

Министерство сельского хозяйства и продовольствия  
Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Витебская ордена «Знак Почета» государственная академия  
ветеринарной медицины»

**Кафедра радиологии и биофизики**

# **ФИЗИКА С ОСНОВАМИ БИОФИЗИКИ**

Учебно-методическое пособие по выполнению  
лабораторных работ для студентов 1 курса БТФ по специальности  
1 - 74 03 01 «Зоотехния»

Витебск  
ВГАВМ  
2017

УДК 53(07)  
ББК 22.3  
Ф50

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом  
УО «Витебская ордена «Знак Почета» государственная  
академия ветеринарной медицины»  
от 28.09.2017 г. (протокол № 2)

Авторы:

старший преподаватель *Н. П. Коваленок*, старший преподаватель  
*А. Н. Толкач*, старший преподаватель *И. О. Петроченко*, старший  
преподаватель *Е. В. Толкач*

Рецензенты:

кандидат биологических наук, доцент *Н. С. Мотузко*; кандидат  
физико-математических наук, доцент *М. Н. Борисевич*

**Физика с основами биофизики** : учеб. - метод. пособие по  
Ф50 выполнению лабораторных работ для студентов 1 курса БТФ  
по специальности 1 – 74 03 01 «Зоотехния» / Н. П. Коваленок [и др.]. –  
Витебск : ВГАВМ, 2017. – 64 с.  
ISBN 978-985-591-045-0.

Учебно-методическое пособие разработано в соответствии  
с типовой учебной программой по физике и биофизике для  
специальности 1 – 74 03 01 «Зоотехния». Содержит теорию, методику  
выполнения и контрольные вопросы защиты лабораторных работ, спра-  
вочный материал и список литературы.

УДК 53(07)  
ББК 22.3

ISBN 978-985-591-045-0

© УО «Витебская ордена «Знак Почета»  
государственная академия ветеринарной  
медицины », 2017

**Сводная таблица  
учета выполнения и защиты лабораторных работ**

студента \_\_\_\_\_ группы \_\_\_\_\_ курса \_\_\_\_\_ факультета

\_\_\_\_\_  
(Ф. И. О. студента)

№№ Л/р	Дата выполнения	Оценка за выполнение, оформление и защиту л/р	Зачет по л/р, подпись преподавателя
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			

## Содержание

Инструкция по охране труда при работе с электрооборудованием в лабораториях.....	5
Инструкция о мерах пожарной безопасности.....	7
Методы вычисления погрешностей .....	9
Л/р №1. Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса.....	11
Л/р №2. Определение коэффициента диэлектрической поляризации питательных веществ.....	16
Л/р №3. Определение удельной электропроводности растворов электролитов.....	22
Л/р №4. Изучение дисперсии электропроводности ткани переменному току.....	29
Л/р №5. Определение фокусного расстояния и оптической силы собирающей линзы.....	35
Л/р №6. Определение концентрации раствора сахарозы с помощью рефрактометра.....	40
Л/р №7. Определение длины световой волны при помощи дифракционной решетки.....	46
Л/р №8. Изучение основных законов внешнего фотоэффекта.....	51
Приложение.....	59
Литература.....	60

---

## **Инструкция по охране труда при работе с электрооборудованием в лабораториях**

### ***1. Общие требования безопасности***

1. Допускаются к работе в физических лабораториях студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности.
2. Студенты должны соблюдать правила внутреннего трудового распорядка, недопущения употребления алкогольных, наркотических и токсических средств, курения в неустановленных местах.
3. Соблюдать правила личной гигиены на рабочем месте.

### ***2. Требования безопасности перед началом работы***

1. Проверить состояние спецодежды (халаты).
2. Осмотреть санитарное состояние помещений, целостность штепсельных розеток, выключателей, форточек, окон, кранов и сохранность лабораторного оборудования.
3. При использовании бытовых электроприборов проверить изоляцию токоведущих шнуров, исправность вилки, состояние штепсельной розетки.
4. Приготовить к работе все необходимые материалы, методички, растворы. Соблюдая технику безопасности, проверить исправность инструментов и инвентаря, заземление приборов.
5. Обеспечить рабочий участок - лаборатории, подсобные помещения - необходимой освещенностью и вентиляцией.
6. Работы выполнять только в установленное расписанием (расписанием учебного отдела) время.

### ***3. Требования безопасности во время работы в физической лаборатории***

1. Будьте внимательны, дисциплинированы, осторожны. Точно выполняйте указания преподавателя и старшего лаборанта.
2. Запрещается в аудиториях и лабораториях находиться в пальто, а также раздеваться и вешать пальто на лабораторное оборудование.
3. Перед началом курса практических работ в лабораториях получите у руководителя работ инструктаж по технике безопасности.
4. Не трогайте, не включайте и не выключайте без разрешения руководителя или старшего лаборанта рубильники и другие приборы.
5. Прежде чем приступить к работе, внимательно ознакомьтесь с заданием, правилами безопасности работ, уясните ход выполнения лабораторной работы, наличие и состояние оборудования. О неисправностях немедленно сообщите преподавателю или старшему лаборанту.

6. При работе с электроприборами включать и выключать их только сухими руками за вилку. Оберегать токоведущий шнур от механических повреждений.
7. В лаборатории выполняйте только то задание, которое вам поручено. Не входите в лабораторию, в которой не работает ваша группа.
8. Для предотвращения падения при проведении опытов стеклянные сосуды (пробирки, колбы) осторожно закрепляйте в лапках штатива.
9. При проведении опытов не допускайте предельных нагрузок измерительных приборов. При работе с приборами из стекла соблюдайте особую осторожность. Не вынимайте термометры из пробирок с затвердевшим веществом.
10. Производите сборку электрических цепей, переключение в них, монтаж и ремонт электрических устройств, смену предохранителей только при отключении от источника питания.
11. Следите, чтобы изоляция проводов была исправна, на концах проводов были наконечники, при сборке электрических цепей провода располагайте аккуратно, а наконечники плотно зажимайте клеммами.
12. Проверьте наличие напряжения на источнике питания или других частях электроустановки с помощью указателей напряжения.
13. Выполняйте наблюдение и измерение, соблюдая осторожность, избегая случайного прикосновения к оголенным проводам (токоведущим частям, находящимся под напряжением).
14. Следите за тем, чтобы во время работы случайно не коснуться вращающихся частей электрических машин. Не производите пересоединение в электроцепях машин до полной остановки якоря или ротора машин.
15. Не прикасайтесь к корпусам стационарного электрооборудования, к зажимам отключенных конденсаторов.
16. Пользуйтесь инструментами (отвертка, плоскогубцы, индикатор, щипцы и др.) с изолирующими ручками.
17. Не оставляйте без присмотра электрическую схему, находящуюся под напряжением. Без разрешения преподавателя или старшего лаборанта не покидайте рабочее место.
18. Обнаружив неисправность в электрических устройствах, находящихся под напряжением, немедленно отключите источник электропитания и сообщите об этом преподавателю или старшему лаборанту.
19. Для присоединения потребителей к сети пользуйтесь штепсельными соединениями.
20. При ремонте и работе электроприборов пользуйтесь розетками, гнездами, зажимами, выключателями с невыступающими контактными поверхностями.
21. По окончании работы отключите источник электропитания, после чего разберите электрическую цепь.

#### ***4. Требования безопасности в аварийных ситуациях***

1. Если с вашим товарищем произошел несчастный случай (травма, потеря сознания и др.), немедленно сообщите об этом преподавателю или старшему лаборанту, которые окажут доврачебную помощь и вызовут врача.
2. Если во время работы с электрическим оборудованием произошел несчастный случай, срочно отключите приборы от внешней сети, сообщите руководителю или старшему лаборанту, которые окажут доврачебную помощь и вызовут врача.

#### ***5. Требования безопасности по окончании работы***

1. После окончания работы приведите в порядок свое рабочее место, соблюдая санитарное состояние в столах и на столах.
2. Убрать все приспособления и инструменты, которые использовались при ремонте приборов, в отведенное для них место.
3. Протереть приборы и рабочий стол ветошью.
4. Выключить электросветильники и вентиляционные устройства, закрыть форточки.
5. Привести в порядок спецодежду (халаты). После этого разрешается покинуть лабораторию.

#### **Инструкция о мерах пожарной безопасности**

Сотрудники и студенты академии обязаны знать и строго выполнять правила пожарной безопасности, не допускать действий, которые могут привести к пожару, а в случае возникновения пожара принимать немедленные меры по его ликвидации.

#### ***В целях предупреждения пожара студенты обязаны:***

1. Все учебные корпуса, общежития, служебные помещения (комнаты) и гаражно-хозяйственные здания и сооружения, а также территорию академии постоянно содержать в чистоте и порядке. Мусор, бумагу и производственные отходы в конце рабочего дня удалять в специально отведенные места, в металлические ящики.
2. Коридоры, лестничные площадки, запасные выходы и проходы содержать свободными, а чердаки - чистыми. Иметь свободный доступ к пожарному инвентарю. Ключи от чердаков и запасных выходов хранить у дежурного вахтера, дежурного по общежитию отдельно от других ключей.
3. Знать расположение огнетушителей, пожарных кранов, пожарных щитов и уметь ими пользоваться в случае пожара. Ориентироваться в

расположении пожарных гидрантов на территории академии.

4. Курить только в специально отведенных и оборудованных местах. Погашенные окурки и спички бросать в металлические урны.
5. Следить за исправностью электроприборов, выключателей, розеток и электропроводов. Применять только специальные электропредохранители, не пользоваться самодельными «жучками». Не оставлять без присмотра включенные в сеть электроприборы. Утюги, чайники, электроплитки устанавливать на несгораемые подставки. При обнаружении неисправности выключить электроприбор и вызвать электрика.
6. Не оставлять без присмотра включенные газовые приборы (плиты). При обнаружении неисправности в газовом оборудовании немедленно перекрыть газ и вызвать аварийную службу горгаза.
7. Легковоспламеняющиеся и горючие жидкости хранить в металлических ящиках (шкафах) с допустимой нормой потребности. При работе с горючими жидкостями на рабочем месте иметь песок, воду, огнетушитель, кошму.
8. Средства пожаротушения содержать укомплектованными и готовыми к применению на случай пожара.
9. В случае пожара немедленно вызвать пожарную службу по номеру 101, сообщить руководству академии и приступить к тушению пламени, спасению людей и материальных ценностей.
10. Лица, виновные в нарушении правил пожарной безопасности, несут ответственность в дисциплинарном, административном или уголовном порядке.



## Методы вычисления погрешностей

Никакое измерение не дает истинного значения определяемой величины. Всякое измерение сопровождается той или иной ошибкой, или погрешностью. Поэтому недостаточно знать только результат измерения, необходимо еще определить величину допущенной погрешности. Погрешности делятся на *систематические* и *случайные*.

*Систематические* ошибки возникают из-за неисправности или несовершенства измерительных приборов. Например, из-за смещения нуля измерительных приборов (амперметра, вольтметра и др.) все отсчеты будут искажены. Такие недостатки приборов изменяют результат измерений всегда в одну сторону, либо увеличивая, либо уменьшая его.

Систематические ошибки могут быть допущены также в процессе работы, если теория опыта недостаточно разработана и не учтены все причины, влияющие на точность измерений. Например, при определении сопротивления проводников, растворов не учтена поправка на температуру и т.д.

Систематические ошибки могут быть значительно уменьшены при более тщательном изучении приборов и устранении их недостатков, при более подробной разработке теории опыта и введении поправочных коэффициентов в результат измерений. Характерно, что увеличение числа измерений не уменьшит систематических ошибок.

*Случайные* ошибки вызываются неточностью отсчета, которую невольно допускает каждый экспериментатор. Например, недостаток органов зрения, органов слуха, реакции включения и выключения приборов отсчета времени и т.д.

В отличие от систематических случайные ошибки могут изменять результат измерений в обе стороны, т.е. увеличивать или уменьшать его. Поэтому для уменьшения влияния случайных ошибок необходимо всякое измерение проводить несколько раз  $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ .

Случайные ошибки подчиняются законам вероятности. Это значит, что если при каком-либо измерении получится результат больше истинного, то при следующих измерениях столь же вероятно может получиться результат меньше истинного. Очевидно, многократные повторения одного и того же измерения уменьшат влияние случайных ошибок, так как нет основания считать отклонение от истинного значения в одну сторону более вероятным, чем в другую, и среднее арифметическое из большого числа измерений будет ближе к истинному значению, чем отдельные измерения.

### Математический аппарат вычисления случайных ошибок прямых измерений

1. При измерении какой-либо величины получают ряд значений:  $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ .

2. Вычисляют среднее арифметическое значение измеряемой величины:

$$x_{cp.} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} \quad (1)$$

3. Вычисляют отклонения отдельного измерения от среднего арифметического значения, т.е. абсолютную ошибку:

$$\begin{aligned} \Delta x_1 &= |x_{cp.} - x_1|; \\ \Delta x_2 &= |x_{cp.} - x_2|; \\ \Delta x_n &= |x_{cp.} - x_n| \end{aligned} \quad (2)$$

4. Вычисляют среднее арифметическое численных значений отдельных абсолютных ошибок, т.е. *среднюю абсолютную ошибку* всех измерений:

$$\Delta x_{cp.} = \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3 + \dots + \Delta x_n}{n} \quad (3)$$

5. Тогда результат измерения:

$$x = x_{cp.} \pm \Delta x_{cp.} \quad (4)$$

6. Отношение средней абсолютной ошибки всех измерений  $\Delta x_{cp.}$  к среднему арифметическому значению  $x_{cp.}$  измеряемых величин называется *средней относительной ошибкой*:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x_{cp.}}{x_{cp.}} \cdot 100\% \quad (5)$$

**Пример:** Пусть при  $n = 3$  измерений сопротивления проволоки с помощью прибора ЕС-11 получены следующие числовые значения:

$$R_1 = 5,0 \text{ Ом}; \quad R_2 = 4,9 \text{ Ом}; \quad R_3 = 5,1 \text{ Ом}.$$

1. Найдем среднее арифметическое значение величины:

$$R_{cp.} = \frac{5,0 + 4,9 + 5,1}{3} = 5,0 \text{ (Ом)}$$

2. Вычислим абсолютную ошибку измерения:

$$\Delta R_1 = |5,0 - 5,0| = 0 \text{ (Ом)}; \quad \Delta R_2 = |5,0 - 4,9| = 0,1 \text{ (Ом)}; \quad \Delta R_3 = |5,0 - 5,1| = 0,1 \text{ (Ом)}$$

3. Вычислим среднюю абсолютную ошибку:

$$\Delta R_{cp.} = \frac{0 + 0,1 + 0,1}{3} = 0,07 \text{ (Ом)}$$

4. Запишем результат измерения:  $R = (5,0 \pm 0,07) \text{ Ом}$ .

5. Определим относительную ошибку измерения:

$$\varepsilon = \frac{\Delta R_{cp.}}{R_{cp.}} \cdot 100\% = \frac{0,07}{5,0} \cdot 100\% = 1,4\%$$

## Лабораторная работа № 1

### Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса

**Цель работы:** изучение метода Стокса, экспериментальное определение коэффициента вязкости жидкости.

**Литература:** [1] стр.194-198; [2] стр.164-166; [3] стр. 95-102; [4] стр. 56-63.

**Приборы и принадлежности:** цилиндрический сосуд с исследуемой жидкостью, шарики, микрометр, секундомер.

#### Теория опыта

**Реальная жидкость** – сжимаемая жидкость, обладающая вязкостью.

**Сжимаемость** – свойство жидкости изменять свой объем под действием давления.

**Вязкостью, или внутренним трением,** называется явление возникновения силы трения между слоями текущей жидкости, параллельными направлению течения.

Вязкость проявляется в том, что при относительном перемещении слоев жидкости медленнее движущийся слой жидкости «тормозит» слой, движущийся быстрее, и наоборот. Вязкость обусловлена наличием сил притяжения между отдельными частицами жидкости, которые при перемещении одной относительно другой сдерживают движение слоев.

Вязкость проявляется как сила сопротивления при помешивании жидкости, вызывает замедление скорости падения тел внутри жидкости.

Вязкость жидкости характеризуется коэффициентом вязкости. Эта величина определяет свойства жидкости и связывает силу внутреннего трения в жидкости со скоростью движения частиц жидкости.

Физический смысл коэффициента вязкости можно выяснить из следующих соображений. Если наблюдать медленное движение жидкости в прозрачной трубе, то легко убедиться в том, что жидкость перемещается отдельными слоями, которые движутся с различными скоростями (рисунок 1). Слои жидкости скользят относительно друг друга.

Наибольшую скорость имеет слой, движущийся по центральной части трубки. Слой, непосредственно прилегающий к стенке трубы, благодаря прилипанию частиц жидкости к стенкам трубы имеет скорость, равную нулю. Распределение скорости текущей жидкости по трубе определяется **градиентом скорости** - это векторная величина, направленная перпендикулярно скорости и показывающая, как изменяется скорость на некотором расстоянии, то есть при переходе от слоя к слою и определяемая по формуле:

$$\text{grad } \vec{v} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta x}, \quad (1)$$

где  $\Delta \vec{v}$  - изменение скорости при переходе от одного слоя к другому;  
 $\Delta x$  - расстояние между слоями жидкости.

Силы внутреннего трения определяются по **формуле Ньютона**:

$$\overline{F_{mp.}} = \eta \cdot \frac{\Delta v}{\Delta x} \cdot S = \eta \cdot grad \vec{v} \cdot S, \quad (2)$$

где  $\eta$  (греч. «этта») - коэффициент вязкости жидкости;

$S$  – площадь соприкасающихся слоев жидкости.

С учетом формулы (2) можно дать определение силы трения:

**Сила внутреннего трения** – это сила, возникающая между слоями при течении реальной жидкости, прямо пропорциональная градиенту скорости и площади соприкасающихся слоев жидкости.

Выразим из формулы (2) **коэффициент вязкости**:

$$\eta = \frac{F_{mp.}}{\frac{\Delta v}{\Delta x} \cdot S} \quad (3)$$

**Коэффициент вязкости** численно равен силе трения, возникающей между слоями жидкости единичной площади, при градиенте скорости, равном единице.

В системе СИ единица измерения коэффициента вязкости - Па·с (Паскаль в секунду):

$$[\eta] = \frac{H \cdot c}{\frac{M}{c} \cdot M^2} = \frac{H \cdot c}{M^2} = Pa \cdot c$$

У большинства жидкостей коэффициент вязкости зависит от природы жидкости, температуры, давления. Такие жидкости называются **ньютоновскими**.

У некоторых жидкостей, преимущественно у высокомолекулярных соединений или представляющих дисперсные системы (суспензии, эмульсии), коэффициент вязкости зависит от режима течения жидкости – давления и градиента скорости. Такие жидкости называются **неньютоновскими**. Их вязкость характеризуется условным коэффициентом жидкости, который относится к определенным условиям течения жидкости.

Одним из наиболее простых методов определения коэффициента динамической вязкости является метод Стокса, основанный на изучении движения тел сферической формы в вязкой среде. Благодаря вязкости тело, движущееся в жидкости, увлекает прилегающие к нему слои жидкости и поэтому испытывает сопротивление (трение) со стороны жидкости.

Суть метода заключается в следующем: если в сосуд с жидкостью бросить шарик с плотностью большей, чем плотность жидкости, то он будет падать. На движущийся шарик действуют три силы (рисунок 2):

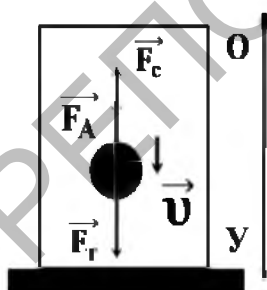
**1. Сила тяжести:**

$$F_T = m_T \cdot g = \rho_T \cdot V \cdot g,$$

где  $\rho_T$  - плотность тела;

$V$  - объем;

$g = 9,8 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения.



**2. Сила Архимеда**, направленная противоположно движению тела:

$$F_A = \rho_{жс} \cdot V \cdot g,$$

где  $\rho_{жс}$  - плотность жидкости.

**3. Сила внутреннего трения (сила сопротивления)**, тормозящая движение тела и направленная вниз. Если считать, что стенки сосуда находятся на значительном расстоянии от движущегося шарика, то величину силы внутреннего трения можно определить по **закону Стокса**:

$$F_C = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v, \quad (4)$$

где  $\eta$  – коэффициент внутреннего трения жидкости;

$r$  – радиус тела;

$v$  – скорость движения тела в жидкости.

Следует учесть, что при движении возникает не сила трения шарика о жидкость, а трение отдельных слоев жидкости друг о друга, так как шарик обволакивается тонким слоем жидкости, и этот слой жидкости движется вместе с шариком.

Сила трения с увеличением скорости движения шарика возрастает, следовательно, при движении шарика его скорость достигает такой величины, при которой все силы, действующие на шарик, будут уравновешены, то есть их равнодействующая будет равна нулю. Такое движение будет равномерным, и шарик будет двигаться с постоянной скоростью. Согласно первому закону Ньютона сумма всех сил, действующих на тело, равна нулю, то есть

$$\vec{F}_T + \vec{F}_A + \vec{F}_C = 0$$

Спроектируем силы на ось ОУ. Тогда в проекциях на ось ОУ получаем:

$$F_T - F_A - F_C = 0$$

Или

$$F_C = F_T - F_A \quad (5)$$

Подставляя в формулу (5) выражение силы тяжести, силы Архимеда и силы Стокса (4), получаем:

$$6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v = \rho_T \cdot V \cdot g - \rho_{жс} \cdot V \cdot g$$

Вынесем за скобки общие множители: ускорение свободного падения  $g$  и объем  $V$ :

$$6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v = V \cdot g \cdot (\rho_T - \rho_{жс})$$

Выразим коэффициент внутреннего трения:

$$\eta = \frac{V \cdot g \cdot (\rho_T - \rho_{жс})}{6 \cdot \pi \cdot r \cdot v} \quad (6)$$

Так как тело сферической формы, то его объем определяется по формуле:

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \quad (7)$$

Подставляя объем шара (7) в формулу (6), получаем:

$$\eta = \frac{4}{3} \cdot \frac{r^3 \cdot g \cdot (\rho_T - \rho_{жс})}{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v}$$

Следовательно, коэффициент вязкости равен:

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot \frac{r^2 \cdot g \cdot (\rho_T - \rho_{жс})}{v} \quad (8)$$

Если учесть, что диаметр шара  $d = 2 \cdot r$ , а скорость при равномерном движении определяется по формуле  $v = \frac{L}{t}$ , где  $L$  - расстояние, пройденное телом за время  $t$ , то выражение для определения коэффициента вязкости (8) примет вид:

$$\eta = \frac{1}{18} \cdot \frac{d^2 \cdot g \cdot t \cdot (\rho_T - \rho_{жс})}{L} \quad (9)$$

### Порядок выполнения задания

Измерительная установка представляет собой цилиндрический сосуд с налитой в него исследуемой жидкостью (рисунок 3). Для измерения коэффициента вязкости при различных температурах в него помещен нагревательный элемент Н, подключенный к источнику переменного тока. Измерение температуры жидкости производится с помощью термометра Т.

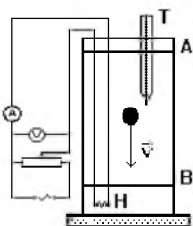


Рисунок 3

1. Измерьте термометром температуру жидкости. По таблице 1 определите плотность жидкости при данной температуре.

Таблица 1 - Зависимость плотности жидкости от температуры

$T, ^\circ C$	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$\rho_{жс} \cdot 10^3, \text{ кг/м}^3$	0,96	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91	0,91

- С помощью микрометра определите диаметр шарика  $d$ .
- Измерьте расстояние  $L$ , которое будет проходить шарик, между метками А и В на сосуде.
- Опустите шарик через отверстие в крышке цилиндрического сосуда в исследуемую жидкость и с помощью секундомера измерьте время  $t$  прохождения шариком расстояния  $L$ .
- Включите нагревательный элемент и проведите аналогичные измерения при еще двух значениях температуры.
- По формуле (9) рассчитайте коэффициент вязкости жидкости  $\eta$  при разных температурах.
- Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 2.
- Постройте график зависимости коэффициента вязкости от температуры  $\eta = f(T)$ .

Таблица 2 - Результаты измерений и вычислений

№	L, м	T, °C	d, м	$\rho_T$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho_{жe} \cdot 10^3$ , кг/м <sup>3</sup>	t, с	$\eta$ , Па·с
1							
2							
3							

9. Сделать вывод о зависимости коэффициента вязкости от температуры.

График зависимости  $\eta = f(T)$



Вывод:

### Контрольные вопросы защиты лабораторной работы № 1

1. Что такое реальная жидкость?
2. Что такое вязкость?
3. Дать понятие сжимаемости жидкости.
4. Дать понятие и записать формулу градиента скорости.
5. Запишите формулу и дайте определение силы внутреннего трения (формула Ньютона).
6. Запишите формулу и дайте определение коэффициента вязкости жидкости.
7. От чего зависит коэффициент вязкости жидкости?
8. Описать сущность метода Стокса, изобразить и назвать силы, действующие на тело, движущиеся в жидкости.
9. Выведите расчетную формулу для определения коэффициента вязкости по методу Стокса.
10. Как зависит вязкость жидкости от температуры?

## Лабораторная работа № 2

### Определение коэффициента диэлектрической поляризации питательных веществ

**Цель работы:** ознакомиться с видами поляризации диэлектриков, научиться измерять ЭДС поляризации питательных веществ и сделать вывод об изменении ЭДС поляризации с течением времени, научиться определять коэффициент поляризации питательных веществ.

**Литература:** [1] ч. 2, §8; [2] §63; [4] гл.15, §5.

**Приборы и принадлежности:** источник постоянного тока, высокоомный вольтметр, ключ, секундомер, исследуемое вещество.

#### Теория опыта

**Диэлектриками** называются вещества, которые не имеют свободных электрических зарядов и не проводят электрический ток.

Согласно представлениям классической физики, диэлектрик, как и всякое вещество, состоит из атомов и молекул. Однако, в отличие от проводников, в нем нет свободных зарядов, способных двигаться под действием электрического поля. Все молекулы диэлектрика электрически нейтральны, так как суммарный заряд электронов и атомных ядер, входящих в состав молекулы, равен нулю.

Тем не менее такая система создает электрическое поле, поскольку положительный заряд ядер и отрицательный заряд электронов находится в разных точках пространства и по своим электрическим свойствам молекулы диэлектрика подобны **электрическим диполям** (рисунок 1).

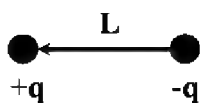


Рисунок 1

**Диполь** – это система, состоящая из двух одинаковых по величине, но противоположных по знаку зарядов, расположенных на расстоянии  $L$  друг от друга.

Основной характеристикой диполя является **дипольный момент**  $P_L$  – вектор, равный произведению заряда на плечо диполя  $L$  и направленный от отрицательного заряда к положительному:

$$P_L = q \cdot L, \quad (1)$$

где  $q$  – суммарная величина положительных или равных им отрицательных зарядов молекулы;

$L$  – расстояние между центрами тяжести положительных и отрицательных зарядов.

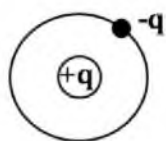


Рисунок 2

В зависимости от строения молекул различают *три группы диэлектриков*:

**1. Диэлектрики с неполярными молекулами**, молекулы которых имеют симметричное строение. К ним относятся водород, кислород, азот, углеводы и т.д. Внутримолекулярные заряды в них расположены таким образом, что «центр тяжести» по-



ложительного ядра совпадает с «центром тяжести» отрицательного заряда электронной оболочки и дипольный момент молекулы равен нулю (рисунок 2):

$$\sum_{i=1}^n \vec{P}_i = 0 \quad (2)$$

**2. Диэлектрики с полярными молекулами**, молекулы которых имеют несимметричное строение и представляют собой диполи. К ним относятся вода, нитробензол, спирты, щелочи, кислоты, белки, биополимеры и др.

Так как «центры масс» их положительных и отрицательных зарядов не совпадают, то они обладают постоянным дипольным моментом даже в том случае, когда отсутствует внешнее электрическое поле:

$$\sum_{i=1}^n \vec{P}_i \neq 0 \quad (3)$$

**3. Кристаллические диэлектрики**, молекулы которых имеют ионное строение. Примером является каменная соль, кварц, слюда, корунд и др.

Кристаллические решетки ионных диэлектриков можно рассматривать как состоящие из двух подрешеток, каждая из которых образована ионами одного знака, вставленных одна в другую. При отсутствии внешнего электрического поля подрешетки расположены симметрично и суммарный электрический момент равен нулю:

$$\sum_{i=1}^n \vec{P}_i = 0 \quad (4)$$

При помещении диэлектрика в электрическое поле происходит поляризация.

**Поляризация** - возникновение в диэлектрике собственного электрического поля при внесении его во внешнее электрическое поле, обусловленное смещением связанных заряженных частиц, входящих в состав атомов или молекул диэлектрика.

Диэлектрик, в котором возникло такое поле, называют **поляризованным**.

Различают *три вида поляризации диэлектриков*:

### 1. Электронная поляризация

Возникает у диэлектриков с неполярными молекулами. При помещении такого диэлектрика во внешнее электрическое поле положительный заряд каждой молекулы смещается в направлении поля, а электронная оболочка вытягивается в противоположную сторону. Молекула становится полярной, т.е. подобной электрическому диполю, и в результате этого диэлектрик поляризуется (рисунок 3).

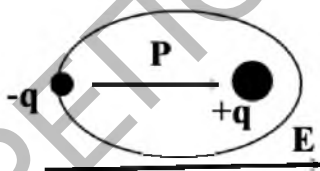


Рисунок 3

### 2. Ориентационная, или дипольная, поляризация

Возникает у диэлектриков с полярными молекулами. Благодаря тепловому движению дипольные молекулы расположены в диэлектрике хаотично. Под влиянием внешнего электрического поля все дипольные молекулы диэлектрика поворачиваются так, что их оси располагаются вдоль

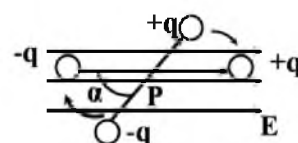


Рисунок 4

силовых линий внешнего электрического поля  $E$ . В результате диэлектрик поляризуется (рисунок 4).

### 3. Ионная поляризация

Возникает в кристаллических диэлектриках, имеющих ионные кристаллические решетки. Во внешнем поле происходит смещение ионов подрешеток в противоположных направлениях: положительных ионов решетки по направлению поля, а отрицательных ионов – в противоположную сторону. Появляется отличный от нуля суммарный электрический момент.

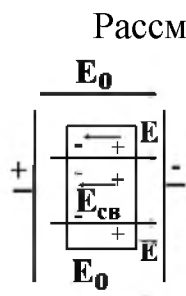


Рисунок 5

Рассмотрим диэлектрик в электрическом поле напряженностью  $E_0$  [электрическое поле в вакууме]. Любой вид поляризации диэлектриков приводит к уменьшению этого поля внутри диэлектрика, т.к. поляризуясь, диэлектрик создает собственное электрическое поле напряженностью  $E_{св.}$ , направленное против внешнего поля (рисунок 5). В результате в диэлектрике будет возникать электрическое поле, напряженность которого равна:

$$E = E_0 - E_{св.}$$

Степень уменьшения напряженности электрического поля в диэлектрике  $E$  по сравнению с напряженностью электрического поля в вакууме  $E_0$  характеризуется **относительной диэлектрической проницаемостью вещества**.

**Относительной диэлектрической проницаемостью вещества  $\epsilon$**  называется величина, которая показывает, во сколько раз напряженность электрического поля в вакууме больше, чем напряженность электрического поля в диэлектрике:

$$\epsilon = \frac{E_0}{E} = \frac{E_0}{E_0 - E_{св.}}, \quad (5)$$

где  $E = E_0 - E_{св.}$  – напряженность электрического поля в диэлектрике.

Очевидно, что  $\epsilon$  – величина безразмерная.

Относительная диэлектрическая проницаемость зависит от природы диэлектрика и температуры (особенно для жидких диэлектриков). С увеличением температуры вязкость уменьшается, сопротивление среды смещению зарядов уменьшается, и количество связанных зарядов на поверхности увеличивается, что ведет к увеличению диэлектрической проницаемости.

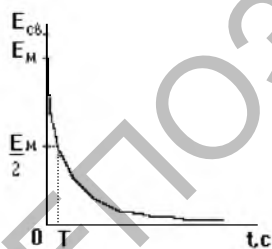


Рисунок 6

Если поляризованный диэлектрик убрать из внешнего электрического поля, то за счет теплового хаотического движения молекул поле в диэлектрике, обусловленное появлением связанных зарядов, начнет исчезать, а его напряженность  $E_{св.}$  будет с течением времени уменьшаться по экспоненциальному закону (рисунок 6):

$$E_t = E_0 \cdot e^{-k \cdot t}, \quad (6)$$

где  $E_t$  – напряженность электрического поля связанных зарядов в данный момент времени  $t$ ;

$E_0$  – напряженность электрического поля связанных зарядов в момент отключения внешнего поля ( $t=0$ );

$e$  – основание натуральных логарифмов ( $e \approx 2,71$ );

$k$  – коэффициент диэлектрической поляризации;

$t$  – время.

Если измерить время  $t=T$ , за которое напряженность электрического поля уменьшится в два раза, то коэффициент диэлектрической поляризации будет определяться формулой:

$$k = \frac{\ln 2}{T} = \frac{0,693}{T} \quad (7)$$

Большинство продуктов питания и питательных веществ (овощи, фрукты и др.) по своим физическим свойствам близки к диэлектрикам. В работе предусмотрено измерять коэффициент диэлектрической поляризации питательных веществ, по величине которого можно определять качество продуктов питания.

### Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую схему (рисунок 7), состоящую из исследуемого питательного вещества и иглы - 1;

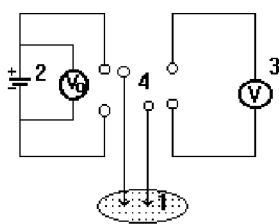


Рисунок 7

источника постоянного тока на  $U_0 = 4-6$  В - 2; цифрового высокоомного вольтметра - 3; четырехполюсного ключа - 4.

2. В питательное вещество вставить иглы на глубину 0,01 м с расстоянием между ними 0,01 м и ключом замкнуть на источник постоянного тока на 20-30 секунд. Переключить ключ на милливольтметр и быстро записывать его показания через 0, 10, 20, ... и т. д. секунд до момента времени,

когда напряженность уменьшится в два раза.

3. Зная значение напряженности внешнего электрического поля  $E_0$ , измеренное по вольтметру, и  $E_{св.}$  – значение напряженности электрического поля внутри диэлектрика, измеренное по цифровому вольтметру в момент времени  $t=0$ , вычислить по формуле (5) значение относительной диэлектрической проницаемости  $\square$

4. По формуле (7) вычислить коэффициент диэлектрической поляризации  $k$ .

5. Данные измерений и вычислений занести в таблицу.

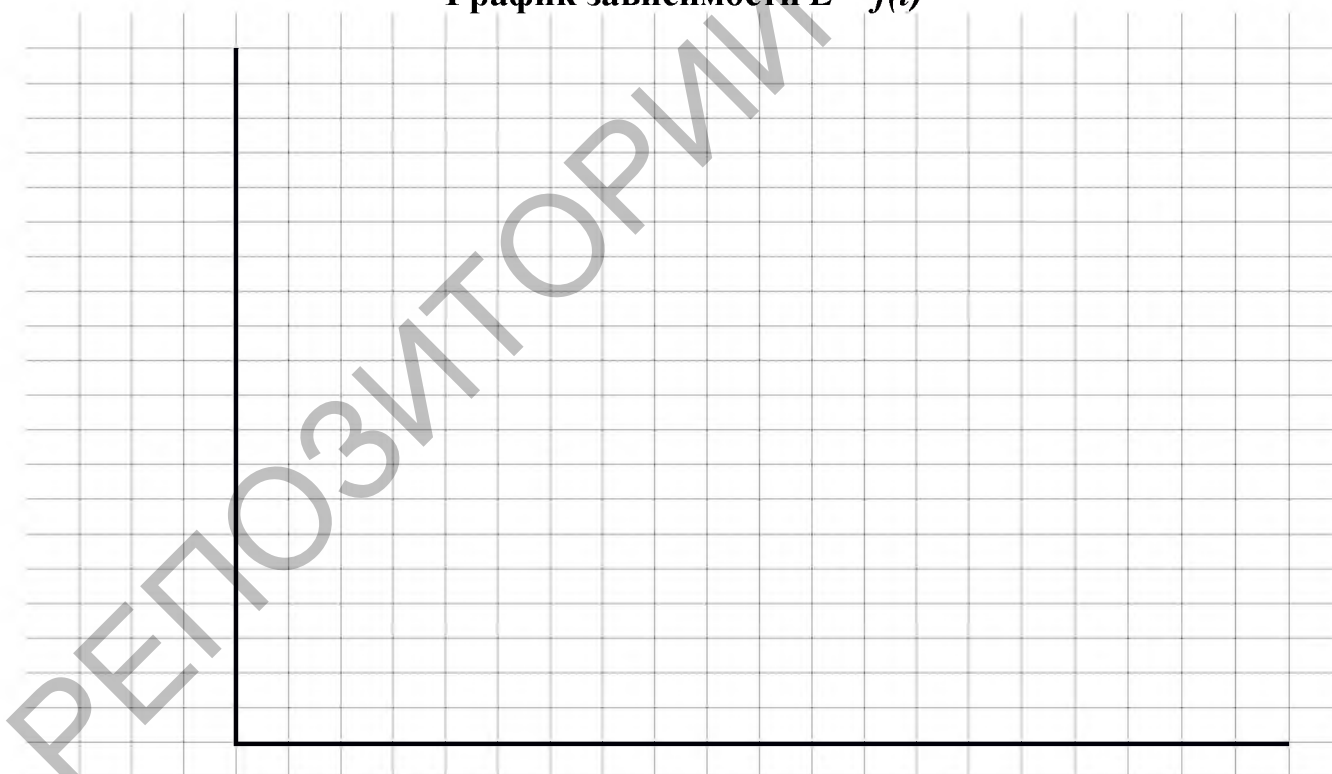
6. Построить график зависимости изменения напряженности электрического поля от времени  $E=f(t)$ .

7. Сделать вывод о зависимости напряженности электрического поля в диэлектрике от времени.

Таблица - Результаты измерений и вычислений

картофель				морковь				свекла			
$t, c$	$E, B/m$	$t, c$	$E, B/m$	$t, c$	$E, B/m$	$t, c$	$E, B/m$	$t, c$	$E, B/m$	$t, c$	$E, B/m$
0		110		0		110		0		110	
10		120		10		120		10		120	
20		130		20		130		20		130	
30		140		30		140		30		140	
40		150		40		150		40		150	
50		160		50		160		50		160	
60		170		60		170		60		170	
70		180		70		180		70		180	
80		190		80		190		80		190	
90		200		90		200		90		200	
100		210		100		210		100		210	
$\Delta_k =$				$\Delta_k =$				$\Delta_{CB} =$			
$k_k =$				$k_M =$				$k_{CB} =$			

График зависимости  $E = f(t)$



**Вывод:**

## Вычисления к лабораторной работе № 2

### Контрольные вопросы защиты лабораторной работы № 2

1. Какие вещества называются диэлектриками? Приведите пример.
2. Что такое диполь?
3. Дать определение и записать формулу дипольного момента.
4. Назовите и дайте характеристику видам диэлектриков.
5. Что называется поляризацией диэлектрика?
6. Какие виды поляризации диэлектриков вы знаете?
7. Опишите электронную поляризацию.
8. Опишите ориентационную, или дипольную, поляризацию.
9. Опишите ионную поляризацию.
10. Какой диэлектрик называется поляризованным?
11. Что показывает относительная диэлектрическая проницаемость вещества?
12. Запишите закон изменения напряженности электрического поля связанных зарядов с течением времени.
13. В чем причина уменьшения электрического поля связанных зарядов после выключения внешнего электрического поля?
14. Запишите формулу для определения коэффициента поляризации.

### Лабораторная работа № 3 Определение удельной электропроводности растворов электролитов

**Цель работы:** ознакомиться с принципом работы схемы моста Уитстона, научиться вычислять сопротивление электролитов и их электропроводность.

**Литература:** [1] ч. 2, §21; [2] стр. 227-232; [3] гл. 18, §2.

**Приборы и принадлежности:** сосуд с электродами для электролитов, звуковой генератор, термометр, сосуды с растворами  $KCl$  (0,1N и 0,05N), про- вода, осциллограф, реохорд.

#### Теория опыта

Электролитами, или проводниками второго рода, называют *растворы солей, кислот и оснований, способные проводить электрический ток.*

Основными носителями зарядов в электролитах являются **положи- тельно и отрицательно заряженные ионы (катионы и анионы)**, которые образуются в растворе в результате электролитической диссоциации нейтральных молекул растворенного вещества. Молекулы воды имеют достаточно большой дипольный момент, поэтому вокруг молекул воды существует довольно сильное электрическое поле. Это поле ослабляет силу электростатического взаи- модействия ионов в молекулах растворенного вещества. За счет тепловых со- ударений происходит распад этих молекул на ионы.

Результатом диссоциации является образование сольватов, когда моле- кулы воды «обволакивают» ионы, образуя вокруг них сольватную оболочку.

Также сольватная оболочка препятствует обратному процессу – восста- новлению (рекомбинации) ионов электролита в нейтральные молекулы.

Электролиты можно разделить на сильные и слабые.

**Сильные электролиты** образуются при использовании веществ, которые при растворении практически полностью диссоциируют на ионы, независимо от их концентрации в растворе.

**Слабые электролиты** получают, когда при растворении происходит лишь частичная (обратимая) диссоциация вещества на ионы.

**Плотность тока в электролитах** определяется по формуле:

$$i = e \cdot Z \cdot n \cdot (b^+ + b^-) \cdot E, \quad (1)$$

где  $e$  – абсолютное значение заряда электрона;

$Z$  – валентность;

$n$  – концентрация - число молекул в единице объема;

$b^+$  и  $b^-$  – подвижность положительных и отрицательных ионов;

$E$  – напряженность электрического поля.

Так как выражение

$$\gamma = e \cdot Z \cdot n \cdot (b^+ + b^-) \quad (2)$$

- **удельная электропроводность электролита**, то формула (1) примет вид:

$$i = \gamma \cdot E \quad (3)$$

Эта зависимость представляет собой закон Ома в дифференциальной форме для электролитов.

**Подвижность иона** – это скорость передвижения иона в растворителе при наличии электрического поля с напряженностью  $1$  вольт на метр.

Подвижность иона характеризует его способность преодолевать сопротивление среды при его направленном движении в электрическом поле.

К основным факторам, влияющим на подвижность ионов в водных растворах, относятся:

- **Заряд и радиус иона**, т. е. его природа. Влияние этих характеристик иона взаимосвязано, но неоднозначно: чем больше заряд и чем меньше радиус иона, тем сильнее гидратируется ион, тем толще его гидратная оболочка и, следовательно, тем ниже подвижность иона в растворе. В соответствии с этим в ряду однозарядных ионов  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Rb}^+$ ,  $\text{Cs}^+$ , который характеризуется последовательным возрастанием ионного радиуса, радиус гидратированного иона, наоборот, уменьшается, а определенная опытным путем электрическая подвижность ионов возрастает от  $\text{Li}^+$  к  $\text{Cs}^+$ .

- **Природа растворителя**, в частности, его диэлектрическая проницаемость и вязкость. Чем полярнее растворитель, тем больше размеры гидратированного иона и, следовательно, меньше его подвижность. Вязкость растворителя обуславливает сопротивление среды движущемуся иону: чем больше вязкость, тем меньше подвижность иона.

- **Температура раствора**. При повышении температуры уменьшаются вязкость растворителя и толщина сольватных оболочек ионов, а также снижается межионное взаимодействие. Все это приводит к увеличению подвижности ионов.

- **Концентрация ионов**. Чем больше концентрация ионов в растворе, тем сильнее электростатическое взаимодействие ионов, снижающее их подвижность.

Закон Ома для участка цепи, содержащего электролит, имеет вид:

$$I = \frac{U - \mathcal{E}_{\text{пол}}}{R}, \quad (4)$$

где  $I$  – сила тока;

$U$  – напряжение между электродами;

$\mathcal{E}_{\text{пол}}$  – электродвижущая сила (ЭДС) поляризации, которая направлена против разности потенциалов, создаваемой между электродами внешним источником тока;

$R$  – сопротивление.

Механизм образования ЭДС поляризации заключается в следующем:

1. Вокруг электродов, опущенных в электролит, изменяется концентрация ионов. Возле каждого электрода скапливаются ионы противоположных знаков, которые создают свое электрическое поле, направленное противоположно внешнему полю.

2. Подходя к электродам, ионы электролита нейтрализуются и оседают на электродах или выделяются в виде газа, что уменьшает активную рабочую поверхность электродов.

Такое явление называется **электролизом**.

**Электролиз** – это процесс выделения чистого вещества на электродах при прохождении постоянного электрического тока через электролит.

Электролиз широко используется для получения чистых веществ; создания тонких защитных покрытий (гальваностегия); металлических копий каких-либо предметов (гальванопластика); для химического анализа (электроанализ, полярография).

Количественные закономерности электролиза выражены в законах Фарадея.

### 1-й закон Фарадея:

масса вещества, выделившегося на электродах в процессе электролиза, прямо пропорциональна заряду, прошедшему через электролит:

$$m = k \cdot q \quad (5)$$

Так как  $q = I \cdot \Delta t$ , то первый закон Фарадея примет вид:

$$m = k \cdot I \cdot \Delta t, \quad (6)$$

где  $k$  – **электрохимический эквивалент вещества**.

Выразим из формулы (3) электрохимический эквивалент вещества:

$$k = \frac{m}{q} \quad (7)$$

**Электрохимический эквивалент вещества** – величина, численно равная массе вещества, выделившегося на электродах при прохождении через электролит заряда в 1 Кл.

В системе СИ единица измерения электрохимического эквивалента вещества – кг/Кл (килограмм на Кулон):

$$[k] = \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$$

### 2-й закон Фарадея:

электрохимический эквивалент вещества прямо пропорционален химическому эквиваленту этого вещества:

$$k = \frac{1}{F} \cdot X, \quad (8)$$

где  $X = \frac{M}{Z}$  – **химический эквивалент вещества**, равный отношению молярной массы вещества  $M$  к его валентности  $Z$ .

Тогда 2-й закон Фарадея примет вид:

$$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{Z}, \quad (9)$$

где  $F = 96500$  Кл/моль – **постоянная Фарадея**.

Количественной характеристикой способности раствора проводить электрический ток является удельная электропроводность.

**Удельная электропроводность** характеризуется степенью диссоциации молекул и концентрации ионов в электролите.

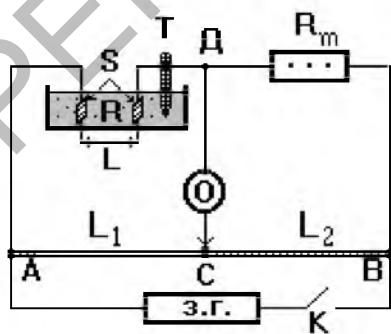


Рисунок 1



Удельную электропроводность растворов электролитов можно определить по схеме моста Уитстона с применением источника переменного тока (рисунок 1), где З.Г. – звуковой генератор; О – осциллограф; К – ключ; R – сосуд с электролитом;  $R_m$  – магазин сопротивлений; АВ – реохорд с передвижным контактом С; Т – термометр.

Применение переменного тока при измерении сопротивления электролита обусловлено тем, что при прохождении постоянного тока через электролит происходит поляризация электродов продуктами электролиза, а это приводит к постоянному изменению состава электролита.

Сопротивление электролита измеряется с помощью моста Уитстона в уравновешенном состоянии. При этом потенциалы точек С и Д равны, т.е.  $\varphi_c = \varphi_d$ , что аналогично равенству нулю силы тока на участке СД, т.е.  $I_{CD} = 0$ . Тогда сопротивление можно рассчитать по формуле:

$$R = R_m \cdot \frac{L_1}{L_2}, \quad (10)$$

где  $R_m$  – известное сопротивление (сопротивление магазина);

$R$  – определяемое неизвестное сопротивление объема электролита сечением  $S$  и длиной  $L$ ;

$L_1$  и  $L_2$  – соответственно длина левого и правого плеча реохорда.

Как и для металлических проводников, сопротивление электролита можно определить по формуле:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S}, \quad (11)$$

где  $L$  – расстояние между электродами;

$S$  – площадь электродов;

$\rho$  – удельное сопротивление электролита.

Величина, обратная сопротивлению, называется электропроводностью:

$$K = \frac{1}{R} \quad (12)$$

В системе СИ единица измерения электропроводности – См (Сименс):

$$[K] = \frac{1}{\text{Ом}} = \text{См}$$

Электропроводность зависит от концентрации ионов, их заряда, подвижности и температуры. Электропроводность электролитов возрастает при увеличении температуры, так как при этом возрастает степень диссоциации, падает вязкость раствора и увеличивается подвижность ионов.

Величина, обратная удельному сопротивлению, называется удельной электропроводностью:

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad (13)$$

В системе СИ единица измерения удельной электропроводности См/м (Сименс на метр):

$$[\gamma] = \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}} = \frac{\text{См}}{\text{м}}$$

Выразив из уравнения (11) удельное сопротивление  $\rho$ , получим:

$\rho = \frac{R \cdot S}{L}$ . Подставив его в выражение (13), получим:

$$\gamma = \frac{L}{S} \cdot \frac{1}{R} \quad (14)$$

Для определения удельной электропроводности используется специальный сосуд с жестко закрепленными электродами. Если заполнять сосуд растворами всегда до одного и того же уровня, то отношение  $\frac{L}{S} = C$  будет постоянным. Величина  $C$  называется *электролитической емкостью сосуда* (константой сосуда). Тогда выражение (14) для удельной электропроводности примет вид:

$$\gamma = \frac{C}{R} \quad (15)$$

Экспериментальный метод определения удельной электропроводности сводится к измерению сопротивления стандартного раствора  $R_0$  и расчета константы сосуда  $C$ , когда сосуд заполнен стандартным раствором с известной удельной электропроводностью:

$$C = \gamma_0 \cdot R_0 \quad (16)$$

После этого измеряют сопротивление исследуемого электролита  $R$  и определяют его удельную электропроводность  $\gamma$ .

### Порядок выполнения работы

1. В сосуд налить до метки стандартный раствор  $KCl$  с известной электропроводностью  $\gamma_0$ , предварительно сполоснув 2-3 раза сосуд стандартным раствором.

2. В соответствии с температурой раствора найти электропроводность стандартного раствора (таблица 1).

**Таблица 1 - Зависимость электропроводности стандартного раствора от температуры**

$t, ^\circ\text{C}$	15	16	17	18	19	20	21	25
$\gamma_0,$ См/м	1,048	1,072	1,095	1,119	1,143	1,167	1,191	1,191

3. Вставить электроды в сосуд с электролитом. Замкнуть ключ К.
4. Уравновесить мост Уитстона, для чего:
  - а) установить передвижной контакт  $C$  реохорда так, чтобы длины плеч реохорда были одинаковы:  $L_1 = L_2$ ;
  - б) изменяя сопротивление магазина  $R_m$ , приблизительно добиться наименьшего сигнала на осциллографе;
  - в) при найденном сопротивлении магазина  $R_m$ , перемещая передвижной контакт  $C$  реохорда, добиться самого наименьшего сигнала на осциллографе, что соответствует точному уравновешиванию моста Уитстона, при котором сила тока на участке СД, где находится осциллограф, равна нулю:  $I_{CD}=0$ .
5. Сбалансировав мост, определить по реохорду длины плеч  $L_1$  и  $L_2$ .
6. Измерения повторить еще два раза при других значениях сопротивления магазина.
7. По формуле (10) найти сопротивление стандартного раствора электролита  $R_0$ , его среднее значение  $R_{0cp}$ .
8. Используя формулу (16), найти значение постоянной сосуда  $C$ .
9. Аналогичные измерения произвести с исследуемым раствором электролита. Рассчитать сопротивление исследуемого раствора  $R$  по формуле (10), найти его среднее значение и, зная постоянную сосуда  $C$ , определенную по стандартному раствору, по формуле (15) найти удельную электропроводность  $\gamma$  исследуемого раствора.
10. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 2.

Таблица 2 - Результаты измерений и вычислений

№ опыта	Стандартный раствор						$C, \frac{1}{M}$	Исследуемый раствор					
	$\gamma_0, \frac{CM}{M}$	$R_m, Ом$	$L_1, м$	$L_2, м$	$R_0, Ом$	$R_{0cp}, Ом$		$R_m, Ом$	$L_1, м$	$L_2, м$	$R, Ом$	$R_{cp}, Ом$	$\gamma, \frac{CM}{M}$
1													
2													
3													

**Вывод:**

## Вычисления к лабораторной работе № 3

### Контрольные вопросы защиты лабораторной работы № 3

1. Что представляет собой электролит?
2. Чем обусловлен ток в электролитах?
3. Приведите пример (для соли, кислоты, основания) диссоциации молекулы на ионы.
4. В чем отличие сильных и слабых электролитов?
5. Дайте определение подвижности иона.
6. Назовите, какие факторы и как влияют на подвижность ионов в электролите.
7. Запишите закон Ома для участка цепи, содержащего электролит.
8. В чем заключается механизм образования ЭДС поляризации?
9. Что называется электролизом?
10. Сформулируйте законы Фарадея для электролиза.
11. Дайте определение электропроводности.
12. Дайте определение удельной электропроводности.
13. Какая схема лежит в основе определения удельной электропроводности раствора электролита в данной работе?
14. Запишите формулы, по которым рассчитываются сопротивление электролита, электролитическая емкость сосуда, удельная электропроводность электролита?
15. Как в общем случае влияет концентрация ионов в электролите на его электропроводность?

## Лабораторная работа № 4

### Изучение дисперсии электропроводности ткани переменному току

**Цель работы:** научиться определять импеданс ткани живого организма и изучить зависимость импеданса от частоты переменного тока, познакомиться с методом диагностики – реографией.

**Литература:** [1] стр. 230-232, 270-271; [2] стр. 264-266; [3] гл.22, §7.

**Приборы и принадлежности:** микроамперметр для переменного тока, вольтметр переменного тока, два свинцовых электрода, генератор электрических колебаний, потенциометр, ключ, провода.

#### Теория опыта

**Переменным** называется ток, который изменяется по величине и направлению с течением времени.

**Импедансом**  $Z$  называется полное (суммарное) сопротивление ткани переменному току.

Ткани живых организмов состоят из структурных элементов - клеток, омываемых тканевой жидкостью. Цитоплазма клеток и тканевая жидкость представляют собой электролиты, разделенные плохо проводящей клеточной мембраной – диэлектриком. Таким образом, клетка представляет собой сферический конденсатор, обладающий емкостным сопротивлением, которое значительно уменьшается по мере увеличения частоты переменного тока. Омывающие клетку жидкости являются электролитами, обладающими активным сопротивлением, не зависящим от частоты переменного тока. Таким образом, полное сопротивление в живом организме (импеданс) определяется свойствами клеточных мембран, а также свойствами клеточных и межклеточных жидкостей.

Так как биологические ткани обладают только активным и емкостным сопротивлениями, то при последовательном соединении этих сопротивлений (явление наблюдается при прохождении тока через поверхностно лежащие ткани) **импеданс будет определяться по формуле:**

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}, \quad (1)$$

где  $R$  - активное сопротивление электролита;

$\frac{1}{\omega \cdot C}$  - емкостное сопротивление;

$\omega$  - круговая частота переменного тока;

$C$  - емкость клетки.

Так как  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot \nu$ , то формула импеданса примет вид:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot C}\right)^2} \quad (2)$$

В ходе эксперимента импеданс вычисляется по **закону Ома для цепи переменного тока**:

$$Z = \frac{U_{эфф.}}{I_{эфф.}}, \quad (3)$$

где  $U_{эфф.}$  – эффективное значение напряжения;

$I_{эфф.}$  – эффективное значение силы переменного тока.

Импеданс тканей живого организма зависит от многих физиологических факторов, в частности от состояния кровообращения, от степени наполнения кровеносных сосудов, проходящих в этих тканях.

Действие переменного тока на живой организм зависит от частоты.

**На низких частотах (НЧ) (порядка 50–100 Гц)** переменный ток действует так же, как и постоянный, т.е. поляризационные эффекты также велики, как и при постоянном токе. Это значит, что смещение ионов достаточно, чтобы вызвать изменение их концентрации по обе стороны клеточных мембран, сопровождающееся раздражающим действием на клетку.

**На средних частотах (СЧ) (порядка 4000–50000 Гц)** поляризационные эффекты менее выражены. Это позволяет применять переменный ток частотой 4000–5000 Гц для *электростимуляции*, а ток частотой 20000 – 30000 Гц применяется в *реографии*.

Переменный ток **высокой частоты (ВЧ) (более 200000 Гц)** не оказывает раздражающего действия на ткани живого организма, однако тепловой эффект тока при этом сохраняется. В связи с этим высокочастотные токи применяются для тепловых лечебных процедур – прогревания глубоко лежащих тканей.

Действие переменного тока на организм зависит и от других параметров тока. Основным поражающим фактором является сила электрического тока, проходящего через тело человека.

Человек начинает ощущать воздействие переменного тока величиной 0,5 ... 1,5 мА (миллиампер). Это порог ощутимого тока, который не представляет серьезной опасности.

Величину тока 10 ... 15 мА называют порогом неотпускающего тока. Эта величина тока при промышленной частоте 50 Гц вызывает непроизвольное сокращение мышц кисти руки и предплечья, сопровождающееся резкой болью. При воздействии этого тока на организм человек не может разжать руку и самостоятельно прервать контакт с электрической цепью.

Ток 40 мА поражает органы дыхания и сердечно-сосудистую систему, вызывает фибрилляцию сердца. Фибрилляция - это такое состояние сердца, когда отдельные группы мышечных волокон миокарда сокращаются разрозненно и нескоординированно, вследствие чего сердце теряет способность совершать согласованные сокращения как единое целое и в определенной последовательности. При этом может произойти остановка дыхания.

Ток 100 мА (0,1 А) считается смертельным, так как происходят немедленная остановка сердца и паралич дыхания.

*Исследование периферического кровообращения путем измерения электросопротивления называется **реографией**.*

Для реографии измеряют полное сопротивление определенного участка ткани в течение цикла сердечной деятельности. При увеличении наполнения органа кровью во время систолы сердца его сопротивление уменьшается, так как кровь обладает меньшим сопротивлением, чем клетки. При диастоле сопротивление органа увеличивается. Исследование реограмм применяют в диагностике заболеваний периферических кровеносных сосудов, сопровождающихся изменением их эластичности и сужением артерий, а также при исследовании механизма экстремальных воздействий на организм животного, действия лекарственных веществ и др.

С помощью этого метода получают реограммы головного мозга (реоэнцефалограмма), сердца (реокардиограмма), лёгких (реопульманограмма), глаз (реоофтальмограмма), конечностей (реовазограмма). Электроды при этом накладываются на соответствующий орган, смазанный предварительно специальной пастой для улучшения контакта с кожей.

**Электропроводностью ткани** называется величина, обратная сопротивлению (импедансу) ткани, через которую проходит электрический ток:

$$K = \frac{1}{Z} \quad (4)$$

В системе СИ единица измерения электропроводности – См (Сименс):

$$K = \frac{1}{\text{Ом}} = \text{См}$$

Электропроводность биологических объектов так же, как и импеданс, зависит от частоты переменного тока.

**Дисперсией электропроводности ткани** называется зависимость электропроводности ткани от частоты переменного тока.

Увеличение электропроводности живых тканей при увеличении частоты переменного тока связано с уменьшением явления поляризации. Дело в том, что диполи и ионы ведут себя по-разному при действии переменного тока разной частоты. При небольших частотах диполи и ионы успевают вслед за изменением поля переориентироваться и накапливаться на поверхности раздела фаз, слоев и мембран. При увеличении частоты все меньшая часть заряженных частиц успевает переориентироваться и эффект поляризации уменьшается.

Измерение электропроводности используется при исследованиях физиологического состояния и для оценки патологических процессов, происходящих в живых тканях. На ранних стадиях превращения нормальных клеток в раковые обнаруживается увеличение емкостного сопротивления.

*Зависимость импеданса живой ткани от частоты переменного тока называется **дисперсией импеданса**.*

Зависимость импеданса ткани от частоты переменного тока определяется физиологическим состоянием и морфологическими особенностями ткани, что позволяет использовать измерения в биологических и ветеринарных исследованиях.

При действии повреждающих факторов (повышение температуры, мощного ультразвука, ионизирующих излучений и др.), а также при отмирании ткани происходит увеличение проницаемости мембран, их частичное или полное разрушение. Эти процессы приводят к уменьшению роли емкостного сопротивления ткани, и зависимость импеданса от частоты становится слабой.

При патологических процессах в тканях изменяются их электрические свойства. Так в начальной стадии воспалительного процесса происходит набухание клеток, объем межклеточных пространств уменьшается, в результате чего увеличивается активное сопротивление. В более поздних стадиях воспаления возникают глубокие структурные изменения, увеличивается клеточная проницаемость, что сопровождается уменьшением сопротивления. Таким образом, измерение электрических параметров тканей может служить показателем диагностики воспалительных процессов.

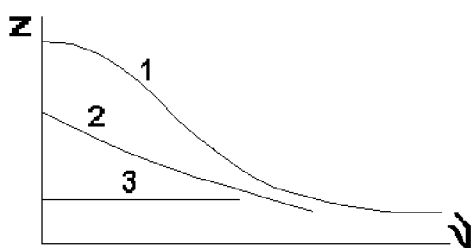


Рисунок 1

Исследование дисперсных кривых (рисунок 1) дают важные сведения о состоянии биологических объектов. По крутизне дисперсионной кривой можно судить о жизнеспособности той или иной ткани, что имеет большое значение, тогда когда ткань предназначена для трансплантации.

Причина дисперсии заключается в том, что на величину сопротивления при низких частотах значительное влияние оказывает макроструктурная поляризация.

Кривая 1 (см. рисунок 1, 1) соответствует здоровой ткани, так как при увеличении частоты переменного тока уменьшаются поляризационные эффекты, то это ведет к уменьшению полного сопротивления ткани, и дисперсионная кривая обладает значительной крутизной.

Кривая 2 (см. рисунок 1, 2) – ткань подверглась кратковременному нагреву, что привело к частичному разрушению клеточных мембран. При повреждении ткани возрастает проницаемость клеточных мембран, что приводит к уменьшению полного сопротивления на низких частотах. Поэтому вторая кривая обладает меньшей крутизной.

Кривая 3 (см. рисунок 1, 3) - образец ткани, подвергнутый длительному кипячению, вызывающему полное разрушение мембран («мертвая ткань»). При отмирании ткани поляризационные эффекты практически исчезают, и зависимость сопротивления от частоты отсутствует, т.к. остается только активное сопротивление.

В данной работе исследуется дисперсия электропроводности тканей живого организма. Электропроводность тканей определяется методом амперметра и вольтметра. Такой метод измерения электропроводности клеток и тканей довольно широко применяется в медицине и ветеринарии при изучении процессов, происходящих при действии повреждающих факторов, при возникновении различных патологий и т.д. Удобства данного метода заключаются в том, что прикладываемое напряжение не вносит существенных изменений в физико-



химические процессы в живых тканях и не повреждает их.

### Порядок выполнения работы

1. Включить звуковой генератор.
2. С помощью потенциометра установить напряжение  $U_1$ .
3. Положить руку на свинцовые электроды.
4. Изменяя частоту переменного тока от 200 до 1000 Гц, через 100 Гц измерить силу тока в цепи по микроамперметру ( $1 \text{ мкА} = 10^{-6} \text{ А}$ ).
5. Повторить измерения при напряжении  $U_2$ .
6. Вычислить по формуле (3) импеданс, а по формуле (4) - электропроводность ткани.
7. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу.

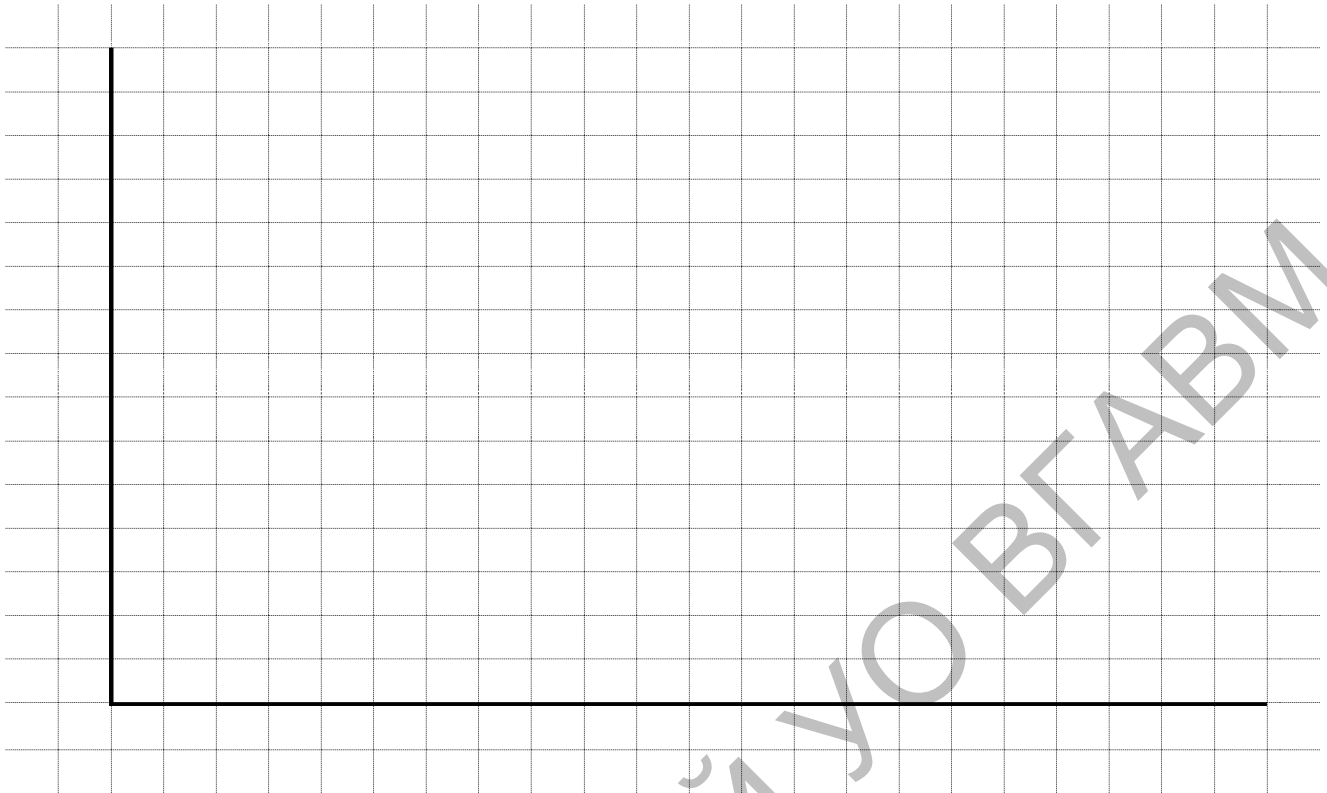
Таблица - Результаты измерений и вычислений

№ опыта	$\nu$ , Гц	$I_{эфф.}, \text{ А}$		$Z, \text{ Ом}$		$K, \text{ См}$	
		$U_1 = \text{В}$	$U_2 = \text{В}$	$U_1 = \text{В}$	$U_2 = \text{В}$	$U_1 = \text{В}$	$U_2 = \text{В}$
1	200						
2	300						
3	400						
4	500						
5	600						
6	700						
7	800						
8	900						
9	1000						

8. Построить графики зависимости электропроводности от частоты  $K = f(\nu)$  при одном и том же значении напряжения (два графика в одной системе координат).

9. Сделать вывод (заключение) о зависимости электропроводности ткани от частоты переменного тока.

### График зависимости $K = f(\nu)$



**Вывод:**

#### Контрольные вопросы для защиты лабораторной работы № 4

1. Что называется переменным током?
2. Что такое импеданс?
3. Из каких сопротивлений состоит импеданс живой ткани. Какие элементы живой ткани обладают этими сопротивлениями?
4. Запишите формулу импеданса живой ткани.
5. По какой формуле вычисляется импеданс в данной работе?
6. Что такое реография? Какой ток применяют для реографии?
7. Какое действие оказывает переменный ток на живой организм в зависимости от частоты?
8. Какое действие оказывает переменный ток на живой организм в зависимости от силы тока?
9. Дайте определение электропроводности ткани.
10. В каких единицах измеряется электропроводность? Дайте ее определение.
11. Что называется дисперсией электропроводности, дисперсией импеданса?
12. Как зависит электропроводность живой ткани от частоты переменного тока?

## Лабораторная работа № 5

### Определение фокусного расстояния и оптической силы собирающей линзы

**Цель работы:** изучить теорию опыта, построение изображений предмета в собирающей линзе, научиться определять фокусное расстояние и оптическую силу собирающей линзы двумя методами.

**Литература:** [1] §§45,47; [2] §§123-135; [4] стр. 204-208.

**Приборы и принадлежности:** собирающая линза в оправе, оптическая скамья, экран с белой поверхностью, источник света, предмет в оправе.

#### Теория опыта

**Линза** - это прозрачное тело, ограниченное с двух сторон сферическими поверхностями.

Линзы входят в состав разнообразных оптических приборов, широко используемых в ветеринарной практике, таких как микроскопы, эндоскопы, бронхоскопы, гастроскопы, цитоскопы и др.

#### Основные характеристики линзы:

**Главная оптическая ось  $OO_1$**  – прямая, проведенная через центры кривизны обеих поверхностей (рисунок 1).

**Оптический центр** – точка в центре линзы.

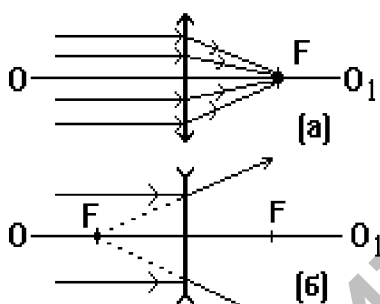


Рисунок 1

Любой луч, проходящий через оптический центр линзы, не изменяет своего направления.

**Фокус линзы F** - это точка, в которой пересекаются преломленные лучи, падающие на линзу параллельно главной оптической оси, или их продолжение.

У любой линзы имеется два фокуса по обе стороны от нее.

**Фокусное расстояние  $f$**  – расстояние от оптического центра линзы до точки фокуса.

Фокусное расстояние зависит от степени кривизны сферических поверхностей линзы. Более выпуклые поверхности будут сильнее преломлять лучи и, соответственно, уменьшать фокусное расстояние. Если фокусное расстояние короче, то данная линза будет давать большее увеличение изображения.

Для характеристики увеличивающей способности линзы вводят понятие оптической силы линзы.

**Оптическая сила  $D$**  – величина обратная фокусному расстоянию линзы:

$$D = \frac{1}{f} \quad (1)$$

В системе СИ единица измерения оптической силы – дптр (диоптрии):

$$[D] = \frac{1}{\text{м}} = \text{дптр}$$

Оптическая сила характеризует преломляющую способность линз. Обычно оптическая сила используется для характеристики линз в офтальмологии и обозначениях очков.

Линзы бывают **собирающие** (выпуклые) и **рассеивающие** (вогнутые).

**Собирающая линза** - это линза, в которой световые лучи (см. рисунок 1(а)), падающие на линзу параллельно главной оптической оси линзы  $OO_1$ , преломляясь в линзе, собираются в ее фокусе  $F$ .

У собирающей линзы фокус действительный, и он расположен с обратной стороны от падающих лучей. У собирающей линзы фокусное расстояние считается положительным, т.е.  $f > 0$ .

**Рассеивающая линза** - это линза, в которой световые лучи (см. рисунок 1(б)), падающие на линзу параллельно главной оптической оси линзы  $OO_1$ , преломляясь в линзе, расходятся.

Для нахождения ее точки фокуса, выходящие из линзы лучи продляют в обратную сторону до пересечения с главной оптической осью  $OO_1$ .

У рассеивающей линзы фокус мнимый, и располагается он с той же стороны, с которой свет падает на линзу. Фокусное расстояние рассеивающей линзы считается отрицательным, т.е.  $f < 0$ .

Оптическая сила собирающей линзы положительна, т.е.  $D > 0$ , а оптическая сила рассеивающей линзы отрицательна, т.е.  $D < 0$ .

**Оптическая сила системы линз**  $D_{сист.}$  численно равна алгебраической сумме оптических сил линз, входящих в ее состав, т.е.

$$D_{сист.} = D_1 + D_2 + \dots \quad (2)$$

### Построение изображения предмета в линзе:

Для построения изображения в собирающей линзе (рисунок 2) от каждой точки предмета  $AB$  проводят два луча:

**1-й луч** - через оптический центр линзы идет, не преломляясь;

**2-й луч** - сначала - параллельно главной оптической оси линзы  $OO_1$  до линзы, а затем - через фокус до пересечения с первым лучом.

Изображение предмета  $A_1B_1$  в данном случае получается *увеличенным, перевернутым и действительным*.

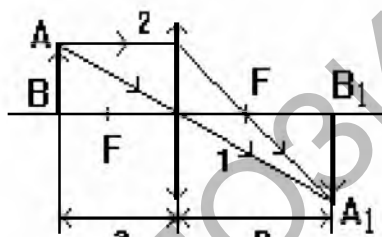


Рисунок 2

Линзы широко применяются для устранения дефектов зрения: собирающие линзы – для дальнозоркости, а рассеивающие – для близорукости.

### Задание № 1. Определение фокусного расстояния и оптической силы собирающей линзы с помощью формулы тонкой линзы

**Тонкой** называется линза, толщина которой значительно меньше радиусов, ограничивающих ее сферических поверхностей.

Для определения фокусного расстояния собирающей линзы применим формулу тонкой линзы:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}, \quad (3)$$

где  $f$  - фокусное расстояние линзы;

$a$  - расстояние от предмета до линзы;

$b$  - расстояние от линзы до полученного изображения.

Выразив из формулы (3)  $f$ , мы получим выражение для нахождения фокусного расстояния собирающей линзы:

$$f = \frac{a \cdot b}{a + b} \quad (4)$$

### Порядок выполнения задания № 1

1. На оптическую скамью поставить собирающую линзу.
2. Перемещая линзу, найти положение линзы, при котором видно отчетливое изображение  $A_1B_1$  предмета  $AB$  на экране (см. рисунок 2).
3. Измерить линейкой расстояния от предмета до линзы  $a$  и расстояние от линзы до полученного изображения  $b$ .
4. Меняя положения экрана и линзы, повторить измерения еще два раза.
5. По формуле (4) рассчитать фокусное расстояние  $f$  собирающей линзы. Найти среднее значение фокусного расстояния  $f_{cp.}$
6. Оценить абсолютную  $\Delta f$  и относительную  $\Delta f / f_{cp.} \cdot 100\%$  погрешности измерений.
7. Исходя из среднего значения фокусного расстояния, по формуле (1) рассчитать среднее значение оптической силы собирающей линзы  $D_{cp.}$
8. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 1.

Таблица 1 - Результаты измерений и вычислений

№	$a,$ м	$b,$ м	$f,$ м	$f_{cp.},$ м	$\Delta f,$ м	$\Delta f_{cp.},$ м	$\frac{\Delta f \cdot 100\%}{f_{cp.}}$	$D_{cp.},$ дптр
1								
2								
3								

### Задание № 2. Определение фокусного расстояния и оптической силы собирающей линзы методом Бесселя

Указанный выше метод определения главных фокусов является приближенным. Бессель предложил точный способ нахождения главных фокусных расстояний линз. Он заключается в том, что предмет и экран остаются неподвижными, а перемещается только линза, которую нужно устанавливать в двух положениях: в первом положении линза дает увеличенное изображение, а во втором положении линза дает уменьшенное изображение.

Из формулы тонкой линзы (3) видно, что величины  $a$  и  $b$  можно менять местами. Такая замена означает, что если на место изображения  $A_1B_1$  в положении (б) (рисунок 3) поставить предмет  $AB$  из положения (а), то изображение в случае (б) предмета  $AB$  получится в том же месте, где раньше был предмет.

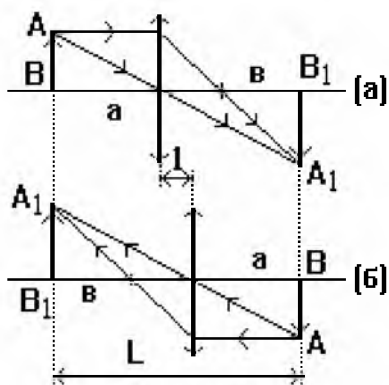


Рисунок 3

Из рисунка 3, следует, что

$$\begin{cases} L = a + b \\ l = a - b \end{cases}$$

где  $L$  – расстояние от предмета до изображения,  $l$  – расстояние между двумя положениями линзы, дающими увеличенное и уменьшенное изображения предмета.

Решая совместно эту систему уравнений относительно  $a$  и  $b$ , получим:

$$a = \frac{L+l}{2} \text{ и } b = \frac{L-l}{2} \quad (5)$$

Подставляя выражения (5) в формулу (4), получим формулу нахождения фокусного расстояния собирающей линзы **методом Бесселя**:

$$f = \frac{L^2 - l^2}{4 \cdot L} \quad (6)$$

### Порядок выполнения задания № 2

1. На оптическую скамью поставить собирающую линзу.
2. Расположить экран и предмет на таком расстоянии друг от друга, чтобы, перемещая между ними линзу, можно было получить два отчетливых изображения (увеличенное и уменьшенное) предмета.
3. Измерить расстояние  $L$  (рисунок 3) между экраном и предметом.
4. Перемещая линзу, получить увеличенное изображение предмета на экране, заметить по линейке положение линзы. Затем, передвигая линзу, получить уменьшенное изображение предмета. Измерить расстояние  $l$  между двумя положениями линзы.
5. Меняя положение экрана и линзы, повторить измерения еще два раза.
6. По формуле (6) вычислить фокусное расстояние собирающей линзы. Рассчитать его среднее значение. Оценить погрешности измерений.
7. Используя среднее значение фокусного расстояния, по формуле (1) рассчитать оптическую силу линзы.
8. Записать результаты измерений и вычислений в таблицу 2.

Таблица 2 - Результаты измерений и вычислений

№	$L$ , м	$l$ , м	$f$ , м	$f_{ср}$ , м	$\Delta f$ , м	$\Delta f_{ср}$ , м	$\frac{\Delta f \cdot 100\%}{f_{ср}}$	$D_{ср}$ , дптр
1								
2								
3								

## Вычисления к лабораторной работе № 5

### Контрольные вопросы защиты лабораторной работы № 5

1. Что называется линзой?
2. Какие существуют виды линз? Дать им определение.
3. Дать определение фокуса и фокусного расстояния линзы.
4. Чем отличаются фокусы и фокусные расстояния собирающей и рассеивающей линз?
5. Дать определение и записать формулу оптической силы линзы.
6. Записать формулу оптической силы системы линз.
7. Нарисовать и объяснить принцип построения изображения в собирающей линзе.
8. Объяснить принцип определения фокусного расстояния собирающей линзы с помощью формулы тонкой линзы.
9. Записать формулу тонкой линзы.
10. Объясните принцип определения фокусного расстояния линзы методом Бесселя.
11. Записать формулу фокусного расстояния линзы методом Бесселя.

## Лабораторная работа № 6

### Определение концентрации раствора сахарозы с помощью рефрактометра

**Цель работы:** изучить принцип работы и назначение рефрактометра, научиться определять концентрацию и абсолютный показатель преломления раствора сахарозы с помощью рефрактометра, установить зависимость абсолютного показателя преломления и скорости света в растворах от их концентрации.

**Литература:** [1] §115; [2] §123; [3] гл. 29.

**Приборы и принадлежности:** рефрактометр, сосуд с дистиллированной водой, сосуды с исследуемыми растворами сахарозы.

#### Теория опыта

**Свет** - это электромагнитная волна.

В однородной среде свет распространяется прямолинейно. При переходе света из одной среды в другую изменяется скорость распространения световых волн, а вследствие этого изменяется и направление распространения света. В каждой среде скорость света изменяется по-разному.

Для характеристики способности вещества изменять скорость распространения электромагнитных волн используется **абсолютный показатель преломления вещества** - величина, которая показывает, во сколько раз скорость света в вакууме больше скорости света в данной среде:

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

где  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с - скорость света в вакууме.

Следовательно, **скорость света в данной среде** можно определить по формуле:

$$v = \frac{3 \cdot 10^8}{n} \quad (2)$$

Из двух сред, имеющих разные показатели преломления, *среда с меньшим показателем преломления*, в которой свет распространяется быстрее, называется **оптически менее плотной**, а среда с большим показателем преломления, в которой свет распространяется медленнее, называется **оптически более плотной**.

На границе раздела двух сред свет частично отражается и частично преломляется.

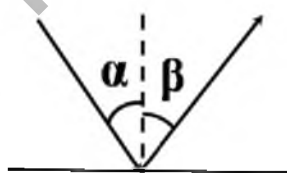


Рисунок 1

**Отражение** – это явление, когда свет, попадая на границу раздела двух сред, возвращается в первоначальную среду (рисунок 1).

**Угол падения  $\alpha$**  - угол между падающим лучом и перпендикуляром.

**Угол отражения  $\beta$**  - угол между отраженным лучом и перпендикуляром.



### Законы отражения света:

1. Луч падающий, луч отраженный и перпендикуляр, восстановленный к границе раздела двух сред в точке падения луча, лежат в одной плоскости.
2. Угол отражения равен углу падения:

$$\alpha = \beta \quad (3)$$

**Преломление** - это явление, когда свет из одной среды переходит в другую (рисунок 2).

**Угол преломления  $\gamma$**  - угол между преломленным лучом и перпендикуляром.

При переходе света из одной среды в другую может наблюдаться два случая:

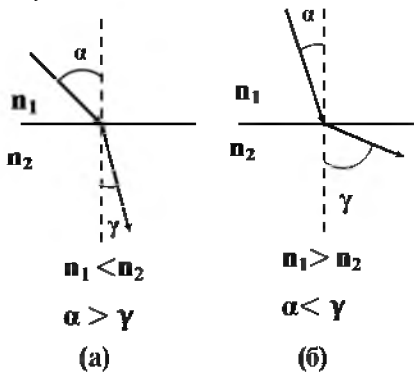


Рисунок 2

1).  $n_1 < n_2$  (см. рисунок 2 (а)), т.е. свет переходит из оптически менее плотной среды в оптически более плотную среду, например, из воздуха в стекло. При этом угол падения света  $\alpha$  больше угла преломления  $\gamma$ .

2).  $n_1 > n_2$  (см. рисунок 2 (б)), т.е. свет переходит из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду, например, из стекла в воздух. При этом угол падения света  $\alpha$  меньше угла преломления  $\gamma$ .

### Законы преломления света:

1. Луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, восстановленный к границе раздела двух сред в точке падения луча, лежат в одной плоскости.
2. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная, равная отношению показателей преломления данных двух сред:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad (4)$$

**Относительный показатель преломления  $n_{21}$**  показывает, во сколько раз скорость света в первой среде больше скорости света во второй:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}, \quad (5)$$

где  $n_1$  – абсолютный показатель преломления первой среды;  
 $n_2$  – абсолютный показатель преломления второй среды.

Рассмотрим случай, когда, свет переходит из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную. В этом случае, угол преломления будет больше угла падения. При увеличении угла падения света угол преломления будет тоже увеличиваться. При определенном угле падения, называемом **предельным углом полного внутреннего отражения  $\alpha_{\text{пр}}$** , угол преломления  $\gamma$  станет равен  $90^\circ$  (рисунок 3).

Явление, при котором при переходе света из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную угол преломления равен  $90^\circ$ , называется **явлением полного внутреннего отражения**.

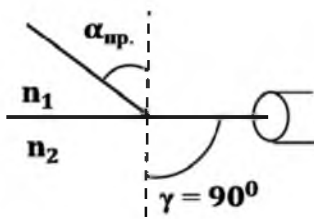


Рисунок 3

Определим предельный угол полного внутреннего отражения. Запишем 2-й закон преломления:  $\frac{\sin \alpha_{np.}}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1}$ . Так

как  $\sin 90^\circ = 1$ , то закон преломления для случая полного внутреннего отражения примет вид:

$$\sin \alpha_{np.} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad (6)$$

На явлении полного внутреннего отражения света работают приборы, называемые **рефрактометрами**. С помощью рефрактометра определяют абсолютный показатель преломления и концентрацию растворенного вещества, например, содержание белка в сыворотке крови.

Основу оптики рефрактометра составляют две прямоугольные призмы 2 и 1 (рисунок 4), между которыми помещается тонкий слой исследуемого вещества. Верхняя призма 2 - осветительная, а нижняя призма 1 - измерительная. Свет от источника

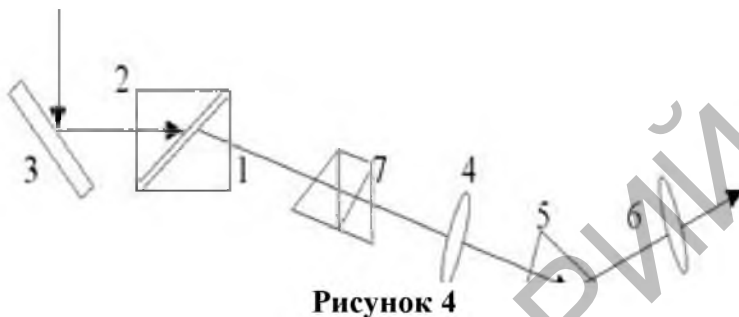


Рисунок 4

зеркалом 3 направляется на боковую грань осветительной призмы. При выходе через ее

матовую грань свет рассеивается. Лучи рассеянного света проходят через слой жидкости и входят в измерительную призму под всевозможными углами. А внутри измерительной призмы лучи проходят только по направлениям, лежащим внутри предельного угла  $\alpha_{np.}$ . Выходя из призмы, лучи попадают в зрительную трубу, с помощью которой наблюдают границу светотени. Зрительная труба состоит из объектива (4), отражательной (поворотной) призмы (5), изменяющей направление распространения света на  $90^\circ$  к наблюдателю, и окуляра (6). Наблюдаемая граница светотени может быть в большей или меньшей степени окрашена и расплывчата. Для устранения этого в рефрактометре применяется призма прямого зрения (7).

В объективе поле зрения разделено на светлую и темную половины. Установив визирную линию на границу раздела темного и светлого полей, по шкалам прибора определяют концентрацию и показатель преломления.

В медицине и ветеринарии рефрактометры используются как анализаторы состава газов и жидких растворов.

В настоящее время явление полного внутреннего отражения нашло широкое применение в волоконной оптике. Кроме этого, важно знать, что сетчатка глаза человека является высокоорганизованной волоконно-оптической системой, состоящей примерно из  $130 \cdot 10^6$  волокон.

## Порядок выполнения работы

### Задание № 1. Определение нуля прибора

1. Открывают верхнюю камеру, промывают и вытирают досуха соприкасающиеся плоскости призмы.
2. Наносят стеклянной палочкой на поверхность измерительной призмы 1-2 капли дистиллированной воды.
3. Поворачивая окуляр, добиваются четкого изображения поля зрения.
4. Глядя в окуляр, перемещают источник света, добиваясь наибольшей контрастности поля зрения.
5. Совмещают визирную линию с границей светотени, перемещая ручку.
6. По левой шкале отсчитывают нуль прибора (т.е. показатель преломления дистиллированной воды), а по правой шкале - концентрацию (в случае дистиллированной воды концентрация равна нулю).

### Задание № 2. Определение показателя преломления и концентрации растворов сахарозы

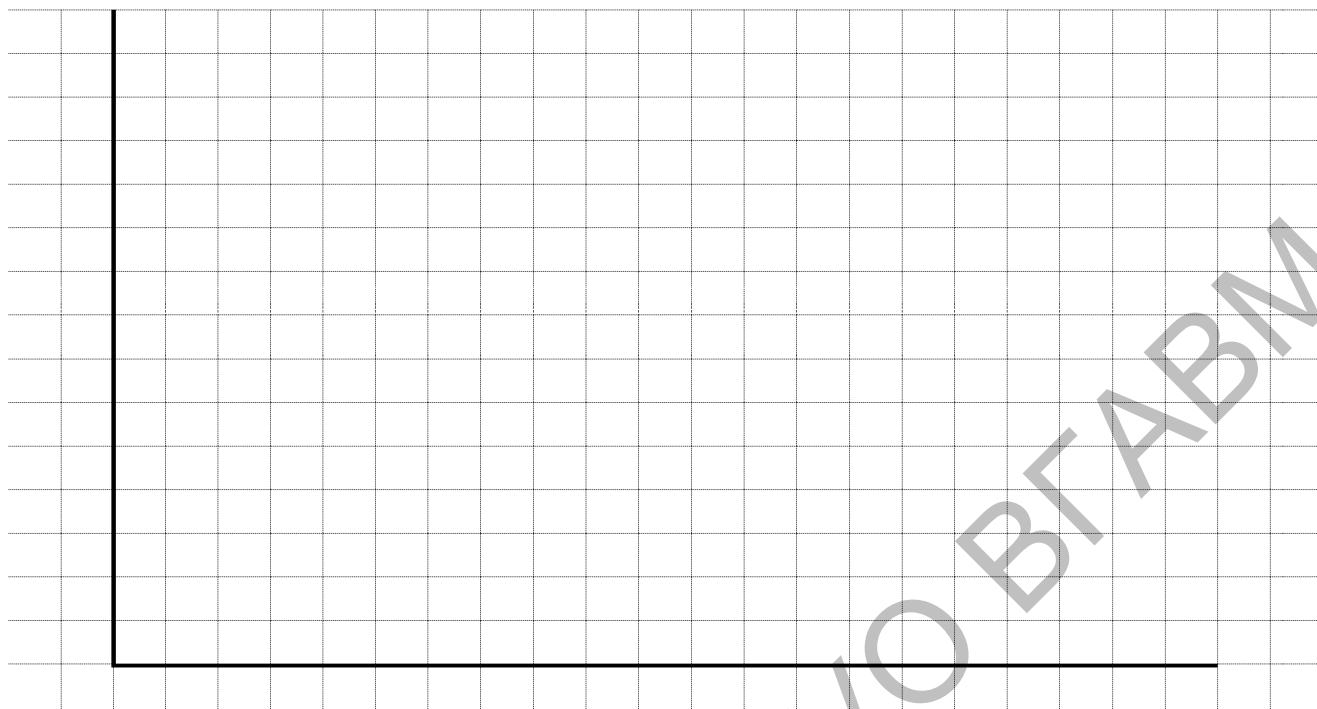
1. На поверхность измерительной призмы наносят 1-2 капли исследуемого раствора в порядке номеров, указанных на сосудах.
2. Глядя в окуляр, по левой шкале отсчитывают показатель преломления данного раствора, а по правой - его концентрацию.
3. По формуле (2) определяют скорость света в растворах с различной концентрацией.
4. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу.

Таблица - Результаты измерений и вычислений

№ раствора	$n$	$C, \%$	$v, 10^8 \text{ м/с}$
Дист. вода			
1			
2			
3			
4			
5			

5. Построить график зависимости показателя преломления от концентрации  $n = f(C)$ .
6. Построить график зависимости скорости света в растворе от концентрации  $v = f(C)$ .
7. Сделать вывод о зависимости показателя преломления от концентрации растворов.
8. Сделать вывод о зависимости скорости света в растворах от их концентрации.

**График зависимости  $n = f(C)$**



**Вывод:**

**График зависимости  $\nu = f(C)$**



**Вывод:**

## Вычисления к лабораторной работе № 6

### Контрольные вопросы защиты лабораторной работы № 6

1. Дать определение и записать формулу абсолютного показателя преломления.
2. Дать определение оптически более плотной и оптически менее плотной среды.
3. Дать понятие явления отражения света.
4. Сформулировать законы отражения.
5. Дать понятие явления преломления света.
6. Нарисовать и объяснить два случая преломления света.
7. Сформулировать законы преломления света.
8. Дать определение и записать формулу относительного показателя преломления среды.
9. Нарисовать и объяснить случай полного внутреннего отражения света.
10. Записать и объяснить закон преломления для явления полного внутреннего отражения света.
11. Объяснить принцип работы и назначение рефрактометра.

## Лабораторная работа № 7

### Определение длины световой волны при помощи дифракционной решетки

**Цель работы:** изучить явления интерференции и дифракции света, научиться определять период дифракционной решетки и длину волны монохроматического света при помощи дифракционной решетки.

**Литература:** [1] §123,124; [2] §141,142; [3] гл. 27.

**Приборы и принадлежности:** дифракционная решетка, источник света, линейка с вертикальной шкалой, набор светофильтров.

#### Теория опыта

Волновые свойства света проявляются в явлениях интерференции, дифракции, поляризации и др.

Все электромагнитные волны имеют общую природу и отличаются друг от друга только длиной волны или частотой.

**Когерентные волны** – это волны, у которых одинаковые частоты, а разность фаз между колебаниями с течением времени не изменяется.

В природе когерентных источников не существует, поэтому когерентные волны получают разделением и последующим сведением световых лучей, исходящих из одного и того же источника. Практически это можно получить с помощью экранов и щелей, зеркал и преломляющих тел.

Пусть от когерентных источников света  $S_1$  и  $S_2$  распространяются волны. В некоторой точке эти волны накладываются друг на друга. В результате происходит перераспределение энергии - в одних точках энергия волны увеличивается, а в других - уменьшается. Это явление называется *интерференцией*.

**Интерференция света** – это явление наложения в пространстве когерентных световых волн, при котором в разных его точках возникает усиление или ослабление амплитуды результирующей волны.

Интерференцию света обычно рассматривают не в одной точке, а на плоском экране. Поэтому говорят об интерференционной картине, под которой понимают чередование светлых (максимумов - max) и темных (минимумов - min) полос.

Наличие максимумов или минимумов в данной точке зависит от *оптической разности хода волн  $\Delta l$*  (рисунк 1).

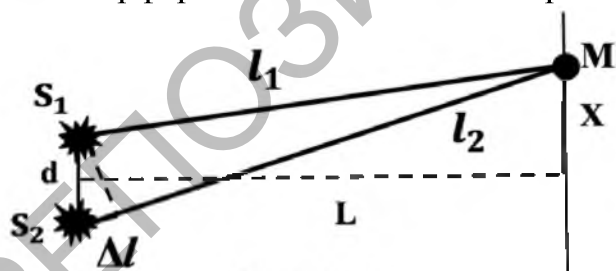


Рисунок 1

Если две интерферирующие волны испускаются одним источником света, то **разность хода** - это геометрическая разность длин путей, по которым два интерферирующих луча от источника достигли одной точки экрана:

$$\Delta l = l_2 - l_1 \quad (1)$$

**Максимум интенсивности** при интерференции наблюдается тогда, когда оптическая разность хода равна целому числу длин волн (четному числу полуволн):

$$\Delta l = k \cdot \lambda = 2 \cdot k \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – длина волны;

$k$  - целое число.

**Минимум интенсивности** при интерференции наблюдается тогда, когда оптическая разность хода равна нечетному числу полуволн:

$$\Delta l = (2 \cdot k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (3)$$

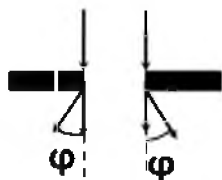
Наиболее известное проявление интерференции, с которым мы встречаемся в повседневной жизни – радужное окрашивание мыльных пузырей или тонких пленок бензина на воде или асфальте.

Интерференция нашла широкое применение в различных областях науки и техники, так как позволяет значительно увеличить точность измерений. Приборы, принцип действия которых основан на явлении интерференции, называются *интерферометрами* и используются для измерений показателей преломления прозрачных сред, длин волн, угловых размеров звезд.

Явление интерференции в тонких пленках используется для создания зеркал, фильтров, просветления покрытий, контроля качества шлифовки поверхностей.

**Дифракцией** называется явление огибания светом малых препятствий (неоднородностей среды), сопровождающееся проникновением световой волны в область геометрической тени.

В общем смысле дифракцией называется любое отклонение распространения света от законов геометрической оптики (рисунок 2).



Угол, на который отклоняется луч от первоначального направления, называется **углом дифракции φ**. Угол дифракции тем больше, чем больше длина волны и чем меньше толщина щели.

Рисунок 2

Явление дифракции объясняется на основании **принципа Гюйгенса – Френеля** (рисунок 3): каждая точка среды (1, 2, ..., N), до которой дошел фронт волны, сама становится источником вторичных сферических волн, которые в боковом направлении гасятся, а в прямом - усиливаются. Касательная к вторичным сферическим волнам называется **вторичным фронтом** волны.



Рисунок 3

Дифракционная картина часто возникает в естественных условиях, например цветные кольца, окружающие источник света, наблюдаемые сквозь туман, обусловлены дифракцией света на водяных каплях.

Наблюдать четкую дифракционную картину можно при помощи дифракционной решетки.

**Дифракционная решетка** – это оптическое устройство, представляющее собой совокупность большого числа узких параллельных щелей, разделенных непрозрачными для света промежутками.

Дифракционную решетку можно получить нанесением непрозрачных паралин (штрихов) на стеклянную пластину, при этом щели будут пропускать свет, а штрихи – рассеивают и не пропускают свет.

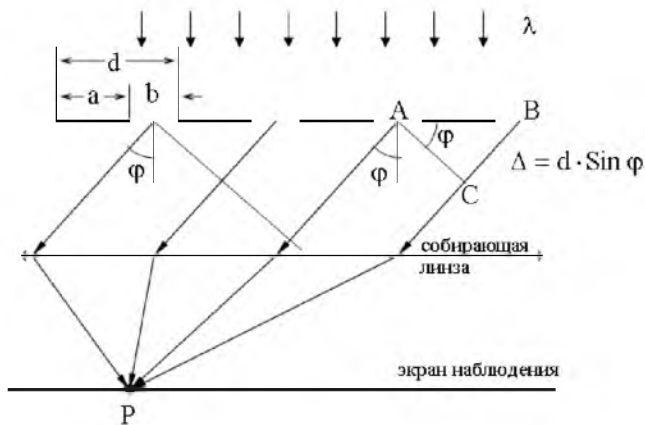


Рисунок 4

Если ширина прозрачной щели -  $a$ , а ширина непрозрачных промежутков -  $b$ , то величина  $d = a + b$  называется **периодом дифракционной решетки**.

Пусть на дифракционную решетку падает пучок параллельных лучей перпендикулярно плоскости решетки (рисунок 4). При прохождении света через дифракционную решетку образуются когерентные вторичные волны, которые распространяются по всем направлениям,

и наблюдается дифракция. За решеткой помещают собирающую линзу, в фокусе которой располагается экран. Линза фокусирует лучи, идущие параллельно, в одной точке. В этой точке происходит сложение волн и их взаимное усиление (max) и ослабление (min). На экране в месте наложения лучей будет наблюдаться дифракционная картина.

Рассмотрим треугольник ABC.  $BC = \Delta l$  - разность хода лучей,  $AB = d$  - постоянная дифракционной решетки. Тогда  $\sin \varphi = \frac{BC}{AB} = \frac{\Delta l}{d}$ . Отсюда следует, что

$$\Delta l = d \cdot \sin \varphi \quad (4)$$

В зависимости от разности хода лучей в точке P может наблюдаться максимум или минимум. Сравнивая выражения (2), (3) и (4) получим условия максимума и минимума для интерференции на дифракционной решетке.

**Условие максимума:** максимумы будут наблюдаться в направлении тех углов, для которых на разности хода укладывается целое число длин волн:

$$d \cdot \sin \varphi_{\max} = k \cdot \lambda, \quad (5)$$

где число  $k = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$  называется **порядком спектра**.

Если  $k = 0$ , то будет центральный максимум.

Формулу (5) называют **формулой дифракционной решетки**.

**Условие минимума:** минимум будет наблюдаться в направлении тех углов, для которых на разности хода укладывается нечетное число длин полуволн:

$$d \cdot \sin \varphi_{\min} = (2 \cdot k + 1) \cdot \lambda / 2 \quad (6)$$

Если на решетку падает белый свет, то направления, при которых наблюдаются максимумы для разных длин волн, будут различными, что очевидно из формулы (5). Поэтому при дифракции произойдет разложение белого света в



спектр. На месте каждого максимума, кроме центрального, будет сплошной спектр, обращенный фиолетовым концом к центру.

При помощи дифракционной решетки, зная  $\varphi$ ,  $k$ ,  $d$ , используя выражение (4), можно определить длину волны  $\lambda$ . Порядок спектра определяется последовательным счетом от центрального  $\text{max}$  (рисунок 5). На штативе (1) шарнирно укрепляется горизонтальная линейка (2). На ней размещаются дифракционная решетка (3) (обращенная к глазу) и передвижная вертикальная шкала (4) с прорезью (обращена к источнику света, в которой подвижно закреплены различные светофильтры).

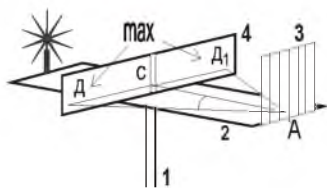


Рисунок 5

Если линейку (4) расположить так, чтобы источник света был виден в прорезь, то, глядя через дифракционную решетку, мы увидим на темной шкале по обе стороны прорези спектры 1-го, 2-го, 3-го и более высоких порядков. Если на пути света поставить светофильтр, то вместо спектров будут наблюдаться максимумы только одного определенного цвета, т.е. максимумы, соответствующие определенной длине волны света  $\lambda$ . Точка А соответствует расположению дифракционной решетки. Точка С - прорезь в шкале (место, где находятся светофильтры). Точка Д соответствует положению  $\text{max}$  некоторого порядка, АС - расстояние по горизонтальной линейке (2) от решетки до вертикальной линейки, ДС - расстояние по вертикальной шкале от прорези С до наблюдаемого  $\text{max}$ .

Учитывая, что  $ДС = ДД_1 / 2$ , окончательное выражение для вычисления порядка дифракционной решетки имеет вид:

$$d = \frac{k \cdot \lambda \cdot 2 \cdot АС}{ДД_1} \quad (7)$$

Выражая из формулы (7)  $\lambda$ , получим формулу для нахождения длины волны света при помощи дифракционной решетки:

$$\lambda = \frac{d_{\text{ср.}} \cdot ДД_1}{2 \cdot k \cdot АС} \quad (8)$$

### Порядок выполнения работы

#### Задание № 1. Определение периода дифракционной решетки

1. Включить источник света в электрическую сеть.
2. Вставить в рамку дифракционную решетку так, чтобы ее штрихи были направлены параллельно щели (С) на вертикальной линейке (4).
3. Перекрыть ход световых лучей от источника света к решетке красным светофильтром (с помощью светофильтров в вертикальной линейке (4)). Длина волны красного цвета  $\lambda = 700 \text{ нм}$ .
4. Измерить расстояние АС от решетки до линейки (4) и расстояние ДД<sub>1</sub> между красными максимумами одинакового порядка для  $k = 1; 2$  и 3.
5. По формуле (7) рассчитать период дифракционной решетки.
6. Рассчитать среднее значение периода дифракционной решетки, абсолютную и относительную погрешности.

7. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 1.

**Таблица 1 - Результаты измерений и вычислений**

№	k	$\lambda$ , нм	АС, м	ДД <sub>l</sub> , м	d, нм	d <sub>ср.</sub> , нм	$\Delta d$ , нм	$\frac{\Delta d \cdot 100\%}{d_{ср.}}$
1	1	700						
2	2							
3	3							

**Задание № 2. Определение длины световой волны**

1. Считая период дифракционной решетки известным из первого задания, занести его среднее значение во вторую таблицу.
2. Поставить на пути света от источника светофильтр, длину волны света которого вы хотите определить (зеленый или синий).
3. Измерить аналогично заданию № 1 расстояния АС и ДД<sub>l</sub> для данного света.
4. По формуле (8) рассчитать неизвестную длину волны.
5. Рассчитать среднее значение длины волны, абсолютную и относительную погрешности измерений.
6. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 2.

**Таблица 2 - Результаты измерений и вычислений**

№	k	d <sub>ср.</sub> , нм	АС, м	ДД <sub>l</sub> , м	$\lambda$ , нм	$\lambda_{ср.}$ , нм	$\Delta \lambda$ , нм	$\frac{\Delta \lambda \cdot 100\%}{\lambda_{ср.}}$
1	1							
2	2							
3	3							

**Контрольные вопросы защиты лабораторной работы № 7**

1. Какие волны называют когерентными? Как их получают?
2. В чем состоит явление интерференции?
3. Что представляет собой интерференционная картина?
4. Дать понятие и записать формулу оптической разности хода волн.
5. Сформулировать условие интерференционного максимума и минимума.
6. В чем состоит явление дифракции света? При каких условиях она возникает?
7. Что называют углом дифракции? От чего он зависит?
8. Сформулируйте принцип Гюйгенса-Френеля.
9. Что представляет собой дифракционная решетка?
10. Что понимают под периодом дифракционной решетки?
11. Каково условие возникновения главных максимумов (минимумов) при прохождении света через дифракционную решетку?

## Лабораторная работа № 8

### Изучение основных законов внешнего фотоэффекта

**Цель работы:** изучить основные законы внешнего фотоэффекта; научиться снимать световую, вольтамперную и спектральную характеристики фотоэлемента; установить зависимости: фототока от светового потока, силы тока от напряжения и коэффициента чувствительности от длины волны.

**Литература:** [1] §68; [3] гл. 30 §4.

**Приборы и принадлежности:** фотоэлемент, микроамперметр, выпрямитель, источник света, вольтметр, реостат, линейка, провода.

#### Теория опыта

**Фотоэффект** – явление выбивания электронов из атомов или молекул вещества под действием электромагнитного излучения.

Впервые фотоэффект был обнаружен в 1887 году немецким физиком Г. Герцем, что явилось экспериментальным обоснованием квантовой теории света.

Если оторванные от своих атомов или молекул электроны остаются внутри вещества в качестве свободных носителей заряда, то фотоэффект называется **внутренним**. Внутренний фотоэффект наблюдается в некоторых полупроводниках и в меньшей степени - у диэлектриков.

Если электроны, выбитые электромагнитным излучением, вылетают за пределы вещества, фотоэффект называют **внешним**. Внешний фотоэффект наблюдается главным образом у металлов.

Явление внешнего фотоэффекта впервые было исследовано в 1890 году русским физиком Столетовым А. Г.

Схема опытов Столетова по изучению внешнего фотоэффекта изображена на рисунке 1. В вакуумной трубке помещают отрицательно заряженный катод (К) и положительно заряженный анод (А), которые через потенциометр (Р) подключены к источнику напряжения. Напряжение между электродами измеряют вольтметром (V), ток в цепи - гальванометром (Г).

При освещении катода через кварцевое окно свет вырывает из него электроны, называемые **фотоэлектронами**. Они устремляются к аноду. В цепи появляется ток, называемый **фототоком**. Величину фототока измеряют гальванометром при различных значениях напряжения между катодом и анодом. По результатам измерений можно построить вольтамперную характеристику (рисунк 2). Из вольтамперной характеристики следует:

а) при отсутствии напряжения между электродами фототок отличен от нуля. Это объясняется наличием у фотоэлектронов при вылете кинетической энергии;

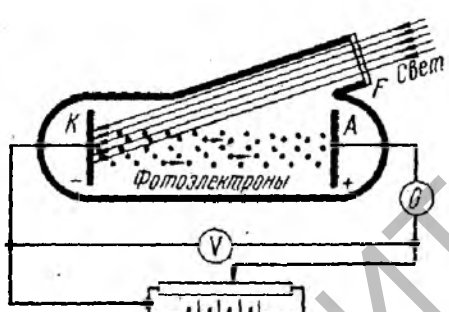


Рисунок 1

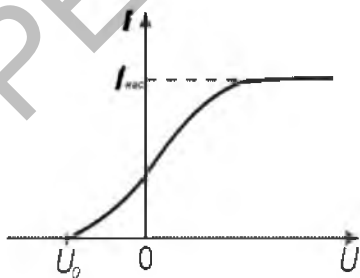


Рисунок 2

б) при некотором напряжении между анодом и катодом сила фототока перестает зависеть от напряжения – фототок достигает насыщения, то есть все электроны, испущенные катодом, достигают анода (см. рисунок 2).

**Сила фототока насыщения  $I_{нас}$**  определяется количеством электронов, испускаемых катодом под действием света, в единицу времени.

в) фотоэлектроны, испускаемые катодом, имеют различные начальные скорости, а значит и различные кинетические энергии. При уменьшении напряжения от 0 до  $-U_0$  фототок постепенно уменьшается и при напряжении  $U = -U_0$  полностью прекращается. Величину напряжения  $U_0$  называют **задерживающим напряжением**.

**Задерживающим напряжением** называется значение отрицательного напряжения  $U_0$ , при котором величина силы фототока  $I$  равна нулю.

Согласно теореме о кинетической энергии, работа задерживающего электрического поля равна изменению кинетической энергии фотоэлектронов. Значит, зная величину задерживающего напряжения, можно найти максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов:

$$A_z = \Delta E_k \Rightarrow e \cdot U_z = \frac{m \cdot v_{max}^2}{2} \quad (1)$$

Экспериментальные исследования, выполненные Столетовым, привели к установлению основных **законов внешнего фотоэффекта**:

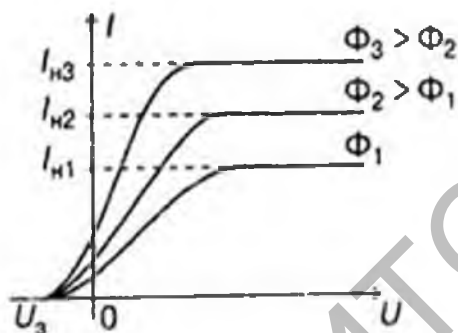


Рисунок 3

**1-й закон:** Сила фототока насыщения  $I_n$  прямо пропорциональна световому потоку (рисунок 3):

$$I_n = k \cdot \Phi, \quad (2)$$

где  $k$  – **фоточувствительность** вещества и выражается в микроамперах на люмен (мкА/лм).

**2-й закон:** Скорость фотоэлектронов возрастает с увеличением частоты падающего света и не зависит от его интенсивности.

**3-й закон:** Для каждого вещества существует красная граница внешнего фотоэффекта, то есть минимальная частота света  $\nu_{min}$ , при которой еще возможен фотоэффект.

Объяснение явления фотоэффекта было дано А. Эйнштейном (1905 г.) на основе гипотезы о том, что свет представляет собой не волну, а поток частиц – световых квантов, или фотонов. Он предложил уравнение, которое является частным случаем закона сохранения и превращения энергии применительно к фотоэффекту.

Согласно уравнению Эйнштейна:

энергия фотона расходуется электроном на совершение работы по выходу из вещества и сообщение электрону кинетической энергии:

$$h \cdot \nu = A_{\text{вых.}} + \frac{m \cdot v^2}{2}, \quad (3)$$

где  $h \cdot \nu$  - энергия фотона;

$h$  - постоянная Планка;

$\nu$  - частота электромагнитного излучения;

$A_{\text{вых.}}$  - работа выхода электрона из вещества;

$\frac{m \cdot v^2}{2}$  - кинетическая энергия выбитых электронов;

$m$  - масса электрона;

$v$  - скорость электрона.

**Работа выхода электрона**  $A_{\text{вых.}}$  - это работа, которую нужно совершить, чтобы вырвать электрон из вещества на поверхность.

Величина работы выхода зависит от химической природы вещества и состояния его поверхности.

Внешний фотоэффект является результатом взаимодействия фотонов с находящимися у поверхности металла электронами. При столкновении с одним из таких электронов фотон полностью передает ему свою энергию и, если она достаточно велика, электрон сможет преодолеть силы, удерживающие его в металле, и вылететь наружу. Каждый электрон выбивается из металла одним фотоном, поэтому его скорость определяется лишь энергией фотона, т.е. частотой падающего света (2-й закон фотоэффекта). Повышение интенсивности света приводит к увеличению плотности фотонов. Следовательно, увеличивается число соударений в единицу времени фотонов с электронами. Это объясняет прямую зависимость между интенсивностью падающего света и силой фототока (1-й закон фотоэффекта).

Третий закон фотоэффекта объясняется следующим образом. Так как **красная граница фотоэффекта** определяется минимальной частотой  $\nu_{\text{min}}$  падающего света, при которой начинается фотоэффект, то  $E = h \cdot \nu_{\text{min}}$  - минимальная энергия фотона, передаваемая электрону и идущая на совершение работы выхода  $A_{\text{вых.}}$  электрона из вещества. То есть  $A_{\text{вых.}} = h \cdot \nu_{\text{min}}$ .

Отсюда:

$$\nu_{\text{min}} = \frac{A_{\text{вых.}}}{h} \quad \text{или} \quad \lambda_{\text{max}} = \frac{h \cdot c}{A_{\text{вых.}}}, \quad (4)$$

так как частота и длина волны связаны соотношением  $\nu_{\text{min}} = \frac{1}{\lambda_{\text{max}}}$ .

Явление фотоэффекта нашло широкое практическое применение. На основе фотоэффекта разрабатываются и выпускаются многочисленные промыш-

ленные устройства. Среди них можно выделить фотоэлементы, используемые для регистрации световых потоков и применяемые в различных областях техники: связи, автоматике, телемеханике и т. д.

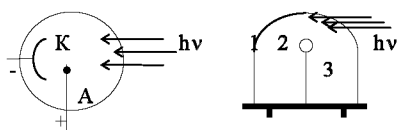


Рисунок 4

**Фотоэлементами** называют приборы, в которых фотоэффект используется для превращения энергии излучения в электрическую энергию.

Фотоэлементы бывают: вакуумные, газонаполненные, с запирающим слоем (вентильные).

В данной работе явление фотоэффекта изучается на промышленном фотоэлементе (рисунок 4), представляющем собой: 1 - стеклянный баллон, 2 - фотокатод в виде тонкого слоя металла, запыленного на одну из сторон баллона, 3 - металлический анод в виде кольца.

При освещении фотокатода из него вырываются электроны. Если между катодом и анодом приложить некоторую разность потенциалов, то электроны, перемещаясь под действием электрического поля от катода к аноду, создают электрический ток.

Важнейшими характеристиками фотоэлемента являются световая, вольт-амперная и спектральная, которые изучаются в данной работе.

**Световой характеристикой** называется зависимость фототока (при заданном напряжении на электродах фотоэлемента) от светового потока, т.е.  $I = f(\Phi)$ .

Световой поток можно определить по формуле:

$$\Phi = E \cdot S,$$

где  $S$  - площадь фотокатода;

$E$  - освещенность фотокатода.

В системе СИ единица измерения светового потока – лм (люмен):

$$[\Phi] = \text{кд} \cdot \text{ср} = \text{лм}$$

Так как освещенность рассчитывается по формуле:

$$E = \frac{J}{r^2},$$

где  $J$  - сила света;

$r$  - расстояние.

В системе СИ единица измерения освещенности - лк (люкс):

$$[E] = \text{лм}/\text{м}^2 = \text{лк}$$

В системе СИ единица измерения силы света - кд (кандела):

$$[J] = \text{кд}$$

Тогда формула светового потока примет вид:

$$\Phi = \frac{J \cdot S}{r^2} \quad (4)$$

**Вольтамперной характеристикой** называется зависимость тока от напряжения на электродах фотоэлемента при постоянном световом потоке:

$I = f(U)$ , при  $\Phi = \text{const}$ .

Интенсивность фотоэффекта зависит, как было показано выше, от длины волны падающего света. При одной и той же мощности излучения сила тока насыщения  $I_n$  получается различная для разных длин волн.

**Спектральной характеристикой** называется зависимость чувствительности фотоэлемента от длины волны падающего света.

### Порядок выполнения работы

#### Задание № 1. Снятие световой характеристики фотоэлемента

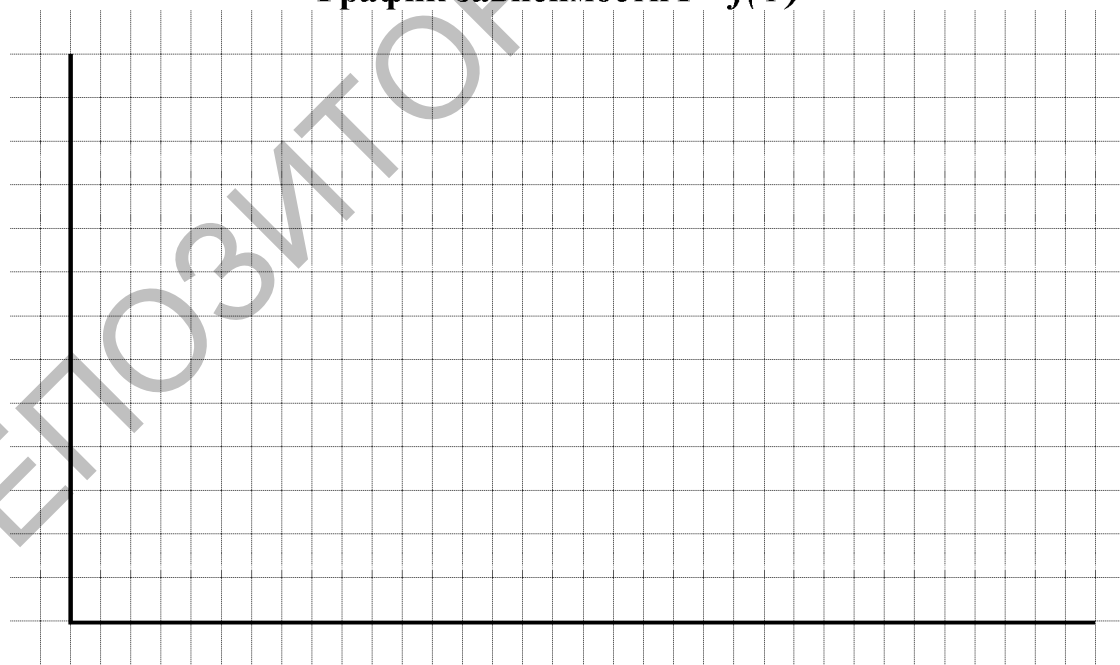
1. Включить источник света (напряжение на лампе 220 В).
2. Установить постоянное напряжение на фотоэлементе ( $U=30$  В).
3. Измерить величину фототока  $I$  при различных расстояниях  $r$  от источника света до фотоэлемента.
4. По формуле (4) рассчитать значения светового потока  $\Phi$ , падающего на фотокатод, при различных расстояниях  $r$ . Величину освещаемой поверхности фотокатода принять равной  $S=8 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>. Сила источника света  $J=20$  кд.
5. Данные измерений и вычислений занести в таблицу 1.

Таблица 1 - Результаты измерений и вычислений

Расстояние	$r$ , м				
Световой поток	$\Phi$ , лм				
Фототок	$I$ , мкА				

6. Построить график зависимости фототока от светового потока  $I = f(\Phi)$ .
7. Сделать вывод о зависимости фототока от светового потока.

#### График зависимости $I = f(\Phi)$



**Вывод:**

**Задание № 2. Снятие вольтамперной характеристики фотоэлемента**

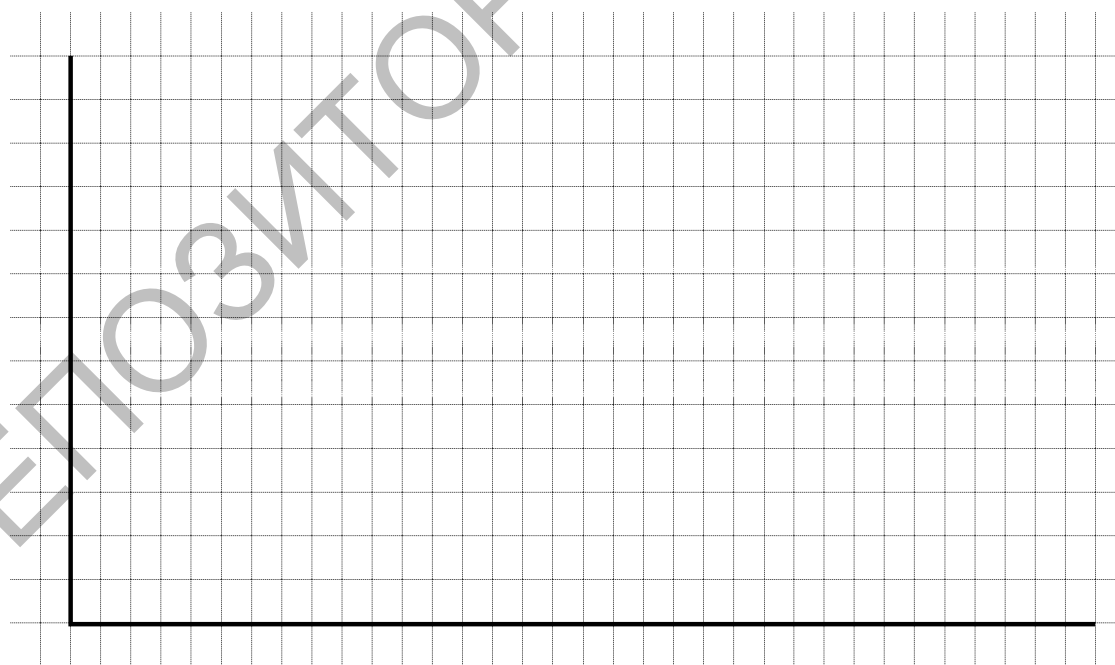
1. Включить источник света ( $U=220$  В).
2. Установить фотоэлемент на расстоянии  $r_1$  от источника света.
3. Измерить фототок при различном напряжении на фотоэлементе (напряжение изменять через 5 В) при постоянном световом потоке.
4. Аналогично измерить фототок при расстоянии  $r_2$ .
5. Вычислить  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  по формуле (4).
6. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 2.

**Таблица 2 - Результаты измерений и вычислений**

$r_1 =$			$r_2 =$		
$U, \text{В}$	$I_1, \text{мкА}$	$\Phi_1, \text{лм}$	$U, \text{В}$	$I_2, \text{мкА}$	$\Phi_2, \text{лм}$
5			5		
10			10		
15			15		
20			20		
25			25		
30			30		

7. Построить график зависимости фототока от напряжения  $I=f(U)$  для двух случаев светового потока (в одной системе координат).
8. Сделать вывод о зависимости силы тока от напряжения.

**График зависимости  $I = f(U)$**



**Вывод:**



### Задание № 3. Снятие спектральной характеристики фотоэлемента

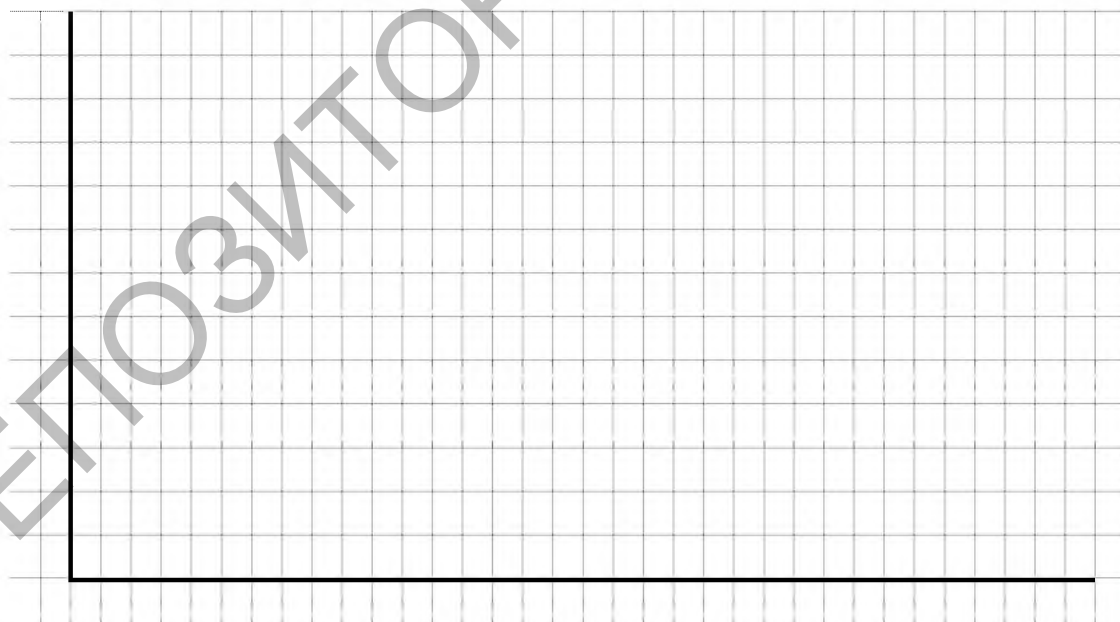
1. Включить источник света (220 В).
2. Установить напряжение на электродах фотоэлемента 30 В.
3. Установить в держателе красный светофильтр. Длину волны определить по таблице 4.
4. Измерить величину фототока для этого светофильтра при расстоянии  $r_1$ .
5. Аналогичные измерения произвести и для остальных светофильтров.
6. Рассчитать чувствительность фотоэлемента для различных длин волн по формуле  $k = I / \Phi$ .
7. Аналогичные измерения произвести при расстоянии  $r_2$ .
8. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 3.

Таблица 3 - Результаты измерений и вычислений

$r, \text{ м}$						
$\lambda, \text{ нм}$						
$I, \text{ мкА}$						
$k, \text{ мкА/лм}$						

9. Построить графики зависимости чувствительности фотоэлемента от длины волны  $k = f(\lambda)$  для двух расстояний в одной системе координат.
10. Сделать вывод о зависимости коэффициента чувствительности от длины волны.

#### График зависимости $k = f(\lambda)$



Вывод:

**Таблица 4 - Средняя длина волны спектрального участка  
для различных светофильтров**

№	Цвет	$\lambda_{\text{ср.}}$ , нм
1	Красный	760
2	Оранжевый	620
3	Желтый	580
4	Зеленый	550
5	Голубой	490
6	Синий	450
7	Фиолетовый	410

**Контрольные вопросы защиты лабораторной работы № 8**

1. Что называют фотоэффектом?
2. Какой фотоэффект называется внешним?
3. Какой фотоэффект называется внутренним?
4. Дайте определение фототока насыщения. От чего зависит число фотоэлектронов, вырываемых в единицу времени с поверхности вещества?
5. Как зависит фототок от напряжения?
6. Что понимают под задерживающим напряжением? Чем определяется его величина?
7. От чего зависит скорость фотоэлектронов?
8. Что такое красная граница фотоэффекта? От чего зависит ее величина?
9. На что расходуется энергия фотона, поглощенного фотоэлектроном?
10. Запишите уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.
11. Как объяснить законы внешнего фотоэффекта на основании квантовой теории света и уравнения Эйнштейна?
12. Что представляют собой фотоэлементы? Где они применяются?
13. Дайте определение световой характеристики фотоэлемента.
14. Дайте определение вольтамперной характеристики фотоэлемента.
15. Дайте определение спектральной характеристики фотоэлемента.

## Приложение 1

### Приставки для обозначения десятичных кратных и дольных единиц

Название приставки	Обозначение	Коэффициент умножения	Пример
Экса	Э	$10^{18}$	Эксаметр (Эм)
Пета	П	$10^{15}$	Петаметр (Пм)
Тера	Т	$10^{12}$	Тераджоуль (ТДж)
Гига	Г	$10^9$	Гигаом (ГОм)
Мега	М	$10^6$	Мегаом (МОм)
Кило	К	$10^3$	километр (км)
Гекто	Г	$10^2$	гектоватт (ГВт)
Дека	Да	$10^1$	декалитр (дал)
Деци	Д	$10^{-1}$	дециметр (дм)
Санتي	С	$10^{-2}$	сантиметр (см)
Милли	М	$10^{-3}$	миллиампер (мА)
Микро	мк, $\mu$ (греч. «мю»)	$10^{-6}$	микровольт (мкВ, $\mu$ В)
Нано	Н	$10^{-9}$	нанометр (нм)
Пико	П	$10^{-12}$	пикофарада (пФ)
Фемто	Ф	$10^{-15}$	фемтометр (фм)
Атто	А	$10^{-18}$	аттокулон (аКл)

**Примечание:** при произношении ударение не должно приходиться на приставку.

## Приложение 2

### Основные физические константы в СИ

Название	Символ	Значение
Гравитационная постоянная	$\gamma$	$6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$
Скорость света в вакууме	$c$	$2,99793 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$
Постоянная Авогадро	$N_A$	$6,022252 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Универсальная газовая постоянная	$R$	$8,31510 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$
Постоянная Больцмана	$k$	$1,38054 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$
Постоянная Фарадея	$F$	$9,6487 \cdot 10^4 \text{ Кл} \cdot \text{моль}^{-1}$
Постоянная Планка	$h$	$6,62491 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Постоянная Стефана-Больцмана	$\sigma$	$5,6607 \cdot 10^{-8} \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{К}^{-4}$
Постоянная Вина	$b$	$2,8979 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$
Заряд электрона	$e$	$1,60021 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Масса покоя электрона	$m_e$	$9,1091 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Масса покоя протона	$m_p$	$1,67261 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$

## Литература

1. Белановский, А. С. Основы биофизики в ветеринарии: учебное пособие для студентов вузов по специальности «Ветеринария» / А. С. Белановский. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Дрофа, 2007. – 332 с. : ил.
2. Грабовский, Р. И. Курс физики: учебное пособие для высших сельскохозяйственных вузов / Р. И. Грабовский. – 6-е изд., перераб. и доп. – Москва: Высшая школа, 2004. – 605 с. : ил.
3. Ливенцев, Н. М. Курс физики для медвузов : учебник / Н. М. Ливенцев. – 5-е изд., переб. и доп. – Москва : Высшая школа, 1999. – 648 с. : ил.
4. Ремизов, А. Н. Курс физики, электроники и кибернетики для медицинских институтов : учебник для студентов медицинских специальностей вузов / А. Н. Ремизов. – Москва : Высшая школа, 1982. – 607 с. : ил.
5. Соболевский, В. И. Физика и биофизика : учебно-методическое пособие для выполнения лабораторных работ / В. И. Соболевский, О. В. Пышненко. – Витебск : ВГАВМ, 2006. – 81 с. : табл., рис.
6. Соболевский, В. И. Механизм электрогенеза в клетках : учебно-методическое пособие по изучению дисциплины «Физика и биофизика» для студентов вузов по спец. «Зоотехния», «Ветеринарная медицина» / В. И. Соболевский ; Витебская государственная академия ветеринарной медицины, Кафедра физики и биофизики. – Витебск, 2003. – 30 с.

## КАФЕДРА РАДИОЛОГИИ И БИОФИЗИКИ

Кафедра радиологии и биофизики (до декабря 2012 года - кафедра физики и основ высшей математики) была организована в Витебском ветеринарном институте в ноябре 1931 года.

Первым заведующим кафедрой физики 24 ноября 1931 года назначен ассистент Стурницкий В.Ф., руководивший кафедрой до 17 декабря 1935 года. С 1935 по 1937 год кафедрой заведовал ассистент Куличенко М.И. В 1937 году кафедра физики была переименована в кафедру физики и математики, которой руководили в разное время Шарупич В.Т., Слесаренко И.А., Рабинович И.В., Круглов Н.А., Булавский Н.Н., Крашенинников А.А.

В 1969 году в Витебском ветеринарном институте после реорганизации образована кафедра физики и основ высшей математики, которой с 1969 по 1979 год руководил Кляц Аркадий Яковлевич. В 1976 году защитил кандидатскую диссертацию на тему «Влияние микроэлементов на физико-химические свойства эритроцитов».

С ноября 1979 по 2006 год и в период с 2009 по 2011 год возглавлял кафедру Соболевский Владимир Иванович. В 1989 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата биологических наук на тему «Влияние постоянного магнитного поля на физико-химические свойства крови и неспецифическую резистентность животных».

В 2009-2015 годы руководили коллективом кафедры Наумов А.Д., Клименков К.П. С декабря 2015 года заведующим кафедрой назначена кандидат ветеринарных наук, доцент Братушкина Е.Л.

В настоящее время на кафедре работают 11 сотрудников. Восемь преподавателей - 1 доктор биологических наук, доцент (Наумов А.Д), три доцента, кандидата ветеринарных наук (Братушкина Е.Л., Клименков К.П., Мехова О.С.), четыре старших преподавателя (Коваленок Н.П., Петроченко И.О., Толкач А.Н., Толкач Е.В.), имеющих высшее педагогическое образование по специальности «Физика и высшая математика».

На кафедре занимаются студенты 1-6-х курсов биотехнологического факультета, факультетов ветеринарной медицины и заочного обучения. Преподавателями кафедры осуществляется учебный процесс в Пинском и Речицком филиалах академии. Проводится переподготовка слушателей, читаются лекции и проводятся занятия на ФПКиПК.

Научно-исследовательская работа на кафедре выполняется по основным направлениям: влияние электромагнитных излучений на физико-химические свойства крови; пути активизации познавательной деятельности студентов в учебном процессе; патология органов дыхания и пищеварения у животных; радиационный мониторинг объектов внешней среды.

***По вопросам сотрудничества обращаться:  
(80212) 51-73-70***

## **УО «ВИТЕБСКАЯ ОРДЕНА «ЗНАК ПОЧЕТА» ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ ВЕТЕРИНАРНОЙ МЕДИЦИНЫ»**

Витебская ордена «Знак Почета» государственная академия ветеринарной медицины является старейшим учебным заведением в Республике Беларусь, ведущим подготовку врачей ветеринарной медицины, ветеринарно-санитарных врачей, провизоров ветеринарной медицины и зооинженеров.

Вуз представляет собой академический городок, расположенный в центре города на 17 гектарах земли, включающий в себя единый архитектурный комплекс учебных корпусов, клиник, научных лабораторий, библиотеки, студенческих общежитий, спортивного комплекса, Дома культуры, столовой и кафе, профилактория для оздоровления студентов. В составе академии 5 факультетов: ветеринарной медицины; биотехнологический; повышения квалификации и переподготовки кадров агропромышленного комплекса; заочного обучения; довузовской подготовки, профориентации и маркетинга. В ее структуру также входят Аграрный колледж УО ВГАВМ (п. Лужесно, Витебский район), филиалы в г. Речице Гомельской области и в г. Пинске Брестской области, первый в системе аграрного образования НИИ прикладной ветеринарной медицины и биотехнологии (НИИ ПВМиБ).

В настоящее время в академии обучается около 6 тысяч студентов, как из Республики Беларусь, так и из стран ближнего и дальнего зарубежья. Учебный процесс обеспечивают около 330 преподавателей. Среди них 7 академиков и членов-корреспондентов Академии наук, 21 доктор наук, 19 профессоров, более чем две трети преподавателей имеют ученую степень кандидатов наук.

Помимо того, академия ведет подготовку научно-педагогических кадров высшей квалификации (кандидатов и докторов наук), переподготовку и повышение квалификации руководящих кадров и специалистов агропромышленного комплекса, преподавателей средних специальных сельскохозяйственных учебных заведений.

Научные изыскания и разработки выполняются учеными академии на базе НИИ ПВМиБ, 24 кафедральных научно-исследовательских лабораторий, учебно-научно-производственного центра, филиалов кафедр на производстве. В состав НИИ входит 3 отдела: научно-исследовательских экспертиз, биотехнологический, экспериментально-производственных работ. Располагая уникальной исследовательской базой, научно-исследовательский институт выполняет широкий спектр фундаментальных и прикладных исследований, осуществляет анализ всех видов биологического материала (крови, молока, мочи, фекалий, кормов и т.д.) и ветеринарных препаратов, кормовых добавок, что позволяет с помощью самых современных методов выполнять государственные тематики и заказы, а также на более высоком качественном уровне оказывать услуги предприятиям агропромышленного комплекса. Активное выполнение научных исследований позволило получить сертификат об аккредитации академии Национальной академией наук Беларуси и Государственным комитетом по науке и технологиям Республики Беларусь в качестве научной организации.

Обладая большим интеллектуальным потенциалом, уникальной учебной и лабораторной базой, вуз готовит специалистов в соответствии с европейскими стандартами, является ведущим высшим учебным заведением в отрасли и имеет сертифицированную систему менеджмента качества, соответствующую требованиям ISO 9001 в национальной системе (СТБ ISO 9001 – 2009).

[www.vsavm.by](http://www.vsavm.by)

210026, Республика Беларусь, г. Витебск, ул. 1-я Доватора, 7/11, факс (0212)51-68-38,  
тел. 53-80-61 (факультет довузовской подготовки, профориентации и маркетинга);  
51-69-47 (НИИ ПВМиБ); E-mail: [vsavmpriem@mail.ru](mailto:vsavmpriem@mail.ru).

Учебное издание

**Коваленок** Наталья Павловна,  
**Толкач** Алексей Николаевич,  
**Петроченко** Ирина Олеговна и др.

## **ФИЗИКА С ОСНОВАМИ БИОФИЗИКИ**

Учебно-методическое пособие

Ответственный за выпуск Е. Л. Братушкина  
Технический редактор Е. А. Алисейко  
Компьютерный набор Н. П. Коваленок  
Компьютерная верстка Е. В. Морозова  
Корректоры Т. А. Драбо, Е. В. Морозова

Подписано в печать 23.11.2017. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Печать ризографическая. Усл. п. л. 4,0. Уч.-изд. л. 2,62.

Тираж 1000 экз. Заказ № 1742.

Издатель и полиграфическое исполнение:

учреждение образования «Витебская ордена «Знак Почета»  
государственная академия ветеринарной медицины».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 1/362 от 13.06.2014.

ЛП №: 02330/470 от 01.10.2014 г.

Ул. 1-я Доватора, 7/11, 210026, г. Витебск.

Тел.: (0212) 51-75-71.

E-mail: rio\_vsavm@tut.by

<http://www.vsavm.by>

РЕПОЗИТОРИЙ УО ВГАВМ

ISBN 978-985-591-045-0



9 789855 910450

