

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»

Институт Естественнонаучный  
Кафедра «Физика»

Утверждено на заседании кафедры  
«Физика»  
«31» августа 2020 г., протокол № 1

Заведующий кафедрой

 Р.Н. Ростовцев

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
по выполнению лабораторных работ**

**по дисциплине (модулю)  
«Биофизика»**

**основной профессиональной образовательной программы  
высшего образования – программы бакалавриата**

по направлению подготовки  
**06.03.01 Биология**

с направленностью (профилем)  
**Биоэкология**

Форма(ы) обучения: очная, заочная

Идентификационный номер образовательной программы: 060301-01-20

Тула 2020 год

**Разработчик(и) методических указаний**

Герасимова О.А., старший преподаватель  
(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание)

  
\_\_\_\_\_  
(подпись)

## Лабораторная работа по биофизике №1.

### ОСНОВЫ ФИЗИЧЕСКОЙ АКУСТИКИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ

#### *Цель работы:*

- ознакомление с физическими основами акустики и основными свойствами звуковых волн,
- определение порога слышимости для правого и левого уха по уровню громкости звукового сигнала генератора в различных диапазонах спектра.
- Краткие теоретические сведения.

Звуком или звуковыми волнами называют процесс распространения механических колебаний в средах (газы, жидкости и твердые тела). Звуковые волны бывают продольными (газы, жидкости, твердые тела) и поперечными (поверхностные волны в жидкостях, твердые тела). В зависимости от формы фронта волны их подразделяют на плоские и сферические. Уравнение плоской монохроматической звуковой волны, распространяющейся в направлении оси «х» может быть записано в следующем виде:

$$x = A \cdot \sin(\omega_0 t - kx + \alpha_0),$$

где

- $A$  – амплитуда колебаний частиц,
- $\omega_0$  – циклическая частота,
- $k$  – модуль волнового вектора, который равен  $k = \frac{\omega_0}{v} = \frac{\lambda}{2\pi}$ ,
- $\alpha_0$  – начальная фаза колебаний,
- $v$  – скорость распространения волны,
- $\lambda$  – длина волны.

Основными свойствами звуковых волн являются отражение и преломление на границе раздела разных сред, интерференция от когерентных источников и дифракция.

Энергетические свойства звуковых волн характеризуются интенсивностью, звуковым

давлением и громкостью. Интенсивность волны ( $I$ ) - величина, равная среднему значению потока звуковой энергии за период колебаний, переносимой волной через единичную площадку, перпендикулярную вектору скорости. Поэтому для интенсивности можно записать формулу:

$$I = \frac{d^2W}{dt dS}$$

Интенсивность связана со звуковым давлением соотношением следующего вида:

$$I = \frac{p^2}{\rho v}$$

Где  $P$  – звуковое давление,

$\rho$  – плотность среды,

$v$  – скорость звука.

Громкость  $L$  – уровень слухового ощущения звука над пороговым значением, которая определяется по формуле закона Вебера-Фехнера:

$$L = K \lg \frac{I}{I_n}$$

Где  $K$  – коэффициент пропорциональности,

$I_n$  - пороговая интенсивность.

Уровень пороговой громкости зависит от частоты, чувствительности звуковых рецепторов, шумов электронной аппаратуры и окружающей среды. Поэтому обычно используют функцию понижения чувствительности слуха ( $\Delta L$ ), которую определяют в виде разности уровня пороговой громкости для среднестатистического значения и уровня пороговой громкости для исследуемого человека:

$$\Delta L = L_H - L_n$$

Эту функцию определяют аудиометрами по соответствующему ГОСТу или с помощью генератора низкой частоты, к выходу которого подключены высококачественные звуковоспроизводящие аппараты (наушники).

### **Выполнение работы:**

1. Включить низкочастотный генератор в сеть переменного тока 220 В и дать ему



6. Результаты измерений пороговой громкости занести в таблицу 1 и отключить генератор от сети 220 В.
7. Построить графики зависимости пороговой громкости (дБ) от логарифма частоты колебаний.

### **Контрольные вопросы к лабораторной работе №1 по биофизике.**

#### **Основы физической акустики и определение зависимости порога слышимости от частоты.**

1. Назовите цель и учебные задачи лабораторной работы, основные части и органы управления установкой. Как определить значение частоты звуковых колебаний?
2. Что называется порогом слышимости и почему он существует? В чем заключается методика его определения в данной работе?
3. Какое движение называется механическим колебанием и волной? Напишите уравнения гармонических колебаний и плоской звуковой волны.
4. Что называется длиной и фронтом волны? Какая связь существует между длиной волны, частотой и скоростью ее распространения?
5. Какие величины называют интенсивностью и громкостью звуковой волны? Назовите единицы их измерения.
6. Чем отличаются поперечные звуковые волны от продольных и в каких средах они могут распространяться? Какие волны называют солитонами?
7. Что понимают под высотой и тембром звука? Что такое инфразвук и ультразвук? Какую роль играют эти волны в природе?

## Лабораторная работа по биофизике №2

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАССИВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТКАНЕЙ ОРГАНИЗМОВ

#### **Цель работы:**

- ознакомление с физическими основами работы цепей переменного тока, содержащих емкостные и резистивные элементы, характерные для биологических тканей,
- получить частотную зависимость импеданса цепи переменного тока для эквивалентной электрической схемы ткани.

#### **I. Краткие теоретические сведения.**

Ткани организма состоят из структурных элементов - клеток, омываемых тканевой жидкостью. Тканевая жидкость и цитоплазма клеток хорошие проводники электрического тока. Они разделены плохо проводящим слоем - клеточными мембранами. Кроме этого в клетках встречаются и макроскопические образования, состоящие из различных соединительных оболочек и перегородок с большим сопротивлением. Они придают тканям емкостные свойства, которые существенно влияют на электропроводность и, соответственно, на прохождение нервных импульсов. Наиболее простые эквивалентные электрические схемы цепей переменного тока, моделирующие электрические свойства участка ткани, представлены на рис. 1.

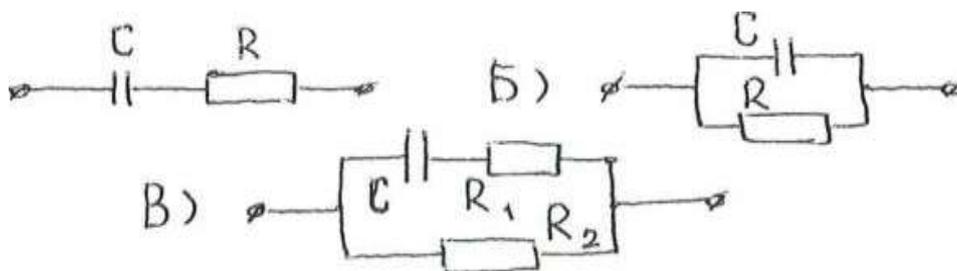


Рис. 1. Эквивалентные электрические цепи переменного тока для биологических тканей.

- А) цепь с последовательным соединением  $C$  и  $R$ ;
- Б) цепь с параллельным соединением  $C$  и  $R$ ;
- В) цепь с комбинированным соединением.

Для моделирования цепи подключают к низкочастотному генератору переменного тока, э.д.с. которого изменяется по гармоническому закону:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \sin \omega t$$

где  $\varepsilon_0$  - амплитудное значение э.д.с.

$\omega$ - циклическая частота.

Закон Ома для участка цепи переменного тока записывают для эффективных значений тока и напряжения на участке:

$$I_{\text{эф.}} = \frac{U_{\text{эф.}}}{Z}$$

Где  $I_{\text{эф.}}$ - эффективное значение силы тока,

$U_{\text{эф.}}$ - эффективное напряжение,

$Z$  – полное значение участка цепи переменного тока (импеданс).

Для последовательной цепи переменного тока (рис.1, а) импеданс рассчитывается по формуле:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2},$$

где  $R$  – активное сопротивление участка,

$X_C$  – емкостное сопротивление конденсатора.

Конденсатор в цепях постоянного тока является местом разрыва цепи, но в цепях переменного и импульсного токов - это проводник с реактивным сопротивлением, которое рассчитывается по формуле:

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

Электрическая схема для изучения зависимости импеданса последовательной цепи переменного тока в зависимости от частоты и емкости конденсатора приведена на рис.2.

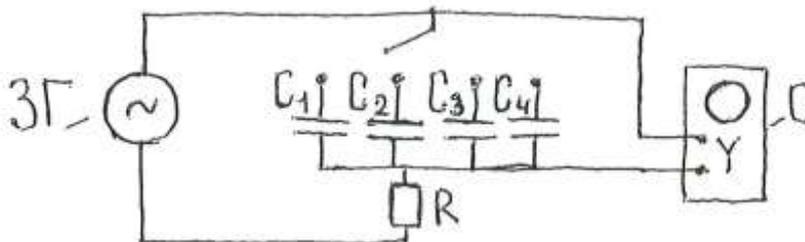


Рис.2. Схема установки для изучения импеданса цепи переменного тока.

$C_1=0,05$  мкФ;  $C_2=0,5$  мкФ;  $C_3=5$  мкФ;  $C_4=20$  мкФ;  $R=2$  кОм

Задачей работы является определение зависимости на конденсаторе от частоты колебаний генератора для разных значений емкости конденсаторов и расчет величины

импеданса этих участков.

### Выполнение работы.

1. Включить генератор низкочастотных колебаний и осциллограф в сеть переменного тока 220 В. В течение 3-5 мин сделать выдержку для прогрева приборов.
2. Установить переключатель блока конденсаторов в положение 0,05 мкФ.
3. Установить частоту колебаний генератора 200 Гц ручками ступенчатого переключения с множителями  $\times 1$ ,  $\times 10$ ,  $\times 100$  и плавной регулировки ( $1 \times 200$ ).

Таблица 1.

Частота, Гц	200	500	1000	2000	4000	8000
0,05 мкФ						
0,5 мкФ						
5 мкФ						
20 мкФ						
Напряжение в дел. шкалы						

4. Ручками регулировки напряжения генератора и уровня входного напряжения осциллографа установить на экране синусоиду с амплитудой 20 мм по вертикальной шкале, предварительно проведя процедуру синхронизации путем подбора частоты развертки осциллографа и генератора.
5. Провести измерения амплитуды напряжения на конденсаторе в делениях шкалы (мм) и занести результат в таблицу 1. Ручками ступенчатой и плавной установки частоты колебаний генератора последовательно установить частоты 500 Гц ( $10 \times 50$ ), 1000 Гц ( $10 \times 100$ ), 2000 Гц ( $10 \times 200$ ), 4000 Гц ( $100 \times 40$ ), 8000 Гц ( $100 \times 80$ ) и проводить измерения амплитуды колебаний на экране осциллографа в делениях вертикальной шкалы с одновременной записью результатов в таблицу. При этих и других измерениях положение ручек регулировки напряжения генератора и уровня входного напряжения осциллографа должно оставаться без изменения. Бегущие осциллограммы напряжения можно устранять подбором частоты развертки осциллографа.
6. Не изменяя положения ручек регулировки напряжения генератора и осциллографа последовательно установить переключатель блока конденсаторов в положение 0,5 мкФ и другие, проводя при этом измерения амплитуды напряжения на конденсаторе для всех

выше указанных часто. Результаты измерения напряжения в делениях шкалы занести в таблицу 1.

7. После проведения измерений напряжения на всех конденсаторах для указанных выше частот колебаний генератор и осциллограф отключить от сети переменного тока.

8. Проведите расчеты циклических частот колебаний напряжения по формуле:

$$\omega = 2\pi\nu,$$

где  $\nu$  – частота колебаний в Гц,

и емкостного сопротивления конденсатора 0,5 мкФ по формуле:

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

9. Рассчитайте значения импеданса и тангенса сдвига фаз между колебаниями тока и напряжения в последовательной цепи для всех частот и указанной емкости конденсатора по формулам:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}; \operatorname{tg} \varphi = \frac{X_C}{R}$$

10. Постройте график зависимости напряжения на конденсаторе от логарифма частоты переменного тока.

### **Контрольные вопросы к лабораторной работе № 2 по биофизике.**

#### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАССИВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТКАНЕЙ ОРГАНИЗМОВ.**

1. Назовите цель и учебные задачи лабораторной работы. Какие приборы входят в состав установки? Как осуществляется управление их работой?
2. Из каких элементов состоят эквивалентные радиосхемы для биологических тканей при работе в цепях переменного тока?
3. Какую величину называют емкостным сопротивлением и импедансом участка цепи переменного тока?
4. Назовите проводящие и непроводящие постоянный электрический ток части биологической клетки?
5. Какова природа электрического тока в металлах, полупроводниках, электролитах и биологических мембранах?
6. Почему емкостное сопротивление конденсатора называют реактивным? Какие токи называются токами смещения?

7. Что называется потенциалами покоя и действия в биологических клетках и тканях?

### **Лабораторная работа по биофизике № 3**

#### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ ДИФРАКЦИИ СВЕТА ЛАЗЕРА**

##### ***Цель работы:***

- ознакомиться с принципом действия лазерных источников света и явлением дифракции на непрозрачной дифракционной решетке;
- определить размеры частиц ликоподия методом дифракции света от лазерного источника.

##### **I. Краткие теоретические сведения.**

Дифракцией света называется явление отклонения световых лучей от прямолинейного распространения в средах с резко выраженными неоднородностями, если их размеры сравнимы с длиной волны. Дифракцией также называют явления, связанные с захождением света в область геометрической тени, и другие, которые сопровождаются образованием дифракционных картин в виде определенного распределения максимумов и минимумов интенсивности света.

Дифракцию света подразделяют на два вида в зависимости от условий наблюдения:

- дифракция Френеля в сходящихся лучах, когда источник и экран для наблюдения находятся на конкретном расстоянии от объекта,
- дифракция Фраунгофера в параллельных лучах.

Для наблюдения дифракционной картины Фраунгофера обычно используют собирающие линзы или вогнутые зеркала. В настоящей работе для определения размеров микрообъектов используется метод, основанный на свойствах дифракции Фраунгофера с лазерным источником света. Лазеры являются источниками монохроматического, когерентного и узконаправленного светового потока, которые идеально подходят для подобных измерений. Принцип действия лазера основан на свойствах индуцированного излучения атомов и молекул активной среды с инверсной населенностью энергетических уровней. Инверсия населенностей уровней энергии достигается в ходе проведения определенных процессов- накачки (пропускание тока, света, химические

реакции и т.д.). Активная среда может не только усиливать проходящее через нее излучение, но и быть генератором световых импульсов. Для этого активную среду помещают в оптический резонатор, состоящий из двух и более зеркал. В работе применен лазер, рабочей средой которого является газовая смесь гелия и неона в соотношении около 1:9. Инверсия населенности атомов неона создается путем столкновений с атомами гелия, которые находятся в долгоживущем (метастабильном) возбужденном состоянии при пропускании электрического тока через смесь. Принципиальная схема газового лазерного источника показана на рис.1.

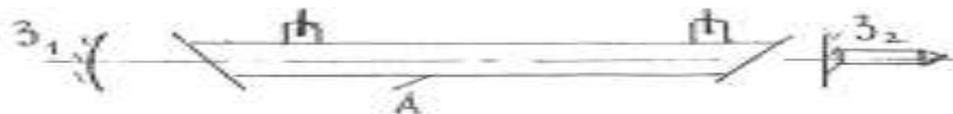


Рис. 1

Лазеры нашли широкое применение в медицине при проведении хирургических операций офтальмологии, физио- и рефлексотерапии.

Конструкция установки для наблюдения дифракции Фраунгофера с лазером приведена на рис.2. Лазер установлен на стойке 1 и подключается к сети переменного тока 220В. Луч лазера проходит через объект 2 и вследствие дифракции на экране 3 создает дифракционную картину в виде максимумов и минимумов освещенности.

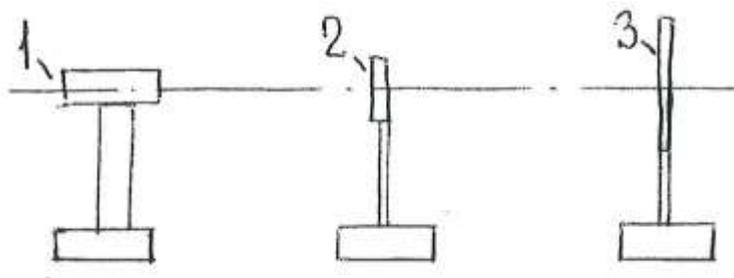


Рис.2 Схема конструкции установки.

## II. Выполнение работы.

1. Включить лазер и установить на пути луча стойку с держателем прозрачной дифракционной решетки, плоскость которой должна быть перпендикулярной лучу. На расстоянии 20 - 30 см от решетки установить экран для наблюдения дифракционной картины с закрепленным на нем листом белой бумаги.
2. Путем небольших поперечных перемещений решетки получить наиболее четкое изображение дифракционной картины на экране в виде центрального дифракционного

максимума интенсивности нулевого порядка и горизонтально расположенных максимумов 1 и 2 порядков симметрично по отношению к центральному.

3. На белом листе бумаги, который закреплен на экране, отметить ручкой места расположения максимумов нулевого порядка (центрального) и других симметрично расположенных максимумов 1-2 порядков.

4. Измерить расстояние от дифракционной решетки до экрана линейкой  $L_1$  в мм.

5. Заменить стойку с дифракционной решеткой на стойку с держателем порошка ликоподия, перевернуть закрепленный лист белой бумаги на экране и провести наблюдение полученной дифракционной картины в виде светлых и темных колец.

6. Не изменяя расстояния от держателя ликоподия до экрана, ручкой отметить на бумаге положение центрального дифракционного максимума и середину первого темного дифракционного кольца.

7. Измерить расстояние от держателя ликоподия до экрана линейкой  $L_2$  в мм, выключить лазер и снять лист бумаги с экрана.

8. Рассчитать длину волны излучения лазера, используя данные листа 1 по формуле:

$$\lambda = \frac{d \cdot \sin \varphi}{k};$$

где  $d$  – период дифракционной решетки,  $d=0,009$ мм,

$$\varphi - \text{угол дифракции, } \sin \varphi = \frac{x}{\sqrt{L_1^2 + x^2}}$$

$k$  – порядок дифракционного максимума,

$x$  – расстояние от центрального дифракционного максимума до максимума 1-и 2- порядков соответственно.

9. Используя данные листа 2, а именно, измеренный линейкой в мм радиус первого темного дифракционного кольца по формуле:

$$D = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{\sin \varphi}, \quad \sin \varphi = \frac{R}{\sqrt{L_2^2 + R^2}}$$

Рассчитать средний диаметр частичек ликоподия ( $D$ ).

### **Контрольные вопросы к лабораторной работе №3 по биофизике.**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ**

## ДИФРАКЦИИ СВЕТА ЛАЗЕРА

1. Назовите цель и учебные задачи данной лабораторной работы, а также приборы и приспособления.
2. Какие прозрачные среды называются активными? При каком условии происходит поглощение, просветление и усиление света, проходящего через такую среду?
3. Покажите принципиальную схему устройства газового лазера. Какие виды накачки активной среды применяются в технике?
4. Какое явление называют дифракцией света? Какой вид дифракции света используется в данной работе? Какое устройство называется дифракционной решеткой?
5. Сформулируйте условие главных дифракционных максимумов для прозрачной решетки в параллельных лучах. Какие максимумы называются побочными?
6. Что представляет собой дифракционная картина после прохождения светом тонкого слоя частиц ликоподия? Как объяснить механизм ее возникновения?
7. В чем состоит способ определения размеров частиц, используя для этого данные по дифракционной картине?

### Лабораторная работа по биофизике №4

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ ЗРИТЕЛЬНЫХ РЕЦЕПТОРОВ.

##### *Цель работы:*

- Ознакомление с работой фотоэлектрических приемников света на внешнем фотоэффекте;
- Опытная проверка законов внешнего фотоэффекта.

##### I. Краткие теоретические сведения.

Фотоэлектрическим эффектом называется процесс взаимодействия электромагнитных волн (света) с веществом, в результате которого энергия фотонов передается электронам вещества. Для твердых тел и жидких сред различают внешний фотоэффект, при котором поглощение фотонов сопровождается вылетом электронов с поверхности за пределы вещества и внутренний фотоэффект, при котором электроны остаются в веществе, изменяя свое энергетическое состояние (полупроводники). Возникновение фото э.д.с. при освещении р-п перехода в полупроводниках называется вентильным фотоэффектом, который нашел широкое применение в технике и солнечной энергетике. Фотоэффект

также может наблюдаться для электронов внешних и внутренних оболочек атомов и молекул.

Для внешнего фотоэффекта используют уравнение Эйнштейна, которое отражает закон сохранения энергии для фотопроцессов, и имеет следующий вид:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2},$$

где  $A_{\text{вых}}$  – работа выхода электрона,

$h\nu$  – энергия фотона,

$m$  – масса электрона,

$v_{\text{max}}$  – максимальное значение скорости вылетающих фотоэлектронов.

Для каждого вещества существует граничная частота световых колебаний (пороговая), ниже которой фотоэффект не происходит. Значение этой частоты определяется величиной работы выхода.

$$\nu_0 = \frac{A_{\text{вых}}}{h}$$

Число фотоэлектронов, приходящееся на один падающий на поверхность фотон, называется квантовым выходом фотоэффекта. Обычно квантовый выход составляет  $10^{-4}$  и растет с увеличением частоты колебаний.

Устройство простейшего фотоэлемента на внешнем фотоэффекте показано на рис.1.

Как правило, он состоит из сферического баллона 1, прозрачного для соответствующей области спектра, с двумя металлическими электродами. Обычно, свет воздействует на тонкий фотоэлектрический слой из щелочных металлов или их сплавов, который наносится на внутреннюю поверхность стеклянного баллона 2 и соединен с внешним электродом – катодом (К). Другой электрод в виде маленького кольца или шарика находится в центре стеклянной сферы и присоединен к другому внешнему электроду – аноду (А).

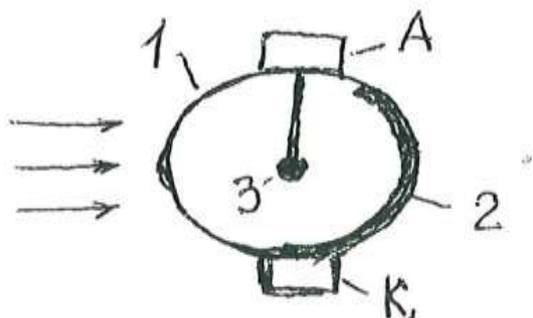


Рис.1. Схема простого фотоэлемента.

При освещении поверхности фотокатода светом с частотой колебаний выше пороговой

происходит вырывание электронов с поверхности, имеющих направление вектора скорости перпендикулярного поверхности. В результате они достигают анода и являются причиной возникновения фотоэ.д.с. Если внешняя цепь анода и катода будет замкнута, то в цепи возникает фототок, который имеет невысокие значения и для его регистрации нужны чувствительнее приборы. Величину фототока можно повысить, если на анод подать положительный потенциал от внешнего источника тока. Однако увеличение тока происходит до некоторого максимального значения, которое называется фототоком насыщения, при котором все вырываемые светом электроны достигают анода (рис.2).

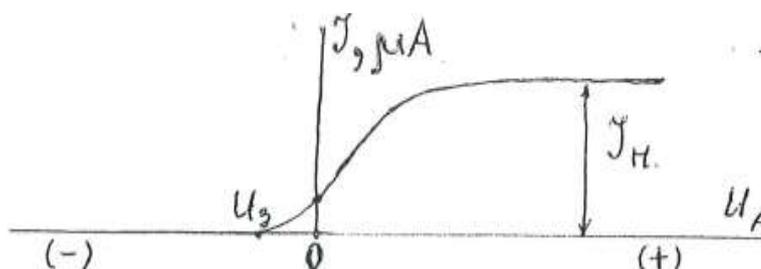


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика фотоэлемента.

При подаче на анод отрицательного потенциала источника тока происходит снижение значения фототока до 0. Напряжение при котором фототок прекращается называется задерживающим потенциалом. Схема установки для изучения работы фотоэлемента приведена на рис. 3.

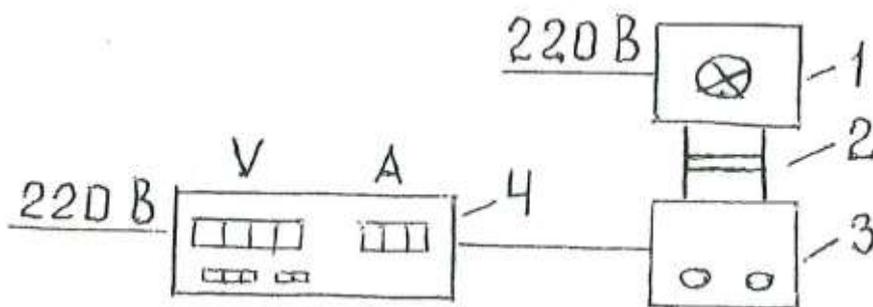


Рис.3. Схема установки с фотоэлементом Ф19.

Освещение фотоэлемента осуществляется лампой накаливания от сети 220 В через трансформатор, которые установлены в закрытом кожухе блока 1. Параллельный световой поток формируется линзами и, пройдя через светофильтр 2, попадает в окно фотоэлемента Ф19, установленного в светонепроницаемом кожухе 3. Управление схемой электрического питания фотоэлемента находится в отдельном блоке 4, на переднюю панель которого вынесены приборы для измерения напряжения и фототока с

цифровой индикацией и с кнопками установки анодных потенциалов в прямом «+» и обратном « - » направлении. На корпусе блока 3 имеются ручкиустановки фототока на нулевое значение при отсутствии освещения фотоэлемента.

## II. Выполнение работы.

1. Включить в сеть переменного тока 220 В блок 4 и проверить нулевые показания прибора «0000» В и «000» мкА. При наличии показания фототока привести их в нулевое положение ручкамустановки нуля «грубо» и «точно» на блоке 3.

2. Установить светофильтр №4 блока 2 с длиной волны пропускания 578 нм и частотой  $5,19 \times 10^{14}$  Гц, которая меньше пороговой, и после включения в сеть 220 В блока лампы 1 убедиться в

отсутствии фототока. Фототок должен быть равным 0 и при подаче на фотоэлемент положительного потенциала при прямом включении кнопками до 5-10 В. Кнопками сниженияпотенциала снова установить нулевые показания.

3. Установить светофильтр №3 с длиной волны пропускания 546 нм и частотой  $5,49 \times 10^{14}$  Гц, которая выше пороговой частоты и записать показания фототока при нулевом значении потенциала.

4. Последовательно через 1 В провести при «прямом» включении увеличение положительного потенциала до 10 В и занести в таблицу 1 показания микроамперметра. Снизить напряжение до нуля п переключить кнопкой полярность напряжения на «обратное».

U, В	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	+8	+9	+10
I, $\mu$ А											

5. Последовательно через 0.1 В провести увеличение обратного напряжения до нулевого значения фототока. Полученные результаты измерения фототока занести в таблицу 2. Уменьшить обратное напряжение до нуля, отключить блоки 1 и 4 от сети переменного тока 220 В.

U, В	0	-0,1	-0,2	-0,3	0,4	-0,5	-0,6
I, $\mu$ А							

6. Построить вольтамперную характеристику фотоэлемента для светофильтра №3

## **Контрольные вопросы к лабораторной работе №4 по биофизике.**

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ ЗРИТЕЛЬНЫХ РЕЦЕПТОРОВ.**

1. Назовите цель и учебные задачи данной лабораторной работы. Какое устройство используется в работе в качестве модели зрительных рецепторов?
2. Какие явления называются внешним и внутренним фотоэффектом? В чем состоит отличие внешнего фотоэффекта от внешнего и внутреннего?
3. Напишите уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта. Какой физический закон отражает это уравнение?
4. Почему существует граничная (пороговая) частота света, ниже которой внешний фотоэффект не возникает? Как эта частота связана с работой выхода электронов?
5. Приведите схему устройства фотоэлемента и методику определения его вольт-амперной характеристики.
6. Карой фототок называется ток насыщения и почему он возникает? Что называется квантовым выходом фотоэффекта и от чего он зависит?
7. Какую величину называют задерживающим потенциалом и каким способом его можно определить?

## **Лабораторная работа по биофизике №5.**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРА ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТЯЩЕГОСЯ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА**

#### **I. Краткая теория.**

Фотометрический анализ по спектрам поглощения основан, на измерении интенсивности полос поглощения, которые определяются числом квантовых переходов в единицу времени молекул или атомов поглощающего вещества. Поглощением света называют явление уменьшение энергии световой волны при ее распространении в веществе, происходящее вследствие преобразования энергии волны во внутреннюю энергию или в энергию вторичного излучения, меньшего имеющую иной спектральный состав или направления распространения.

В результате поглощения света могут происходить процессы нагревания вещества, ионизация атомов и молекул, фотохимические реакции, фотолюминесценция и т.д. Поглощение света не стоит смешивать с явлением световой волны в оптически неоднородной среде, вследствие рассеяния света.

Допустим на среду в виде слоя толщиной  $l$  падает нормально световой пучок интенсивностью  $J_0$  (см. рис. 1) по мере прохождения интенсивности будет уменьшаться по экспоненциальному закону. Выберем равномерный слой среды толщиной  $dl$ .

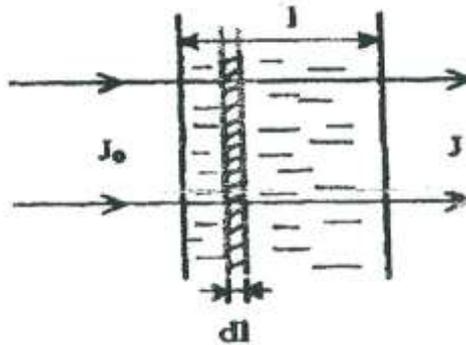


Рис. 1

Приращение (уменьшение) интенсивности этим слоем обозначим через  $dJ$ , которое пропорционально толщине слоя  $dl$  и интенсивности волны  $J$ . Запишем это в виде  $dJ = -KJdl$ , где  $K$  — коэффициент пропорциональности (показатель поглощения). Интегрируем это уравнение по толщине слоя и получим

$$\int \frac{dJ}{J} = - \int K dl$$

После интегрирования  $\ln J = -Kl + \text{const}$ . Константу находим из условия, что при  $l=0$   $J=J_0$ . И тогда  $\text{const} = \ln J_0$ . Далее пишем, что

$$\ln J = -Kl + \ln J_0$$

окончательно имеем

$$J = J_0 \cdot e^{-Kl} \quad (2)$$

Это выражение называется законом Бугера-Ламберта. Показатель поглощения численно равен толщине слоя среды, после прохождения которого интенсивность

уменьшается в  $e=2,72$  раз.

Значение  $K$  зависит от частоты света, химической природы и состояния вещества. Для некоторых веществ при достаточно больших интенсивностях света наблюдается отступление от закона Бугера-Ламберта; коэффициент поглощения убывает с ростом  $J_0$ , что обусловлено изменением заселенностей основного и возбужденного уровней квантовой системы.

Для разбавленных растворов поглощающего вещества в непоглощающем растворителе выполняется простое соотношение (закон Бера)  $K=\alpha \cdot C$ , где  $\alpha$  - показатель поглощения,  $C$  - концентрация растворенного вещества. Поэтому для разбавленных растворов справедлив закон Бугера-Ламберта-Бера

$$J = J_0 \cdot e^{-\alpha Cl} \quad (3)$$

При больших концентрациях закон Бера нарушается, так как из-за влияния взаимодействия между близко расположенными молекулами растворенного вещества величина  $\alpha$  начинает зависеть от концентрации раствора.

Зависимость  $K$  от частоты света или длины волны называют спектром поглощения, который может быть линейчатым, полосатым или сплошным спектром поглощения. Селективное поглощение приводит к возникновению окраски вещества (красители, минералы). Из формулы (2) найдем коэффициент поглощения  $K$

$$K = \frac{1}{l} \ln \frac{J_0}{J}$$

Очень часто  $K$  измеряют в обратных сантиметрах ( $\text{см}^{-1}$ ). В некоторых случаях коэффициент поглощения достигает нескольких тысяч  $\text{см}^{-1}$ . Величина  $D = \lg \frac{J_0}{J}$  - называется оптической плотностью, которую записывают в виде  $D = ECl$ , где  $E$  - молярный показатель поглощения,  $C$  - концентрация в  $\frac{\text{моль}}{\text{литр}}$ ,  $l$  - толщина в см.

Если  $C$  брать в массовых процентах, то  $D=\alpha C l$ , где  $\alpha$  - показатель поглощения. Концентрацию  $C$  можно определить по формуле  $C = \frac{D}{\alpha l}$  (4), если известна величина  $\alpha$  для соответствующей полосы поглощения.

Количественное определение концентрации вещества по спектрам поглощения можно проводить, если вещество равномерно распределено по объему, поглощающие молекулы и атомы не изменяют характера взаимодействий друг с другом и со средой в пределах излучаемых концентраций, световой поток ослабляется только за счет

поглощения фотонов и не вызывает фотохимических превращений. По спектрам поглощения можно определить концентрацию веществ в смесях, если известны показатели поглощения  $\alpha$  для различных длин волн или по крайней мере для двух значений длины волны света.

Если компоненты смеси не взаимодействуют между собой в растворе, то оптическая плотность смеси равна сумме оптических плотностей компонентов. Для двухкомпонентной смеси

$$D = D_1 + D_2 = \alpha_1 C_1 l + \alpha_2 C_2 l$$

в качестве примера на рис. 2 показан спектр  $D = f(\lambda)$ , а пунктирной линией

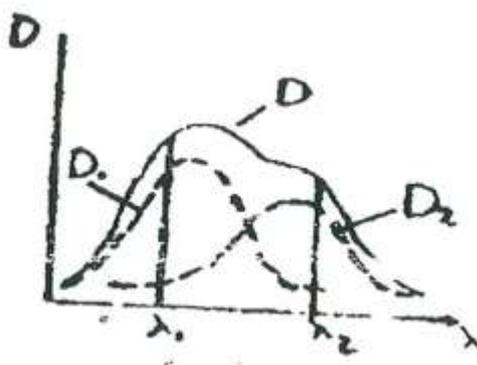


Рис. 2

обозначены зависимости  $D_1 = f_1(\lambda)$  и  $D_2 = f_2(\lambda)$  для компонентов смеси.

Для значения  $\lambda_1$  можем записать

$$D' = D'_1 + D'_2 = E'_1 C_1 l + E'_2 C_2 l$$

1

Для значения  $\lambda_2$  аналогично запишем

Измеряя  $D$  при двух длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  и зная молярные коэффициенты поглощения компонентов  $E'_1, E'_2, E''_1$  и  $E''_2$ , после решения системы уравнений можно найти  $C_1$  и  $C_2$ .

### Краткое описание спектрофотометра СФ-46.

Спектрофотометр СФ-46 предназначен для получения спектров поглощения жидких и твердых веществ ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной области в интервале длин волн 200-1000 нм. При использовании дейтериевой лампы (200-600 нм) и лампы накаливания (600-1000 нм). Схема показана на рис.3

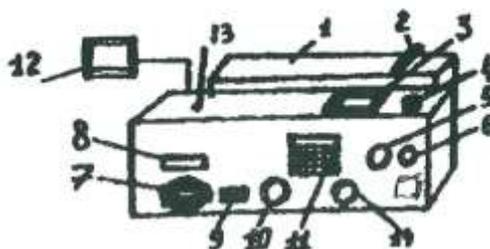


Рис.3

Блоки питания и стабилизаторы напряжения и тока источников света находятся в отсеке 1, а монохроматор расположен в корпусе 13. Рычагом 2 осуществляется переключение источников света, одновременно ручкой 4 необходимо производить смену фотоэлементов на фиолетовую и красную область «Ф» и «К». Установка изучаемых образцов производится в кюветном отделении после монохроматора. Кюветное отделение имеет герметичную крышку 3. Длина волны света, пропускаемая монохроматором, устанавливается с помощью маховика 7 на табло 8. Ручкой 5 открывается шторка выходной щели, ширина которой фиксировано устанавливается ручкой 10 и имеет значения 0.5; 1.0; 1.5; 2.0; 2.5; 3.0 мм. Фототок, вырабатываемый фотоэлементами усилителя фиксируется на индикаторной панели цифрового милливольтметра 12 и на дисплее микропроцессора 11. Ручкой 14 осуществляется смена образцов в кюветном отделении, которые попеременно вводятся в световой канал. Микропроцессор, встроенный в корпус прибора, может запоминать значения напряжения, пропорциональные световому потоку и проводить операции расчета коэффициента пропускания «Т» и оптической плотности «D». Значения этих величин можно получить на дисплее микропроцессора. Прибор включается в сеть 220В кнопкой 9 и прогревается в течении 15+20 минут.

## II. Выполнение работы

1. Установить переключатель источника света спектрофотометра СФ-46 в положение «Н», а фотоэлектрический приемник (фотоэлемент) в положение «К». Шторка окна фотоэлемента должна быть закрытой, т.е. ручка управления шторкой находится в положении «закр.».
2. Включить прибор в сеть 220 В кнопкой «сеть» путем ее нажатия и дать прибору прогреться в течение 15-20 мин.
3. При закрытой шторке открыть крышку кюветного отделения и установить держатель с исследуемым образцом 1 и образцом сравнения 2 в направляющие планки.

Проверить установку держателя путем переключения соответствующей ручки в положение 1 и 2.

4. Закрывать крышку кюветного отделения, ручкой установки длины волны пропускания монохроматора выставить значение 460 нм, установить ширину выходной щели монохроматора

5. Включить регистрирующий прибор в сеть 220 В тумблером «сеть» и при закрытой шторке ручками установки нуля «грубо» и «точно» осторожно довести показания прибора до минимального значения со знаком «+» или «-». Это значение надо записать в качестве нулевого отсчета.

6. Открыть шторку фотоэлемента и поочередно устанавливая образцы 1 и 2 в световой канал поворотом ручки, не открывая при этом крышку кюветного отделения. Показания прибора для исследуемого образца светящегося полиметилметакрилата  $U_1$  и образца сравнения  $U_2$  записать в таблицу 1.

7. Аналогично провести измерения фотоэда для образцов 1 и 2 для других значений длин волн, которые указаны в таблице 1. Полученные результаты занесите в таблицу и выключите приборы.

8. Провести расчеты коэффициентов поглощения светящегося полиметилметакрилата для всех длин волн, указанных в таблице 1, построить кривую зависимости  $K$  в  $\text{см}^{-1}$  от длины волны (нм)

$\lambda$ , нм	460	480	500	520	540	560	580	600	620
$U_1$ , мВ									
$U_2$ , мВ									
$K$ , $\text{см}^{-1}$									

### Контрольные вопросы к лабораторной работе №5 по биофизике.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРА ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТЯЩЕГОСЯ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА

1. Сформулируйте цель и учебные задачи данной работы, дайте название основным блокам и ручкам управления спектрофотометра СФ- 46.
2. Какие действия необходимо выполнять для подготовки прибора к работе, в процессе работы и при завершении.
3. Какое явление называют поглощением света и почему оно возникает при прохождении светового потока через среду?

4. Сформулируйте закон Бугера-Ламберта для жидкостей и твердых тел. Какую величину называют коэффициентом поглощения среды?
5. Сформулируйте закон Бугера-Ламберта-Бера для истинных растворов. Какую величину называют оптической плотностью и молярным коэффициентом экстинкции?
6. Что называется спектром поглощения вещества и какие виды спектров поглощения молекул бывает?
7. В чем состоит отличие спектров поглощения обычного полиметилметакрилата от светящегося?

### **Лабораторная работа по биофизике № 6.**

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИСПЕРСИИ ОПТИЧЕСКОГО ВРАЩЕНИЯ РАСТВОРА САХАРОЗЫ.**

**Цель работы:** ознакомиться с устройством кругового поляриметра СМ, методиками определения концентрации и дисперсии оптически активного вещества - сахарозы в водном растворе.

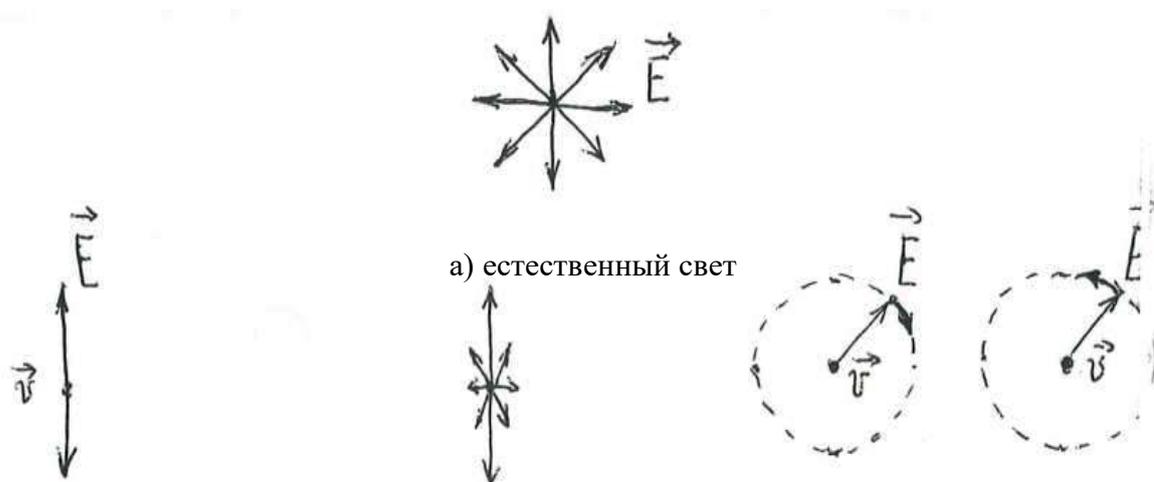
**Оборудование:** поляриметр 1 с натриевой лампой и поляриметр 2 с лампой накаливания, набор светофильтров, оптические кюветы с раствором сахара.

### **1. Краткие сведения по классической теории оптической активности вещества.**

Оптической активностью называется свойство кристаллов и молекул поворачивать плоскость поляризации линейно поляризованного света по мере распространения. Дисперсия оптического вращения - зависимость угла поворота плоскости поляризации света в веществе от длины волны или частоты. Дисперсия оптической активности также как и дисперсия показателя преломления обусловлены явлением поглощения света. В органических молекулах причиной оптического вращения чаще всего бывают асимметрические атомы углерода. Измерения дисперсии оптической активности применяются при определении строения сложных молекул, комплексов металлоорганических соединений, а также биополимеров - белков, нуклеиновых кислот. Из кривых дисперсии оптического вращения вычисляют степень спиральности белков, в частности, для трипсина было получено значение около 16 %. Для света в виде плоской электромагнитной волны колебания векторов электрического и магнитного полей происходят в направлениях перпендикулярных направлению ее распространения, т.е. электромагнитные волны поперечные.

В естественном свете при хаотичном его излучении атомами вещества направление

колебаний векторов постоянно изменяется, поэтому говорят о равной вероятности любого из направлений колебаний. С помощью специальных устройств - оптических поляризаторов можно выделить из естественной световой волны только волны с определенным направлением колебаний вектора электрического поля (светового вектора). Такие волны называют поляризованными и подразделяют на плоскополяризованные, частично-поляризованные и волны с круговой поляризацией или циркулярно-поляризованные, а естественные световые волны называют неполяризованными или деполаризованными. На рис.1 показаны модели различно поляризованных световых волн. Плоскополяризованные волны иногда называют волнами с линейной поляризацией



б) плоско-поляризованная    в) частично-поляризованная    г) волна с правой и левой

Рис.1. Модели поляризованных световых волн.

В циркулярно-поляризованной световой волне электрический и магнитный векторы вращаются вокруг направления распространения по часовой стрелке или против с частотой волны, поэтому их называют волнами с правой или левой циркулярной или круговой поляризацией (рис.1, г). Конец, электрического вектора при этом в пространстве спиралевидную траекторию. Плоско-поляризованные световые волны получают с помощью простых поляризаторов: кристаллические призмы Глана, Аренса, Волластона и др., изготовленных из кристаллов кальцита и полимерные поляроиды. Частичная поляризация света возникает при отражении от поверхности диэлектрических материалов. При падении естественного света на границу раздела диэлектриков под углом Брюстера, отраженная волна становится плоско-поляризованной, а преломленная волна частично поляризованной. Чтобы определить состояние поляризации светового потока, на пути световых лучей устанавливают анализатор, который является обычным поляризатором в оправе, позволяющей вращать его вокруг продольной оси. Нередко

оправа снабжена отсчетным устройством в виде лимба с 360 градусной шкалой, позволяющей устанавливать значения углов, соответствующих максимуму или минимуму интенсивности прошедшего через анализатор света. Если на анализатор падает плоско-поляризованный свет с интенсивностью  $I_0$ , то интенсивность прошедшего через анализатор света рассчитывается по формуле, которую называют законом Малюса:

$$I = I_0 \cdot \cos^2 \varphi$$

Где  $I_0$  - интенсивность света, падающего на анализатор;

$I$  – интенсивность света, прошедшего через анализатор без учета потерь энергии на отражение и поглощение;

$\varphi$  – угол между направлениями пропускания анализатора и поляризатора.

Если угол между направлениями пропускания поляризатора и анализатора равен 0 или 180 градусам, то интенсивность света, прошедшего эту систему будет максимальной, при угле 90 или 270 градусов интенсивность прошедшего света будет равна 0. Поэтому иногда используют термины параллельного или скрещенного положения поляризаторов.

Оптически - активные среды обладают способностью поворачивать направление колебаний электрического вектора по мере распространения электромагнитной волны по часовой стрелке или против, если смотреть по ходу ее распространения. Такие вещества называют лево- или правовращающими оптически - активными средами. Это свойство проявляется при прохождении света через кристаллы, жидкости или растворы. Оптической активностью обладают, как правило, нецентросимметричные кристаллы или молекулы, при этом одно и то же вещество может иметь обе оптически активные формы. Молекулы право- и левовращающих веществ являются зеркальным отображением друг друга. Зеркально симметричные кристаллические формы называют энантиоморфными. Если в растворе присутствуют обе оптически активные формы в равных концентрациях, то общего вращения плоскости поляризации света не происходит.

Нередко оптически активные молекулы имеют разные химические свойства для оптических антиподов. Например: правой и левой оптической активностью обладают кристаллы кварца, растворы сахара и т.д. В кристаллах угол поворота плоскости поляризации пропорционален расстоянию, которое проходит свет в кристалле. В растворах этот угол пропорционален еще и концентрации растворенного вещества

$$\varphi = \alpha \cdot C \cdot l$$

На переднюю панель прибора вынесена ручка поворота плоскости пропускания и шкала (лимб) с двумя нониусами, по которым можно провести точное измерение угла

поворота плоскости поляризации. Отсчетную шкалу и нониусы можно наблюдать в маленькие лупы, расположенные слева и справа от основного зрительного окуляра. Наблюдаемая в окуляр световая картина наводится на резкость вращением втулки на трубке окуляра.

Свет от лампы, пройдя через оптический конденсор и поляризатор, является плоско - поляризованным с вертикальным расположением плоскости поляризации. Для более точного, определения угла поворота плоскости поляризации оптически активного вещества в приборе применено разделение поля зрения на две части введением в оптическую схему поляриметра хроматической фазовой кварцевой пластинки, поворачивающей плоскость поляризации на некоторый угол в пределах одной половины поля зрения. Улучшение точности достигается тем, что необходимые отсчеты углов выполняются путем уравнивания яркостей двух половин поля зрения окуляра. Таким образом, при вращении анализатора можно наблюдать поочередное гашение или просветление двух половинок поля зрения. Уравнивание яркостей этих половин светового поля происходит при промежуточном положении анализатора. Причем надо знать, что таких положений у анализатора два: одно соответствует максимальной яркости поля зрения, а другое - минимальной. Наиболее точные отсчеты будут получены только в том случае, если уравнивание яркостей половин поля зрения выполняется при минимальной освещенности. Такое положение анализатора соответствует так называемому «нулевому отсчету» или нулевой точке для отчета. Если между хроматической пластинкой и анализатором поместить оптически активное вещество, то настроенное на нулевую точку световое поле будет нарушено и необходимо повернуть анализатор на некоторый угол, чтобы снова уровнять яркости половинок поля зрения в минимуме освещенности. При установке трубки в кюветное отделение происходит изменение оптического пути лучей и изменение резкости изображения поля зрения. Нарушение резкости восстанавливается вращением втулки окуляра поляриметра. Разность двух показаний по лимбу будет равна значению угла поворота плоскости поляризации среды, находящейся в трубке. Расчет концентрации оптически активного вещества в растворе проводится по формуле

$$C = \frac{\varphi}{\alpha \cdot l}$$

Где  $C$  – концентрация вещества в %, масс.,

$l$  – длина трубки в дециметрах,

$\varphi$  – угол вращения плоскости поляризации в градусах,

$\alpha$  – удельная постоянная вращения в град/дм·%.

Удельная постоянная вращения зависит от температуры и длины волны света, т.е. имеет место дисперсия удельного вращения. Поэтому один и тот же раствор может быть право- или левовращающим в разных диапазонах спектра, а измерение угла поворота плоскости поляризации необходимо проводить в монохроматическом свете. Чаще всего для этих целей используют свет натриевой лампы. Поляриметры применяют для определения концентрации различных органических веществ в твердых продуктах или растворах, например, определяют содержание крахмала в зерновом сырье. Для этого проводят тонкий помол зерна и 5 г помола помещают в мерную колбу на 100 мл. Потом туда добавляют 50 мл соляной кислоты, содержащей 1,124 весовых частей HCl. Содержимое колбы перемешивается и ставится на 15 мин в водяную кипящую ванну для гидролиза. После охлаждения раствора до +20°C к нему прибавляется 5 мл 2,5%-го раствора молибденово-кислого аммония для осаждения белков. Далее в раствор добавляется дистиллированная вода до метки, хорошо взбалтывается и фильтруется через обезболенный фильтр с синей лентой не менее 3 раз. Фильтратом наполняют трубку для растворов поляриметра, которую надо установить в поляриметр не позднее тридцати минут после приготовления, так как в дальнейшем раствор заметно мутнеет. Определение концентрации крахмала в растворе выполняют по аналитической кривой или рассчитывают по известному значению удельной постоянной вращения.

## 2. Описание устройства оптического поляриметра.

Оптическая схема поляриметра СМ-2 приведена на рис.2. Измерение углов вращения плоскости поляризации проводится визуально по лимбу в градусах и двум нониусам, которые входят в состав конструкции анализатора.

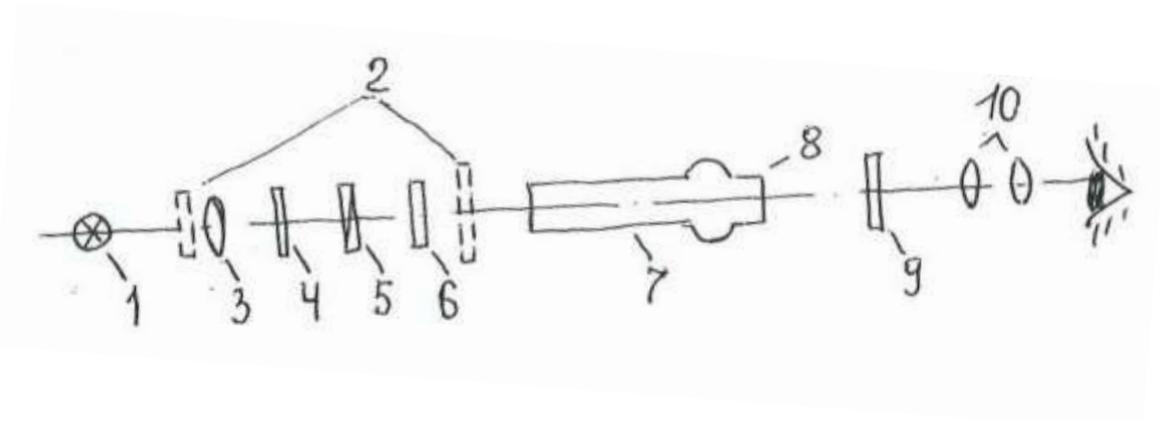


Рис. 2. Оптическая схема поляриметра СМ-2.

1- Источник света; 2 - светофильтры; 3 - осветительная линза; 4 - поляризатор; 5 - хроматическая фазовая пластинка; 6-защитное стекло; 7-трубка с раствором; 8- покрывное стекло; 9 - анализатор; 10 - зрительная трубка.

Все элементы этой схемы заключены в корпус, в котором имеется кюветное отделение с верхней крышкой, которая необходима для установки трубки с эталонным и исследуемым растворами.

### **3. Порядок выполнения работы.**

1. Включить поляриметр 1 в сеть переменного тока 220В и после непродолжительного прогрева натриевой лампы в течение 3-5 минут вращением втулки окуляра с одновременным наблюдением светового поля без трубки с раствором в кюветном отделении установить его на резкость. При этом в окуляре будет наблюдаться четкое контрастное изображение левого и правого поля зрения различной светимости.

2. Вращением анализатора уравнивать яркости обеих половин поля зрения с минимальной светимостью. После этого любое незначительное вращение анализатора приводит к резкому изменению равенства светимости половин поля зрения, которые называют полями сравнения. Такое положение анализатора называют нулевым, а отсчет по шкале лимба - нулевым отсчетом.

3. Определение нулевого отсчета по шкале лимба выполнить с пустым кюветным отделением или с трубкой заполненной дистиллированной водой. Установку одинаковой освещенности полей сравнения выполнить 5 раз, поворачивая анализатор по и против часовой стрелки. Отсчеты проводить по основной шкале лимба и по нониусам. Среднее значение по отсчетам является значением нулевого отсчета. По круговой шкале определить целое число градусов, которое для нулевого отсчета должно соответствовать 0, а по нониусам определить добавку к этому числу. Оцифровке нониуса 20 соответствует добавка 0,20 градуса и т.д. Отсчет по нониусу соответствует тому делению, которое наилучшим образом совпадает с делением основной шкалы. Добавка нониуса при проведении точных измерений является средним значением отсчетов по правому и левому нониусу шкалы лимба.

4. В кюветное отделение установить трубку с раствором сахара известной концентрации и вращая трубку окуляра снова добиться резкого изображения полей сравнения. Медленным вращением анализатора по или против часовой стрелки добиться одинаковой яркости полей сравнения. Провести отсчет нового положения анализатора по основной шкале лимба и по нониусу. Повторить нахождение отсчетов по нониусам не менее 5 раз, вращая анализатор по и против часовой стрелки. Найти среднее значение

отсчета по лимбу и нониусам для трубки с раствором известной концентрации и угол поворота плоскости поляризации для него. Записать значение толщины слоя раствора при этом, которое указано оцифровкой на трубке в мм.

5. Рассчитать значение удельной постоянной оптической активности раствора сахара в град/° дм.

6. Поместить в кюветное отделение стеклянную трубку с раствором неизвестной концентрации и определить среднее значение угла поворота плоскости поляризации этого раствора, аналогично п. 4. После проведения необходимых измерений поляриметр с натриевой лампой выключить.

7. Включить поляриметр 2 в сеть переменного тока 220 В, в котором источником света является вольфрамовая лампа накаливания, излучающая свет в широком диапазоне длин волн и для раствора с известной концентрацией сахарозы провести измерения угла поворота плоскости поляризации для разных светофильтров. Измерение углов поворота выполнить при условии получения минимальной освещенности поля зрения в окуляре.

8. Провести расчет концентрации неизвестного раствора сахара в воде и вычислить абсолютную и относительную погрешности полученного результата.

9. Построить зависимость угла поворота плоскости поляризации раствора сахарозы от длины волны пропускания светофильтра (красный – 0,65 мкм, оранжевый – 0,6 мкм, желтый – 0,57 мкм, голубой – 0,5 мкм).

#### **4. Контрольные вопросы к лабораторной работе №6 по биофизике.**

##### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИСПЕРСИИ ОПТИЧЕСКОГО ВРАЩЕНИЯ РАСТВОРА САХАРОЗЫ**

1. Назовите цель и основные учебные задачи этой лабораторной работы, дайте краткое описание устройства оптического поляриметра и его назначение.
2. Какое явление называется оптической активностью вещества? Назовите основные причины его возникновения.
3. Что называют дисперсией оптического вращения и какова методика ее определения в работе.
4. Какие устройства называются поляризаторами (поляроидами), и на чем основан принцип их действия?
5. Сформулируйте закон Малюса и покажите возможность его использования в приборах.
6. Покажите связь между дисперсией оптического вращения молекул и их строением.
7. Дайте объяснение явлению оптической активности и дисперсии оптического вращения.