхностную пленку, лезвие останется лежать на ней. В водоемах по поверхностной пленке воды свободно бегают и прыгают насекомые «водомерки». Улитка «прудовик», имеющая массу до 50 г, ползает по нижней

стороне поверхностной пленки воды, как муха по потолку. Наличием поверхностной пленки обусловлено образование пены на воде, представляющей собой скопление множества мелких пузырьков воздуха под этой пленкой: пузырьки приподнимают пленку, не прорывая ее. Слипание мокрых волос, мокрых песчинок и т. п. также связано с жидкими пленками, с их стремлением приобрести *минимальную поверхность*.

На поверхностное натяжение жидкости большое влияние оказывают находящиеся в ней примеси. Например, мыло, растворенное в воде, уменьшает ее коэффициент поверхностного натяжения с 0,075 до 0,045 Н/м. Вещество, ослабляющее поверхностное натяжение жидкости, называется *поверхностно-активным*.

По отношению к воде поверхностно-активными являются нефть, спирт, эфир, мыло и многие другие жидкие и твердые вещества.

Поверхностно-активными, как правило, являются вещества, способные адсорбироваться на поверхности жидкости, образуя мономолекулярный слой, в котором действуют силы, отличные от чистой жидкости.

Адсорбционные силы, вытесняющие молекулы поверхностно-активного вещества на поверхность растворителя, противодействуют силам, втягивающим молекулы растворителя в глубину жидкости, которые и образуют поверхностное натяжение. Поэтому последнее значительно снижается.

С точки зрения молекулярной теории, влияние поверхностно-активных веществ объясняется следующим образом. Силы притяжения между молекулами самой жидкости больше сил притяжения между молекулами жидкости и поверхностно-активной примеси. Поэтому расположенные в поверхностном слое молекулы жидкости притягиваются внутрь жидкости сильнее, чем молекулы примеси. В результате молекулы уходят из поверхностного слоя внутрь жидкости, а молекулы поверхностно-активного вещества вытесняются на поверхность.

Некоторые вещества увеличивают поверхностное натяжение жидкости в связи с тем, что их молекулы взаимодействуют с молекулами жидкости сильнее, чем молекулы жидкости между собой. Очевидно, что молекулы таких примесей будут втянуты внутрь жидкости и в поверхностном слое останутся преимущественно молекулы жидкости. По отношению к воде примером такого рода примесей могут служить сахар и соль.

Таким образом, поверхность мыльной воды будет состоять преимущественно из молекул мыла, поверхность водного раствора спирта из молекул спирта, а поверхность водного раствора сахара будет состоять преимущественно из молекул воды. Возвращаясь к формуле (4), можно сказать, что уменьшение свободной энергии поверхности жидкости может осуществляться двумя путями: во-первых, сокращением поверхности жидкости и, во-вторых, ослаблением поверхностного натяжения с помощью поверхностно-активных веществ. Поверхностно-активные вещества имеют большое значение в биологических процессах, особенно на клеточном и молекулярном уровнях, где эти процессы происходят на поверхностях раздела различных сред. Поверхностно-активные вещества содержатся как в соках растений, так и во многих жидких средах животных организмов. Изучение поверхностного натяжения жидкостей имеет важное значение для медицины. Известно, что при некоторых заболеваниях изменяется поверхностное натяжение крови. Поэтому измерение коэффициента поверхностного натяжения крови является одним из показателей в диагностике заболеваний. В медицинской практике встречаются заболевания, объяснить которые без понимания явления поверхностного натяжения невозможно, например, *газовая эмболия* (*эмболия* – прижизненная закупорка сосудов какими-либо частицами (эмболами), занесенными током крови).

Закупорка сосудов может вызываться эмболами эндогенного и экзогенного происхождения.

При газовой эмболии пузырек газа способен затруднить и даже остановить кровоток в мелких сосудах и лишить кровоснабжения какой-либо орган, что может привести к серьезному функциональному расстройству и даже летальному исходу. Поэтому рассмотрим подробнее поведение пузырька воздуха, находящегося в капилляре с жидкостью. Пока диаметр газового пузырька меньше диаметра сосуда, он имеет сферическую форму и движется вместе с током крови. Если он попадает в мелкий сосуд, диаметр которого меньше диаметра пузырька, его мениски деформируются под действием динамического давления текущей крови: передний по току крови мениск вытягивается, его радиус кривизны уменьшается, а задний под напором

крови уплощается, его радиус кривизны увеличивается. Соответственно, дополнительные молекулярные давления, действующие на эти мениски, будут не одинаковы и направлены навстречу, а их результирующая сила, приложенная к пузырьку, будет направлена против тока крови, противодействуя ему (рис.7) вплоть до остановки кровотока.



Рис.7

Еще более сложная ситуация возникает, когда газовый пузырек попадает на разветвление (бифуркацию) сосудистого русла, и полностью останавливает кровоток в дистально расположенных сосудах (рис.8).

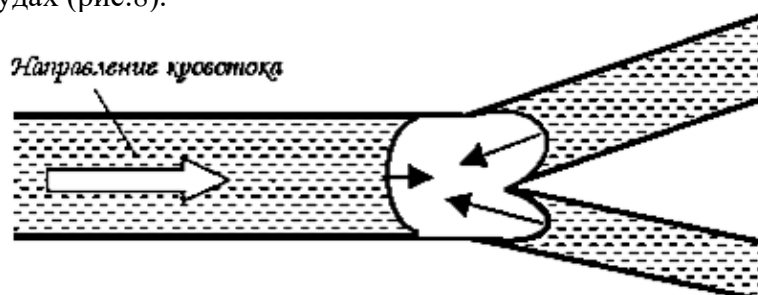


Рис.8

Таким образом, попавшие в кровь пузырьки воздуха способны закупорить мелкие сосуды. Воздушная эмболия может возникнуть при ранении крупных вен, где давление крови ниже атмосферного, при неправильно проведенных внутривенных инъекциях и в других ситуациях.

Газовые пузырьки в крови человека и животных могут появиться и при резком снижении внешнего давления на организм, что обусловлено уменьшением растворимости газов (в первую очередь – азота) в крови и переходом их из растворенного состояния в газообразное вследствие резкого снижения окружающего давления. С подобной проблемой могут столкнуться водолазы при быстром подъеме с большой глубины на поверхность (кессонная болезнь), летчики и космонавты при разгерметизации кабины или скафандра на большой высоте.

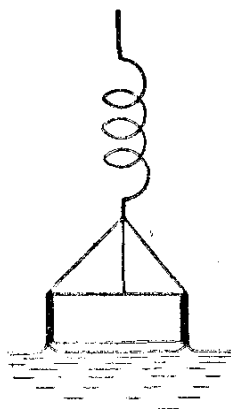


Рис.9

В данной работе сила поверхностного натяжения определяется по методу отрыва кольца с помощью торсионных весов. Опишем вкратце суть этого метода.

К слабой пружине подвешено легкое кольцо с тонкими стенками (рис.9). Подведем к этому кольцу чашку с жидкостью и будем плавно тянуть пружину с кольцом вверх. Жидкость, сцепившись с кольцом в результате его смачивания, будет удерживать кольцо, пока

упругость пружины не превысит сцепление между молекулами поверхностного слоя жидкости. Пружина разрывает поверхностный слой, при этом разрушающее усилие F будет равно силе поверхностного натяжения, приложенной к внешнему и внутреннему контурам кольца.

Разрывающее усилие выразится формулой

$$F = 2\pi r_1 \sigma + 2\pi r_2 \sigma = 2\pi \sigma (r_1 + r_2), \quad (6)$$

где r_1 и r_2 – радиусы внешней и внутренней окружности кольца, σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Эта формула позволяет найти коэффициент поверхностного натяжения жидкости σ , если известны радиусы r_1 и r_2 (или диаметры D_1 и D_2) и величина разрывающей силы F :

$$\sigma = \frac{F}{2\pi(r_1 + r_2)} = \frac{F}{\pi(D_1 + D_2)}, \quad (7)$$

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Величину разрывающей силы можно определить непосредственно при помощи торсионных весов. Торсионные весы дают возможность упростить процесс при сохранении достаточной точности (на весах с предельной нагрузкой 500 мг точностью взвешивания 1 мг).

Основным элементом торсионных весов является *спиральная пружина*, которая закручивается под действием взвешиваемого предмета. Принцип их устройства и действия заключается в следующем (рис. 10). На ось вращения $O - O$ насажена муфта M с маленьким коромыслом K , подвешенной к нему чашечкой для грузов и указателем равновесия $УР$. К этой муфте прикреплен один конец спиральной пружины $П$. Муфта с коромыслом имеет возможность свободно вращаться вокруг оси $O - O$. На той же оси жестко укреплен указатель веса $У$, к которому прикреплен другой конец спиральной пружины $П$. В отсутствии нагрузки указатель веса $У$ должен быть установлен на нулевое деление шкалы весов, а указатель равновесия $УР$ должен быть совмещен с чертой, отмечающей положение равновесия. При действии груза равновесие нарушается, чашка весов опускается и поворачивая при этом муфту, закручивает пружину $П$.

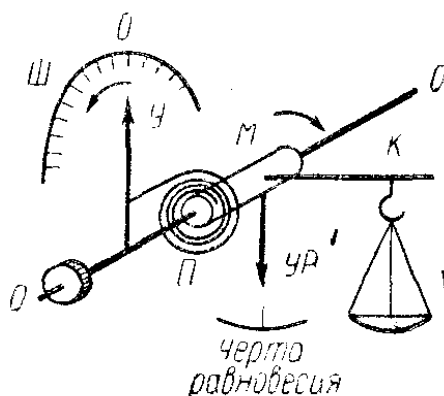


Рис.10

Для восстановления равновесия весов нужно повернуть указатель весов $У$ в сторону, противоположную повороту коромысла под действием груза. Величина требуемого поворота указателя $У$ равна углу закручивания спиральной пружины и пропорциональна весу тела. Перемещение указателя $У$ отсчитывается по шкале $Ш$, градуированной в миллиграммах.

Внешний вид торсионных весов изображен на рис.11. На этом рисунке вместо чашки для наложения грузов изображено кольцо, подвешенное с целью определения коэффициента поверхностного натяжения; вес кольца подобран так, что он равен весу снятой чашки весов.

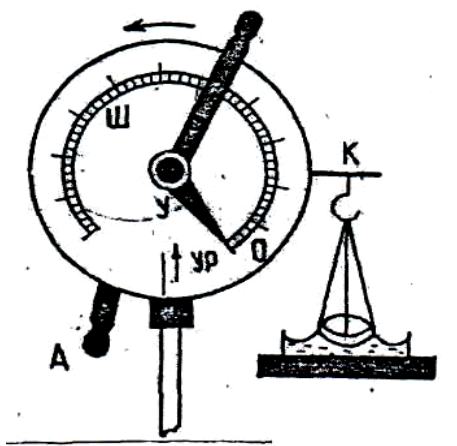


Рис. 11

Здесь $У$ – указатель веса, который можно переводить в различные участки шкалы при помощи рычага $Р$, $К$ – конец коромысла с крючком для подвешивания чашки, $Ш$ – шкала весов, $А$ – арретира, закрепляющий коромысло весов.

Весы устанавливаются на штативе, на основании которого имеется уровень для установки весов и установочные винты (не показаны на рисунке). Конец коромысла весов с подвешенным крючком $К$ и кольцом закрыт футляром с остекленными стенками. В футляре имеется столик, на который можно поставить неглубокую чашку с испытуемой жидкостью.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Задание. *Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости*

1. Проверьте установку весов по уровню.
2. Проверьте горизонтальность нижнего среза кольца, подвешенного к крючку весов $К$.
3. Освободите коромысло весов передвижением рычага арретира $А$ вправо.
4. С помощью рычага $Р$ указатель веса $У$ установите на нулевое деление шкалы. При этом указатель равновесия $УР$ должен совместиться с чертой, отмечающей положение равновесия.
5. Рычагом $Р$ указатель веса $У$ совместите с делением шкалы 40 мг. Заарретируйте коромысло весов передвижением рычага $А$ влево.
6. Откройте футляр и на столик осторожно поставьте чашечку с исследуемой жидкостью. Закройте крышку.

Замечание. *Кольцо должно располагаться примерно над серединой чашки.*

7. Передвиньте рукоятку арретира $А$ вправо. С помощью рычага $Р$ плавно опустите указатель веса $У$ ниже нулевого деления. При этом нижний срез кольца должен соприкоснуться с поверхностью жидкости.
8. Медленно перемещайте рычаг $Р$ с указателем веса $У$ по шкале до тех пор, пока кольцо не оторвется от поверхности жидкости. Положение указателя $У$ в момент отрыва кольца укажет величину разрывающей силы F .
9. Опыт с испытуемой жидкостью сделайте 5 раз. Заарретируйте весы поворотом рукоятки арретира $А$ влево.

10. Результаты опыта запишите в таблицу и вычислите абсолютную и относительную погрешности измерений.

Таблица

№	Исследуемая жидкость	F , Н	σ , Н/м	$\Delta\sigma$, Н/м	$\frac{\overline{\Delta\sigma}}{\bar{\sigma}} \cdot 100\%$
1.					
2.					
3.					
4.					
5.					

$$\bar{\sigma} = \quad \overline{\Delta\sigma} =$$

11. Аналогичные опыты проделайте с остальными исследуемыми жидкостями.
 12. По полученным результатам идентифицируйте исследуемые жидкости.

3. Цель деятельности студентов на занятии:

Студент должен знать:

1. Механизм образования сил поверхностного натяжения.
2. Формулу для коэффициента поверхностного натяжения.
3. Устройство и принцип действия торсионных весов.

Студент должен уметь:

1. Определять коэффициент поверхностного натяжения методом отрыва кольца с помощью торсионных весов.
2. Идентифицировать исследуемые жидкости по полученным значениям коэффициента поверхностного натяжения.

4. Содержание обучения:

1. Особенности молекулярного строения жидкостей.
2. Механизм образования сил поверхностного натяжения.
3. Коэффициент поверхностного натяжения.
4. Свободная энергия поверхности жидкости.
5. Поверхностно-активные вещества.
6. Газовая эмболия.
7. Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости.

5. Перечень вопросов для проверки исходного уровня знаний:

1. В чем состоит тепловое движение в жидкости?
2. Что называется сферой молекулярного действия?
3. Объясните механизм возникновения внутреннего (молекулярного) давления.
4. Почему в отсутствие внешних сил масса жидкости принимает форму шара?
5. Приведите механизм возникновения силы поверхностного натяжения. Как можно обнаружить действие этой силы? Как она направлена?
6. Что называется коэффициентом поверхностного натяжения? Запишите формулы для коэффициента поверхностного натяжения и укажите его единицы измерения в СИ.
7. Объясните метод отрыва кольца для определения коэффициента поверхностного натяжения.
8. Объясните устройство и принцип работы торсионных весов.
9. Как зависит коэффициент поверхностного натяжения от температуры?

6. Перечень вопросов для проверки конечного уровня знаний:

1. Что называется свободной энергией поверхности жидкости и как ее можно уменьшить?
2. Почему при растяжении поверхности жидкости ее потенциальная энергия увеличивается, а при сокращении - уменьшается?
3. Какие вещества называются поверхностно-активными? Приведите примеры.
4. Получите выражение для работы, совершаемой при сокращении поверхности жидкости.
5. Объясните влияние поверхностно-активных веществ с точки зрения молекулярной теории.
6. Какое значение имеет изучение коэффициента поверхностного натяжения для медицины?
7. Как возникает газовая эмболия?
8. Как зависит поверхностное натяжение от концентрации раствора?

7. Хронокарта учебного занятия.

1. Организационный момент - 5 мин.
2. Текущий контроль знаний - 40 мин.
3. Пояснения к выполнению работы - 10 мин.
4. Выполнение и оформление работы - 60 мин.
5. Проверка работы и задание на дом - 20 мин.

8. Перечень учебной литературы к занятию.

1. Ремизов А.Н., Максина А.Г., Потапенко А.Я. Медицинская и биологическая физика. М., «Дрофа», 2008, §§ 7.7, 7.8
2. Ремизов А.Н., Потапенко А.Я. Курс физики. М., «Дрофа», 2008, § 13.3.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЖИДКОСТИ ПО КОЭФФИЦИЕНТУ ВЯЗКОСТИ

1. Научно-методическое обоснование:

Жидкие среды составляют наибольшую часть организма, их перемещение обеспечивает обмен веществ и снабжение клеток кислородом, поэтому механические свойства и течение жидкостей представляют собой интерес для медиков.

При движении жидкости, в том числе крови по кровеносным сосудам, большую роль играет внутреннее трение или вязкость.

2. Теория:

В реальной жидкости между молекулами действуют силы взаимного притяжения, обуславливающие *внутреннее трение (вязкость)*. Внутреннее трение, например, вызывает силу сопротивления при помешивании жидкости, замедление скорости падения брошенных в жидкость тел и т.д.

Ньютон установил, что сила $F_{тр}$ внутреннего трения между двумя слоями жидкости, движущимися с различными скоростями (рис.1), зависит от природы жидкости и прямо пропорциональна площади S соприкасающихся слоев и градиенту скорости $\frac{dv}{dz}$ между ними:

$$F_{тр} = \eta S \frac{dv}{dz}, \quad (1)$$

где η - коэффициент пропорциональности, называемый *коэффициентом вязкости* или просто *вязкостью* жидкости и зависящий от ее природы.

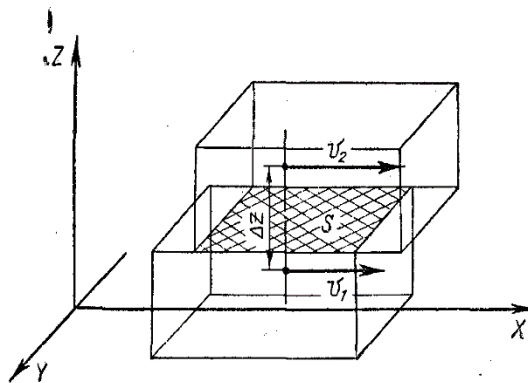


Рис.1

Сила $F_{тр}$ действует *касательно* к поверхности соприкасающихся слоев жидкости, ускоряет слой, движущийся более медленно и замедляет слой, движущийся более быстро.

Градиент скорости характеризует быстроту изменения скорости между слоями жидкости, т.е. в направлении, перпендикулярном направлению течения жидкости.

Единица коэффициента вязкости в системе СИ – Н·с/м², в СГС – дин·с/см², эта единица называется *пуазом* (П):

$$1П = 0,1Н \cdot с/м^2.$$

У большинства жидкостей (вода, низкомолекулярные соединения, истинные растворы, расплавленные металлы и их соли) коэффициент вязкости зависит только от природы жидкости и температуры: с повышением температуры коэффициент вязкости уменьшается. Такие жидкости подчиняются уравнению (1) и называются *ньютоновскими*, а их вязкость называется *нормальной*.

На практике используется величина $\eta_{\text{отн}}$ - *относительная вязкость*, под которой понимают отношение коэффициента вязкости данной жидкости к коэффициенту вязкости воды при той же температуре:

$$\eta_{\text{отн}} = \frac{\eta}{\eta_{\text{в}}} 100\%, \quad (2)$$

У высокомолекулярных жидкостей (например, растворы полимеров) или представляющих дисперсные системы (суспензии и эмульсии) коэффициент вязкости зависит также от режима течения - давления и градиента скорости. Такие жидкости не подчиняются уравнению (1), называются *неньютоновскими*, а их вязкость называется *аномальной*. К неньютоновским жидкостям относится, например, кровь.

При относительно невысокой скорости течения по трубам небольшого диаметра движение жидкости имеет *ламинарный* характер: слой молекул прилегающих к стенке трубы прилипает к ней и остается неподвижным, следующий слой под действием силы давления и при противодействии силы внутреннего трения между слоями смещается относительно пристеночного слоя и движется с небольшой скоростью. Каждый последующий слой молекул, смещаясь относительно предыдущего слоя, движется по отношению к стенке трубы с постоянно возрастающей скоростью, которая достигает наибольшего значения в центре трубы (рис.2):

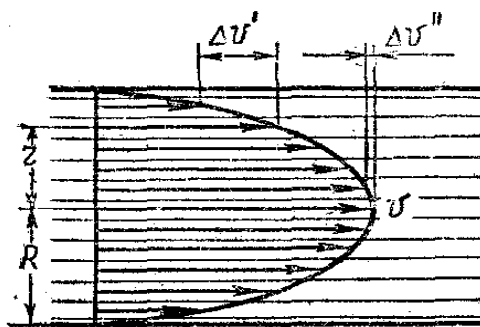


Рис.2

Распределение скоростей по сечению круглой трубы имеет параболический характер (рис.2):

$$v = \frac{p_1 - p_2}{4l\eta} (R^2 - r^2), \quad (3)$$

где p_1 и p_2 - давления в начале и конце участка трубы длиной l , η - коэффициент вязкости жидкости, R - радиус трубы, r - радиус рассматриваемого слоя жидкости. Максимальная скорость наблюдается в центре трубы:

$$v_{\text{max}} = \frac{p_1 - p_2}{4l\eta} R^2, \quad (4)$$

Ламинарное течение устанавливается в трубах с гладкими стенками, без резких изменений площади сечения или изгибов трубы, при отсутствии множественных разветвлений.

При нарушении этих условий, и особенно при высоких скоростях течение переходит в *турбулентное*.

Характерным для турбулентного течения являются местные изменения давления в жидкости, сопровождающиеся звуковыми явлениями (шум, журчание).

Скорость $v_{\text{кр}}$ перехода ламинарного течения в турбулентное определяется *числом Рейнольдса* Re :

$$Re = \frac{v_{\text{кр}} \rho D}{\eta}, \quad (5)$$

где ρ - плотность жидкости, D - диаметр трубы.

Для прямой гладкой трубы $Re_{кр}=2300$. Если $Re \geq Re_{кр}$, то течение переходит в турбулентное.

Средняя скорость ламинарного течения по неширокой горизонтальной трубе постоянного сечения равна (закон Пуазейля):

$$v_{cp} = \frac{p_1 - p_2}{8l\eta} R^2, \quad (6)$$

где p_1 и p_2 - давления на входе и выходе из трубы, R - радиус трубы, l - длина трубы, η - коэффициент вязкости жидкости.

Количество жидкости Q , протекающее через поперечное сечение в единицу времени равно $Q=v_{cp}S$, где $S = \pi R^2$. Следовательно

$$Q = \frac{(p_1 - p_2)}{l} \frac{\pi R^4}{8\eta}, \quad (7)$$

Формулу (7) называют *формулой Гагена-Пуазейля*. Ее можно записать в виде

$$Q = \frac{p_1 - p_2}{X}, \quad (8)$$

где $X = \frac{8l\eta}{\pi R^4}$ называется *гидравлическим сопротивлением*.

Для измерения относительного коэффициента вязкости не очень вязких жидкостей используется капиллярный вискозиметр.

Для более вязких жидкостей применяется метод, основанный на измерении скорости падения в жидкости небольших тел сферической формы (*метод Стокса*).

Стокс эмпирически установил, что при не слишком быстром движении тела сферической формы (шарика) сила сопротивления движению равна

$$F_c = 6\pi r\eta v, \quad (9)$$

где r – радиус шарика, v - скорость движения, η - коэффициент вязкости жидкости.

При падении шарика в узком цилиндре, наполненном исследуемой жидкостью на шарик действуют три силы (рис.3): сила сопротивления $F_c = 6\pi r\eta v$, сила тяжести $P = (4/3)\pi r^3 \rho_{ш} g$, выталкивающая сила $F_B = (4/3)\pi r^3 \rho_{ж} g$, где $\rho_{ш}$ – плотность вещества шарика, $\rho_{ж}$ – плотность жидкости.

При равномерном движении шарика

$$P = F_B + F_c.$$

Отсюда

$$F_c = P - F_B$$

или

$$6\pi r\eta v = \frac{4}{3}\pi r^3 (\rho_{ш} - \rho_{ж}) g,$$

и для коэффициента вязкости получаем:

$$\eta = \frac{2}{9} g r^2 \frac{\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ж}}}{v}, \quad (10)$$

Измерив время, за которое шарик проходит определенное расстояние l , можно вычислить скорость его движения:

$$v = \frac{l}{t}.$$

Тогда конечная формула для определения коэффициента вязкости примет вид:

$$\eta = \frac{2}{9} g r^2 \frac{\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ж}}}{l} t, \quad (11)$$

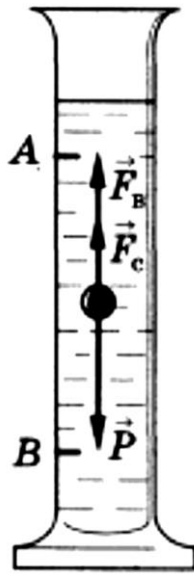


Рис.3

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Для определения коэффициента вязкости жидкости используется высокий цилиндрический сосуд с исследуемой жидкостью (рис.3). На сосуде имеются две кольцевые метки A и B . Метка A соответствует высоте, на которой силы, действующие на шарик, уравниваются и движение становится равномерным. Нижняя метка B нанесена для удобства отсчета времени.

$\rho_{\text{ш}} = 11,4 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – плотность вещества шарика (свинец),
 $\rho_{\text{ж}} = 1,26 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – плотность исследуемой жидкости,
 $r = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – радиус шарика.

Задание. Определение вязкости жидкости

1. Опустите шарик в сосуд с жидкостью так, чтобы он двигался по оси цилиндра.
2. Измерьте время t прохождения шариком расстояния между метками A и B .
3. Измерьте расстояние l между метками.
4. Произведите аналогичные измерения с пятью шариками.
5. Данные измерений занесите в таблицу и произведите вычисления.

Таблица

№	l , м	t , с	η , Па·с	$\Delta\eta$, Па·с	$\frac{\overline{\Delta\eta}}{\overline{\eta}} \cdot 100\%$
1.					
2.					
3.					
4.					
5.					

$$\overline{\eta} = \quad \quad \quad \overline{\Delta\eta} =$$

6. Вычислите абсолютную и относительную погрешности измерений.
7. По найденному значению коэффициента вязкости идентифицируйте исследуемую жидкость.

3. Цель деятельности студентов на занятии:

Студент должен знать:

1. Физическую природу вязкости жидкости.
2. Единицы измерения вязкости.
3. Формулу Ньютона.
4. Понятия ламинарного и турбулентного течений.
5. Формулу Гагена-Пуазейля.
6. Метод Стокса.

Студент должен уметь:

Определять вязкость жидкости по методу Стокса.

4. Содержание обучения:

1. Вязкость жидкости. Формула Ньютона. Градиент скорости.
2. Коэффициент внутреннего трения. Единицы вязкости. Относительная вязкость.
3. Течение жидкости по трубам. Ламинарное течение. Формула для скорости слоя. Распределение скорости слоев по сечению трубы.
4. Турбулентное течение. Число Рейнольдса.
5. Формула Гагена-Пуазейля. Гидравлическое сопротивление.
6. Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса.

5. Перечень вопросов для проверки исходного уровня знаний:

1. Что называется внутренним трением?
2. Запишите уравнение Ньютона.
3. Что такое градиент скорости?
4. В каких единицах измеряется коэффициент вязкости?
5. Что называют относительным коэффициентом вязкости?
6. Какие жидкости называются ньютоновскими? неньютоновскими?

6. Перечень вопросов для проверки конечного уровня знаний:

1. Охарактеризуйте ламинарное и турбулентное течения жидкости.
2. Что называют числом Рейнольдса, от каких величин оно зависит?
3. Получите формулу Гагена-Пуазейля.
4. Выведите формулу для определения вязкости жидкости по методу Стокса.
5. Какие условия должны выполняться при измерении вязкости методом Стокса?

7. Самостоятельная работа студентов:

По учебнику Ремизова и др. (§7.4) изучите клинический метод определения вязкости крови.

8. Хронокарта учебного занятия:

1. Организационный момент – 10 мин.
2. Текущий контроль знаний – 40 мин.
3. Пояснение к выполнению работы – 10 мин.
4. Выполнение работы – 80 мин.
5. Проверка работы – 40 мин.

9. Перечень учебной литературы к занятию:

1. Ремизов А.Н., Максина А.Г., Потапенко А.Я., Медицинская и биологическая физика. М., «Дрофа», 2008, §§ 7.1-7.5
2. Ремизов А.Н., Потапенко А.Я. Курс физики. М., «Дрофа», 2008, §§ 8.3-8.6.
3. Антонов В.Ф., Черныш А.М., Козлова Е.К., Коржуев А.В. Физика и биофизика. Практикум. М., «ГЭОТАР-Медиа», 2008, § 2.1.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВЕЩЕСТВ ПО ПЛОТНОСТИ

1. Научно-методическое обоснование темы:

Плотностью вещества называется величина, численно равная массе этого вещества, содержащейся в единице объема. Плотность является одной из важнейших физико-химических характеристик вещества, знание которой бывает необходимо как для практических целей, так и для теоретических исследований. Поскольку величина плотности вещества зависит от его внутреннего строения (взаимного расположения молекул, расстояния между ними), то она меняется с температурой. Температурное изменение плотности может служить одной из характеристик внутренних изменений, происходящих в веществе.

2. Теория:

Плотность - физическая величина, определяемая для однородного вещества массой его единичного объёма. Для неоднородного вещества плотность в определённой точке вычисляется как предел отношения массы тела (m) к его объёму (V), когда объём стягивается к этой точке. Средняя плотность неоднородного вещества есть отношение m/V . Плотность вещества зависит от массы атомов, из которых оно состоит, и от плотности упаковки атомов и молекул в веществе. Чем больше масса атомов, тем больше плотность. Одно то же вещество в разных агрегатных состояниях имеет разную плотность.

Твёрдое тело - агрегатное состояние вещества, характеризующееся стабильностью формы и характером теплового движения атомов, которые совершают малые колебания около положений равновесия. Кристаллы характеризуются пространственной периодичностью в расположении равновесных положений атомов. В аморфных телах атомы колеблются вокруг хаотически расположенных точек. Согласно классическим представлениям, устойчивым состоянием (с минимумом потенциальной энергии) твёрдого тела является кристаллическое. Аморфное тело находится в метастабильном состоянии и с течением времени должно перейти в кристаллическое состояние. В твердом теле атомы прочно связаны друг с другом и очень плотно упакованы. Поэтому вещество, находящееся в твердом состоянии имеет наибольшую плотность.

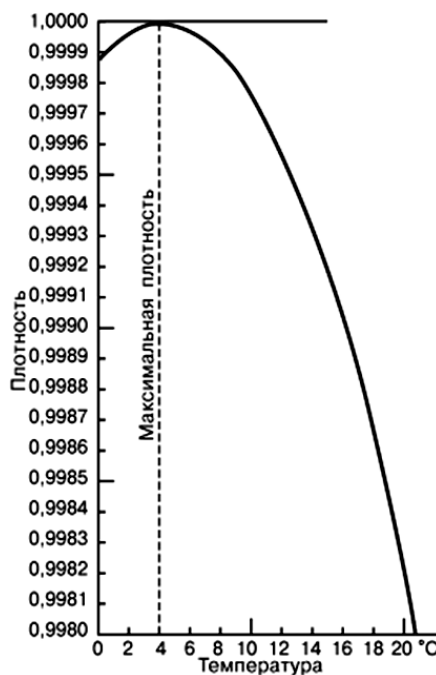


Рис.1. Зависимость плотности воды от температуры.

Плотность твердого образца - это масса образца, деленная на его объем. При определении плотности вещества различают два вида плотности - истинную и кажущуюся. В отличие от

истинной плотности, при измерении которой объем открытых пор исключается из общего объема образца, кажущаяся плотность - это масса образца, деленная на его объем включающий объем пор. Для твердого тела эти две плотности совпадают, а для пористых - различаются. Плотность измеряется в системе СИ в кг/м³ и в системе СГС в г/см³, остальные (г/мл, кг/л) – производные.

Плотность зависит от температуры. Как правило, *при уменьшении температуры плотность увеличивается*, хотя встречаются вещества, чья плотность ведет себя иначе, например, вода, бронза и чугун. Так, плотность воды имеет максимальное значение при 4 °С и уменьшается как с повышением, так и с понижением температуры рис.1.

Для измерения плотности используются:

- *пикнометр* - прибор для измерения истинной плотности,
- *ареометр (денсиметр, плотномер)* - измеритель плотности жидкостей,
- *бурик Качинского и бурав Зайделя* - приборы для измерения плотности почвы.

Закон Архимеда. Сила, выталкивающая целиком погружённое тело в жидкость или газ, равна весу жидкости в объёме этого тела.

Силу можно рассчитать по формуле:

$$F = \rho g V,$$

где F - сила Архимеда, ρ - плотность жидкости, g - ускорение свободного падения, V – объём погружаемого тела.

Следовательно, архимедова сила зависит от плотности жидкости, в которую погружено тело, и от объёма этого тела. Но она не зависит от плотности вещества тела, погружаемого в жидкость. Определим вес тела, погружённого в жидкость (или газ). Так как две силы, действующие на тело в этом случае, направлены в противоположные стороны (сила тяжести вниз, а архимедова сила вверх), то вес тела в жидкости P_1 будет меньше веса тела в вакууме на архимедову силу.

$$P_1 = P - F$$

$$P_1 = mg - m_{жс}g = g(m - m_{жс})$$

Таким образом, если тело погружено в жидкость (или газ), то оно теряет в своём весе столько, сколько весит вытесненная им жидкость (или газ).

ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

Пикнометр (от греч. *pyknós* — плотный и ...метр) – физико-химический прибор, стеклянный сосуд специальной формы и определённой вместимости, применяемый для измерения плотности веществ, в газообразном, жидком и твёрдом состояниях (рис.2).

Пикнометр был изобретён Менделеевым Дмитрием Ивановичем в 1859 году. Измерение плотности пикнометром основано на взвешивании находящегося в нём вещества (обычно в жидком состоянии), заполняющего пикнометр до метки на горловине или до верхнего края капилляра, что соответствует номинальной вместимости пикнометра. Измерения объёма значительно упрощаются, если вместо одной метки у пикнометра имеется шкала. Очень удобен в работе пикнометр с боковой капиллярной трубкой, у которой пробкой служит тело термометра. Плотность твёрдых тел определяют, погружая их в пикнометр с жидкостью. Для измерения плотности газов применяют пикнометр специальной формы (шаровидные и др.).

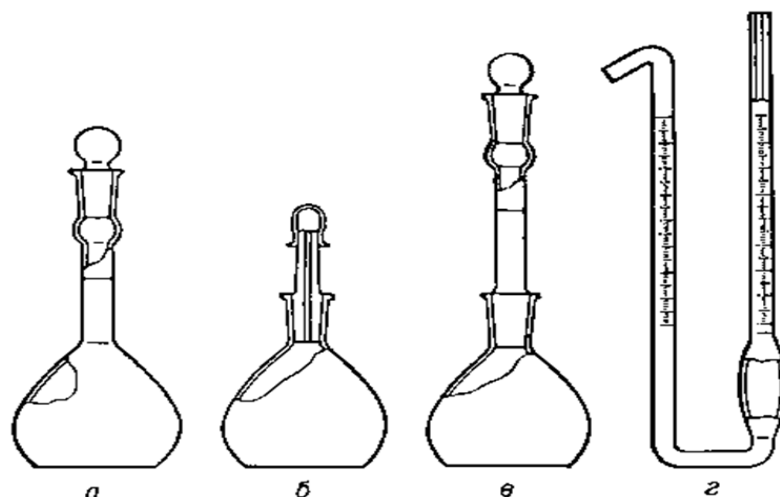


Рис.2. Пикнометры: *а* — колбообразный с меткой и глухой притёртой пробкой (для жидкостей); *б* — колбообразный с капиллярным отверстием в пробке (для жидкостей); *в* — колбообразный со съёмной горловиной (для твёрдых веществ); *г* — U-образный капиллярный (для летучих жидкостей).

Основные достоинства пикнометрического метода определения плотности: высокая точность измерений (до 10^{-5} г/см³); возможность использования малых количеств вещества (0,5—100 см³); малая площадь свободной поверхности жидкости в пикнометре, что практически исключает испарение жидкости и поглощение влаги из воздуха; раздельное проведение операций термостатирования и последующего взвешивания.

Определение плотности твердого тела при помощи пикнометра. Исследуемое твердое тело в виде отдельных кусочков взвешивают сначала в воздухе, а затем погружают в пикнометр с водой. Пикнометр представляет собой сосуд с пробиркой в виде длинной трубки. На пробирке имеется метка, до уровня которой должна доходить налитая жидкость. Нужного уровня жидкости добиваются с помощью пипетки с длинной капиллярной трубочкой. Уменьшить уровень жидкости можно также промокательной бумагой, которая впитывает жидкость.

Согласно закону Архимеда, плотность тела, погруженного в воду (но без учета кажущейся потери веса при взвешивании в воздухе) равна

$$\rho' = \frac{m}{m_0} \delta,$$

где m — масса тела в воздухе, m_0 — масса воды, вытесненная телом; δ — плотность воды при температуре опыта. Если M — масса пикнометра с водой, M_0 — масса пикнометра с водой и кусочками твердого тела, то

$$m_0 = M + m - M_0.$$

Из приведенных соотношений имеем

$$\rho' = \frac{m}{M + m - M_0} \delta.$$

Для получения более точного значения плотности твердого тела (с учетом потери веса в воздухе) проведем следующие рассуждения. Пусть V — суммарный объем кусочков испытуемого тела, ρ — их истинная плотность, λ — плотность воздуха, σ — плотность вещества

разновесок. Тогда $V\rho$ – истинная масса кусочков испытуемого тела, $V\delta$ – истинная масса вытесненной ими воды, $V\lambda$ – масса воздуха, вытесненного кусочками вещества и водой.

Масса воздуха, вытесненного разновесками, уравновешивающими кусочки:

$$\frac{m}{\sigma} \lambda$$

Масса воздуха, вытесненного разновесками, уравновешивающими воду:

$$\frac{M + m - M_0}{\sigma} \lambda$$

По закону Архимеда

$$V\rho - V\lambda = m - \frac{m}{\sigma} \lambda ,$$

или

$$V(\rho - \lambda) = m \left(1 - \frac{\lambda}{\sigma} \right) .$$

Для воды соответственно имеем:

$$V(\delta - \lambda) = (M + m - M_0) \left(1 - \frac{\lambda}{\sigma} \right) .$$

После преобразований получим:

$$\frac{\rho - \lambda}{\delta - \lambda} = \frac{m}{M + m - M_0} ,$$

и для расчета плотности имеем:

$$\rho = \frac{m}{M + m - M_0} (\delta - \lambda) + \lambda$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Задание. Определение плотности твердого тела при помощи пикнометра

1. Определите взвешиванием (без поправки на кажущуюся потерю веса в воздухе) массу m возможно большего числа кусочков исследуемого твердого тела, предварительно убедившись, что все они проходят через горлышко пикнометра.
2. Наполнив пикнометр дистиллированной водой комнатной температуры до специальной метки, определите массу M пикнометра с водой.
3. Кусочки твердого тела поместите в пикнометр, уберите излишек воды и определите массу M_0 пикнометра с остатком воды и твердыми телами. При этом следует обратить особое внимание

на то, чтобы на кусочках не оставались пузырьки воздуха: из-за малости самих кусочков это может весьма значительно исказить результат.

4. Вычислите плотность твердых тел по формуле, определив по таблице плотность воды δ при температуре опыта и принимая плотность воздуха $\lambda = 0,0012 \text{ г/см}^3$.

5. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу.

Таблица

№	m , г	M , г	M_0 , г	$M+m-M_0$, г	ρ , г/см ³
1.					
2.					
3.					

6. Вычислите истинные значения плотностей исследуемых тел и пользуясь таблицей плотностей твердых тел идентифицируйте каждое вещество.

3. Цель деятельности студентов на занятии:

Студент должен знать:

1. Закон Архимеда.
2. Физическое объяснение возникновения выталкивающей силы – силы Архимеда.
3. Метод взвешивания на электронных весах.
4. Метод определения плотности тела.
5. Физические основы метода измерений плотности тела пикнометром.

Студент должен уметь:

1. Определять плотность тела.
2. Измерять массу и объем тел неправильной формы.
3. Применять метод определения плотности тела пикнометром.
4. Идентифицировать вещества по плотности.

4. Содержание обучения:

1. Твердые тела.
2. Плотность тела.
3. Зависимость плотности тела от температуры.
4. Физические основы метода измерения плотности тела пикнометром.
5. Определение плотности веществ.

5. Перечень вопросов для проверки исходного уровня знаний:

1. Дайте определение плотности тела. В каких единицах измеряется плотность?
2. Сформулируйте закон Архимеда.
3. Как изменяется плотность твердого тела с изменением температуры?
4. Как меняется плотность воды с изменением температуры?

6. Перечень вопросов для проверки конечного уровня знаний:

1. Выведите формулы для определения плотности.
2. Объясните зависимость плотности тела от температуры.

7. Хронокарта учебного занятия:

1. Организационный момент – 5 мин.
2. Текущий контроль знаний – 30 мин.
3. Пояснения к выполнению работы – 20 мин.
4. Выполнение работы – 60 мин.
5. Проверка работы и задание на дом – 20 мин.

8. Перечень учебной литературы к занятию:

1. Ремизов А.Н., Максина А.Г., Потапенко А.Я. Медицинская и биологическая физика. М., «Дрофа», 2008, §8.1.
2. Грабовский Р.И.. Курс физики. М., «Лань», 2009, §51.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТЫ ИССЛЕДУЕМОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПО МЕТОДУ ФИГУР ЛИССАЖУ

1. Научно-методическое обоснование темы:

Для наблюдения и регистрации быстропротекающих биоэлектрических процессов (потенциалов действия, изменения электропроводности при возбуждении) требуются приборы, обладающие очень малой инерционностью и большим входным сопротивлением. Такими приборами являются осциллографы. Осциллограф применяется для наблюдения биопотенциалов сердца в электрокардиооскопах. В сочетании с другими устройствами он является составной частью более сложных аппаратов: вектор-электрокардиооскопов, электромиографов, электроэнцефалографов и других приборов, используемых для визуального наблюдения.

2. Теория:

Электронный осциллограф в основном предназначен для исследования быстропеременных процессов, как периодических, так и однократных (ждущая развертка). Например, с помощью осциллографа можно измерять силу тока или величину напряжения, исследовать ее изменение во времени. Для синусоидальных токов или напряжений можно сравнивать амплитуды и частоты исследуемых величин или определять сдвиг фаз между ними. Кроме того, используя соответствующие преобразователи (датчики), с помощью электронного осциллографа можно исследовать и различные неэлектрические процессы.

Важными особенностями электронного осциллографа являются его высокая чувствительность и безынерционность. Последнее позволяет в специальных типах осциллографов исследовать процессы, длительность которых составляет 10^{-9} с.

Всякий осциллограф содержит следующие основные узлы:

- 1) электронно-лучевую трубку,
- 2) генератор развертки,
- 3) усилитель вертикального отклонения,
- 4) усилитель горизонтального отклонения,
- 5) блок питания,
- 6) блок синхронизации.

Электронно-лучевая трубка. По принципу фокусировки и отклонения электронного луча электронно-лучевые трубки бывают электростатические и электромагнитные. В осциллографах используются в основном трубки с электростатическим управлением и фокусировкой.

В такой трубке, откачанной до высокого вакуума (10 мм рт.ст.), содержится так называемая электронная пушка и две пары отклоняющих пластин (6 и 7 на рис.1). Передняя часть трубки (экран 8) покрыта флуоресцирующим веществом.

Электронная пушка состоит из оксидного катода 2, нагреваемого нитью накала 1, управляющего электрода 3 и двух анодов: фокусирующего 4 и ускоряющего 5.

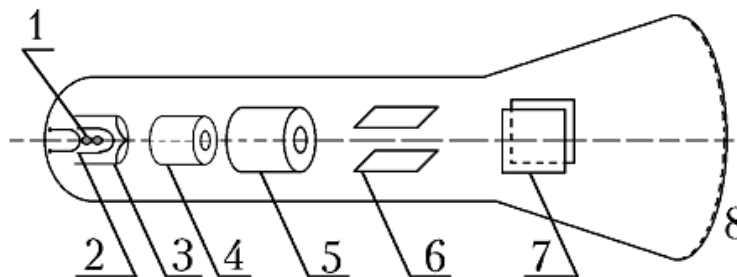


Рис.1. Схема электронно-лучевой трубки.

Катод является источником электронов. Интенсивность электронного пучка, проходящего сквозь отверстие управляющего электрода, а следовательно, и яркость светящегося пятна на

экране регулируются путем изменения отрицательного смещения на управляющем электроде, играющим ту же роль, что и сетка электронной лампы. Управляющий электрод и аноды образуют фокусирующую систему.

На рис. 2. с помощью эквипотенциальных линий представлено электрическое поле этих электродов, пунктиром изображены траектории электронов. Потенциал ускоряющего (второго) анода обычно выбирается в несколько раз больше потенциала первого анода.

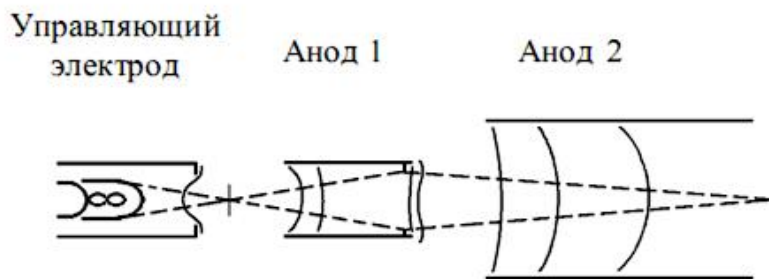


Рис.2. Схематическое устройство электронной пушки.

Под действием взаимно перпендикулярных электрических полей отклоняющих пластин электронный луч на экране испытывает смещение вдоль горизонтальной (X) и вертикальной (Y) осей.

Пусть при напряжении на вертикально отклоняющих пластинах произошло смещение луча на y делений шкалы. Величина $\sigma_y = y/U_y$ называется чувствительностью трубки к напряжению в направлении оси y . Аналогично $\sigma_x = y/U_x$ представляет собой чувствительность трубки в направлении оси X .

Генератор развертки. Если осциллограф используется для исследований процессов во времени, то пятно должно равномерно перемещаться по экрану вдоль одной из осей (обычно X) и, достигнув конца, быстро возвращается в исходную точку. При длительном наблюдении этот процесс должен повторяться непрерывно.

Допустим, что на вертикально отклоняющие пластины подано исследуемое переменное напряжение, например,

$$U_y = U_0 \sin \omega t .$$

Если напряжение на горизонтально отклоняющих пластинах отсутствует, то смещение светового пятна на экране вдоль оси Y :

$$y = \sigma_y U_y = \sigma_y U_0 \sin \omega t = y_0 \sin \omega t ,$$

вдоль оси X :

$$x = 0 .$$

Следовательно, пятно будет совершать колебания вдоль оси Y . Вследствие световой инерции экрана и способности глаза сохранять некоторое время световое восприятие, на экране будет видна вертикальная линия.

Если же напряжение на горизонтально отклоняющих пластинах, одновременно с изменением исследуемого напряжения, возрастает по линейному закону

$$U_x = kt ,$$

то смещение пятна на экране вдоль оси Y :

$$y = y_0 \sin \omega t,$$

вдоль оси X:

$$x = x_0 t.$$

Следовательно, его результирующая траектория будет представлять собой зависимость исследуемого напряжения U_y от времени (в данном случае синусоиду):

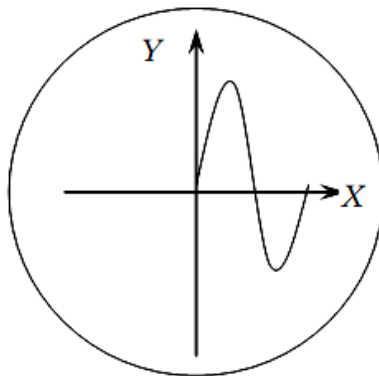


Рис.3. Кривая, описываемая лучом на экране осциллографа.

Если через промежуток времени, равный периоду исследуемого колебания, напряжение U_x резко падает до начального значения, то пятно скачком возвращается в исходное положение. При таком изменении напряжения U_x на экране воспроизводится исследуемая временная зависимость, так что глаз видит неподвижную кривую. При таком сравнительно медленном нарастании по линейному закону и быстром спаде напряжение называется пилообразным, т.к. его график напоминает профиль пилы (рис.4):

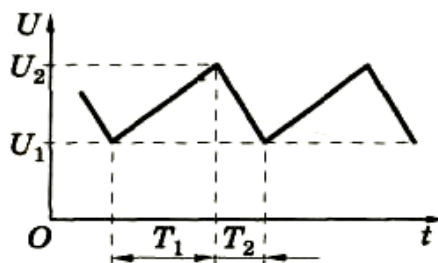


Рис.4. График пилообразного напряжения.

В течение времени T_1 напряжение линейно возрастает от U_1 до U_2 , затем за время T_2 оно линейно уменьшается до минимального значения.

Если период развертывающего пилообразного напряжения кратен периоду исследуемого напряжения, то на экране получится неподвижное изображение нескольких полных колебаний. При некрatности указанных периодов кривая на экране будет двигаться.

Строгое равенство (или кратность) периодов изменения исследуемого напряжения и напряжения развертки сохраняться длительное время не может из-за нестабильности генератора развертки и изучаемого процесса. Для согласования этих периодов осциллографы снабжаются специальным синхронизирующим устройством.

Усилители. Чувствительность электронно-лучевых трубок обычно невелика. Для отклонения луча нужны десятки, сотни вольт. Поэтому при исследовании слабых напряжений сигнал приходится предварительно усилить. В осциллографе имеются два усилителя: усилитель напряжения U_x , подаваемого на горизонтально отклоняющие пластины, и усилитель напряжения U_y , подаваемого на вертикально отклоняющие пластины.

При сравнении амплитуд, частот или фаз двух напряжений или токов генератор развертки отключается, и используются оба усилителя.

В случае сигналов большой амплитуды напряжения подаются непосредственно на отклоняющие пластины через выводы, находящиеся на боковой панели осциллографа.

В данной лабораторной работе частота гармонического колебания, неизвестная точно, определяется с помощью электронного осциллографа по методу фигур Лиссажу. Исследуемое напряжение от звукового генератора подается на вертикально отклоняющие пластины, а на горизонтально отклоняющие пластины подается напряжение от сети переменного тока с частотой 50 Гц. Частота сети достаточно стабильна и в этой работе считается стандартом, с которым сравнивается частота звукового генератора.

Электронный луч в электронно-лучевой трубке, испытывая действие указанных синусоидальных напряжений, будет совершать движение, представляющие собой результат сложения двух взаимно перпендикулярных колебаний. Если частоты колебаний не одинаковы, то светящееся пятно на экране трубки описывает довольно сложные кривые, называемые *фигурами Лиссажу*. В случае кратных частот кривые Лиссажу замкнутые и по их виду можно определить отношение частот ν_y / ν_x .

При колебательном движении луча вдоль любой из осей (например Y) он пересекает за время одного периода перпендикулярную движению ось (X) дважды. Если отношение частот колебаний вдоль осей $\nu_y / \nu_x = N$, то, очевидно, что за одно и то же время число пересечений лучей оси X (n_x) будет в N раз больше числа пересечений оси Y (n_y), то есть $n_x / n_y = N$.

Таким же будет и число пересечений соответствующей фигурой Лиссажу координатных осей или прямых, параллельных осям.

Следовательно,

$$\nu_y / \nu_x = n_x / n_y$$

и определяемая частота

$$\nu_y = \nu_x \frac{n_x}{n_y}.$$

Приведенное здесь отношение может быть также получено из совместного решения соответствующих уравнений движения вдоль осей.

В случае, когда прямая проходит через точку пересечения ветвей кривой, при подсчете пересечений ее учитывают дважды (такая точка соответствует кратным корням).

Примеры фигур Лиссажу при различном соотношении частот складываемых колебаний и сдвиге фаз приведены на рис. 5.

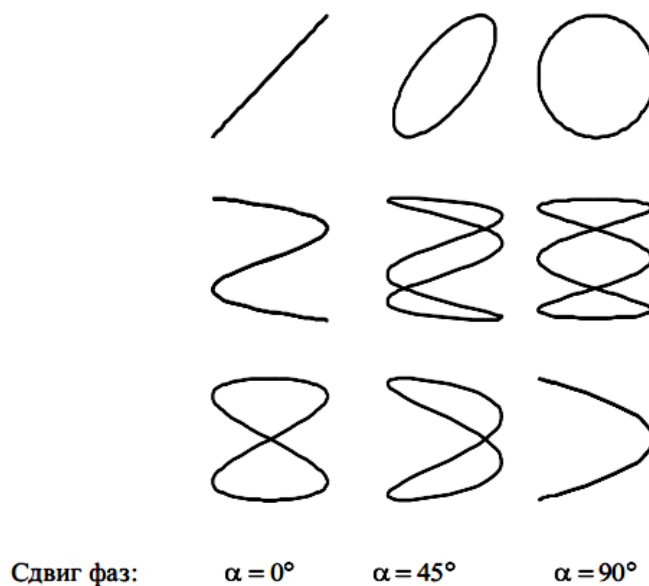


Рис. 5. Фигуры, получаемые при сложении взаимно перпендикулярных колебаний.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка (рис.6) состоит из электронного осциллографа, звуковой генератора и источника синусоидального напряжения стандартной частоты (50 Гц).

Все ручки управления осциллографа с соответствующими надписями сгруппированы на его передней панели. Звуковой генератор представляет собой генератор колебаний синусоидальной формы в диапазоне от 20 Гц до 20 кГц. Напряжение снимается с выходных клемм и регулируется ручкой потенциометра, находящейся на передней панели генератора.

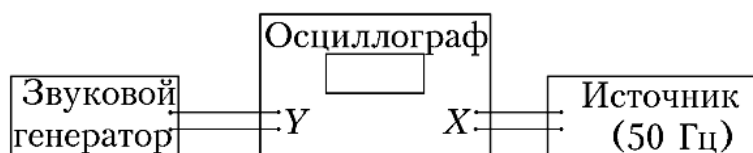


Рис.6. Схема экспериментальной установки.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

- 1.Соберите схему в соответствии с рис. 6.
- 2.Включите осциллограф в сеть и дайте ему прогреться в течение 1-2 мин.
- 3.Выключите генератор развертки осциллографа. Усиление по осям X и Y установите на «0», регуляторы яркости и фокуса – в среднее положение.
4. Включите в сеть звуковой генератор и источник стандартной частоты.
- 5.Вращая ручку плавного регулятора частоты звукового генератора, добейтесь появления на экране устойчивой фигуры Лиссажу,
- 6.Запишите в таблицу 1 значение частоты звукового генератора, соответствующее устойчивой фигуре Лиссажу, и зарисуйте ее вид.
7. Изменив частоту колебаний звукового генератора, получите новую устойчивую фигуру Лиссажу.
8. Получите такие фигуры для 7 случаев, при которых частота звукового генератора близка к следующим значениям: 17; 25; 33,5; 50; 75; 100; 150.
9. Найдите число пересечений n_x каждой фигуры с осью X и число пересечений n_y с осью Y.
10. Определите частоту исследуемого напряжения по формуле

$$\nu_y = \nu_x \frac{n_x}{n_y},$$

где $\nu_x = 50$ Гц.

- 11.Результаты занесите в таблицу.

Таблица

№	Частота звукового генератора, Гц	Вид фигуры Лиссажу	$\frac{n_x}{n_y}$	ν_y
1.				
2.				
3.				
4.				
5.				
6.				
7.				

3. Цель деятельности студентов на занятии:

Студент должен знать:

1. Блок-схему электронного осциллографа.
2. Устройство, назначение и принцип работы отдельных блоков электронного осциллографа.
3. Метод фигур Лиссажу.

Студент должен уметь:

1. Измерять параметры электрических сигналов с помощью электронного осциллографа.
2. Определять частоту исследуемого напряжения по методу фигур Лиссажу.

4. Содержание обучения:

1. Устройство и принцип действия электронного осциллографа.
2. Назначение отдельных блоков электронного осциллографа.
3. Метод фигур Лиссажу.

5. Перечень вопросов для проверки исходного уровня знаний:

1. Из каких блоков состоит электронный осциллограф?
2. Опишите устройство и принцип действия электронно-лучевой трубки.
3. Что называется чувствительностью осциллографа?
4. Для каких целей может быть использован осциллограф в медико-биологических исследованиях?
5. Как создается ускоряющее поле в осциллографе?

6. Перечень вопросов для проверки конечного уровня знаний:

1. Для чего предназначен генератор развертки?
2. Как осуществляется развертка сигнала во времени на экране электронного осциллографа?
3. Что такое синхронизация сигналов и как она осуществляется в осциллографе?
4. Опишите метод фигур Лиссажу.
5. Определите по виду фигуры Лиссажу отношение частот колебаний.

7. Хронокарта учебного занятия:

1. Организационный момент - 5 мин.
2. Текущий контроль знаний – 40 мин.
3. Пояснения к выполнению работы – 10 мин.
4. Выполнение и оформление работы - 60 мин.
5. Проверка работы и задание на дом - 20 мин.

8. Перечень учебной литературы к занятию:

1. Ремизов А.Н., Максина А.Г., Потапенко А.Я., Медицинская и биологическая физика, М., «Дрофа», 2008, § 18.8.
2. Блохина М.Е., Эссаулова И.А., Мансурова Г.В. Руководство к лабораторным работам по медицинской и биологической физике. М., «Дрофа», 2002, §21.

ИЗУЧЕНИЕ ДИСПЕРСИИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ЖИВОЙ ТКАНИ

1. Научно-методическое обоснование темы:

Пассивные электрические свойства биологических тканей характеризуются импедансом (полным сопротивлением), величина которого определяется емкостной и активной проводимостью тканей.

Измерение полного сопротивления (импеданса) тканей переменному электрическому току имеет большое практическое значение для диагностики и научно-медицинских исследований. На измерений импеданса основан метод импедансной реоплетизмографии (реографии). Это метод регистрации изменения полного электрического сопротивления исследуемого участка тела или органа. Импеданс зависит от кровенаполнения сосудов. Метод находит широкое применение при массовых обследованиях различных контингентов практически здоровых людей с целью оценки функционального состояния сердечно-сосудистой системы и выявления скрытой патологии, как один из методов экспресс-диагностики в экстремальных ситуациях, а также в исследованиях, связанных с космической медициной, трансплантационной хирургией и т.п.

Ткани организма состоят из структурных элементов — клеток, омываемых тканевой жидкостью. Каждый такой элемент представляет две среды, относительно хорошо проводящие ток (тканевая жидкость и цитоплазма клеток), разделенные плохо проводящим слоем (клеточные мембраны). В тканях встречаются и макроскопические образования, состоящие из различных соединительнотканых оболочек и перегородок, то есть плохие проводники, по обе стороны которых находятся ткани, хорошо проводящие ток. Все это придает тканям организма емкостные свойства, наличие которых элементарно подтверждается измерением тангенса угла сдвига фаз между током и напряжением. Индуктивные свойства тканей не обнаружены. Общее сопротивление и общая емкость участка тканей организма зависят от состояния тканей: степени кровенаполнения, скорости кровотока, отека и т.д. При переменном токе с увеличением частоты полное сопротивление (импеданс) тканей организма снижается за счет уменьшения емкостного сопротивления.

2. Теория:

Импедансом называется полное сопротивление цепи переменного тока.

Переменным называется ток, мгновенные значения которого периодически изменяются по величине и направлению. В общем случае переменный ток может иметь любую сложную форму колебания; в технике наиболее распространен *синусоидальный* ток. В этом случае мгновенные значения напряжения и тока определяются выражениями $U = U_m \sin \omega t$ и $I = I_m \sin \omega t$, где U_m и I_m — амплитудные значения напряжения и тока. Рассмотрим три цепи, к каждой из которых приложено переменное напряжение

$$U = U_m \sin \omega t, \quad (1)$$

Сила тока в цепи с резистором (рис.1, а) будет изменяться в фазе с приложенным напряжением:

$$I = I_m \sin \omega t, \quad (2)$$

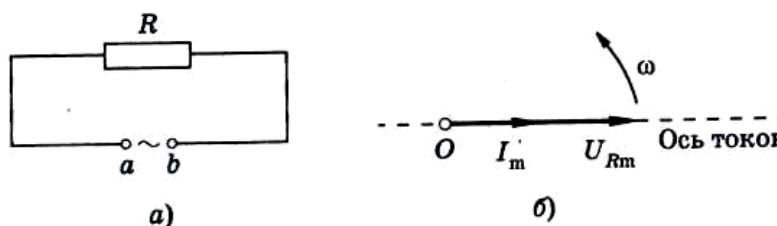


Рис.1

сила тока в цепи с катушкой индуктивности (рис.2, а) будет отставать по фазе от приложенного напряжения на $\pi/2$:

$$I = I_m \sin (\omega t - \pi/2) , \quad (3)$$

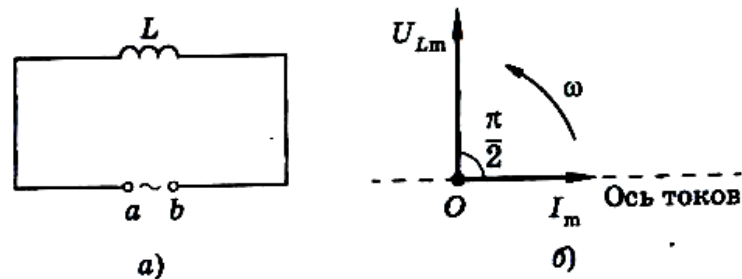


Рис.2

а ток в цепи с конденсатором (рис.3, а) будет опережать по фазе напряжение на $\pi/2$:

$$I = I_m \sin (\omega t + \pi/2) , \quad (4)$$

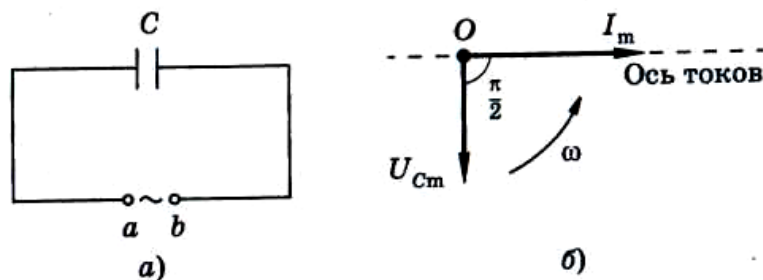


Рис.3

Векторные диаграммы, соответствующие этим примерам, показаны на рис. 1, б – 3,б. Для цепи с резистором имеем *омическое сопротивление*

$$R = \frac{U_{mR}}{I_m} , \quad (5)$$

для цепи с катушкой индуктивности – *индуктивное сопротивление*

$$X_L = \frac{U_{mL}}{I_m} = L\omega , \quad (6)$$

а для цепи с конденсатором – *емкостное сопротивление*

$$X_C = \frac{U_{mC}}{I_m} = \frac{1}{C\omega} , \quad (7)$$

Рассмотрим цепь, в которой последовательно соединены резистор, катушка индуктивности и конденсатор (рис.4):

В общем случае сила тока в цепи и напряжение изменяются не в одной фазе, поэтому

$$I = I_m \sin (\omega t - \varphi) , \quad (8)$$

где φ – разность фаз напряжения и силы тока.

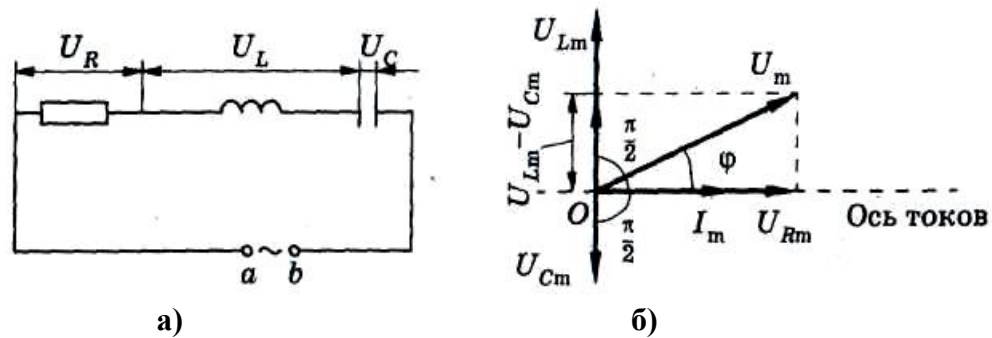


Рис.4

Сумма напряжений на отдельных участках цепи равна внешнему напряжению:

$$U = IR + IX_L + IX_C = U_R + U_L + U_C, \quad (9)$$

На рис. 4, б по оси токов направлен вектор амплитуды силы тока I_m .

Так как по всей цепи амплитуда силы тока одинакова, то амплитуды напряжений на участках цепи отложены относительно этого вектора: вектор U_{Rm} – в одной фазе с силой тока; вектор U_{Lm} – с опережением силы тока по фазе на $\frac{\pi}{2}$, вектор U_{Cm} – с отставанием силы тока по фазе на $\frac{\pi}{2}$. Используя теорему Пифагора, имеем

$$U_m^2 = U_{Rm}^2 + (U_{Lm} - U_{Cm})^2, \quad (10)$$

Подставляя в (10) выражения этих амплитуд из (5) – (7) и учитывая закон Ома, находим

$$I^2 Z^2 = I_m^2 R^2 + \left[I_m L \omega - \frac{I_m}{C \omega} \right]^2, \quad (11)$$

где Z – полное сопротивление цепи переменного тока, называемое импедансом. Из (11) получаем

$$Z = \sqrt{R^2 + \left[L \omega - \frac{1}{C \omega} \right]^2}, \quad (12)$$

Живые ткани состоят из клеток, омываемых тканевой жидкостью. Цитоплазма клеток и тканевая жидкость представляют собой электролиты, разделенные плохо проводящей клеточной оболочкой. Такая система обладает *статической* и *поляризационной* емкостью. Поляризационная емкость – результат электрохимической поляризации, возникающей при прохождении постоянного электрического тока через электролит. Она зависит от силы тока и времени его протекания. По современным представлениям, живые ткани не обладают *индуктивностью* и сопротивление их имеет только *активную* и *емкостную* составляющие.

При прохождении переменного тока через живые ткани наблюдается *дисперсия электропроводимости*: полное сопротивление ткани увеличивается с уменьшением частоты тока до некоторой максимальной величины $Z_{\max}$ и стремится к некоторому минимальному значению $Z_{\min}$ при увеличении частоты. На рис.5 изображен график зависимости импеданса мышцы от частоты переменного тока.

Дисперсия электропроводимости живой ткани является результатом зависимости емкостного сопротивления от частоты переменного тока, а также влияния поляризационной

емкости, которая при низких частотах сказывается сильнее и уменьшается с увеличением частоты.

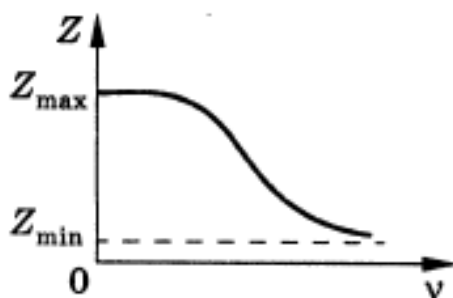


Рис.5

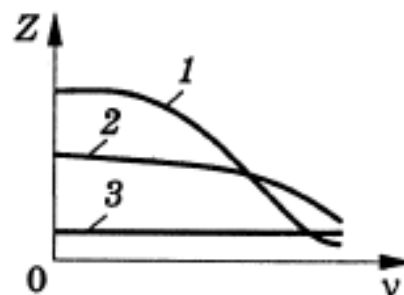


Рис.6

Дисперсия электропроводимости присуща только живым тканям. По мере отмирания ткани крутизна кривой уменьшается. На рис.6 приведена зависимость сопротивления участка живой ткани от частоты при отмирании: 1—живая ткань, 2—поврежденная ткань, 3— мертвая ткань.

В настоящее время в связи с развитием трансплантационной хирургии и поисками методов определения качества консервированных тканей, электропроводимость используется как один из тестов жизнеспособности консервированной кожи, кости, роговицы и т.п.

Другим проявлением реактивных свойств сопротивления живой ткани является наличие сдвига фаз между силой тока и напряжением. В цепи, содержащей активное и емкостное сопротивление, угол сдвига фаз лежит в интервале от 0 до 90° . Для биологических объектов характерен большой угол сдвига фаз, что говорит о значительной доле емкостного сопротивления в полном сопротивлении (импедансе). Для кожи человека, например, при частоте 1 кГц угол сдвига фаз равен 55° .

Импеданс живой ткани можно моделировать с помощью эквивалентных схем. На рис.7, а, б, в приведены три такие схемы и указаны графики зависимости $Z(v)$ для данных схем. Из них видно, что наиболее близкая к живой ткани зависимость $Z(v)$ получается для схемы в.

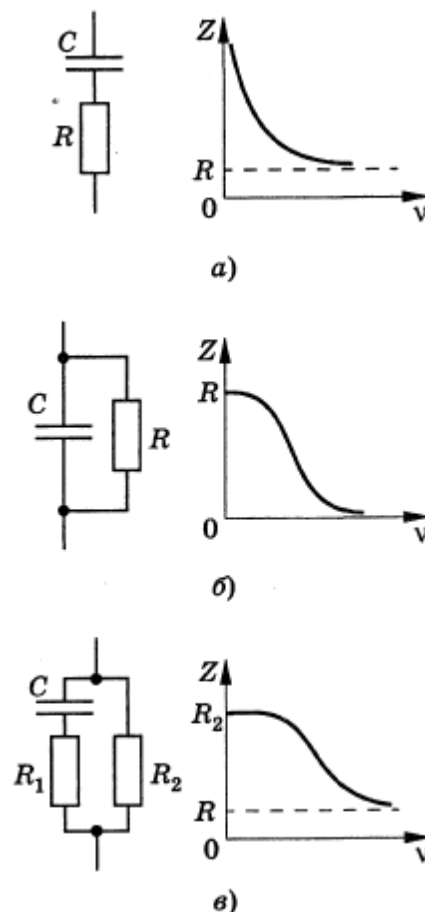


Рис.7

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Структурная схема установки, используемой для измерения импеданса, изображена на рис.8. К клеммам 1 может подключаться поочередно каждая эквивалентная схема или биологический объект. В данной работе частотная характеристика снимается с эквивалентных электрических схем.

Последовательно с эквивалентной схемой подключается дополнительный резистор 2 с сопротивлением R_0 . Напряжение с эквивалентной схемы подается на Y – пластины осциллографа 3. Напряжение с дополнительного резистора подается на X – пластины осциллографа. Так как эквивалентная схема и дополнительный резистор включены в цепь последовательно, то сила тока в них одинакова.

Обозначим U_Z – напряжение на эквивалентной схеме; U_R – напряжение на резисторе; Z – импеданс эквивалентной схемы; I – силу тока в цепи. По закону Ома

$$U_Z = I \cdot Z, \quad U_R = I R_0,$$

откуда

$$Z = U_Z / I, \quad I = U_R / R_0;$$

Следовательно,

$$Z = U_Z R_0 / U_R, \quad (13)$$

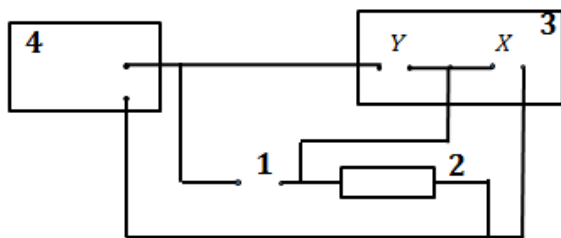


Рис.8

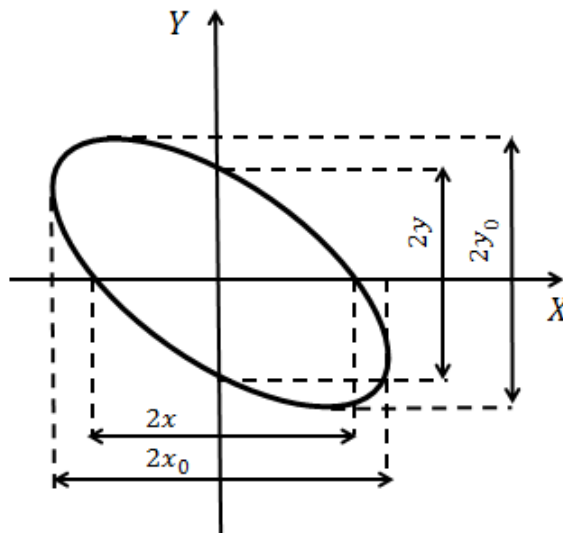


Рис.9

Источником питания служит звуковой генератор 4, который позволяет изменять частоту подаваемого напряжения. При подаче напряжения на экране осциллографа наблюдается эллипс (рис.9).

Как известно, эллипс получается в результате сложения двух взаимно перпендикулярных гармонических колебаний одинаковой частоты.

Измерив двойные амплитуды $2x_0$ и $2y_0$ сигнала и зная чувствительности S_x и S_y соответствующих каналов осциллографа, можно определить напряжения

$$U_Z = \frac{y_0}{S_y}, \quad U_R = \frac{x_0}{S_x}.$$

Подставляя эти соотношения в формулу (13), получаем

$$Z = y_0 S_y R_0 / x_0 S_x, \quad (14)$$

Если $S_x = S_y$, то

$$Z = y_0 R_0 / x_0, \quad (15)$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Задание. Определение импеданса эквивалентных электрических схем

1. Подключите к клеммам 1 эквивалентную схему «а».
2. Включите звуковой генератор и осциллограф.
3. Получите устойчивую картину на экране осциллографа при условии $S_x = S_y$.
4. Установите на звуковом генераторе частоту 50 Гц и получите на экране осциллографа эллипс.
5. Проведите 10 измерений $2x_0$ и $2y_0$ на разных частотах в пределах от 30 до $5 \cdot 10^3$ Гц.
6. Рассчитайте импеданс Z эквивалентной схемы «а» по формуле (15), где $R_0 = 2000$ Ом.
7. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу.

Таблица

№	ν , Гц	$\lg \nu$	I			II			III		
			$2x_0$, мм	$2y_0$, мм	Z_1 , Ом	$2x_0$, мм	$2y_0$, мм	Z_2 , Ом	$2x_0$, мм	$2y_0$, мм	Z_3 , Ом
1.	30	1,5									
2.	100	2,0									
3.	300	2,5									
4.	1000	3,0									
5.	3000	3,5									
6.	10000	4,0									
7.	20000	4,5									
.	.	.									
.	.	.									
.	.	.									

8. Подключая поочередно схемы «б» и «в», повторите измерения, указанные в пунктах 4–7.
9. По полученным данным постройте графики зависимости $Z(\nu)$ или $Z(\lg \nu)$ для всех трех схем.
10. Сравните полученные графики с частотной характеристикой импеданса живой ткани (см. рис.5) и выберите схему, наиболее точно моделирующую живую ткань.

3. Цель деятельности студентов на занятии:

Студент должен знать:

1. Определение импеданса.
2. Особенности электропроводимости живых тканей.
3. Обобщенный закон Ома.
4. Использование импеданса в медицине.

Студент должен уметь:

1. Объяснять причины наличия в ткани емкостного сопротивления.
2. Исследовать зависимость импеданса от частоты для предложенных эквивалентных электрических схем ткани.
3. Сравнить полученные результаты с экспериментальными данными для живой ткани.

4. Содержание обучения:

1. Переменный электрический ток.
2. Цепи, содержащие только резистор, только катушку индуктивности, только емкость.
3. Полное сопротивление (импеданс) цепи переменного тока.
4. Физические основы реографии.
5. Определение импеданса эквивалентных электрических схем.

5.Перечень вопросов для проверки исходного уровня знаний:

- 1.Какой ток называется переменным?
- 2.Что такое импеданс?
- 3.Что такое эквивалентная схема?
- 4.Что называется дисперсией электропроводимости и чем она обусловлена?

6.Перечень вопросов для проверки конечного уровня знаний:

- 1.Приведите векторную диаграмму для цепи с резистором; с катушкой индуктивности; с конденсатором.
- 2.Запишите выражения для омического, индуктивного и емкостного сопротивлений.
- 3.Получите формулу импеданса для цепи, в которой последовательно соединены резистор, катушка индуктивности и конденсатор.
- 4.Выведите формулу для расчета импеданса в данной работе.
- 5.Для каких целей используется импеданс в медицине?

7. Хронокарта учебного занятия:

1. Организационный момент – 10 мин.
2. Текущий контроль знаний – 40 мин.
3. Пояснение к выполнению работы – 10 мин.
4. Выполнение работы – 80 мин.
5. Проверка работы – 40 мин.

8. Перечень учебной литературы к занятию:

- 1.Ремизов А.Н., Максина А.Г., Потапенко А.Я., Медицинская и биологическая физика. М., «Дрофа», 2008, §§ 14.3, 14.4.
2. Ремизов А.Н., Потапенко А.Я. Курс физики. М., «Дрофа», 2008, §§ 19.2, 19.3.
- 3.Антонов В.Ф., Черныш А.М., Козлова Е.К., Коржув А.В. Физика и биофизика. Практикум. М., «ГЭОТАР-Медиа», 2008, § 3.9.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРА МЕТОДОМ РЕФРАКТОМЕТРИИ

1. Научно-методическое обоснование темы:

Показатель преломления является важной оптической характеристикой прозрачных сред. Она, например, определяет функционирование хрусталика глаза.

Метод измерения показателя преломления – *рефрактометрия* – широко применяется в практике лабораторных исследований для определения концентрации вещества в растворе, установления его подлинности и чистоты.

2. Теория:

Пусть две прозрачные среды находятся в контакте, и из первой среды во вторую распространяется луч света (рис.1, а, б). Тогда на границе раздела двух сред происходит отражение и преломление (рефракция) света.

Абсолютный показатель преломления среды

$$n = \frac{c}{v}, \quad (1)$$

где c - скорость распространения света в вакууме; v - скорость распространения света в данной среде.

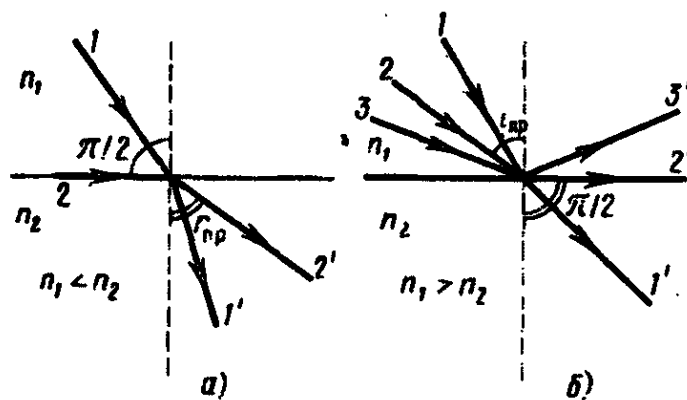


Рис.1

Относительный показатель преломления сред:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (2)$$

где n_2 и n_1 - абсолютные показатели преломления сред.

При переходе света из среды с меньшим показателем преломления (оптически менее плотная среда) в среду с большим показателем преломления (оптически более плотная среда) *угол падения луча больше угла преломления* (рис.1, а). Если луч падает на границу раздела сред под

наибольшим возможным углом $i = \frac{\pi}{2}$ (луч скользит вдоль границы раздела сред), то он будет

преломляться под углом $r_{np} < \frac{\pi}{2}$. Этот угол является наибольшим углом преломления для данных сред и называется *предельным углом преломления*. Из закона преломления света следует:

$$n_{21} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2}\right)}{\sin r_{np}} = \frac{1}{\sin r_{np}} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (3)$$

откуда

$$\sin r_{np} = \frac{n_1}{n_2}, \quad (4)$$

Если свет переходит из оптически более плотной среды в оптически менее плотную, то угол преломления больше угла падения (рис.1, б). При некотором угле падения i луча угол преломления равен $\frac{\pi}{2}$, т.е. преломленный луч скользит вдоль границы раздела сред. При дальнейшем увеличении угла падения преломление не происходит; весь падающий свет отражается от границы раздела сред (полное отражение). Угол i называется предельным углом полного отражения и обозначается i_{np} . Так как

$$n_{21} = \frac{\sin i_{np}}{\sin\left(\frac{\pi}{2}\right)} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (5)$$

то

$$\sin i_{np} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (6)$$

Таким образом, *предельный угол преломления и предельный угол полного отражения для данных сред зависят от их показателей преломления*. Это нашло применение в приборах для измерения показателя преломления веществ – рефрактометрах (рис.2, а, б, в) используемых при определении чистоты воды, концентрации общего белка сыворотки крови, для идентификации различных веществ и т.д.

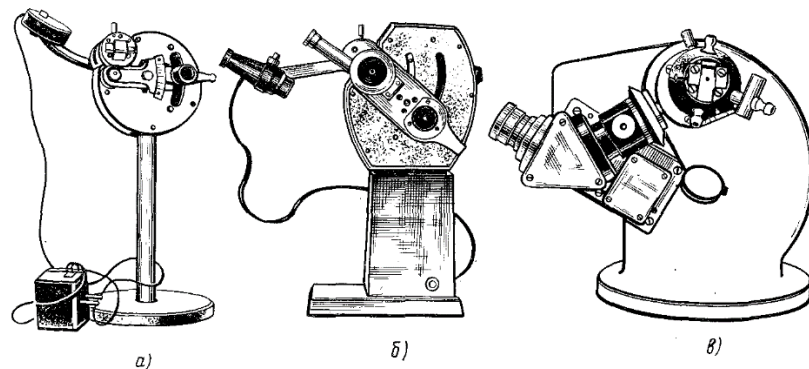


Рис.2

Показатель преломления растворов n определяется показателем преломления растворителя n_0 и линейно зависит от концентрации C растворенного вещества:

$$n = n_0 + Ac, \quad (7)$$

где A – коэффициент пропорциональности, характерный для данного растворенного вещества. Значения этого коэффициента определены с высокой точностью для многих веществ. Поэтому

формулу (1) можно использовать для измерения концентрации различных веществ, используя приборы для определения показателя преломления – *рефрактометры*.

Рефрактометр предназначен для измерения коэффициента преломления растворов различных веществ. Принцип действия рефрактометра состоит в измерении предельного угла преломления на границе исследуемой жидкости и стеклянной призмы с известным коэффициентом преломления.

Рефрактометр состоит из двух призм: вспомогательной откидной призмы 1 с матовой нижней гранью 2 и измерительной призмы 3. Призмы соприкасаются гипотенузными гранями, между которыми имеется зазор около 0,1 мм, в который помещается несколько капель исследуемой жидкости 4. Измеряется предельный угол преломления на границе жидкость - измерительная призма.

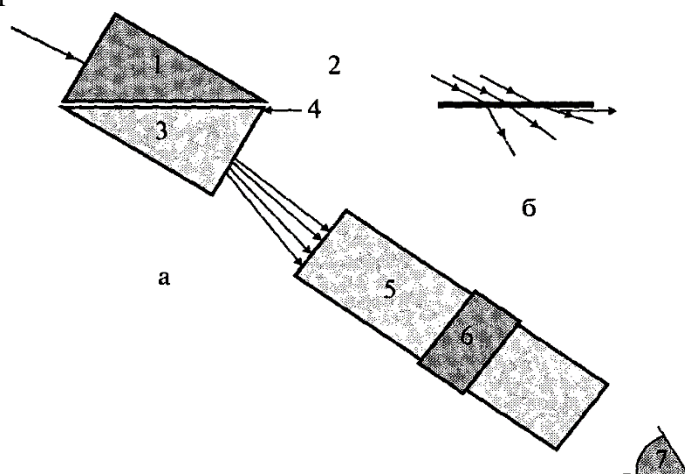


Рис.3 – блок-схема рефрактометра: 1 – вспомогательная откидная призма с матовой гранью 2; 3 – измерительная призма; 4 – исследуемая жидкость; 5 – отсчетное устройство; 6 – компенсатор; 7 – глаз; б – схема рассеяния света матовой нижней гранью 2 откидной призмы.

Величину угла и, соответственно, коэффициент преломления определяют с помощью отсчетного устройства 5. Встроенный в него компенсатор 6 позволяет сделать границу свет-ть черной-белой при освещении белым светом.

Луч света, проходя через вспомогательную откидную призму 1, рассеивается на матовой нижней грани 2. При этом рассеянные лучи распространяются во всех направлениях, в том числе и параллельно поверхности измерительной призмы 3 (рис.3, б). Далее эти лучи преломляются на границе жидкость 4 – измерительная призма 3, и, пройдя сквозь эту призму 3, попадают в отсчетное устройство 5. Если показатель преломления жидкости меньше показателя преломления стекла, то лучи света входят в призму 3 в пределах от 0 до i_{np} . Пространство внутри этого угла будет освещенным, а вне его – темным. Таким образом, поле зрения, видимое в зрительную трубу, разделено на две части: темную и светлую. Положение границы раздела света и тени определяется предельным углом преломления, зависящим от показателя преломления исследуемой жидкости.

Если исследуемая жидкость имеет большой показатель поглощения (мутная, окрашенная жидкость), то во избежание потерь энергии при прохождении света через жидкость измерения проводят в отраженном свете. Если жидкость оптически менее плотная, чем стекло, из которого изготовлена призма, то лучи, падающие под углами, большими i_{np} , будут испытывать полное внутреннее отражение и выходить через вторую боковую грань измерительной призмы в зрительную трубу. Поле зрения, как и в первом случае, окажется разделенным на светлую и темную части. Положение границы раздела в данном случае определяется предельным углом полного отражения i_{np} , также зависящим от показателя преломления исследуемой жидкости.

Если граница свет – тень оказалась окрашенной и размытой, то с помощью компенсатора 6 надо добиться резкой черно-белой границы. Конструкция отсчетного устройства 5 такова, что позволяет путем специального рычага совместить границу свет-ть с маркером отсчетного

устройства. При этом маркер показывает на встроенной шкале непосредственно значения показателя преломления.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Конструкция рефрактометра РПЛ-3 схематично представлена на рис.4.

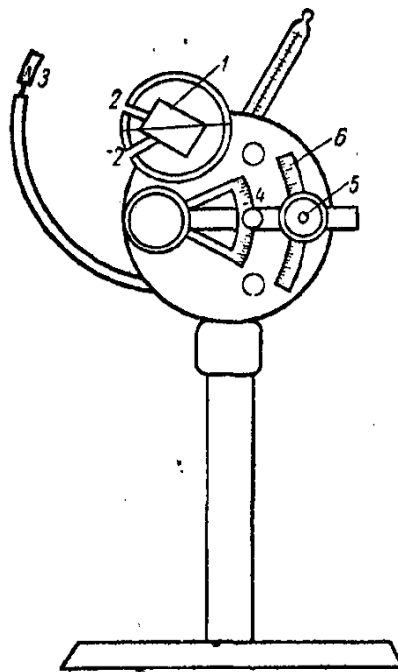


Рис.4

Прибор состоит из корпуса, имеющего форму плоской круглой коробки, навинченного на штатив с массивным основанием. Основная деталь рефрактометра – призма 1, которая состоит в действительности из двух прямоугольных призм, сложенных гипотенузами и вмонтированных в полые кожухи, выполненные в виде полуцилиндров. Нижний из них неподвижно прикреплен к корпусу, а верхний откидывается на шарнире.

Обе призмы изготовлены из тяжелого стекла с показателем преломления порядка 1,7 и вмонтированы в полуцилиндры так, что при складывании последних вплотную между обращенными друг к другу и параллельно расположенными основаниями призм остается свободное пространство около 0,15 мм. *Это пространство при измерении заполняется исследуемой жидкостью.* С левой стороны каждого полуцилиндра имеется отверстие 2 (рис.4), через которое свет, отраженный от зеркальца 3, может быть направлен на призму 1. Прошедший через призму 1 пучок света встречает на своем пути прямоугольную поворотную призму, которая изменяет направление пучка на 90^0 , и направляет его в зрительную трубу 5.

Определение показателя преломления жидкости с помощью рефрактометра, как было сказано выше, может быть выполнено двумя способами (в проходящем и отраженном свете). Рассмотрим их более подробно.

При первом способе – в проходящем свете (рис.5, а) – пучок световых лучей, испускаемых источником света S , с помощью зеркальца Z направляется на грань AB призмы ABC . Преломившись на грани AB , лучи проходят в призму ABC и достигают грани AC . Но так как эта грань сделана матовой и поэтому вызывает рассеяние света, лучи войдут в жидкость и достигнут грани DE под различными углами. Очевидно, что наибольший возможный угол падения для лучей, падающих на грань DE , равен 90^0 . Эти скользящие вдоль поверхности DE лучи после преломления определяют границу распространения света, так как им соответствует предельный угол преломления.

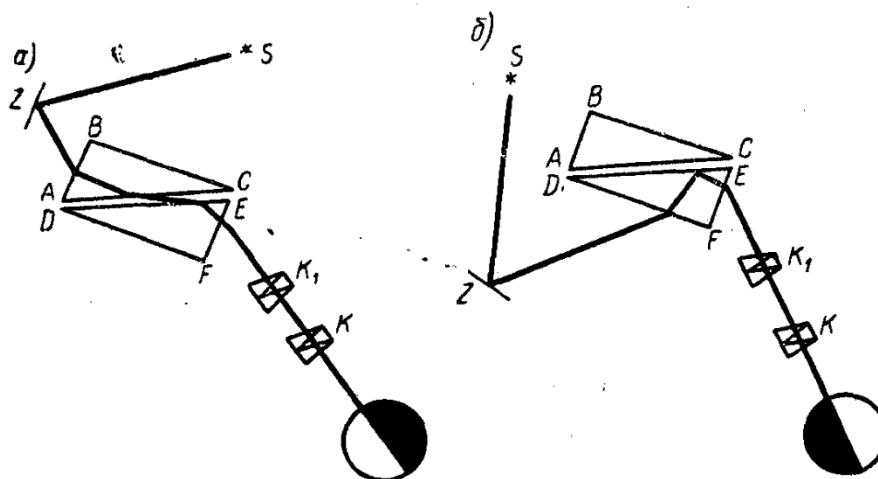


Рис.5

При втором способе – в отраженном свете (рис.5, б) – пучок световых лучей, испускаемых источником S , с помощью зеркала Z направляется на грань DF . Так как грань DF также матовая, то лучи входят в призму DEF под разными углами. В этом случае лучам, вошедшим в призму DEF и достигшим грани DE , приходится переходить из среды, оптически более плотной (стекло), в среду оптически менее плотную (жидкость). Лучи, падающие на поверхность DE под углом меньше предельного, пройдут в жидкость и в призму ABC . Лучи, у которых угол падения больше предельного, претерпят полное внутреннее отражение. Лучи, направление которых соответствует величине предельного угла, и определяют границу раздела света и тени.

В случае бесцветных и слабоокрашенных жидкостей удобно пользоваться первым способом. При измерении показателя преломления интенсивно окрашенных жидкостей, сильно поглощающих свет, лучше пользоваться вторым способом.

При правильном положении компенсатора в окуляр зрительной трубы видно поле зрения, разделенное на две части с резкой границей свет – тень, без цветных оттенков. Одновременно в окуляр видна шкала 6 (см. рис.4), на которой слева нанесены значения показателей преломления и визирная линия (три черточки). Визирная линия (маркер) нанесена на стекле, расположенном внутри зрительной трубы. При измерениях окуляр зрительной трубы перемещается вдоль шкалы до тех пор, пока визирная линия не совпадет с границей раздела свет – тень. При этом слева на шкале можно прочесть непосредственно значение показателя преломления n .

Подготовка прибора к работе

1. Откиньте верхнюю призму рефрактометра и пипеткой нанесите на нижнюю призму 2-3 капли дистиллированной воды. Опустите верхнюю призму;
2. Сориентируйте рефрактометр так, чтобы наблюдения проводились в проходящем свете;
3. Фокусируя окуляр зрительной трубы 5 (рис.4) и вращая зеркальце, добейтесь яркого освещения поля зрения;
4. Медленно передвигайте окуляр вверх вдоль шкалы до появления в поле зрения границы свет-тень. Линия раздела должна быть резкой и без цветной окраски. Последнее достигается поворотом рукоятки компенсатора (рычажка 4 (см. рис.4));
5. Перемещая окуляр, совместите визирную линию (три штриха) с границей раздела свет-тень. Произведите отсчет значения показателя преломления жидкости по левой шкале. При правильной настройке рефрактометра показание шкалы при этом должно соответствовать показателю преломления воды $n=1,333-1,334$.

Задание. Определение концентрации раствора NaCl

1. Для дистиллированной воды и трех растворов соли с известными концентрациями проведите по три измерения показателя преломления n_1 , n_2 , n_3 . Для этого на нижнюю призму нанесите поочередно растворы различной концентрации и, совмещая визир с границей раздела свет-тень, определите по шкале показатели преломления растворов.
2. Результаты измерений занесите в таблицу:

Таблица

Вещество	Концентрация, c г/л	Показатель преломления			
		n_1	n_2	n_3	n
вода	$c = 0$				
NaCl	c_1				
	c_2				
	c_3				
	c_x				

3. Для каждого раствора измерение показателя преломления произведите по три раза и рассчитайте среднее значение показателя преломления n ;
4. Постройте градировочную прямую: график зависимости n от концентрации c ;
5. Измерьте показатель преломления n_x раствора неизвестной концентрации;
6. Определите по графику концентрацию c_x этого раствора и занесите ее значение в таблицу.

3. Цель деятельности студентов на занятии:**Студент должен знать:**

1. Законы преломления и отражения света.
2. Ход лучей при переходе света из оптически более плотной в менее плотную среду.
3. Ход лучей при переходе света из оптически менее плотной в более плотную среду.
4. Физический смысл абсолютного и относительного показателей преломления.
5. Назначение, принцип действия и устройство рефрактометра.

Студент должен уметь:

1. Измерять показатель преломления раствора с помощью рефрактометра.
2. Исследовать зависимость показателя преломления раствора от концентрации.

4. Содержание обучения:

1. Законы отражения и преломления света.
2. Назначение рефрактометра.
3. Устройство и принцип действия рефрактометра.
4. Измерение показателя преломления и определение концентрации раствора.

5. Перечень вопросов для проверки исходного уровня знаний:

1. Сформулируйте законы отражения и преломления света.
2. Что называется предельным углом преломления?
3. В чем заключается явление полного внутреннего отражения?
4. Что называется предельным углом полного внутреннего отражения?

6. Перечень вопросов для проверки конечного уровня знаний:

1. Объясните назначение, принцип действия и устройство рефрактометра.
2. Опишите методы определения показателя преломления жидкостей в проходящем и отраженном свете, начертите ход лучей в рефрактометре в этих случаях.

7. Хронокарта учебного занятия:

1. Организационный момент – 10 мин.
2. Текущий контроль знаний – 40 мин.
3. Пояснение к выполнению работы – 10 мин.
4. Выполнение работы – 80 мин.
5. Проверка работы – 40 мин.

8. Перечень учебной литературы к занятию:

1. Блохина М.Е., Эссаулова И.А., Мансурова Г.В. Руководство к лабораторным работам по медицинской и биологической физике. М., «Дрофа», 2002, §§35.
2. Антонов В.Ф., Черныш А.М., Козлова Е.К., Коржув А.В. Физика и биофизика. Практикум. М., ГЭОТАР-Медиа, 2008, § 2.3.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ МАЛЫХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ МИКРОСКОПА

1. Научно-методическое обоснование темы:

Возможность разрешения деталей предмета зависит от размеров его изображения на сетчатке глаза или угла зрения. Однако, иногда невозможно увеличить угол зрения из-за некоторых технических ограничений. В связи с этим используются оптические приборы, в том числе микроскоп.

Микроскоп является одним из важнейших приборов в медицинских и биологических исследованиях. При этом микроскоп позволяет не только визуально изучать недоступные глазу объекты, но проводить некоторые измерения.

Микроскопические методы исследования - способы изучения различных объектов с помощью микроскопа. В биологии и медицине эти методы позволяют изучать строение микроскопических объектов, размеры которых лежат за пределами разрешающей способности глаза человека. Основу микроскопических методов исследования составляет световая и электронная микроскопия.

В практической и научной деятельности врачи различных специальностей — вирусологи, микробиологи, цитологи, морфологи, гематологи и др. помимо обычной световой микроскопии используют фазово-контрастную, интерференционную, люминесцентную, поляризационную, стереоскопическую, ультрафиолетовую, инфракрасную микроскопию. В основе этих методов лежат различные свойства света.

2. Теория:

Микроскоп - оптический прибор для получения сильно увеличенных изображений объектов, не видимых невооруженным глазом. Различные типы микроскопов предназначаются для рассматривания, изучения и измерения микроструктуры органических клеток, бактерий, срезов тканей, микрокристаллов, минералов, микросхем и других объектов, размеры которых меньше минимального разрешения глаза, равного 0,1мм. Микроскоп дает возможность различать структуры с расстоянием между элементами до 0,2 мкм. Обычно микроскоп имеет двухступенчатую систему увеличения, образованную двумя линзами (*объективом* и *окуляром*) и обеспечивающую увеличение до 1500 крат. В оптическую схему микроскопа входят также элементы, необходимые для освещения объекта.

Линзой называется прозрачное тело, ограниченное двумя криволинейными (обычно сферическими) поверхностями или одной криволинейной и одной плоской поверхностью.

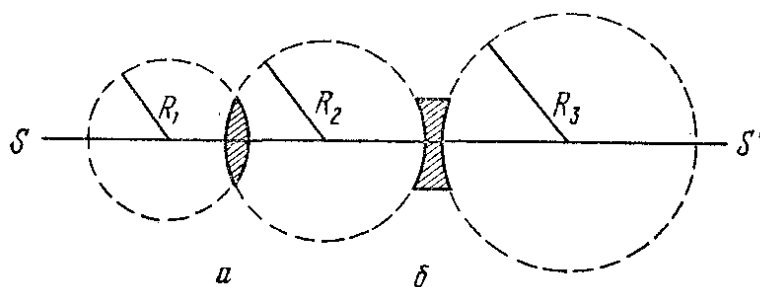


Рис.1

На рис. 1 изображены поперечные сечения двояковыпуклой (а) и двояковогнутой (б) сферических линз (R_1 , R_2 и R_3 — радиусы сфер). Прямая SS' , проходящая через центры кривизны поверхностей, образующих линзу, называется *главной оптической осью* (или просто осью) линзы.

Если толщина линзы O_1O_2 пренебрежимо мала по сравнению с радиусами кривизны линзы, то она называется *тонкой*.

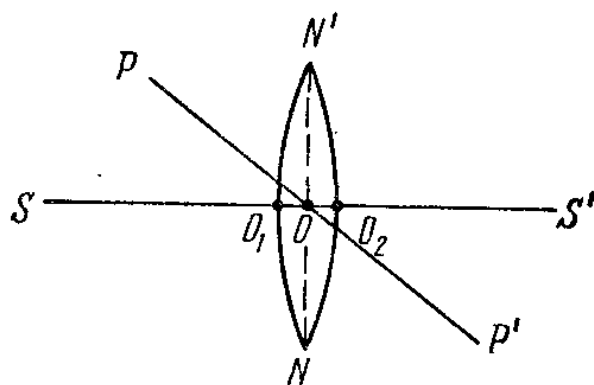


Рис.2

У тонкой линзы (рис.2) имеется точка O , обладающая тем свойством, что проходящие через нее лучи практически не преломляются линзой. Эту точку называют *оптическим центром линзы*: она лежит на пересечении главной оптической оси со средним сечением NN' линзы. Любая прямая PP' , проходящая под углом к главной оптической оси через оптический центр линзы, называется *побочной оптической осью*. Луч, идущий вдоль оптической оси (главной или побочной), носит название *центрального луча*.

Линзу можно представить как совокупность множества *призм* (рис. 3).

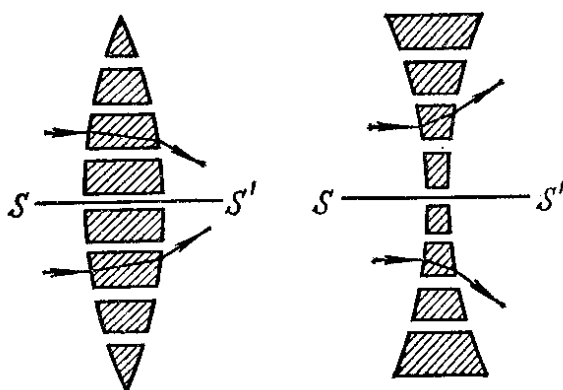


Рис.3

Тогда становится очевидным, что выпуклая линза отклоняет лучи к оптической оси, а вогнутая—от оптической оси. Поэтому выпуклая линза называется *собирающей*, а вогнутая — *рассеивающей*.

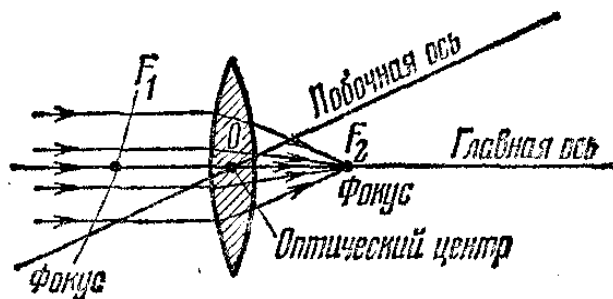


Рис.4

Лучи *параксиального* (приосевого) светового пучка, распространяющиеся параллельно главной оптической оси, пересекаются в точке, лежащей на этой оси и называемой *фокусом линзы (главным фокусом)*. У всякой линзы имеются два фокуса по обе стороны от нее (рис.4).

Плоскость MN , проведенная через фокус линзы перпендикулярно к главной оптической оси, называется *фокальной плоскостью* (рис.5). Лучи, падающие на линзу параллельно какой-либо побочной оптической оси, после преломления в линзе пересекаются в точке, лежащей на фокальной плоскости.

У линзы имеются две фокальные плоскости, расположенные по обе стороны от нее. Точки пересечения побочных оптических осей с фокальными плоскостями линзы называют *побочными фокусами* линзы (точка F' на рис.5).

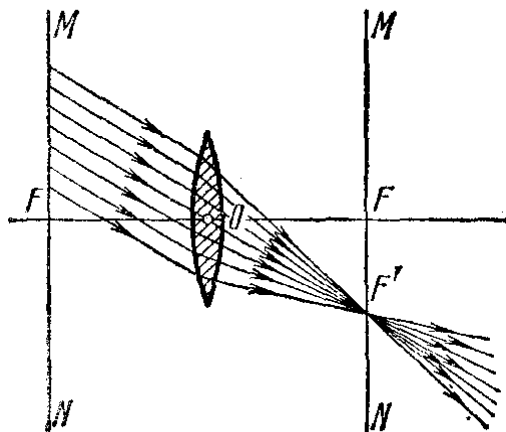


Рис.5

Расстояние $OF=f$ от оптического центра линзы до ее фокусов называется *фокусным расстоянием* линзы.

Изображение любой точки предмета в линзе находится в точке пересечения двух лучей (или их продолжений), вышедших из этой точки и прошедших через линзу. Обычно для построения изображения используют два из трех лучей:

- 1) Луч, проходящий без преломления через оптический центр линзы;
- 2) Луч, падающий параллельно главной оптической оси. После преломления в линзе этот луч (или его продолжение) проходит через задний (относительно предмета) главный фокус;
- 3) Луч (или его продолжение), который проходит через передний главный фокус и после преломления в линзе идет параллельно главной оптической оси.

Величина $D = 1/f$ называется *оптической силой* линзы. Она измеряется в *диоптриях* (дп). Диоптрия равна оптической силе линзы с фокусным расстоянием 1 м.

Оптическая сила собирающих линз (как и фокусное расстояние) считается положительной, а рассеивающих – отрицательной.

Построим ход лучей в простейшем микроскопе (рис.6). Предмет AB находится немного впереди от переднего фокуса объектива. Изображение $A'B'$ строится по обычным правилам построения изображения в собирающей линзе. Оно является промежуточным изображением, увеличенным, перевернутым, действительным и лежит за двойным фокусным расстоянием объектива.

Окуляр располагается так, чтобы изображение $A'B'$ находилось несколько ближе к линзе, чем ее передний фокус. Лучи, образующие точку B' промежуточного изображения, надо продолжить до пересечения с главной плоскостью окуляра в точках l и l' . Через оптический центр окуляра O' проводятся побочные оси, параллельные этим лучам до пересечения в точках m и n с фокальной плоскостью MN окуляра, которая совпадает с главной плоскостью глаза. Аналогично через оптический центр глаза O'' проводятся побочные оси, параллельные отрезкам lm и $l'n$ до пересечения с фокальной плоскостью глаза $\Phi_{гл.}$. Проведя лучи через эти точки и точки m и n , получим за фокальной плоскостью глаза точку B''' изображения на сетчатке глаза. Точка B''' мнимого изображения найдется как точка пересечения продолжения отрезков lm и $l'n$.

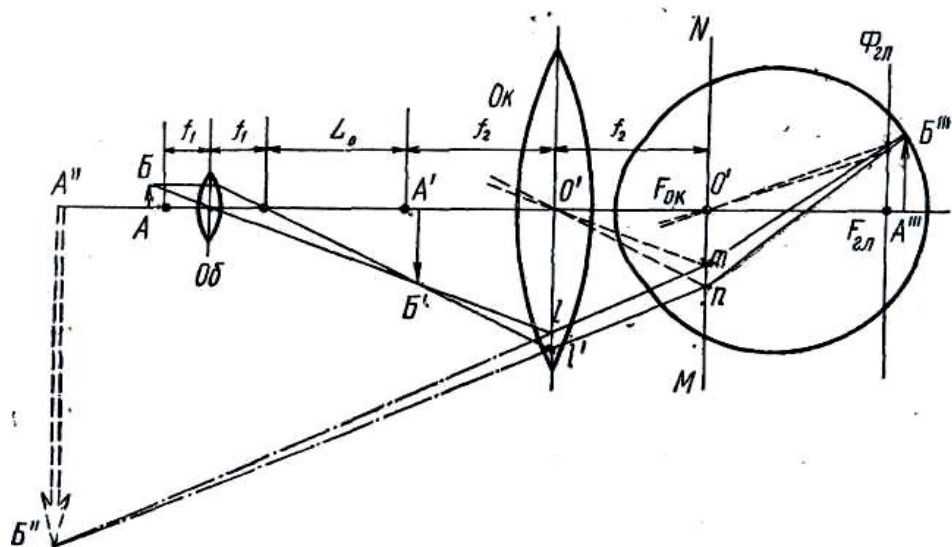


Рис.6

Таким образом, микроскоп дает увеличенное, перевернутое и мнимое изображение. Угловое увеличение γ оптического прибора определяется отношением угла зрения на предмет через оптический прибор к углу зрения на этот предмет невооруженного глаза:

$$\gamma = \frac{\beta_{\text{приб}}}{\beta_{\text{гл}}}, \quad (1)$$

Для микроскопа угловое увеличение численно равно произведению линейного увеличения объектива $\beta_{об}$ и углового увеличения окуляра:

$$\gamma_M = \beta_{об} \cdot \gamma_{ок}, \quad (2)$$

где $\beta_{об} = \frac{L_0}{f_{об}}$ - линейное увеличение объектива, L_0 – расстояние от заднего фокуса объектива до

переднего фокуса окуляра, т.е. *оптическая длина тубуса*; $\gamma_{ок} = \frac{L}{f_{ок}}$ - угловое увеличение

окуляра, L - расстояние наилучшего зрения, $f_{об}$ и $f_{ок}$ - фокусные расстояния объектива и окуляра.

Свойство оптического прибора давать раздельное изображение двух близко расположенных светящихся точек называется *разрешающей способностью* прибора, и характеризуется *пределом разрешения*, т.е. наименьшим расстоянием между этими точками. Чем меньше предел разрешения, тем выше разрешающая способность оптического прибора. Предел разрешения определяется формулой:

$$Z = \frac{\lambda}{2n \sin \theta} = \frac{\lambda}{2A}, \quad (3)$$

где λ - длина волны света в воздухе, n - показатель преломления среды между предметом и объективом (для воздуха $n=1$), θ - апертурный угол.

Необходимым элементом оптических систем, образующих изображение предметов, является *оптическая диафрагма*, которая представляет собой экран с отверстием. Оптическая диафрагма дает возможность регулировать световой поток (ширину пучка световых лучей) попадающий в оптическую систему. Отверстие диафрагмы располагается так, что ее центр совпадает с главной осью оптической системы, а плоскость отверстия перпендикулярна оси.

Апертурной диафрагмой называется диафрагма, ограничивающая световой поток независимо от места ее расположения в оптической системе (диафрагма может располагаться и перед входной линзой прибора, в нашем случае входной линзой является объектив).

Апертурная диафрагма D (рис.7, а) ограничивает ширину световых пучков, поступающих в систему от отдельных точек предмета, находящихся вне поля зрения NN и поэтому падающих на линзу под большим углом. Диафрагма способствует устранению aberrаций и повышает резкость изображения, хотя при этом ограничивается количество световых лучей, попадающих в оптическую систему, т.е. уменьшается яркость изображения.

Для определения границ поля зрения надо провести пунктирные линии AN . Угол θ , равный половине угла, под которым отверстие апертурной диафрагмы видно из точки O (точки пересечения главной оси системы с плоскостью предмета NN), называется *апертурным углом* оптической системы. Апертурный угол – это пространственный угол, ограничивающий конус световых лучей, попадающих в линзу. *Апертурным углом* называют также плоский угол при вершине этого конуса. В микроскопе предмет помещается почти у самого переднего фокуса объектива, а апертурный угол ограничивается оправой AA самой линзы (см. рис. 7 б).

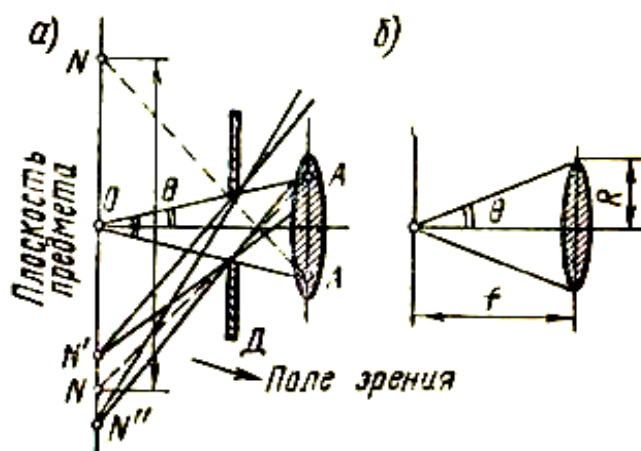


Рис.7

Величина $A = n \sin \theta$ называется *числовой (численной) апертурой*.

Увеличение микроскопа в пределах $500-1000A$ (A -числовая апертура) называется *полезным*, т.к. при нем глаз различает все элементы структуры объекта, разрешаемые микроскопом. Полезное увеличение γ_m микроскопа должно быть не меньше величины, определяемой соотношением пределов разрешения глаза Z_{gl} и микроскопа Z_M :

$$\gamma_m \geq \frac{Z_{gl}}{Z_M}, \quad (4)$$

Разрешающая способность микроскопа прямо пропорциональна апертуре объектива и для ее повышения пространство между объективом и предметом заполняется жидкостью с большим ($n > 1$) показателем преломления. Максимальный апертурный угол может быть порядка 70° , тогда для сухого объектива $A = \sin \theta \approx 0,94$.

Усовершенствованием микроскопа явилось применение иммерсионного объектива. В этом случае пространство между наблюдаемым предметом и входной линзой заполняется жидкостью (*иммерсией*) с показателем преломления, близким к стеклу. В иммерсионных системах по сравнению с сухими системами получают больший апертурный угол. В качестве иммерсии используют воду ($n=1,33$), кедровое масло ($n=1,55$) и др. Апертура объективов с масляной иммерсией может быть доведена до 1,4. При этом возможно разрешение структур с расстоянием между элементами 0,2 мкм. Дальнейшее повышение разрешающей способности микроскопа достигается уменьшением длины волны света, например путем применения ультрафиолетового излучения.

Наиболее распространенным примером оптической микроскопии является *метод темного поля*, который осуществляется путем применения особого конденсора. Конденсор темного поля состоит из нескольких линз особой формы, образующих наклонные пучки света. Падая на мелкие элементы объекта, свет рассеивается на них. Это делает объект видимым на общем темном поле зрения микроскопа.

Фазово - контрастный метод применяется для наблюдения малоконтрастных объектов. Он основан на использовании разности фаз, которая образуется при прохождении света через различные структуры исследуемого объекта. Для фазово-контрастной микроскопии применяют особые объективы, содержащие фазовую пластинку (при этом лучи получают дополнительную разность хода) и специальные конденсоры.

В медицинских и биологических исследованиях микроскопы часто используют для измерения размеров малых объектов. Для этой цели микроскоп снабжают специальным устройством — *окулярно-винтовым микрометром* (рис.10), который представляет собой насадку, надевающуюся на верхний конец тубуса микроскопа вместо окуляра. Оптическая часть микрометра состоит из линзы-окуляра, неподвижно закрепленной стеклянной шкалы и подвижной стеклянной пластинки, на которую нанесены перекрестье и два вертикальных штриха (биштрих) над ним, параллельные делениям шкалы. Стеклянная пластинка с перекрестьем перемещается вдоль шкалы микрометра с помощью микрометрического винта.



Рис.10

Окулярно-винтовой микрометр закрепляют на тубусе так, чтобы стеклянная шкала находилась в плоскости, в которой расположено действительное изображение предмета, создаваемое объективом микроскопа.

При этом изображение шкалы при рассматривании в окуляр совмещается с изображением предмета. Перемещая с помощью микровинта подвижную пластинку, можно совместить перекрестье сначала с одним краем рассматриваемого предмета, а затем с другим. При этом можно определить, какому числу делений шкалы микрометра соответствует данное изображение.

Перемещение пластинки с перекрестьем на одно деление шкалы микрометра соответствует одному полному обороту микрометрического винта. Барабан микрометрического винта разделен на 100 делений; следовательно, с помощью окулярно-винтового микрометра можно производить измерения предметов с точностью до 0,01 деления шкалы.

Полный отсчет по шкалам окулярного микрометра складывается из отсчета по неподвижной шкале и отсчета по барабану винта. Отсчет по неподвижной шкале в поле зрения определяется положением биштриха, т.е. числом делений шкалы, на которое переместится биштрих, считая от нулевого деления шкалы.

Отсчет по барабану микрометрического винта производится точно так же, как и на обычном микрометре, т.е. определяется деление шкалы барабана, которое находится против индекса, нанесенного на неподвижном цилиндре.

Для определения размеров предмета необходимо знать цену деления окулярно-винтового микрометра. Под ценой деления окулярно-винтового микрометра понимают выраженную в миллиметрах длину отрезка, рассматриваемого в микроскоп, изображение которого занимает одно деление шкалы микрометра.

Для определения цены деления окулярно-винтового микрометра применяют объектный микрометр — шкалу с известной ценой деления. Объектный микрометр рассматривают в микроскоп как предмет и, совмещая в поле зрения объектную и окулярную шкалы, определяют цену деления окулярного микрометра.

В лабораторной работе используется объект-микрометр с ценой деления 0,01 мм.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Внешний вид биологического микроскопа изображен на рис. 11, а схема его устройства представлена на рис.12. Оптическая система микроскопа делится на две части: осветительную и наблюдательную.



Рис.11

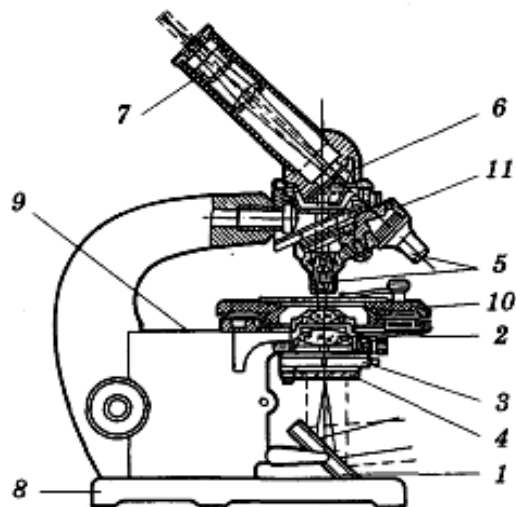


Рис.12

Осветительная часть состоит из подвижного зеркала 1, служащего для направления лучей от осветителя на рассматриваемый объект, конденсора 2, образующего на объекте сходящийся пучок света; съемного светофильтра 4 и укрепленной на конденсоре ирисовой апертурной диафрагмы 3 для регулировки освещенности объекта.

Наблюдательная часть состоит из объектива 5, окуляра 7 и призмы 6, которая служит для направления вертикальных лучей, прошедших объектив, в наклонный тубус.

Объектив представляет собой систему линз, собранных в единой оправе. Передняя линза служит для увеличения, остальные же предназначены для исправления недостатков изображения, создаваемых передней линзой. Окуляр микроскопа обычно состоит из двух линз: верхней — глазной и нижней — собирающей, необходимой для того, чтобы все лучи, прошедшие через объектив, попали в глазную линзу окуляра. Биологический микроскоп имеет три или четыре объектива, дающих различное увеличение, которые закреплены в револьвере 11 и три сменных окуляра.

Механическая система микроскопа состоит из массивного основания 8, тубусодержателя, коробки с микрометрическим механизмом 9 для перемещения тубуса и предметного столика 10, на котором укреплены пружины, прижимающие препарат к предметному столику.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Задание 1. Определение цены деления окулярно-винтового микрометра

1. Установите на предметный столик объект-микрометр (эталонную шкалу). Получите четкое изображение эталонной шкалы в окуляре микроскопа;
2. Добейтесь того, чтобы штрихи шкалы объект-микрометра были параллельны делениям шкалы окулярно-винтового микрометра;
3. Вращая барабан микровинта, совместите центр перекрестья окулярно-винтового микрометра с изображением одного из штрихов шкалы объект-микрометра;
4. Снимите показание n_1 окулярного микрометра;
5. Переместив перекрестье на N делений эталонной шкалы (под визуальным контролем), совместите его центр с изображением второго штриха шкалы объект-микрометра;
6. Снимите показание n_2 окулярно-винтового микрометра;
7. Определите цену деления окулярно-винтового микрометра по формуле

$$\delta = \frac{N \cdot 0,01}{n_2 - n_1} ;$$

8. Определение цены деления δ окулярно-винтового микрометра произведите не менее трех раз, перемещая перекрестье каждый раз на различное число N делений;
9. Найдите среднее значение $\bar{\delta}$ цены деления окулярно-винтового микрометра;
10. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 1.

Таблица 1

№	n_1	n_2	$n_2 - n_1$	δ , мм	$\bar{\delta}$, мм
1.					
2.					
3.					

Задание 2. Определение размеров эритроцитов крови

1. Положите на предметный столик микроскопа гистологический препарат крови и получите четкое изображение эритроцитов в окуляре микроскопа;
2. Совместите перекрестье окулярно-винтового микрометра с одним из краев эритроцита и снимите показание m_1 окулярного микрометра;
3. Совместите перекрестье с другим краем эритроцита и снимите показание m_2 ;
4. Определите размер l эритроцита по формуле
- 5.

$$l = (m_2 - m_1)\bar{\delta} .$$

6. Произведите измерение размеров для трех различных эритроцитов;
7. Заполните таблицу 2.

Таблица 2

№	m_1	m_2	$m_2 - m_1$	l , мм	Δl	$\frac{\bar{\Delta l}}{\bar{l}} \cdot 100\%$	$l_{\text{уст}} = \bar{l} \pm \bar{\Delta l}$
1.							
2.							
3.							

$$\bar{l} = \quad \bar{\Delta l} =$$

3. Цель деятельности студентов на занятии:

Студент должен знать:

1. Назначение и устройство микроскопа.
2. Ход лучей в простейшем микроскопе.
3. Понятие разрешающей способности микроскопа.
4. Понятие предела разрешения микроскопа.
5. Формулу для числовой апертуры микроскопа.

Студент должен уметь:

1. Самостоятельно настраивать микроскоп для работы с микрообъектами.
2. Строить ход лучей в микроскопе.
3. Определять линейные размеры микрообъектов с помощью микроскопа.

4. Содержание обучения:

1. Линзы. Виды линз. Построение изображения в тонкой линзе.
2. Оптическая система микроскопа. Ход лучей в микроскопе.
3. Разрешающая способность и предел разрешения микроскопа.
4. Увеличение микроскопа.
5. Иммерсионные системы.
6. Методы оптической микроскопии.
7. Апертурная диафрагма и апертурный угол.
8. Определение линейных размеров микрообъектов.

5. Перечень вопросов для проверки исходного уровня знаний:

1. Что называется оптическим центром, главным фокусом, фокальной плоскостью и фокусным расстоянием линзы?
2. Что называется побочной оптической осью линзы?
3. Постройте ход лучей в простейшей схеме микроскопа, объясните принцип построения.
4. Из каких основных элементов состоит микроскоп?
5. Запишите формулу для углового увеличения микроскопа.
6. Что называется разрешающей способностью микроскопа?
7. Запишите формулу числовой апертуры.
8. Что такое апертурная диафрагма?

6. Перечень вопросов для проверки конечного уровня знаний:

1. Чем ограничена разрешающая способность микроскопа, как можно ее улучшить? Запишите формулу предела разрешения микроскопа.
2. Как связаны предел разрешения и разрешающая способность микроскопа?
3. Что называется оптической длиной тубуса?
4. Запишите формулу для полезного увеличения микроскопа.
5. Что такое иммерсионная система?
6. Опишите специальные методы микроскопии – метод темного поля и фазово-контрастный метод.

7. Хронокарта учебного занятия:

1. Организационный момент – 10 мин.
2. Текущий контроль знаний – 40 мин.
3. Пояснение к выполнению работы – 10 мин.
4. Выполнение работы – 80 мин.
5. Проверка работы – 40 мин.

8. Перечень учебной литературы к занятию:

1. Ремизов А.Н., Максина А.Г., Потапенко А.Я., Медицинская и биологическая физика. М., «Дрофа», 2008, §§ 21.1-21.9.
2. Ремизов А.Н., Потапенко А.Я. Курс физики. М., «Дрофа», 2008, §§ 24.1-24.6.

МЕТОДОМ ПОЛЯРИМЕТРИИ

1. Научно-методическое обоснование темы:

Исследования видимого света важны не только в области физики, но и в физиологии, прежде всего при обследовании биологических объектов. Для живых организмов свет является совершенно необходимым жизненным фактором – его отсутствие или недостаток нарушает нормальную деятельность организма. Существенное влияние свет оказывает на человека. Во – первых, это действие света на орган зрения: светочувствительные элементы (палочки и колбочки) образуют аппараты сумеречного и цветового зрения. Кроме того, свет действует и на кожный покров. Видимое и инфракрасное излучения вызывают, в основном, поверхностное нагревание кожи. Ультрафиолетовое излучение вызывает фотохимическую реакцию в наружном слое кожи, ведущую к образованию меланина. Этот пигмент сильно поглощает ультрафиолетовые лучи, предохраняя организм от их чрезмерного воздействия.

Природа света двойственна. В одних оптических явлениях в большей степени проявляются корпускулярные свойства света, в других – волновые.

Поляризация света объясняется его волновыми свойствами. Метод, применяемый при качественном и количественном анализе веществ, называется *поляризацией* и используется, например, с целью диагностики рака, определения содержания сахара в моче. Для гистологических исследований используется поляризационный микроскоп.

2. Теория:

В электромагнитной волне вектор напряженности электрической составляющей поля $\vec{E}$ и вектор магнитной составляющей поля $\vec{H}$ могут совершать колебания в любых направлениях, лежащих в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны.

Если направления колебаний при этом беспорядочно меняются, но амплитуды их во всех направлениях одинаковы, то такая волна называется *естественной* (рис.1, а) .

Если колебания происходят в различных направлениях, но в определенных направлениях амплитуды колебаний больше, чем в других, то такая волна называется *частично поляризованной*. (рис.1, б)

Если колебания происходят только в одном постоянном направлении, то такая волна называется *линейно-поляризованной* или плоскополяризованной. (рис. 1, в) .

Плоскость, проходящая через электрический вектор волны $\vec{E}$ в направлении распространения электромагнитной волны, является *плоскостью поляризации*.

Плоскополяризованную волну излучает отдельный атом. В естественном свете, идущем от Солнца, накаливаемой нити лампы, пламени и т.п. складываются неупорядоченные излучения хаотически ориентированных атомов, поэтому направление $\vec{E}$ не выдерживается в одной плоскости.

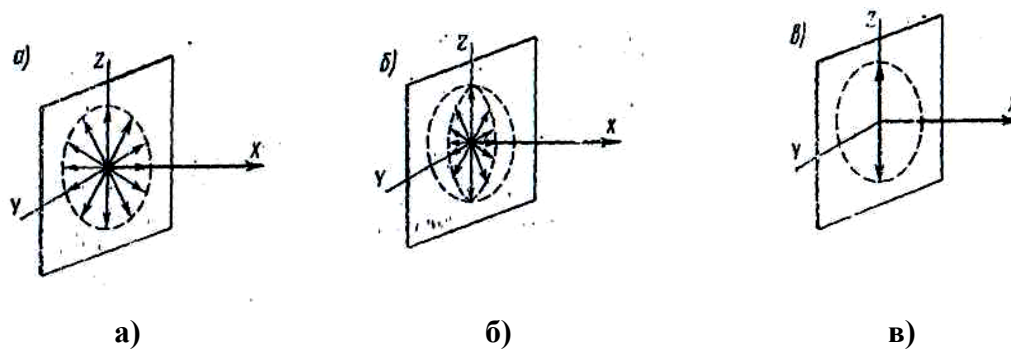


Рис.1

Если выбрать две взаимно перпендикулярные плоскости, проходящие через луч естественного света, и спроецировать векторы $\vec{E}$ на эти плоскости, то в среднем эти суммарные проекции будут одинаковыми. Поэтому луч естественного света удобно изображать в виде прямой, на которой расположено одинаковое число тех и других проекций в виде черточек и точек (рис.2, а). Таким образом, прямая с черточками (рис.2, б) или точками (рис.2, в) обозначает луч плоскополяризованного света.

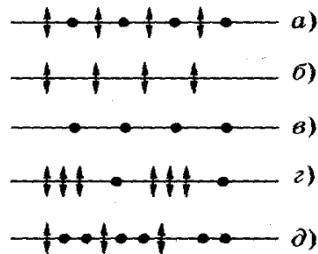


Рис.2

Луч частично поляризованного света условно показан на рис.2, г, д, причем соотношение числа стрелок и точек условно иллюстрирует степень поляризации.

Устройство, позволяющее получать поляризованный свет из естественного, называется **поляризатором**. Он пропускает только составляющую вектора $\vec{E}$ (и соответственно $\vec{H}$) на некоторую плоскость – *главную плоскость поляризатора*. При этом через поляризатор проходит поляризованный свет, интенсивность которого равна половине интенсивности падающего света. При вращении поляризатора относительно луча естественного света поворачивается плоскость колебаний вышедшего плоскополяризованного света, но интенсивность его не меняется. Поляризатор, который используется для анализа поляризованного света, называется **анализатором**.

Пусть на анализатор падает плоскополяризованная волна с амплитудой электрического вектора $\vec{E}_0$. Тогда анализатор пропустит составляющую, равную

$$E = E_0 \cdot \cos \varphi,$$

где φ - угол между главными плоскостями поляризатора P и анализатора A (рис.3) :

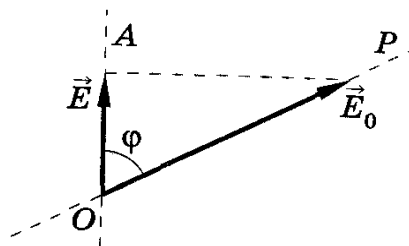


Рис.3

Так как интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды колебаний, имеем:

$$I = I_0 \cos^2 \varphi, \quad (1)$$

где I_0 - интенсивность плоскополяризованного света, падающего на анализатор; I - интенсивность света, вышедшего из анализатора.

Уравнение (1) выражает **закон Малюса**.

Из него видно, что в зависимости от взаимного расположения поляризатора и анализатора интенсивность вышедшего из анализатора света может изменяться от 0 до I_0 .

Некоторые прозрачные кристаллы обладают свойством *двойного лучепреломления*: при попадании света на кристалл луч раздваивается. Для одного из лучей выполняются законы преломления и он называется *обыкновенным*, для другого - не выполняются и этот луч называется *необыкновенным*.

При нормальном падении (90°) луча на поверхность кристалла будем иметь картину (рис.4).

В кристалле имеются направления, вдоль которых двойного лучепреломления нет, и скорости распространения обыкновенного и необыкновенного лучей совпадают. Эти направления называются *оптическими осями кристалла* (штриховая линия на рис.4). Если такое направление одно, то кристаллы называются *одноосными*. К ним относятся кварц, турмалин, исландский шпат и др.

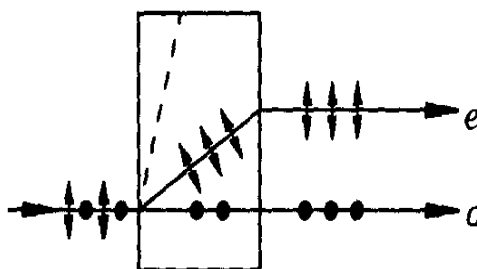


Рис.4

o – обыкновенный луч,
 e – необыкновенный луч.

Плоскость, проходящая через оптическую ось и падающий луч, является *главной*. Колебания обыкновенного луча перпендикулярны главной плоскости, а необыкновенного - лежат в главной плоскости, т. е. эти лучи поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях.

Двойное лучепреломление обусловлено особенностями распространения электромагнитных волн в анизотропных средах: амплитуды вынужденных колебаний электронов зависят от направления этих колебаний.

Двоякопреломляющие кристаллы используются для изготовления специальных поляризационных призм. Рассмотрим наиболее распространенную призму, предложенную Николем (*призма Николя*, или просто *николь*).

Николь представляет собой призму из исландского шпата, разрезанную по диагонали и склеенную канадским бальзамом K (рис.5). Для него $n=1,550$; это значение лежит между показателями преломления обыкновенного и необыкновенного лучей.

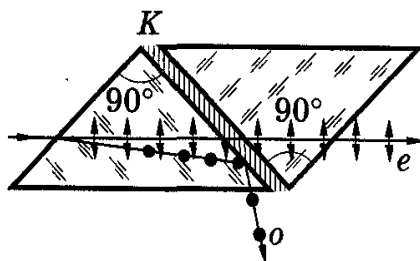


Рис.5

Подобрав соответствующим образом углы призмы, можно обеспечить полное внутреннее отражение обыкновенного луча (o) на границе с канадским бальзамом. Отраженный луч в этом

случае поглощается зачерненной нижней гранью (или выводится из кристалла). Необыкновенный луч (e) выходит из николя параллельно нижней грани.

Вращение плоскости поляризации впервые было обнаружено на пластинках кварца. Это явление заключается в повороте плоскости поляризации плоскополяризованного света при прохождении через вещество. Вещества, обладающие таким свойством, называют *оптически активными*.

Пусть пучок монохроматического света падает от источника S на систему поляризатор P - анализатор A , которые поставлены так, что их главные плоскости взаимно перпендикулярны (рис. 6).

В этом случае свет до наблюдателя не дойдет, т.к. в соответствии с законом Малюса анализатор не пропускает плоскополяризованный свет ($\varphi = 90^\circ$).

Если между поляризатором и анализатором поместить кварцевую пластинку так, чтобы свет проходил вдоль ее оптической оси, то в общем случае свет дойдет до наблюдателя. Если же анализатор повернуть на некоторый угол, то можно вновь добиться затемнения. Это говорит о том, что кварцевая пластинка вызвала поворот плоскости поляризации на угол, соответствующий повороту анализатора для получения затемнения.

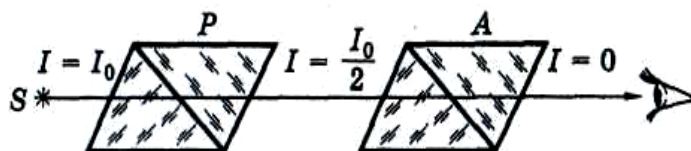


Рис. 6

Используя в опыте свет различных длин волн, можно обнаружить *вращательную дисперсию*, т.е. зависимость угла поворота от длины волны.

По **закону Био** угол вращения приблизительно обратно пропорционален квадрату длины волны λ света:

$$\alpha \approx \frac{a}{\lambda^2}, \quad (2)$$

где a - постоянная, зависящая от природы вещества.

Для определенной длины волны угол α поворота плоскости поляризации пропорционален расстоянию l , пройденному светом в оптически активном веществе:

$$\alpha = \alpha_0 l, \quad (3)$$

где α_0 - *постоянная вращения*, (град/мм)

Существуют две модификации кварца, каждая из которых поворачивает плоскость поляризации в определенном направлении: по часовой стрелке - *правовращающий* (положительный) кварц, против часовой стрелки - *левовращающий* (отрицательный) кварц. Постоянная вращения в обоих случаях одинакова.

Оптически активными являются также многие некристаллические тела: жидкости (скипидар), растворы оптически активных веществ в неактивных растворителях (раствор сахара в воде), некоторые газы и пары.

Для растворов установлен закон:

$$\alpha = [\alpha_0] Cl, \quad (4)$$

где C - концентрация оптически активного вещества, l - толщина слоя раствора; $[\alpha_0]$ - удельное вращение, которое зависит от температуры и свойств растворителя.

Соотношение (4) лежит в основе метода измерения концентрации оптически активных веществ в растворах. Этот метод, называемый *поляризацией* или *сахариметрией* используют в медицине для определения концентрации сахара в моче, в биофизических исследованиях, в пищевой промышленности. Соответствующие измерительные приборы называют *поляриметрами* или *сахариметрами*.

Поляриметр позволяет измерять не только концентрацию, но и удельное вращение. Используя различные светофильтры, можно обнаружить зависимость удельного вращение от длины волны (дисперсию оптической активности).

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В лабораторной работе используется поляриметр СМ-3 (рис.7):



Рис.7. Поляриметр круговой СМ-3

На рис.8 приводится оптическая схема поляриметра СМ-3, предназначенного для измерения угла вращения плоскости поляризации оптически активными прозрачными растворами. В состав поляриметра входит источник света (И), светофильтр (СФ), пропускающий свет с длиной волны 589 нм, поляризатор (П), кювета (К) с исследуемым веществом, анализатор (А) с отсчетным устройством, окуляр (О).

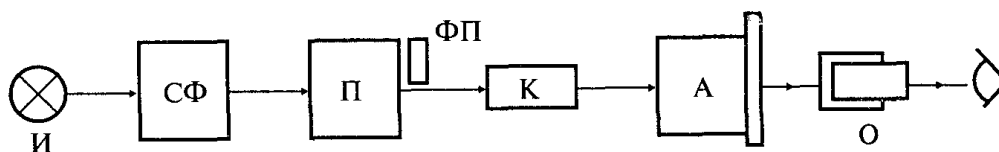


Рис.8

Половину пучка поляризованного света перекрывает фазовая пластинка (ФП). Она необходима для обеспечения полутеневого отсчета, который существенно повышает точность измерений (рис.9).

Принцип полутеневого отсчета используется в связи с тем, что глаз человека с очень большой точностью сравнивает яркости двух соседних полей зрения, и с гораздо меньшей точностью позволяет оценить абсолютную яркость одного поля зрения. Представим себе, что нужно найти угол, при котором поляризатор и анализатор скрещены, то есть анализатор повернут относительно поляризатора на 90° . При изменении угла поворота анализатора φ от 0 до π в соответствии с законом Малюса (1) интенсивность прошедшего света меняется по

закону: $I = I_0 \cos^2 \varphi$, (кривая 1). Следовательно, надо искать на этой кривой минимум, в районе которого интенсивность меняется очень слабо даже при большом изменении угла.

Пропустим половину пучка света, кроме поляризатора, еще через фазовую пластинку, тогда интенсивность будет изменяться по такому же закону, но со сдвигом фазы (кривая 2). Сведем яркости обоих полей зрения вместе так, как это сделано в поляриметре, то есть в виде двух половин одного круга. При вращении анализатора на угол φ от 0 до π яркости полуокружностей совпадают два раза: при угле поворота анализатора $\varphi = \varphi_A$, когда яркости максимальны, и при угле $\varphi = \varphi_B$ — когда они минимальны. Для правильной настройки используют второй случай с минимальными значениями яркости. Видно, что если угол вращения меньше угла с правильной настройкой $\varphi_c < \varphi_B$, или, наоборот, больше ($\varphi_c > \varphi_B$), яркости соседних полей резко меняются в противоположном направлении. Это облегчает правильную настройку-поиск угла вращения φ_B .

Конструкция поляриметра схематично представлена на рис. 10.

В корпусе прибора (1) расположены источник света, светофильтр, поляризатор, фазовая пластинка. К нему крепится кюветное отделение (2) с поворачивающейся крышкой (3), через окуляр (4) наблюдается изображение полутеневого отсчета (рис. 9). Ручкой 5 поворачивают анализатор. Через линзы отсчетного устройства (6) рассматриваются шкалы (7) отсчетного устройства.

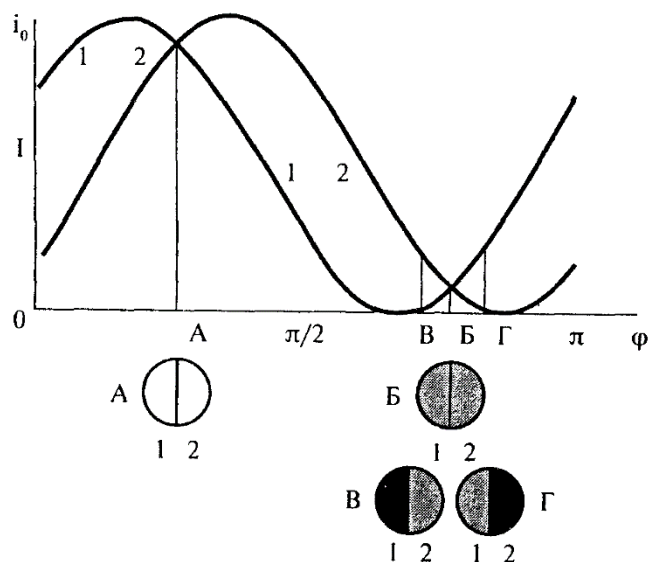


Рис.9. Принцип полутеневого отсчета. Кривые — зависимости интенсивности света, прошедшего через поляризатор (кривая 1) и поляризатор + фазовая пластинка (кривая 2) при изменении угла поворота анализатора от 0 до π . В кружочках — изображения яркости полей зрения при разных углах поворота анализатора: А) $\varphi = \varphi_A$ — неправильная настройка на максимальную яркость; Б) $\varphi = \varphi_B$ — правильная настройка на минимальную яркость; В) и Г) — расстройки: $\varphi_B < \varphi_B$ — угол вращения меньше угла с минимальной яркостью φ_B ; $\varphi_B > \varphi_B$ — угол вращения больше угла с минимальной яркостью φ_B . Белый цвет — большая яркость, черный — малая.

Две шкалы отсчетного устройства используются для облегчения измерений растворов лево- и правовращающих веществ. Для правовращающих веществ (веществ с положительным удельным вращением $[\alpha_0]$) используется левая шкала, при этом углы вращения составляют 0—35°. Для левовращающих веществ (веществ с отрицательным удельным вращением $[\alpha_0]$) также используется левая шкала, при этом углы вращения составляют 360—325° — величина угла вращения равна отсчету по левой шкале минус 360°. В отсчетном устройстве используется нониус.

Нониус — это устройство, состоящее из двух расположенных рядом шкал и служащее для повышения точности отсчета. На рис. 10 показана схема отсчета по правой шкале — для левой

отсчет производится аналогично. Первой шкалой является круговой лимб (8) (на рисунке показана его часть), второй шкалой является шкала нониуса (9). Отсчет показаний анализатора производится следующим образом. Сначала находят число минимального количества градусов (с точностью до $0,5^\circ$), на которое указывает нуль нониуса — на рис. 10 — $2,5^\circ$.

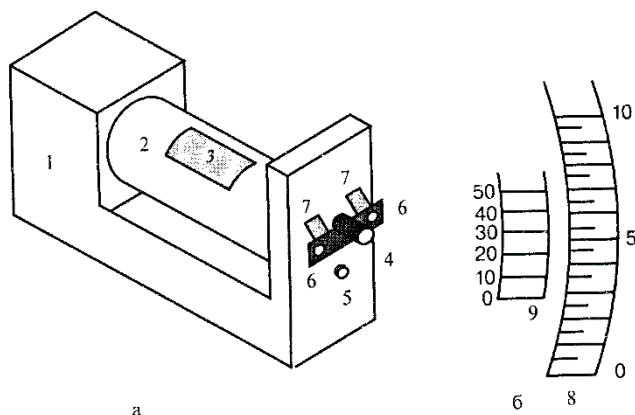


Рис.10. а — оптическая схема поляриметра СМ-3: 1 — корпус, 2 — кюветное отделение, 3 — крышка кюветного отделения, 4 — окуляр, 5 — вращающаяся рукоятка анализатора 6 — линзы отсчетного устройства, 7 — шкалы отсчетного устройства; б — схема нониуса: 8 — лимб, 9 — шкала нониуса.

Затем к этому значению прибавляют десятые и сотые доли градуса, соответствующие тому штриху нониуса, который точнее всего совпадает с каким-либо штрихом лимба, (вся шкала нониуса составляет $0,50^\circ$). Например, на рис.10б таким делением на шкале нониуса является 20, то есть $0,20^\circ$. Таким образом, на рисунке положение анализатора характеризуется углом $\varphi = 2,5^\circ + 0,20^\circ$.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Задание 1. Определение удельного вращения сахара

1. Включите поляриметр в сеть. Выключателем «сеть», расположенным на задней стенке прибора, включите прибор. Через 5 мин прибор готов к работе;
2. Вращением втулки на окуляре (4) установите окуляр так, чтобы видеть резкое изображение линии раздела правой и левой части поля сравнения;
3. Вращением рукоятки (5) добейтесь одинаковой яркости обоих полей зрения при наименьшей их освещенности;
4. Снимите соответствующий отсчет вращения φ_0 без образца. Поверните немного анализатор и повторите измерения по пункту 3. Всего проделайте три измерения: φ_{01} , φ_{02} , φ_{03} и найдите среднее значение угла вращения без образца $\overline{\varphi_0}$;
5. Откройте крышку (3) кюветного отделения (2) и поместите в него кювету с раствором сахара известной концентрации c_1 ;
6. Проделайте действия, записанные в пунктах 2—4, и по результатам трех измерений угла вращения φ_1 , φ_2 , φ_3 найдите среднее значение $\overline{\varphi}$ этой величины;
7. Определите угол вращения плоскости поляризации:

$$\alpha = \overline{\varphi} - \overline{\varphi_0} ;$$

8. Определите удельное вращение раствора сахара:

$$[\alpha_0] = \frac{\alpha}{lc_1}$$

9. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 1.

Таблица 1

Вещество	c , кг/м ³	φ_1	φ_2	φ_3	$\bar{\varphi}$	α , град	$[\alpha_0]$, град·м ² /кг
сахар							

Задание 2. Определение концентрации раствора сахара

1. Поместите в поляриметр кювету с раствором сахара неизвестной концентрации и, повторив операции пунктов 6 - 7 задания 1, определите угол вращения плоскости поляризации для этого раствора;

2. Вычислите концентрацию c_x неизвестного раствора сахара:

$$c_x = \frac{\alpha_x}{[\alpha_0]l};$$

3. Данные измерений и вычислений занесите в таблицу 2.

Таблица 2

φ_1	φ_2	φ_3	$\bar{\varphi}$	α , град	$[\alpha_0]$, град·м ² /кг	c , кг/м ³

4. Рассчитайте относительную погрешность измерения концентрации:

$$\frac{\Delta c}{c} = \frac{\Delta \alpha}{\alpha} + \frac{\Delta l}{l},$$

где Δc , $\Delta \alpha$, $\Delta l = 0,01$ дм – абсолютные ошибки измерений концентрации, угла вращения плоскости поляризации и длины кюветы соответственно.

Абсолютная погрешность для угла $\Delta \alpha$ находится по формуле:

$$\Delta \alpha = t_{p,n} \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \left[(\varphi_{0i} - \bar{\varphi}_0)^2 + (\varphi_i - \bar{\varphi})^2 \right]},$$

где $t_{p,n}$ - коэффициент Стьюдента. Для числа измерений каждого из величин $n = 3$ и доверительной вероятности $p = 0,95$ величина $t_{p,n} = 4,3$.

Задание 3. Решите задачи:

1. Раствор сахара, налитый в трубку длиной 20 см, поворачивает плоскость поляризации света ($\lambda = 0,5 \text{ мкм}$) на 30° . Найдите концентрацию сахара в растворе, если удельное вращение сахара для этой длины волны $6,67 \text{ град} \cdot \text{см}^2/\text{г}$.
2. Раствор глюкозы с концентрацией $0,1 \text{ г/см}^3$, налитый в стеклянную трубку, поворачивает плоскость поляризации на 20 град. Определите концентрацию другого раствора глюкозы, который поворачивает в такой же трубке плоскость поляризации на 15 град.
3. Определите угол поворота плоскости колебаний светового луча для мочи больного диабетом при концентрации сахара $0,05 \text{ г/см}^3$. Длина трубки 20 см, удельное вращение сахара для используемого света $6,67 \text{ град} \cdot \text{см}^2/\text{г}$.
4. Интенсивность естественного света, прошедшего через поляризатор и анализатор, уменьшилась в 4 раза. Пренебрегая поглощением света, определите угол ϕ между главными плоскостями поляризатора и анализатора.
5. Главные плоскости двух призм Николя, поставленных на пути луча, образуют между собой угол $\phi_1 = 60^\circ$. Как изменится интенсивность света, прошедшего через эти призмы, если угол между их плоскостями поляризации станет равным $\phi_2 = 30^\circ$?
6. Анализатор в 4 раза уменьшает интенсивность света, прошедшего через него от поляризатора. Пренебрегая потерями света, определите угол ϕ между главными плоскостями поляризатора и анализатора.
7. 200 мл раствора содержат 10 г глюкозы и 10 г фруктозы. Каков угол вращения плоскости поляризации в кювете длиной 20 см?
8. Рассчитайте концентрацию глюкозы в растворе, если при длине кюветы 20 см угол вращения плоскости поляризации составляет $5,28 \text{ град}$ (воспользоваться таблицей).

3. Цель деятельности студентов на занятии:

Студент должен знать:

1. Физическую природу явления поляризации света.
2. Законы Малюса, Био.
3. Физические основы поляриметрии.
4. Методы исследования микроструктур в поляризованном свете.

Студент должен уметь:

1. Объяснять (с иллюстрациями):
 - а) закон Малюса.
 - б) явление вращения плоскости поляризации.
 - в) поляризацию света при двойном лучепреломлении,
2. Определять удельное вращение и концентрацию оптически активных веществ с помощью поляриметра.
3. Решать ситуационные задачи.

4. Содержание обучения:

1. Поляризация света. Линейно и частично поляризованный свет.
2. Способы получения поляризованного света.
3. Закон Малюса.
4. Двойное лучепреломление в кристаллах. Призма Николя.
5. Вращение плоскости поляризации. Поляриметрия.
6. Определение удельного вращения оптически активных веществ.
7. Определение концентрации оптически активных веществ.
8. Решение ситуационных задач.

5. Перечень вопросов для проверки исходного уровня знаний:

1. В чем отличие поляризованного света от естественного?

2. Опишите способы получения поляризованного света. Что представляют собой поляризатор и анализатор?
3. В чем заключается явление двойного лучепреломления в кристаллах? Чем оно обусловлено?
4. Какие вещества называются оптически активными?
5. Для каких целей используется в медицине, биологии и фармации поляризованный свет?

6. Перечень вопросов для проверки конечного уровня знаний:

1. Сформулируйте и объясните закон Малюса.
2. Как устроена призма Николя?
3. Объясните механизм явления вращения плоскости поляризации. Сформулируйте закон Био, запишите формулу угла поворота плоскости поляризации для определенной длины волны.
4. Для каких целей используется поляризационный микроскоп?
5. Запишите формулу, лежащую в основе метода поляриметрии (сахариметрии). Где используют этот метод?
6. Опишите назначение и оптическую схему поляриметра.

7. Самостоятельная работа студентов:

По учебнику Ремизова А.Н. и др. (§ 20.5) изучите методы исследования биологических тканей в поляризованном свете.

8. Хронокарта учебного занятия:

1. Организационный момент – 5 мин.
2. Текущий контроль знаний – 30 мин.
3. Пояснения к выполнению работы – 10 мин.
4. Выполнение и оформление работы – 70 мин.
5. Проверка работы и задание на дом – 20 мин.

9. Перечень учебной литературы к занятию:

1. Ремизов А.Н. Максина А.Г., Потапенко А.Я. Медицинская и биологическая физика. М., «Дрофа», 2008, §§ 20.1-20.5. 24.1, 24.2.
2. Ремизов А.Н., Потапенко А.Я. Курс физики. М., «Дрофа», 2008, §§ 23.1. – 23.3., 25.2., 25.3.
3. Антонов В.Ф., Черныш А.М., Козлова Е.К., Коржув А.В. Физика и биофизика. Практикум. М., «ГЭОТАР-Медиа», 2008, § 2.5.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРА МЕТОДОМ КОЛОРИМЕТРИИ

1. Научно-методическое обоснование темы:

Свойство атомов и молекул поглощать свет определенных длин волн, характерных для данного вещества, широко используется в медицине и фармации для качественных и количественных исследований.

Измерение спектров поглощения позволяет судить о концентрации различных химических веществ.

Для измерения концентрации веществ по спектрам поглощения их растворов используют прибор фотоэлектроколориметр.

Природа света двойственна. В одних оптических явлениях в большей степени проявляются корпускулярные свойства света, в других – волновые.

Поглощением света обусловлены в конечном счете все виды воздействия света на вещество, в том числе и его физиологические воздействия.

2. Теория:

Поглощением света называется ослабление интенсивности световой волны при прохождении через вещество вследствие превращения световой энергии в другие виды энергии.

Если падающая на поверхность среды световая волна имеет интенсивность I_0 , то интенсивность волны, прошедшей слой среды толщиной d равна

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha d}, \quad (1)$$

где α – натуральный показатель поглощения, характеризующий поглощательную способность вещества. Его величина обратна расстоянию, на котором интенсивность света ослабляется в результате поглощения в среде в e раз. Натуральный показатель поглощения зависит от природы и состояния вещества, а также от частоты (длины волны) света. Формула (1) выражает **закон поглощения света Бугера**.

График зависимости интенсивности света от толщины слоя среды имеет вид (рис.1):

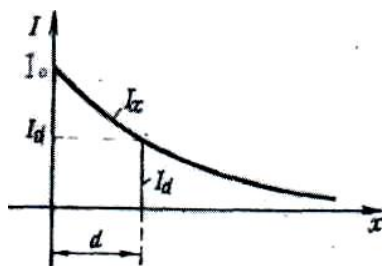


Рис.1

Показатель поглощения достаточно высок у *металлов* ($\alpha = 10^3 - 10^4 \text{ см}^{-1}$). Это объясняется наличием в металлах свободных электронов, вынужденные колебания которых легко возбуждаются и имеют значительную амплитуду. Падающая на поверхность металла световая волна быстро расходует свою энергию и поэтому проникает на малую глубину. У *диэлектриков* показатель поглощения невелик ($\alpha = 10^{-3} - 10^{-5} \text{ см}^{-1}$), но у них наблюдается селективное поглощение света в определенных интервалах длин волн, в которых показатель поглощения резко возрастает.

Это связано с тем, что в диэлектриках нет свободных электронов и значительное поглощение света происходит только при резонансных колебаниях, т.е. при частотах световой волны, близких к собственным (или кратным им) частотам колебаний электронов диэлектрика.

Примерный характер зависимости показателя поглощения от длины волны λ показан на рис. 2.

Рассмотрим слой толщины l , в котором в концентрации C находится вещество, поглощающее свет. В этом случае, согласно закону Бугера-Ламберта-Бера, интенсивность I света, прошедшего через слой, и интенсивность I_0 падающего на него, связаны соотношением:

$$I = I_0 e^{-kCl}, \quad (2)$$

где $e=2,72$ — основание натуральных логарифмов, k — коэффициент пропорциональности, характерный для данного вещества и для данной длины волны.

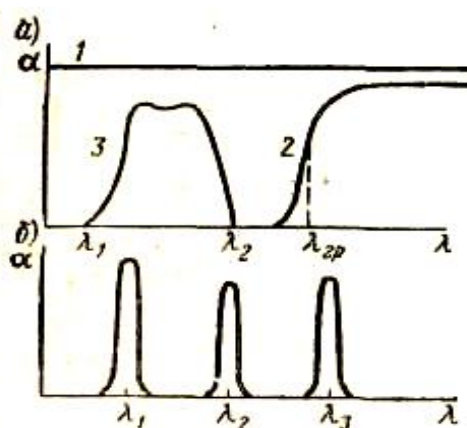


Рис.2. а- 1- график для тел, равномерно поглощающих свет любой длины волны (черные и серые тела), 2 - для тел, поглощающих свет любых длин волн, начиная с некоторой граничной λ_{zp} , 3 - для тел, имеющих широкую полосу поглощения в пределах длин волн от λ_1 до λ_2 ; б - график для тел с селективным (резонансным) поглощением при определенных длинах волн $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$.

Закон Бугера-Ламберта-Бера лежит в основе концентрационной колориметрии: фотометрических методов определения концентрации вещества в окрашенных растворах.

Для практических приложений закон (2) записывается в виде

$$I = I_0 10^{-\varepsilon_\lambda Cl}, \quad (3)$$

где величина ε_λ — молярный коэффициент поглощения на длине волны λ . Показатель степени в формуле (3), взятый с обратным знаком, называют оптической плотностью:

$$D = \varepsilon_\lambda Cl, \quad (4)$$

Как видно из формул (2) и (3), измерив отношение интенсивностей падающего и прошедшего света и зная величину ε_λ , можно определить концентрацию C вещества.

На практике измеряют две физические величины: оптическую плотность D и коэффициент пропускания τ . Коэффициент пропускания τ — это отношение интенсивности света, прошедшего через образец, к интенсивности падающего света:

$$\tau = I/I_0, \quad (5)$$

Значения τ могут изменяться от 0 (весь свет поглощается) до 1 (весь свет проходит). Обычно их выражают в процентах.

Как видно из формулы (4), оптическая плотность D — это десятичный логарифм отношения интенсивности падающего и прошедшего света. Она связана с коэффициентом пропускания следующим образом:

$$D = -\lg(I/I_0) = \lg(1/\tau), \quad (6)$$

Как видно из формулы (6), когда коэффициент пропускания τ падает от 100% до 0%, оптическая плотность D соответственно растет от 0 до ∞ . Используются следующие единицы измерений: τ и D — безразмерные величины; концентрация поглощающего вещества $[C]$ — моль/л; $[l]$ — см; $[\epsilon_\lambda]$ — л/моль · см.

Спектр поглощения — это зависимость молярного коэффициента поглощения ϵ_λ от длины волны λ . Спектры поглощения можно измерять различными приборами. В видимом диапазоне (380—760 нм) спектр поглощения определяет цвет вещества, поэтому прибор измерения спектров называется колориметром (от лат. *color* — цвет). Современные колориметры позволяют производить измерения в более широком спектральном диапазоне от ультрафиолета до ближнего инфракрасного (315–980 нм).

Спектры поглощения веществ определяются разностью энергий между энергетическими уровнями молекул вещества и вероятностями перехода между ними. При этом разность энергий определяет длину волны, на которой происходит поглощение света, а вероятность перехода — показатель поглощения вещества. Для веществ в растворе характерны широкие полосы поглощения, которые обусловлены электронными, колебательными и вращательными уровнями.

Примеры применения фотоэлектроколориметра в биологии, медицине и фармации:

1. Измерение концентрации окрашенных веществ (например, некоторых витаминов и лекарств) в растворе;
2. Определение pH среды по цвету добавленных в раствор pH -индикаторов;
3. Оценка скорости роста микроорганизмов по увеличению оптической плотности культуральной жидкости вследствие рассеяния света на микроорганизмах;
4. Определение активности ферментов по интенсивности окрашивания раствора после добавления соответствующих химических реагентов, дающих окрашенные реакции с продуктами ферментативной реакции (например, оценка активности АТФ-аз по скорости образования неорганического фосфата).

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В лабораторной работе используется фотоэлектроколориметр КФК-3КМ (рис.3).



Рис.3. Фотоэлектроколориметр КФК – 3КМ.

Фотоэлектроколориметр КФК-ЗКМ предназначен для измерения коэффициента пропускания и оптической плотности растворов и определения концентрации жидких проб различного назначения.

Область применения фотоэлектроколориметра - химические, биологические, оптические, экоаналитические лаборатории промышленных предприятий и научно-исследовательских институтов, лаборатории контроля качества воды, почв, пищевых продуктов и т.п..

Фотоэлектроколориметр КФК-ЗКМ представляет собой стационарный настольный лабораторный прибор, состоящий из оптико-механического и электронного узлов, смонтированных в корпусе.

Фотоэлектроколориметр КФК-ЗКМ построен по однолучевой схеме. В приборе используется монохроматор с дифракционной решеткой. В качестве источника излучения используется галогенная лампа, а в качестве приемника - фотодиод. Вывод результатов измерений осуществляется на жидкокристаллический дисплей. Спектральный диапазон – от 325 до 1000 нм.

Термин «фотоэлектроколориметр» означает, что это прибор для измерения цвета («колориметр»), в котором оптическое излучение («фото») преобразуется в электрический сигнал («электро»). Фотоэлектроколориметр состоит из следующих основных блоков (рис.4): источника света (И), монохроматора (светофильтров) (СФ), двух кювет – кюветы сравнения К1, заполненной растворителем, и кюветы для исследуемого раствора К2, полупрозрачного зеркала (3), расщепляющего прошедший пучок света на два фотоэлемента (Ф1) и (Ф2).

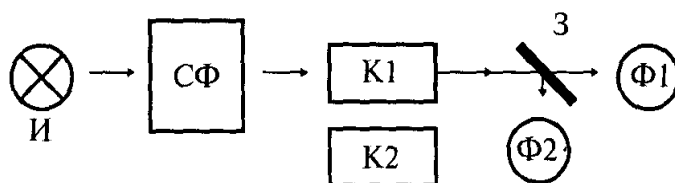


Рис.4. Принципиальная оптическая схема фотоэлектроколориметра.

Источник света создает излучение в широком диапазоне длин волн, а светофильтр выделяет из него нужный участок спектра. Далее этот свет проходит либо через кювету (К2), в которую помещают исследуемый раствор, либо через кювету сравнения (К1), в которой находится растворитель. Пучок света, прошедший через кювету, расщепляется полупрозрачным зеркалом (3) на два пучка, интенсивности которых регистрируются фотоприемниками (Ф1) и (Ф2), используемыми для измерений в разных участках спектра.

Фотоэлектроколориметр состоит из следующих основных частей (см. рис. 5):

- галогенная лампа как источник света;
- монохроматор для выделения спектрального диапазона требуемых длин волн;
- кюветное отделение, служащее для размещения проб и калибровочных растворов;
- детектор для регистрации света и преобразования его в электрический сигнал;
- электроника, обеспечивающая проведение измерений и управление работой прибора;
- ЖК-дисплей для отображения меню рабочих режимов, результатов измерений и вспомогательной информации;
- панель управления.

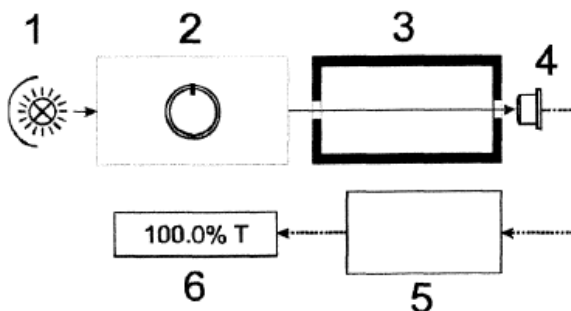


Рис 5. Функциональная схема фотоэлектроколорметра; 1 - источник света; 2 - монохроматор; 3 - кюветное отделение; 4 - детектор; 5- электронная схема; 6 - дисплей.

Принцип работы фотоэлектроколориметра основан на сравнении светового потока Φ_0 , прошедшего через растворитель или раствор сравнения (холостой раствор), по отношению к которому производится измерение, и светового потока Φ , прошедшего через исследуемый раствор.

Световые потоки Φ_0 и Φ преобразуются фотоприемником в электрические сигналы U_0 , U . Также измеряется U_T - сигнал от неосвещенного приемника. По величинам этих сигналов микропроцессором фотоэлектроколориметра рассчитывается и отображается на дисплее результат измерения в единицах коэффициента пропускания, оптической плотности или концентрации в зависимости от выбранного режима измерения.

Коэффициент пропускания τ (в фотоэлектроколориметре вместо символа τ используется символ $T\%$), исследуемого раствора определяется как отношение потоков или сигналов по формулам:

$$\tau = \frac{\Phi}{\Phi_0} \cdot 100\% = \frac{U - U_T}{U_0 - U_T} \cdot 100\%, \quad (7)$$

Оптическая плотность исследуемого раствора рассчитывается по формуле:

$$D = \lg(1/\tau) = -\lg\left(\frac{U - U_T}{U_0 - U_T}\right), \quad (8)$$

Измерение концентрации исследуемого раствора на колориметре возможно при соблюдении закона Бугера-Ламберта-Бера, т.е. при линейной зависимости оптической плотности D_i исследуемого раствора от концентрации C_i .

Концентрация исследуемого раствора рассчитывается ЭВМ по формулам:

$$D_i = c + bC_i, \quad (9)$$

$$C_i = \frac{D_i - c}{b}, \quad (10)$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Задание 1. Исследование зависимости оптической плотности раствора от длины волны

1. Включите фотоэлектроколориметр с помощью сетевого выключателя, расположенного на задней панели прибора.

На дисплее начинает отображаться ход процедуры самотестирования (рис.6):

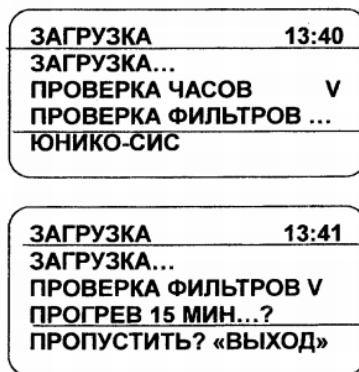


Рис.6. Процедура самотестирования КФК-ЗКМ.

После окончания прогрева на дисплее появится предложение калибровки системы (рис.7):

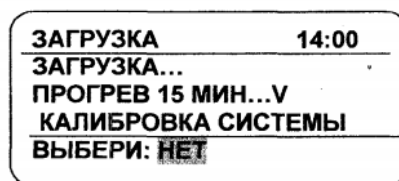


Рис. 7. Предложение откалибровать систему при запуске прибора.

2. Нажмите [ВВОД]. Прибор перейдёт в режим Главного меню (рис.8), где отображается перечень режимов работы прибора.

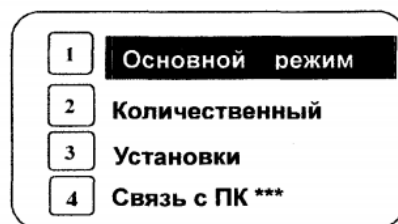


Рис.8. Главное меню.

3. Нажмите кнопку [Ввод]. Прибор произведёт обнуление (рис.9) и на дисплее отобразится рабочее окно Основного режима (рис.10):

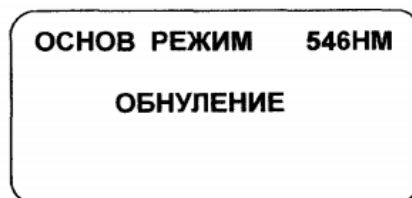


Рис.9. Переход в рабочее окно Основного режима.

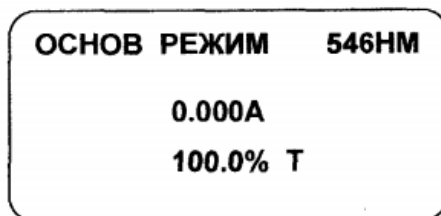


Рис.10. Рабочее окно основного режима.

- В правом верхнем углу дисплея отображается текущее значение длины волны.
4. Наполните кювету исследуемым раствором и оботрите ее салфеткой снаружи;
 5. Установите кювету с рабочим раствором в кюветодержатель;
 6. Закройте крышку кюветного отделения;
 7. Установите необходимую длину волны. Для этого нажмите кнопку [УСТ λ]. В нижней части дисплея появится строка :
[ВВЕДИТЕ λ]: 546

Введите с цифровой клавиатуры прибора нужное значение длины волны.

При неверном наборе нажимайте кнопку [ОТМЕНА].

Подтвердите введенное значение нажатием кнопки [ВВОД].

Прибор автоматически установит новое значение длины волны и произведёт обнуление (рис.11, пример- переход на 600нм).

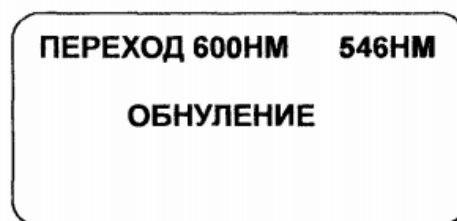


Рис.11. Переход к установленной длине волны.

Внимание: при смене длины волны прибор автоматически производит обнуление по раствору (воздуху), находящемуся на пути светового луча!

Не оставляйте в кюветном отделении на пути светового луча кюветы с рабочими растворами от предыдущих измерений!

8. Снимите показание оптической плотности D исследуемого раствора при длине волны λ_1 ;
9. Проведите измерения пп. 7 — 8 при других длинах волн;
10. Данные измерений и вычислений занесите в таблицу 1;

Таблица 1

Длина волны, λ , нм	325	400	480	580	670	750	830	920	1000
D , отн.ед.									

11. Постройте график зависимости $D = f(\lambda)$.

Задание 2. Исследование зависимости оптической плотности от концентрации раствора

1. Установите длину волны, при которой оптическая плотность исследуемого вещества имеет наибольшее значение (см. задание 1);
2. Проведите измерение оптической плотности растворов различной концентрации аналогично п. 4) — 8) задания 1;
3. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 2;
4. Постройте график зависимости $D = f(c)$.

Таблица 2

$C, \%$			
$D, \text{отн.ед.}$			

Задание 3. Определение неизвестной концентрации раствора

1. Поместите на пути светового пучка кювету с исследуемым раствором неизвестной концентрации c_x ;
2. Определите оптическую плотность D_x данного раствора;
3. Определите по графику задания 2 концентрацию этого раствора;
4. Определите графическую погрешность Δc_x измерения концентрации.

Задание 4. Решите задачи:

1. Монохроматический свет падает нормально поочередно на две пластинки, изготовленные из одного и того же материала, одна толщиной $d_1=4$ мм, другая – $d_2=8,5$ мм. Определите коэффициент поглощения α этого материала, если первая пластинка пропускает 0,7 светового потока, а вторая – 0,52.
2. Коэффициент поглощения графита для монохроматического света определенной длины равен 700 см^{-1} . Определите толщину слоя графита, вызывающего ослабление света в 100 раз.
3. При прохождении в некотором веществе пути l интенсивность света I_0 уменьшается в 2 раза. Во сколько раз уменьшится I_0 при прохождении пути $3l$.
4. При прохождении света через слой раствора поглощается $1/3$ первоначальной световой энергии. Определите коэффициент пропускания и оптическую плотность раствора.
5. Коэффициент пропускания раствора равен 0,3. Чему равна его оптическая плотность?

3. Цель деятельности студентов на занятии:**Студент должен знать:**

1. Физическую природу поглощения света.
2. Законы поглощения света.
3. Устройство, принцип работы и применение фотоэлектроколориметра в лабораторных исследованиях.

Студент должен уметь:

1. Графически интерпретировать зависимость показателя поглощения от длины волны света для различных тел.
2. Определять с помощью фотоэлектроколориметра оптическую плотность и концентрацию вещества в растворе.
3. Решать ситуационные задачи.

4. Содержание обучения:

1. Поглощение света. Закон Бугера. Закон Бугера – Ламберта-Бера.
2. Концентрационная колориметрия.
3. Фотоэлектроколориметр; его использование в лабораторных исследованиях.
4. Определение длины волны максимума поглощения вещества.
5. Определение концентрации вещества в растворе.
6. Решение ситуационных задач.

5. Перечень вопросов для проверки исходного уровня знаний:

1. Запишите формулу закона Бугера.
2. Сохраняет ли энергия при поглощении света свою электромагнитную природу?

3. Что называется оптической плотностью и коэффициентом пропускания раствора? Опишите метод концентрационной колориметрии.
4. Приведите примеры применения фотоэлектроколориметра в биологии, медицине и фармации.
5. Что называется спектром поглощения?

6. Перечень вопросов для проверки конечного уровня знаний:

1. Выведите формулу закона Бугера.
2. Запишите формулу закона Бугера-Ламберта-Бера в системе натуральных и десятичных логарифмов.
3. От чего зависит коэффициент (показатель) поглощения?
4. Опишите принципиальную оптическую схему, блок-схему, назначение, принцип работы и применение фотоколориметра в лабораторных исследованиях.
5. Чем определяются спектры поглощения веществ?
6. Охарактеризуйте виды оптических спектров.

7. Самостоятельная работа студентов:

По учебнику Ремизова А.Н. и др. (§§ 24.3, 24.4) изучите оптические атомные и молекулярные спектры.

8. Хронокарта учебного занятия:

1. Организационный момент – 5 мин.
2. Текущий контроль знаний – 30 мин.
3. Пояснения к выполнению работы – 10 мин.
4. Выполнение и оформление работы – 70 мин.
5. Проверка работы и задание на дом – 20 мин.

9. Перечень учебной литературы к занятию:

1. Ремизов А.Н. Максина А.Г., Потапенко А.Я. Медицинская и биологическая физика. М., «Дрофа», 2008, §§ 24.1, 24.3, 24.4.
2. Ремизов А.Н., Потапенко А.Я. Курс физики. М., «Дрофа», 2008, §25.2.
3. Физика и биофизика. (под ред. Антонова В.Ф.). М., «ГЭОТАР-Медиа», 2008, §§ 8.1, 8.2.
4. Антонов В.Ф., Черныш А.М., Козлова Е.К., Коржуев А.В. Физика и биофизика. Практикум. М., «ГЭОТАР-Медиа», 2008, § 2.6.

УСТРОЙСТВО И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕКТРОФОТОМЕТРА

1. Научно-методическое обоснование темы:

Свойство атомов и молекул излучать и поглощать свет определенных длин волн широко используется в фармации и медицине для качественных и количественных исследований. Измерение спектров поглощения позволяет судить о концентрации различных химических веществ. Для атомного спектрального анализа используют как спектры испускания (эмиссионный спектральный анализ), так и спектры поглощения (абсорбционный атомный спектральный анализ). Эмиссионный анализ часто служит для количественного определения микроэлементов в различных образцах. Анализ спектров поглощения молекул дает информацию как о структуре молекул, так и о свойствах среды, окружающей молекулы.

Для регистрации спектров поглощения используются приборы – спектрофотометры.

2. Теория:

Спектры испускания и поглощения света (электромагнитных волн) свободными или слабо связанными атомами называются **атомными спектрами**.

Атомные спектры являются *линейчатыми* – т.е., они состоят из отдельных спектральных линий. Каждая спектральная линия характеризуется определенной частотой колебаний ν испускаемого или поглощаемого кванта света и соответствует определенному квантовому переходу между уровнями E_i и E_k согласно соотношению:

$$h\nu = E_i - E_k, \quad (1)$$

Еще в начале 19 века были открыты дискретные линии в спектрах излучения атома водорода в видимой области – *линейчатый спектр*.

Отметим, что число электронов в атоме ограничено, они заполняют только часть возможных электронных энергетических уровней с минимальной энергией. Поэтому верхние уровни остаются свободными. Такое состояние атома с возможной минимальной энергией называется **основным**.

Если же атом получает энергию (либо поглощает квант света $h\nu$, либо соударяется с другими частицами), то произойдет переход электрона на более высокий уровень, который при этом станет возбужденным (с избыточной энергией).

Поглощение кванта возможно при условии, если его энергия равна разности энергий какого-либо свободного электронного уровня E_i и заполненного уровня E_k : $h\nu = E_i - E_k$, $i > k$. Эта формула выражает закон сохранения энергии.

Возбужденные атомы стремятся перейти в состояние с наименьшей энергией. Поэтому происходят **спонтанные квантовые переходы** $E_i \rightarrow E_k$. Такие переходы могут быть безызлучательными (энергия передается окружающим атомам при столкновениях, вызывая нагрев тела) или излучательными с испусканием квантов света, энергия которых выражается формулой (1). Спонтанное излучение является случайным событием и носит вероятностный характер. Обычные источники света испускают в основном спонтанное излучение.

Особо выделяется другой вид излучения, который называется **вынужденным** или **индуцированным**. Оно возникает при взаимодействии кванта с возбужденным атомом. На принципе вынужденного излучения работают лазеры.

Для атомного спектрального анализа используют как спектры испускания (**эмиссионный** спектральный анализ), так и спектры поглощения (**абсорбционный** спектральный анализ).

Эмиссионный анализ используют для количественного определения микроэлементов в веществе, небольшого количества атомов металлов в продуктах и т. д.

Молекулярные спектры — это спектры испускания или поглощения, а также комбинационного рассеяния света, принадлежащее свободным или слабо связанным между собой молекулам. Молекулярные спектры имеют сложную структуру. Типичные молекулярные спектры — полосатые, в виде совокупности более или менее узких полос в УФ, видимой и близкой ИК — областях.

Сложность молекулярных спектров связана с тем, что молекула совершает три вида движения: *поступательное, колебательное, вращательное*. Кроме того, конкретная структура молекулярных спектров различна и усложняется с увеличением числа атомов в молекуле. Для весьма сложных молекул видимые и УФ — спектры состоят из немногих широких сплошных полос.

Для каждого вида молекулы молекулярный спектр индивидуален.

Электронно — колебательно — вращательные спектры изучаются экспериментально при помощи спектрографов и спектрометров со стеклянной (в видимой области) и кварцевой (для УФ — области) оптикой, в которых для разложения света в спектр применяются призмы и дифракционные решетки.

Молекулярные спектры применяются в спектральном анализе для определения состава и концентрации вещества.

Рассмотрим слой толщины l , в котором в концентрации C находится вещество, поглощающее свет. В этом случае, согласно закону Бугера-Ламберта-Бера, интенсивность I света, прошедшего через слой, и интенсивность I_0 падающего на него, связаны соотношением:

$$I = I_0 e^{-kCl}, \quad (2)$$

где $e \approx 2,72$ — основание натуральных логарифмов, k — коэффициент пропорциональности, характерный для данного вещества и для данной длины волны.

Для практических приложений закон (2) записывается в виде

$$I = I_0 10^{-\varepsilon_\lambda Cl}, \quad (3)$$

где величина ε_λ — молярный коэффициент поглощения на длине волны λ . Показатель степени в формуле (3), взятый с обратным знаком, называют оптической плотностью:

$$D = \varepsilon_\lambda Cl, \quad (4)$$

Как видно из формул (2) и (3), измерив отношение интенсивностей падающего и прошедшего света и зная величину ε_λ , можно определить концентрацию C вещества.

На практике измеряют две физические величины: оптическую плотность D и коэффициент пропускания τ . Коэффициент пропускания τ — это отношение интенсивности света, прошедшего через образец, к интенсивности падающего света:

$$\tau = I/I_0, \quad (5)$$

Значения τ могут изменяться от 0 (весь свет поглощается) до 1 (весь свет проходит). Обычно их выражают в процентах.

Как видно из формулы (4), оптическая плотность D — это десятичный логарифм отношения интенсивности падающего и прошедшего света. Она связана с коэффициентом пропускания следующим образом:

$$D = -\lg(I/I_0) = \lg(1/\tau) \quad (6)$$

Как видно из формулы (6), когда коэффициент пропускания τ падает от 100% до 0%, оптическая плотность D соответственно растет от 0 до ∞ . Используются следующие единицы измерений: τ и D — безразмерные величины; концентрация поглощающего вещества $[C]$ — моль/л; $[l]$ — см; $[\epsilon_\lambda]$ — л/моль · см.

Спектры поглощения веществ определяются разностью энергий между энергетическими уровнями молекул, составляющих вещество, а также вероятностями перехода между ними. Разность энергий определяет длину волны, на которой происходит поглощение света, вероятность перехода — коэффициент поглощения вещества. Для биологически важных молекул характерны широкие полосы поглощения, обусловленные электронными, колебательными и вращательными уровнями

Метод изучения веществ по их способности поглощать свет называется **абсорбционной спектрофотометрией**. Спектр поглощения — это зависимость молярного коэффициента поглощения ϵ_λ от длины волны λ . Прибор для измерения спектров называется спектрофотометром.

Молекулярные группы, поглощающие свет, называют **хромофорами**.

Стандартный диапазон измерений в абсорбционной спектрофотометрии — 180–1100 нм. Он включает три области спектра:

- 1) ближнюю УФ-область — 180–380 нм;
- 2) видимую — 380–760 нм;
- 3) ближнюю ИК-область — 760–1100 нм.

Нуклеиновые кислоты поглощают только в УФ области (180—220 и 240—280 нм). Их хромофорами являются, в основном, пуриновые и пиримидиновые основания.

Белки имеют три типа хромофорных групп: собственно пептидные группы, боковые группы аминокислотных остатков и простетические группы. Первые две поглощают в УФ-области и не поглощают в видимой области. Пептидные группы $-\text{CO}-\text{NH}-$ поглощают в районе 190 нм. Боковые группы трех ароматических кислот — триптофана, тирозина и фенилаланина — также поглощают на этих длинах волн, причем значительно сильнее, чем пептидные группы. Кроме того, они имеют полосу поглощения в диапазоне 260—280 нм.

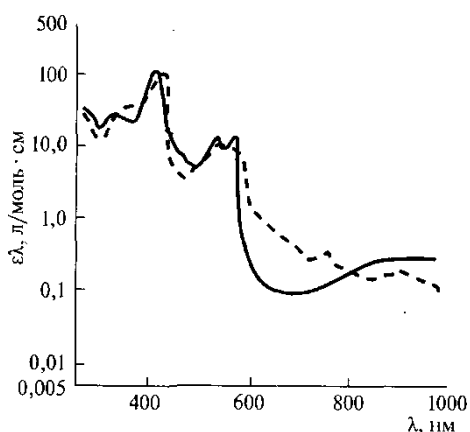


Рис.1. Спектры поглощения гемоглобина, связавшего кислород (оксигемоглобин) – сплошная линия и свободного гемоглобина (деоксигемоглобин) – пунктирная линия.

Протетические группы (гем в гемоглобине и др. хромофоры) поглощают в УФ и в видимой области. Именно они придают белку цвет (например, красный цвет гемоглобину). Спектр поглощения гемоглобина (рис. 1) имеет характерные максимумы в видимой области (400 нм и 525—580 нм), а также в ближней ИК-области (900 нм). Спектры поглощения гемоглобина, связавшего кислород (оксигемоглобин) и свободного гемоглобина (деоксигемоглобин) отличаются. Поэтому с помощью спектров поглощения можно измерить содержание кислорода в крови человека.

Приведем примеры использования спектрофотометрии в биологии, медицине и фармации:

1. Измерение концентрации белков и нуклеиновых кислот.
2. Оценка кровоснабжения тканей на основе измерений степени оксигенации гемоглобина.
3. Измерение pH среды с помощью красителей, изменяющих спектр поглощения с изменением pH.
4. Определение концентрации различных лекарственных средств, имеющих характерные спектры поглощения (рутин, берберин).
5. Отслеживание динамики размножения микроорганизмов по изменению оптической плотности среды, в которой они находятся.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В лабораторной работе используется спектрофотометр СФ-46 (рис.2).



Рис.2. Спектрофотометр СФ-46.

В основу работы спектрофотометра СФ-46 положен принцип измерения отношения двух световых потоков: потока, прошедшего через исследуемый образец, и потока, падающего на исследуемый образец (или прошедшего через контрольный образец). среды, в которой они находятся.

Спектрофотометр состоит из следующих основных блоков (рис.3): источника света (И), монохроматора (М), измерительной кюветы (K1) и кюветы сравнения (K2), фотоприемника (Ф) и регистратора (индикатора) (Р).

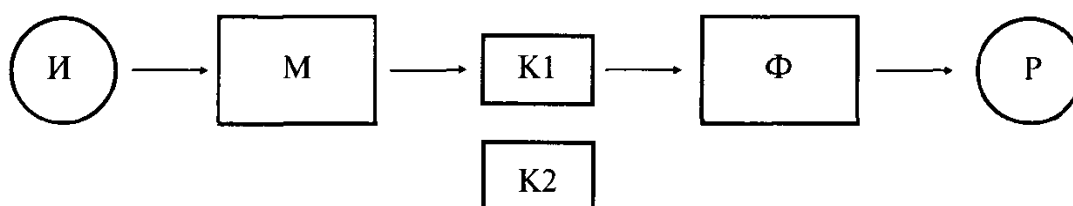


Рис.3. Принципиальная схема спектрофотометра.

Источник (И) испускает свет, монохроматор (М) выделяет из него нужный участок спектра. Этот свет далее проходит либо через измерительную кювету (К1), в которую помещают исследуемый раствор, либо через кювету сравнения (К2), заполненную растворителем (в этом случае кювету К2 помещают вместо кюветы К1). Свет, прошедший через кювету, регистрируют фотоприемником (Ф), и его интенсивность либо записывают каким-либо регистратором, либо отображают на индикаторе. Две кюветы используют для того, чтобы исключить паразитные эффекты, связанные с поглощением света в растворителе и его отражениями от стенок кюветы.

Конструктивно спектрофотометр СФ-46 включает следующие блоки (рис. 4):

- монохроматор (МХ) с указателем длин волн (УДВ) и измерительным прибором (ИП);
- осветитель (Осв) с источником излучения;
- кюветное отделение (К);
- камеру с фотоэлементами (ФЭ) и электронной схемой;

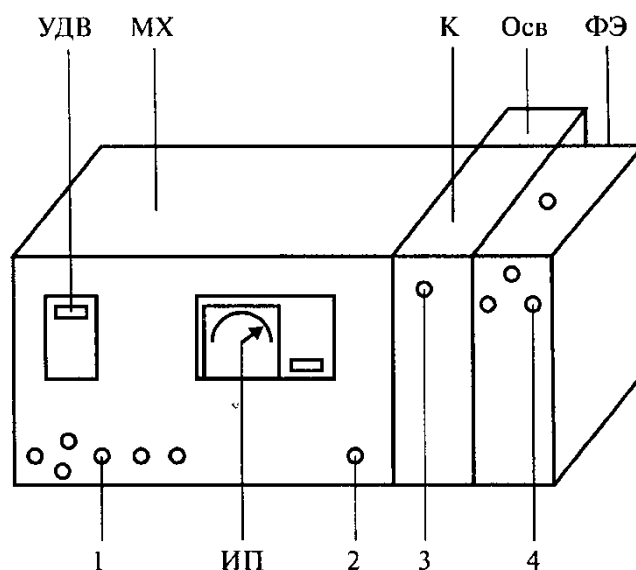


Рис.4. Конструкция спектрофотометра. Обозначения: рукоятка установки длин волн (вращения призмы) — 1; рукоятка раскрытия щели от 0,01 до 2 мм — 2; рукоятка перемещения каретки с образцами — 3; рукоятка «нуль» установки нулевого значения на ИП при закрытой шторке ФЭ — 4.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Задание 1. Ознакомление с порядком включения прибора, границами видимого спектра, соответствием цвета и длины волны.

1. Подключите прибор к сети 220 В.
2. Рукоятку переключения источников света, находящуюся на задней стенке осветительного блока, переведите в крайнее правое положение «Н», соответствующее лампе накаливания.
3. Переведите рукоятку шторки фотоэлементов в положение «закр».
4. Включите тумблер «сеть», после чего загорятся сигнальная лампа «сеть» и сигнальная лампа «Н».
5. Дайте прибору прогреться 10 мин.
6. В процессе прогрева прибора измерьте диапазон длин волн, видимых глазом человека, по излучению, выходящему из монохроматора в кюветное отделение, для чего:
 - а) Откройте кюветное отделение и поместите в него около выхода светового пучка из монохроматора лист белой бумаги.

Внимание: перед открыванием крышки кюветного отделения убедитесь в том, что рукоятка шторки, перекрывающей фотоэлементы, находится в положении «закрывается».

- б) Откройте максимально щель (рукоятка 2). Вращая рукоятку поворота призмы (1) в сторону увеличения длин волн, установить на указателе длин волн значение 350 нм.
- в) Поворачивая медленно рукоятку 1 в сторону увеличения длин волн, зафиксируйте момент, когда появится фиолетовое пятно на бумаге, запишите соответствующее значение длины волны с указателя длин волн.
- г) Увеличивая далее длину волны, отметьте длины волн, соответствующие голубому, зеленому, оранжевому и красному излучению.
- д) При дальнейшем вращении зафиксируйте момент, когда изображение пятна пропадет — это граница инфракрасного диапазона.
- е) Составьте таблицу длин волн, соответствующих границам восприятия глаза человека, а также указанным выше цветам.

Задание 2. Проведение метрологической проверки спектрофотометра с использованием стандартных светофильтров

1. Из комплекта спектрофотометра СФ-46 укрепите в держателе светофильтры КУ-1, НС8-1 и НС8-4 и поместите их на каретку в кюветное отделение.

Замечание. Фильтр КУ-1 пропускает излучение от ультрафиолетового до инфракрасного. Фильтры из стекла НС8 пропускают излучение от видимого до инфракрасного, однако толщина фильтра НС8-1 составляет 1 мм, а фильтра НС8-4 — 4 мм, поэтому последний пропускает меньше.

2. Установите переключатель источников света в положение «Н», переключатель фотоэлементов в положение «К», шторку фотоэлементов в положение «закрывается».

3. Включите тумблер «сеть».

4. Рукояткой 1 установите длину волны 600 нм. В соответствии с конструкцией прибора требуемое значение длины волны устанавливается при вращении рукоятки 1 в сторону увеличения длин волн. Если требуемое значение длин волн пройдено, то необходимо вернуться на несколько делений назад и снова подвести указатель к требуемому делению со стороны меньших длин волн.

5. Рукояткой 4 «нуль» установить значение 0% на ИП.

Внимание! Рукоятка 4 «нуль» — потенциометр с двойной регулировкой (грубой и тонкой), им следует пользоваться с осторожностью, не прилагая усилий.

6. Рукояткой перемещения каретки 3 в световой поток введите свободное от светофильтра окно держателя, служащее контролем.

7. Откройте шторку.

8. Меняя ширину щели рукояткой 2, установите стрелку измерительного прибора на значение 100%.

9. Перемещая каретку с фильтрами рукояткой 3 и фиксируя ее последовательно с положениях 2, 3, 4, введите в световой поток последовательно светофильтры КУ-1, НС8-1 и НС8-4.

10. Измерьте для каждого светофильтра три раза значения коэффициента пропускания и занесите в таблицу 1.

Таблица 1

Светофильтр		Коэффициент пропускания, %	
		X=600 нм	X=640 нм
КУ-1	Эталон	93,7	94,3
	Измерения		

НС8-1	Эталон	46,4	46,5
	Измерения		
НС8-4	Эталон	7,6	7,9
	Измерения		

11. Закройте шторку.

12. Сравните полученные значения коэффициента пропускания τ с эталонными и оцените точностные характеристики спектрофотометра.

Задание 3. Измерение спектра поглощения красителя эозина в видимой части спектра и ароматической аминокислоты в ультрафиолетовой области

1. По описанной выше методике измерьте спектр поглощения эозина на в видимой части спектра (450—650 нм) с шагом 20 нм.

2. Результаты занесите в таблицу 2.

Таблица 2

Номер измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
λ , нм											
τ , %											
D, отн.ед.											

3. Постройте в лабораторной тетради спектр поглощения эозина в координатах: оптическая плотность D (отн. ед.) — длина волны λ (нм).

4. По описанной выше методике измерьте спектр поглощения ароматической аминокислоты в ультрафиолетовой области спектра (240—310 нм) с шагом 10 нм. Для этого установите переключатель источников света в положение «Д», переключатель фотоэлементов в положение «Ф».

5. Результаты занесите в таблицу 3.

Таблица 3

Номер измерения	1	2	3	4	5	6	7	8
λ , нм								
τ , %								
D, отн.ед.								

6. Постройте в лабораторной тетради спектр поглощения ароматической кислоты в координатах: оптическая плотность D (отн. ед.) — длина волны λ (нм).

7. Проведите анализ исследуемого вещества, то есть определите ароматическую аминокислоту (качественный анализ) и ее концентрацию (количественный анализ), используя спектральные свойства ароматических кислот.

8. Результаты занесите в таблицу 4.

Таблица 4

Аминокислоты	Молярный коэффициент поглощения ϵ_λ , РР л/моль·см	λ максимум, нм
Фенилаланин	180	257
Тирозин	1380	275
Триптофан	5600	279,5

Замечание. При определении молярной концентрации C вещества по формуле (4), используя измеренную величину оптической плотности D , учесть, что толщина кюветы составляет 1 см.

Задание 4. Решите задачи:

1. Монохроматический свет падает нормально поочередно на две пластинки, изготовленные из одного и того же материала, одна толщиной $d_1=4$ мм, другая – $d_2=8,5$ мм. Определите коэффициент поглощения α этого материала, если первая пластинка пропускает 0,7 светового потока, а вторая – 0,52.
2. Коэффициент поглощения графита для монохроматического света определенной длины равен 700 см^{-1} . Определите толщину слоя графита, вызывающего ослабление света в 100 раз.
3. При прохождении в некотором веществе пути l интенсивность света I_0 уменьшается в 2 раза. Во сколько раз уменьшится I_0 при прохождении пути $3l$.
4. Имеется кювета толщиной 1 см с раствором окрашенного вещества молярной концентрации 10^{-4} моль/л. Чему равны оптическая плотность и коэффициент пропускания раствора? Как изменятся эти величины, если вслед за первой кюветой расположить вторую с раствором того же вещества в концентрации $5 \cdot 10^{-5}$ моль/л, если $\epsilon' = 10^4 \text{ л/(моль} \cdot \text{см)}$?
5. При прохождении света через слой раствора поглощается $1/3$ первоначальной световой энергии. Определите коэффициент пропускания и оптическую плотность раствора.
6. Коэффициент пропускания раствора равен 0,3. Чему равна его оптическая плотность?

3. Цель деятельности студентов на занятии:

Студент должен знать:

1. Физическую природу поглощения света.
2. Законы поглощения света.
3. Устройство, принцип работы и применение спектрофотометра в лабораторных исследованиях.

Студент должен уметь:

1. Графически интерпретировать зависимость показателя поглощения от длины волны света для различных тел.
2. Проводить качественный и количественный анализ физиологически активных веществ методом абсорбционной спектрофотометрии.
3. Решать ситуационные задачи.

4. Содержание обучения:

1. Поглощение света. Закон Бугера. Закон Бугера – Ламберта-Бера.
2. Спектрофотометр; его использование в лабораторных исследованиях.
3. Метрологическая проверка спектрофотометра.
4. Измерение спектра поглощения красителя эозина и ароматической аминокислоты.

5.Решение ситуационных задач.

5. Перечень вопросов для проверки исходного уровня знаний:

1. Запишите формулу закона Бугера.
2. Сохраняет ли энергия при поглощении света свою электромагнитную природу?
3. Что называется оптической плотностью и коэффициентом пропускания раствора? Опишите метод абсорбционной спектрофотометрии.
4. Приведите примеры применения спектрофотометра в биологии, медицине и фармации.
- 5.Что называется спектром поглощения?
- 6.Каков стандартный диапазон измерений в абсорбционной спектрофотометрии?

6. Перечень вопросов для проверки конечного уровня знаний:

- 1.Выведите формулу закона Бугера.
- 2.Запишите формулу закона Бугера-Ламберта-Бера в системе натуральных и десятичных логарифмов.
- 3.От чего зависит коэффициент (показатель) поглощения?
- 4.Опишите принципиальную схему и назначение отдельных блоков спектрофотометра.
- 5.Чем определяются спектры поглощения веществ?
- 6.Охарактеризуйте виды оптических спектров.

7. Самостоятельная работа студентов:

По учебнику Ремизова А.Н. и др. (§§ 24.3, 24.4) изучите оптические атомные и молекулярные спектры.

8. Хронокарта учебного занятия:

- 1.Организационный момент – 5 мин.
- 2.Текущий контроль знаний– 30 мин.
- 3.Пояснения к выполнению работы – 10 мин.
4. Выполнение и оформление работы - 70 мин.
5. Проверка работы и задание на дом - 20 мин.

9. Перечень учебной литературы к занятию:

- 1.Ремизов А.Н. Максина А.Г., Потапенко А.Я. Медицинская и биологическая физика. М., «Дрофа», 2008, §§ 24.1, 24.3, 24.4.
2. Ремизов А.Н., Потапенко А.Я. Курс физики. М., «Дрофа», 2008, §25.2.
- 3.Физика и биофизика.(под ред. Антонова В.Ф.). М., «ГЭОТАР-Медиа», 2008, §§ 8.1, 8.2.
- 4.Антонов В.Ф., Черныш А.М., Козлова Е.К., Коржув А.В. Физика и биофизика. Практикум. М., « ГЭОТАР-Медиа», 2008, § 2.7.