

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ**

**УНИВЕРСИТЕТ АДАМ**

**ДЕПАРТАМЕНТ МАТЕМАТИЧЕСКИХ  
И ЕСТЕСТВЕННО-НАУЧНЫХ ДИСЦИПЛИН**

**МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО  
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО ФИЗИКЕ**

**ЧАСТЬ 2**

**Бишкек 2022**

## **РАССМОТРЕНЫ**

на заседании департамента МЕНД,  
протокол № 4, от 16.12. 2022 г.

## **ОДОБРЕНЫ**

на заседании деканата Высшей  
школы медицины  
протокол № , от 2022 г

## **УТВЕРЖДЕНЫ**

на заседании Учебно-  
методического совета  
Университета Адам  
от 2022 г

**Рецензент:** к.ф.-м.н., доцент

**Составители:** В.Ж. Мураталиева, А.А. Жамагулов, С.Ц. Манжикова, Б.И. Исмаилова.

### **Методическое руководство к лабораторным работам по физике.**

**Часть 2.** Методическое руководство предназначено для студентов первого курса направление: 560001 Лечебное дело / Университет Адам; сост.: Мураталиева В.Ж., Жамагулов А.А., Манжикова С.Ц., Исмаилова Б.И., 2022. – 40 с.

Настоящее методическое руководство к лабораторным работам по медицинской физике, составлено в соответствии с программой курса медицинской физики для высших учебных заведений. Её цель – оказать помощь студентам в понимании изучаемого теоретического материала и в работе с различными физическими приборами, а также ознакомить их с элементами проведения физического эксперимента. В описании каждой лабораторной работы содержится теоретическая часть, в которой достаточно полно отражаются физические и медицинские аспекты, описание экспериментальных установок, порядок выполнения работы и контрольные вопросы.

Методическое руководство предназначено для студентов первых курсов Высшей школы медицины.

УДК 53.534.53.02

ББК 22.3

©Университет АДАМ / БФЭА, 2022

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

### РЕГИСТРАЦИЯ И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММЫ ЧЕЛОВЕКА С ПОСТРОЕНИЕМ СРЕДНЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ОСИ СЕРДЦА В ТРЕУГОЛЬНИКЕ ЭЙНТХОВЕНА

**Цель занятия:** овладеть навыками построения средней электрической оси сердца в треугольнике Эйнтховена.

#### Краткая теория

*Электрокардиография (ЭКГ)* – это метод регистрации электрических процессов, протекающей в сердечной мышце при её возбуждении. Запись этих процессов – электрокардиограмма, в зависимости от вида регистрирующего прибора может быть получена на экране электронно-лучевой трубки или на бумажной диаграммной ленте. *Задача* электрокардиографии заключается в том, чтобы оценить работу сердца (электрические процессы в сердце) по биопотенциалам, регистрируемым с поверхности тела человека.

В настоящее время метод ЭКГ – один из широко распространенных и информативных методов клинической диагностики, совершенно безвредный для пациента. Соответствующие регистрирующие приборы – *электрокардиографы* – просты в эксплуатации, портативны и являются наиболее доступными и массовыми медицинскими приборами.

Метод ЭКГ представляет собой одну из разновидностей медицинской электрографии вообще; другими ее разновидностями являются *электроэнцефалография (ЭЭГ)* – регистрация электрической активности головного мозга, *электромиография (ЭМГ)*, изучающая электрическую активность мышц, *электроретинография (ЭРГ)* – регистрация биопотенциалов сетчатки глаза, возникающих в результате внешнего воздействия на глаз и другие методы. Однако методы ЭЭГ, ЭМГ, ЭРГ требуют более сложных приборов и применяются лишь в условиях крупных клиник и лабораторий. Все чаще метод ЭКГ применяется в комплексе с другими электрофизическими методами диагностики – *медицинской реографии, фонокардиографией, сфигмографией*. Быстро развивается сейчас *магнитокардиография (МКГ)* – метод регистрации магнитного поля сердца. МКГ дополняет метод ЭКГ и имеет перед ним ряд важных преимуществ. Методы электрографии, в том числе ЭКГ, ЭЭГ, ЭМГ, ЭРГ и другие, широко применяются также в физиологических исследованиях с использованием более чувствительных регистрирующих приборов и техники измерений.

### Электрическое поле сердца. Сердце как диполь.

Поскольку тело человека является электропроводящей средой, внутри которой расположен источник биопотенциалов – сердечная мышца, то разность потенциалов будет возникать не только непосредственно на сердце, но и на поверхности тела. Измеряя потенциалы различных точек тела, можно определить линии одинакового потенциала – *эквипотенциальные линии*. Картина эквипотенциальных линий электрического поля изображена на рис. 1 (в момент сокращения желудочков), где 0-0 – линия нулевого потенциала, А-А – электрическая ось сердца. Вид этих линий напоминает поле, создаваемое электрическим диполем (рис. 2), где пунктирными линиями показаны эквипотенциальные поверхности, сплошной линией – силовые линии.

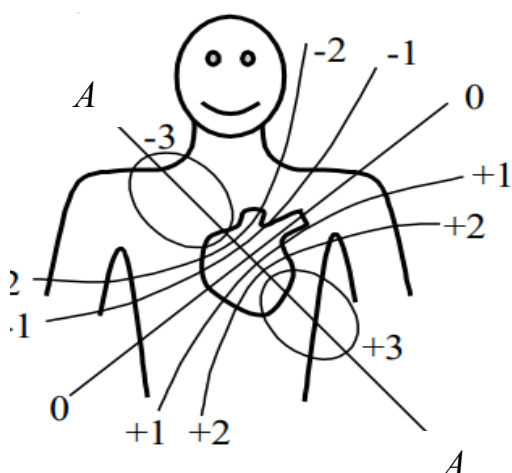


Рис. 1.

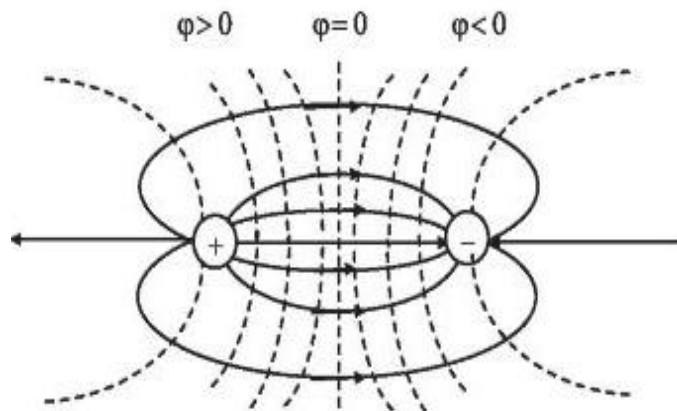


Рис. 2.

Сердце представляет собой диполь, помещенный в объемную проводящую среду. При этом в окружающей сердце среде образуется электрическое поле, которое характеризуется напряженностью и потенциалом. Диполь сердца формируется противоположными зарядами, возникающими у основания сердца и в той части сердца, до которой дошло возбуждение. **Электрический диполь** в физике – это два близко расположенных заряда разного знака, равных по абсолютной величине ( $-Q$  и  $+Q$ ). Основной физической величиной для диполя является *вектор электрического момента диполя*  $\vec{p}$ , равный по величине произведению

$$p = Q l, \quad (1)$$

где  $l$  – расстояние между зарядами. При этом вектор  $\vec{p}$  направлен вдоль оси диполя  $AA$  от отрицательного заряда ( $-Q$ ) к положительному ( $+Q$ ) (рис. 3).

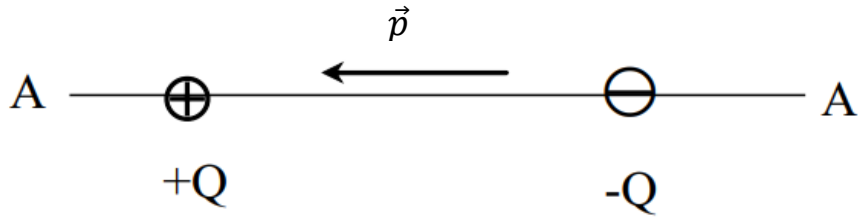


Рис. 3.

Электрическое поле диполя (рис. 2) в любой удаленной точке полностью определяется вектором  $\vec{p}$ . Так, значение потенциала  $\varphi$  в некоторой точке  $M$ , удаленной на большое расстояние  $r$  от диполя,

$$\varphi = \frac{kp_r}{r^2} \quad (2)$$

зависит от проекции  $p_r$  вектора  $\vec{p}$  на направление радиус-вектора точки  $M$   $\vec{r}$  (рис. 4);  $k$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от диэлектрической проницаемости среды, окружающей диполь.

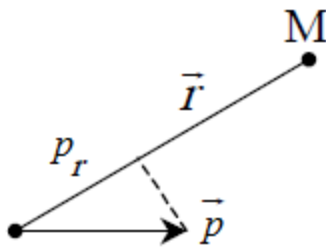


Рис. 4

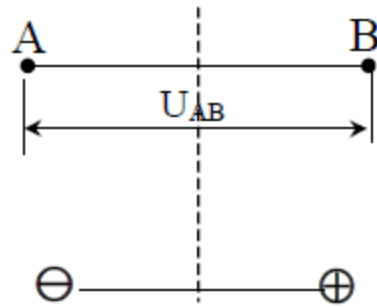


Рис. 5

Из формулы (2) можно получить свойство электрического поля диполя: напряжение (разность потенциалов)  $U_{AB}$  между двумя равноудаленными от диполя точками ( $A$  и  $B$ , рис. 5) прямо пропорционально проекции  $p_{AB}$  вектора  $\vec{p}$  на направление  $AB$ :

$$U_{AB} \sim p_{AB} \quad (3)$$

В соответствии с этой теорией сердце представляет собой диполь, помещенный в объемную проводящую среду. При этом в окружающей сердце среде образуется электрическое поле, которое характеризуется напряженностью и потенциалом. Диполь сердца формируется противоположными зарядами, возникающими у основания сердца и в той

части сердца, до которой дошло возбуждение.

В теории Эйнтховена сердце в электрическом отношении считают диполем, находящимся в однородной среде, которой приближенно являются окружающие сердце ткани. Поэтому за основную электрическую характеристику сердца принимают вектор *дипольного момента сердца*  $\vec{p}$  (рис. 6), в дальнейшем ДМС.

В течение *цикла сердечного сокращения* (ЦСС) вектор  $\vec{p}$  непрерывно изменяется по величине и направлению, приближенно оставаясь во фронтальной плоскости тела. Эти изменения связаны с процессами де- и реполяризации клеточных мембран и целых участков ткани миокарда, сопровождающих механические сокращения сердечной мышцы. За время одного ЦСС конец вектора ДМС  $\vec{p}$  движется по почти плоской кривой, состоящей из трех замкнутых частей – "петель" (рис. 7):  $P$ ,  $QRS$ ,  $T$ . Эту кривую обычно называют *вектор-кардиограммой* (ВКГ) пациента. При этом начало вектора  $\vec{p}$  условно считают фиксированным (обычно в точке, расположенной в межпредсердной перегородке, около верхушки сердца). Направление движения конца вектора  $\vec{p}$  на рис. 7 указано жирными стрелками.

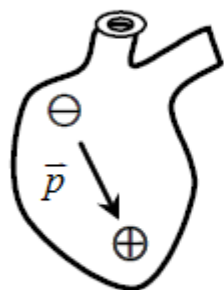


Рис. 6

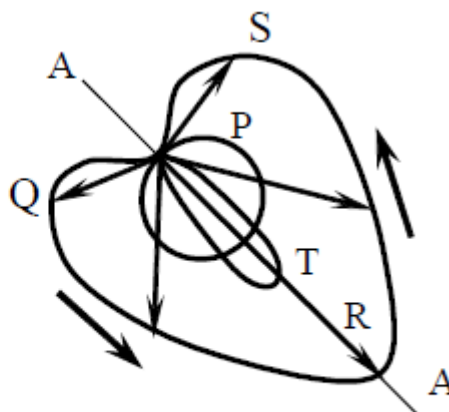


Рис. 7

Каждая часть этой кривой ( $P$ ,  $QRS$ ,  $T$ ) связана с определенной электрической фазой ЦСС ("петля"  $P$  – с возбуждением предсердий, "петля"  $QRS$  и  $T$  – с процессами де- и реполяризации желудочков). При этом максимальное по величине значение вектора  $\vec{p}$  имеет в положении  $R$  (рис. 7), соответствующем стадии наибольшей поляризации желудочковых отделов миокарда. Это положение вектора  $\vec{p}$  определяет направление *электрической оси* сердца  $AA$ , в норме почти совпадающее с анатомической осью сердца.

Аномальные изменения нормы, амплитуды "петель"  $P$ ,  $QRS$ ,  $T$  или скорости движения по кривой конца вектора  $\vec{p}$ , как правило, связаны с

наличием вполне определенной патологии в работе сердца пациента и имеют, следовательно, большое диагностическое значение. Например, "задержка" начала движения вектора  $\vec{p}$  по петле QRS (после окончания движения по петле P) сверх обычных 0,15 с может быть признаком нарушения в проведении электрических импульсов возбуждения от предсердий к желудочкам по соответствующим нервным волокнам ("блокада" атриовентрикулярного типа").

В таблице приведены значения максимального дипольного момента сердца в сопоставлении с массой сердца и тела.

Объект	Масса сердца, г	Масса тела, кг	$p$ , мА·см
Лягушка	0,16	0,036	0,005
Крыса	1,1	0,28	0,107
Собака	100	14	1,63
Человек	300	70	2,32
Лошадь	3 000	400	13,0

### **Физический смысл электрокардиограммы. Отведения**

Для получения сведений о векторе ДМС  $\vec{p}$  в методе ЭКГ измеряют электрическое напряжение (то есть разности потенциалов)  $U_k$  (где  $k = 1, 2, 3, \dots$ ) между парами фиксированных точек на поверхности тела пациента. Каждое  $k$ -е измерение разности потенциалов, производимое с наложением электродов в соответствующих точках тела, принято называть отведением. Графическая кривая, определяющая зависимость этих напряжений от времени,  $U_k(t)$ , называется *электрокардиограммой* (кривой ЭКГ) в отведении номер  $k$ .

В настоящее время приняты три основные стандартные отведения I, II, III, предложенные в начале XX века Эйнтховеном, когда в качестве точек, между которыми измеряются напряжения, берутся следующие: точка А – на правой руке, В – на левой руке, С – на левой ноге, причем эти точки образуют (приблизительно) вершины равностороннего треугольника ABC, в центре О которого находится сердце (рис. 8). Зависимость от времени напряжения  $U_{AB}$  между точками А и В –  $U_1(t)$  – соответствует отведению I,  $U_{AC}$  –  $U_2(t)$  – отведению II и  $U_{BC}$  –  $U_3(t)$  – отведению III. Схематически вид кривой ЭКГ здорового человека в отведении I представлен на рис. 9.

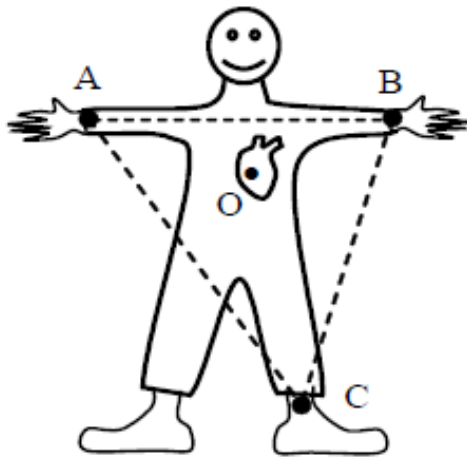


Рис. 8

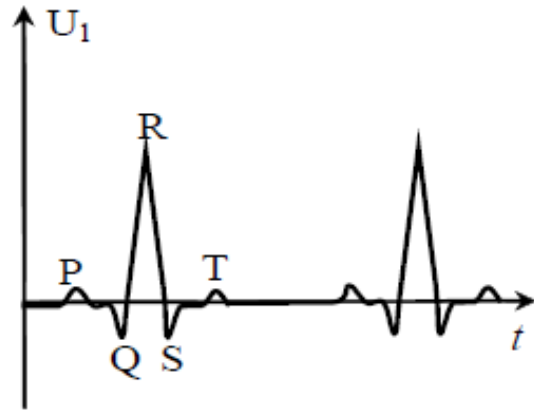


Рис. 9

Поскольку точки А, В, С равно удалены от сердечного "диполя" (рис. 8), то на основании формулы (3) вид кривой ЭКГ  $[U_k(t)]$  приближенно соответствует зависимости проекции вектора ДМС  $p_k(t)$  на соответствующее направление от времени:

$$U_k(t) \sim p_k(t), \quad (4)$$

а отношение напряжений  $U_1 : U_2 : U_3$  в фиксированный момент времени равно отношению  $p_1 : p_2 : p_3$  проекций вектора  $\vec{p}$  на направления АВ, АС и ВС (рис. 10):

$$U_1 : U_2 : U_3 = p_1 : p_2 : p_3. \quad (5)$$

Кривая ЭКГ (рис. 9) состоит из трех характерных зубцов  $P$ ,  $QRS$ ,  $T$ , разделенных промежутками нулевого потенциала и повторяющихся с периодом сердечных сокращений. Эти зубцы соответствуют трем замкнутым "петлям" кривой ВКГ (рис. 11). Поэтому из сравнения кривых ЭКГ в I, II, III отведениях нетрудно получить представление о направлении вектора ДМС  $\vec{p}$  в каждый момент времени, то есть решить основную задачу метода ЭКГ. Например, сопоставляя относительные величины зубцов  $R$  в трех отведениях, можно легко определить положение электрической оси сердца АА (рис. 7), что часто имеет важное значение для диагностики сердечных заболеваний. При дальнейшем развитии электрокардиографии стали применять грудные, пищеводное и другие отведения.

При регистрации биопотенциалов сердца записывается кривая, получившая название электрокардиограммы, которая состоит из пяти основных зубцов  $P$ ,  $Q$ ,  $R$ ,  $S$  и  $T$  (рис. 12), где  $P$  – предсердный зубец и  $QRS$  – желудочковый комплекс. Зубец  $P$  отражает возбуждение предсердий: восходящая часть зубца соответствует распространению возбуждения из

синусного узла на правое предсердие, нисходящая часть зубца – распространению возбуждения по левому предсердию. Зубец *Q* обусловлен возбуждением внутренней поверхности желудочков, правой сосочковой мышцы и верхушки сердца, а зубец *R* – возбуждением поверхности и основания обоих желудочков. К окончанию зубца *S* оба желудочка охвачены возбуждением, т.е. в этом случае отсутствуют разности потенциалов между различными участками желудочков сердца, что соответствует прямолинейному *ST*. Зубец *T* связывают с биохимическими процессами, протекающими после возбуждения желудочков.

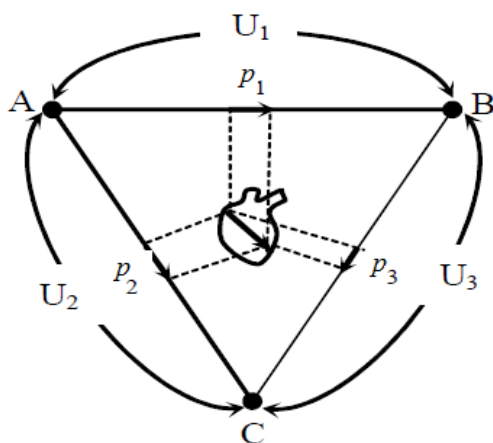


Рис. 10

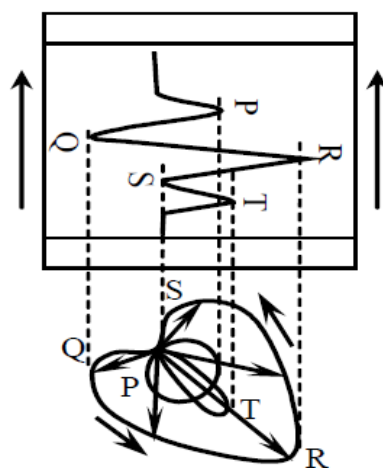


Рис. 11

Кроме указанных основных пяти зубцов *P*, *Q*, *R*, *S* и *T*, может быть шестой зубец *U* (положительный или отрицательный), который встречается сравнительно редко. Происхождение его окончательно не выяснено. Предполагают, что он связан с ионными процессами в миокарде. Зубец *U* располагается после зубца *T*, чаще всего без предварительного интервала, имеет форму, приближающуюся к треугольнику с закругленной вершиной. Наиболее отчетливо зубец *U* наблюдается во втором отведении. Полагают, что начало волны *U* совпадает с концом систолы желудочков и захлопыванием полулунных клапанов.

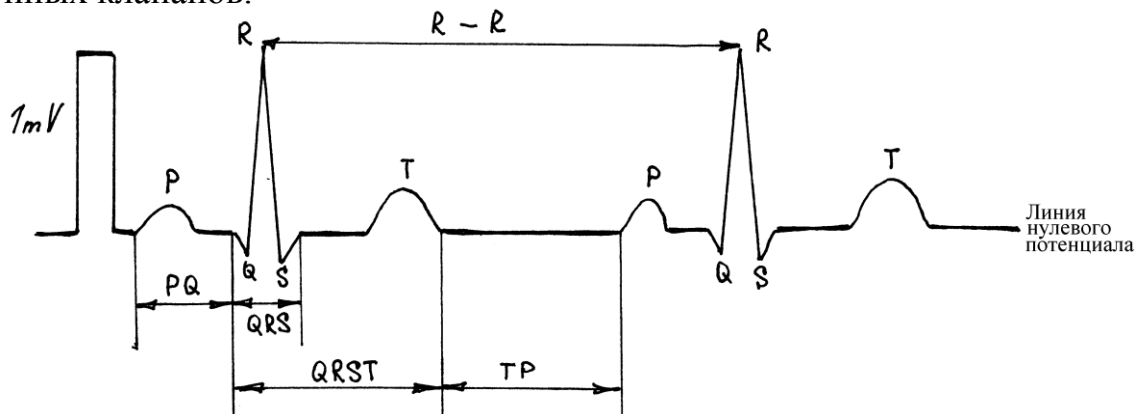


Рис. 12. Нормальная электрокардиограмма.

- калибровка – отметка напряжения (контрольный милливольт);
- зубец P – деполяризация предсердий;
- зубец Q – реполяризация предсердий и деполяризация межжелудочной перегородки (может отсутствовать);
- зубец R – деполяризация боковых стенок и верхушки желудочков;
- зубец S – деполяризация оснований желудочков;
- зубец T – реполяризация желудочков;
- интервал P-Q отражает время, необходимое для деполяризации предсердий;
- интервал QRS – время деполяризации желудочков;
- интервал QRST – время, проходящее от начала деполяризации до конца реполяризации желудочков (в переносе на механическую работу сердца соответствует систоле);
- интервал T-P – состояние покоя;
- интервал R-R – время одного сердечного цикла.

Горизонтальные участки линий между отдельными зубцами соответствуют нулевой разности потенциалов между точками.

Форма, высота и длительность зубцов являются основными характеристиками ЭКГ и деятельности сердца. Так как электрические процессы в сердечной мышце происходят циклически, то группы зубцов при записи ЭКГ повторяются. По расстоянию между группами зубцов (зубцовыми комплексами) можно судить о частоте сердечных сокращений (ЧСС) и ритмичности сердечной деятельности.

Амплитуду зубцов при анализе ЭКГ измеряют в милливольтах, а ширину зубцов и продолжительность интервалов в секундах.

При записи ЭКГ в трех стандартных отведениях отмечается, что амплитуды зубцов электрокардиограммы различны. Наибольшими они регистрируются во втором отведении, наименьшими – в третьем отведении. Это важное положение легко объясняется с точки зрения дипольной или векторной теории.

### **Построение средней электрической оси сердца в треугольнике Эйнтховена**

1. Подпишите на фрагменте полученной вами электрокардиограммы зубцы P, Q, R, S, T, как показано на рис.13:

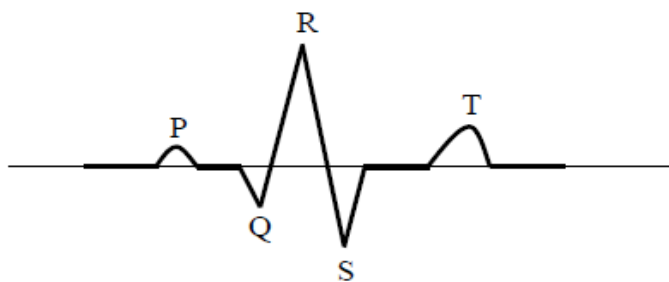


Рис. 13

2. Определите чувствительность  $S$  электрокардиографа и занесите значение в таблицу 1.

$$S = \frac{\text{высота импульса}}{1 \text{ мВ}} \quad \frac{\text{мм}}{\text{мВ}}$$

3. Занесите скорость  $v$  движения ленты в таблицу 2.  
 4. Измерьте для каждого отведения высоты  $h$  зубцов ЭКГ. По измеренной высоте зубцов и чувствительности  $S$  электрокардиографа вычислите разность потенциалов

$$U = \frac{h}{S},$$

соответствующую каждому зубцу. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 1.

5. Измерьте длины  $L$  между зубцами ЭКГ ( $R - R$ ,  $P - Q$ ,  $Q - R - S$ ,  $S - T$ ,  $Q - T$  см. рис. 12).  
 6. По измеренным значениям вычислите длительности  $t$  временных интервалов ЭКГ по формуле

$$t = \frac{L}{v}$$

Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 2.

Таблица №1

Условное обозначение зубца	$h, \text{ мм}$			$S, \text{ мм/мВ}$	$U, \text{ мВ}$			Норма, мВ
	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>		<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	
<i>P</i>								0
<i>R</i>								0,6 – 1,6
<i>S</i>								0 – 0,06
<i>T</i>								0,25 – 0,6
<i>Q</i>								0 – 0,25

Таблица №2

<i>Условное обозначение интервалов</i>	<i>v, мм/с</i>	<i>L, мм</i>	<i>t, с</i>	<i>Норма, с</i>
<i>R – R</i>				0,8 - 1
<i>P – Q</i>				0,12 – 0,21
<i>Q – R – S</i>				0,06 – 0,10
<i>Q – T</i>				0,25 – 0,40

7. Определите по ЭКГ частоту пульса пациента. Для этого рассчитайте: сколько раз за нормативное время (т.е. 1 минуту) сердце успевает совершить циклов работы

$$\text{ЧСС} = \frac{60 \text{ сек}}{t_{R-R}},$$

где  $t_{R-R}$  – длительность одного периода работы сердца. У здорового человека в покое ЧСС составляет: у мужчин – от 60 до 75 в минуту, у женщин – от 65 до 80. Повышение ЧСС (более чем 90 в минуту) называют тахикардией, а урежение (менее 60 в минуту) – брадикардией.

8. Определите положение электрической оси сердца. По результатам измерений комплексов QRS в первом и третьем стандартных отведения определите положение средней электрической оси сердца. Для этого в тетрадах проведите геометрические построения в равностороннем треугольнике – треугольнике Эйнтховена. Углы при основании этого перевернутого треугольника соответствует правой (точка А) и левой (точка В) рукам, угол при вершине (внизу) – левой ноге. Точка О – центр треугольника, точки  $O_I$ ,  $O_{II}$ ,  $O_{III}$  – середины сторон треугольника. На стороне АВ от средней точки ( $O_I$ ) откладывают вправо отрезок  $O_I X_I$ , равный алгебраической сумме амплитуд зубцов Q, R, S, измеренных в первом отведении

$$O_I X_I = R_I - (Q_I + S_I).$$

Из точки  $X_I$  восстанавливают перпендикуляр к АВ.

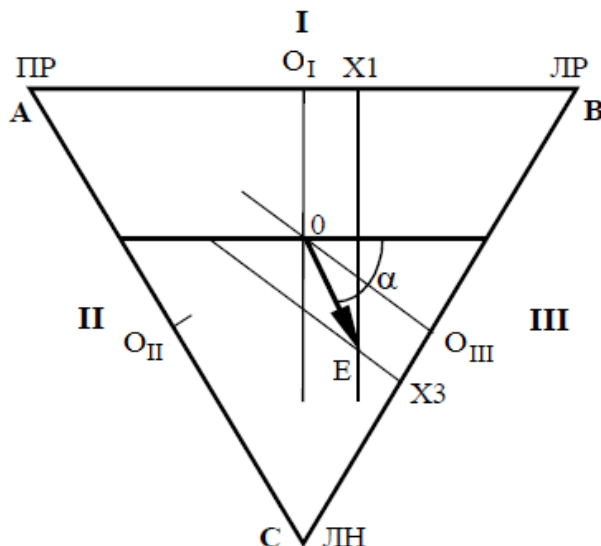
9. На стороне ВС от средней точки  $O_{III}$  откладывают вниз отрезок  $O_{III} X_{III}$ , равный алгебраической сумме амплитуд тех же зубцов, измеренных в третьем отведении ЭКГ

$$O_{III} X_{III} = R_{III} - (Q_{III} + S_{III}).$$

Из точки  $X_{III}$  восстанавливают перпендикуляр к ВС до пересечения с перпендикуляром к АВ. Точка их пересечения (Е) – конечная точка

электрической оси сердца. Начальной точкой ее является центр треугольника O.

10. Отрезок между точками O и E – искомая средняя электрическая ось сердца. Далее определите угол между осью и горизонтальной линией, параллельной АВ и проходящей через центр треугольника.



Принято считать нормальным положением средней электрической оси сердца в диапазоне от 30 до 69.

Результаты определения направления средней электрической оси занести в тетрадь.

### Контрольные вопросы

1. Что называется электрокардиографией? Задачи ЭКГ.
2. Разновидности электрографии.
3. Как определить длительность сердечного цикла, сердечный (систолический) индекс, частоту сердечных сокращений?
4. Характеристики электрического поля.
5. Электростатический диполь. Его характеристики.
6. Электрическое поле сердца.
7. Почему сердце можно рассматривать как токовый диполь?
8. Из каких зубцов состоит ЭКГ здорового человека?
9. Отведения. Треугольник Эйнтховена.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СТЕКЛА

**Цель:** наблюдение преломления стекла на границе раздела сред воздух-стекло, измерение показателя преломления стекла.

**Оборудование:** стеклянная призма, циркуль, линейка, лазер, линейка, карандаш, транспортир.

#### Краткая теория

**Закон прямолинейного распространения света:** свет в оптически однородной среде распространяется прямолинейно.

Доказательством этого закона является наличие тени с резкими границами от непрозрачных предметов при освещении их точечными источниками света (источники, размеры которых значительно меньше освещаемого предмета и расстояния до него). Тщательные эксперименты показали, однако, что этот закон нарушается, если свет проходит сквозь очень малые отверстия, причем отклонение от прямолинейности распространения тем больше, чем меньше отверстия.

**Закон независимости световых пучков:** эффект, производимый отдельным пучком, не зависит от того, действуют ли одновременно остальные пучки или они устранены. Разбивая световой поток на отдельные световые пучки (например, с помощью диафрагм), можно показать, что действие выделенных световых пучков независимо.

Если свет падает на границу раздела двух сред (двух прозрачных веществ), то падающий луч *I* (рис. 1) разделяется на два — отраженный *II* и преломленный *III*, направления которых задаются законами отражения и преломления.

**Закон отражения:** отраженный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и перпендикуляром, проведенным к границе раздела двух сред в точке падения; угол  $i'_1$  отражения равен углу  $i_1$  падения:

$$i'_1 = i_1.$$

**Закон преломления:** луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, проведенный к границе раздела в точке падения, лежат в

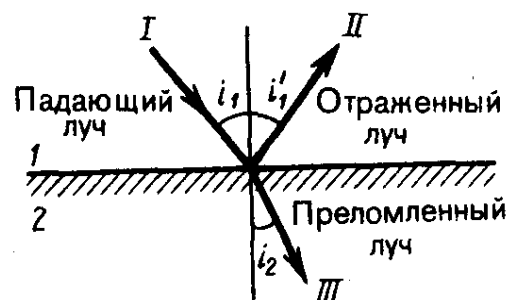


Рис. 1

одной плоскости; отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных сред:

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}, \quad (1)$$

где  $n_{21}$  – **относительный показатель преломления** второй среды относительно первой. Индексы в обозначениях углов  $i_1, i_1', i_2$  указывают, в какой среде (первой или второй) идет луч.

Относительный показатель преломления двух сред равен отношению их абсолютных показателей преломления:

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

**Абсолютным показателем преломления** среды называется величина  $n$ , равная отношению скорости  $c$  электромагнитных волн в вакууме к их фазовой скорости  $v$  в среде:

$$n = \frac{c}{v} \quad (3)$$

Закон преломления (1) можно записать в виде:

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2. \quad (4)$$

Из симметрии выражения (4) вытекает обратимость световых лучей. Если обратить луч *III* (рис. 1), заставив его падать на границу раздела под углом  $i_2$ , то преломленный луч в первой среде будет распространяться под углом  $i_1$ , т. е. пойдет в обратном направлении вдоль луча *I*.

Если свет распространяется из среды с большим показателем преломления  $n_1$  (оптически более плотной) в среду с меньшим показателем преломления  $n_2$  (оптически менее плотную) ( $n_1 > n_2$ ), например из стекла в воду, то, согласно (4),

$$\frac{\sin i_2}{\sin i_1} = \frac{n_1}{n_2} > 1.$$

Отсюда следует, что преломленный луч удаляется от нормали и угол преломления  $i_2$  больше, чем угол падения  $i_1$  (рис. 2, *а*). С увеличением угла падения увеличивается угол преломления (рис. 2, *б, в*) до тех пор, пока при некотором угле падения ( $i_1 = i_{\text{пр}}$ ) угол преломления не окажется равным  $\pi/2$ .

Угол  $i_{\text{пр}}$  называется **предельным углом**. При углах падения  $i_1 > i_{\text{пр}}$  весь падающий свет полностью отражается (рис. 2, з).

По мере приближения угла падения к предельному интенсивность преломленного луча уменьшается, а отраженного – растет (рис. 2, а–в). Если  $i_1 = i_{\text{пр}}$ , то интенсивность преломленного луча обращается в нуль, а интенсивность отраженного равна интенсивности падающего (рис. 2, з). Таким образом, при углах падения в пределах от  $i_{\text{пр}}$  до  $\pi/2$  луч не преломляется, а полностью отражается в первую среду, причем интенсивности отраженного и падающего лучей одинаковы. Это явление называется **полным отражением**.

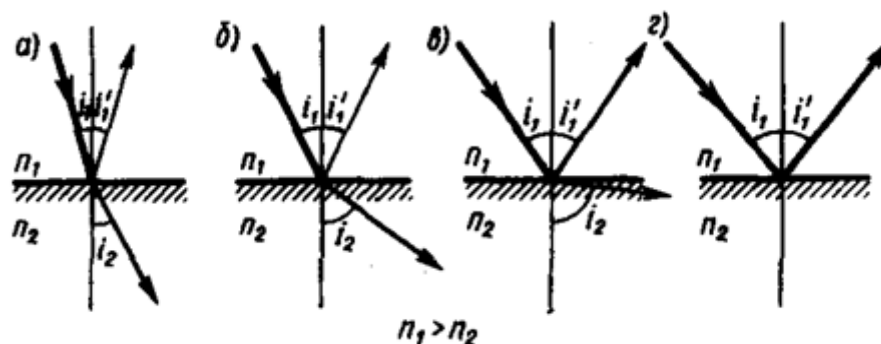


Рис. 2

Предельный угол  $i_{\text{пр}}$  определим из формулы (4) при подстановке в нее  $i_2 = \pi/2$ .

Тогда

$$\sin i_{\text{пр}} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad (5)$$

Уравнение (5) удовлетворяет значениям угла  $i_{\text{пр}}$  при  $n_2 \leq n_1$ . Следовательно, явление полного отражения имеет место только при падении света из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную.

Явление полного отражения используется в призмах полного отражения. Показатель преломления стекла равен  $n \approx 1,5$ , поэтому предельный угол для границы стекло – воздух равен  $i_{\text{пр}} = \arcsin (1/1,5) = 42^\circ$ . Поэтому при падении света на границу стекло – воздух при  $i > 42^\circ$  всегда будет иметь место полное отражение. На рис. 3, а – в показаны призмы полного отражения, позволяющие: а) повернуть луч на  $90^\circ$ ; б) повернуть изображение; в) обернуть лучи. Такие призмы применяются в оптических приборах (например, в биноклях, перископах), а также в рефрактометрах, позволяющих определять показатели преломления тел (по закону преломления, измеряя  $i_{\text{пр}}$ , находим

относительный показатель преломления двух сред, а также абсолютный показатель преломления одной из сред, если показатель преломления другой среды известен).

Явление полного отражения используется также в **световодах (светопроводах)**, представляющих собой тонкие, произвольным образом изогнутые нити (волокна) из оптически прозрачного материала. В волоконных

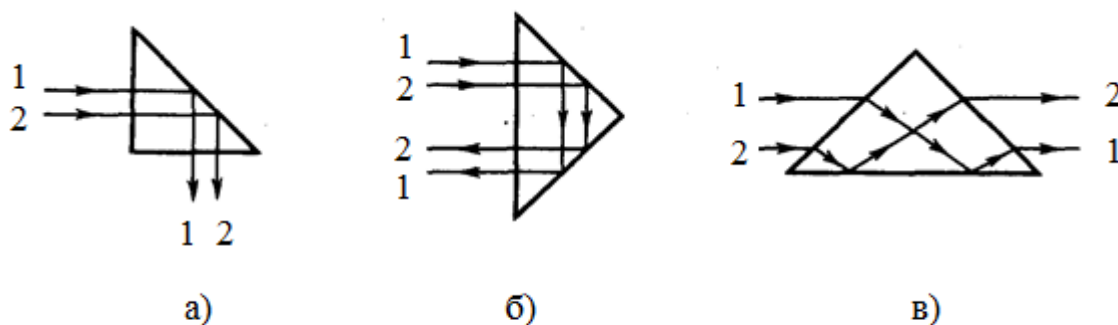


Рис.3

деталях применяют стеклянное волокно, световедущая жила (сердцевина) которого окружается стеклом – оболочкой из другого стекла с меньшим показателем преломления. Свет, падающий на торец световода под углами, большими предельного, претерпевает на поверхности раздела сердцевины и оболочки полное отражение и распространяется только по световедущей жиле.

Таким образом, с помощью световодов можно как угодно искривлять путь светового пучка. Диаметр световедущих жил лежит в пределах от нескольких микрометров до нескольких миллиметров. Для передачи изображений, как правило, применяются многожильные световоды. Световоды используются в электронно-лучевых трубках, в электронно-счетных машинах, для кодирования информации, в медицине (например, диагностика желудка), для целей интегральной оптики и т. д

### Порядок выполнения работы

1. Расположить стеклянную пластину на миллиметровой бумаге. Обвести границы стеклянной пластины.

2. Направьте световой пучок так, чтобы он падал на грань пластины под любым углом.

3. Для построения хода луча внутри пластины сделайте на листе бумаги отметки на падающем на пластину луче (точки *1*, *2*, *В*) и луче, вышедшем из пластины (точки *F*, *3*, *4* см. рис. 4).

4. Убрать стекло.

5. Используя метки, сделанные на листе бумаги, восстановите ход падающего луча и луча вышедшего из пластины.

6. Построить ход луча внутри стекла.

7. Провести перпендикуляр к границе «воздух-стекло». Отметить угол падения  $i_1$  и угол преломления  $i_2$ .

8. Результаты измерений занести в таблицу.

9. Пункты 1 – 8 проделать три раза.

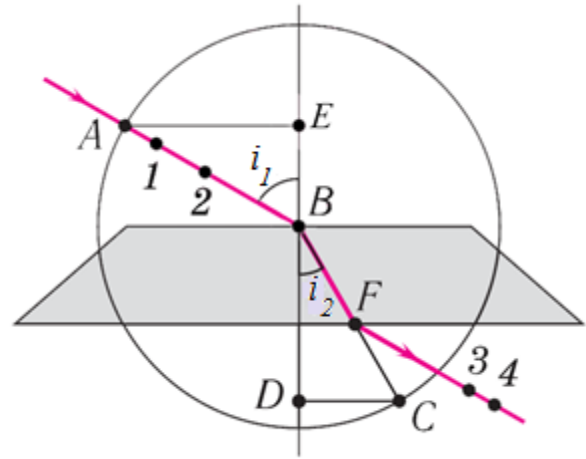


Рис. 4.

№ опыта	$AE, \text{ мм}$	$DC, \text{ мм}$	$\Delta AE, \text{ мм}$	$\Delta DC, \text{ мм}$	$n_2$	$\Delta n_2$	$\varepsilon, \%$
1							
2							
3							
Ср.							

10. Вычислить показатель преломления стекла по закону преломления света.

Т.к.  $\sin i_1 = \frac{AE}{AB}$ ,  $\sin i_2 = \frac{CD}{BC}$  и  $AB = BC$ , то абсолютный показатель преломления стекла в данной работе можно вычислить по формуле:

$$n_2 = \frac{AE}{DC}$$

11. Абсолютные погрешности измерения погрешностей отрезков:

$$\begin{aligned} \Delta AE &= \Delta_{\text{И}} AE + \Delta_{\text{О}} AE \\ \Delta DC &= \Delta_{\text{И}} DC + \Delta_{\text{О}} DC \end{aligned}$$

Так как длину отрезков  $AE$  и  $DC$  измеряют по миллиметровой бумаге или с помощью линейки, то в обоих случаях инструментальную погрешность можно считать равной 1 мм. Погрешность отсчета надо взять также равной 1 мм для учета неточности в расположении линейки относительно края

светового пучка.

12. Максимальную относительную погрешность  $\varepsilon$  измерения показателя преломления определяют по формуле

$$\varepsilon = \frac{\Delta AE}{AE} + \frac{\Delta DC}{DC}$$

13. Окончательный результат измерения показателя преломления:

$$n = n_2 \pm \Delta n.$$

### Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон прямолинейного распространения света.
2. В чём сущность явления преломления света и какова причина этого явления?
3. Что называется коэффициентом преломления и в чём различие абсолютного и относительного коэффициентов преломления?
4. От чего зависит абсолютный показатель преломления вещества?
5. Как с помощью радиуса и перпендикуляра к нормали определить синус угла падения и синус угла преломления?
6. Зависит ли показатель преломления стекла от угла падения луча света на пластину? Где в вашем опыте это видно?
7. В чём заключается явление полного отражения света на границе раздела двух сред?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

**Цель работы:** изучение дифракции монохроматического лазерного излучения на дифракционной решетке, определение длин волн лазерного излучения.

**Оборудование:** лазер, оптическая скамья, дифракционная решетка, линейка, экран.

#### Краткая теоретическая часть

**Дифракция** представляет собой явление отклонения световых лучей от прямолинейного распространения при прохождении световых волн вблизи непрозрачных препятствий и резких неоднородностей. Это явление свойственно всякому волновому процессу. Дифракция света практически наблюдается, если размеры преград или отверстий одного порядка с длиной световых волн или если место наблюдения дифракции находится на большом расстоянии от преград конечных размеров. При дифракции в области геометрической тени происходит перераспределение освещенности и наблюдается максимумы и минимумы света. Явление дифракции наблюдается для плоских и сферических волн. Ниже рассматривается явление дифракции плоских волн. Для пояснения явления рассмотрим параллельный пучок лучей, падающих на непрозрачный экран с отверстиями (рис.1).

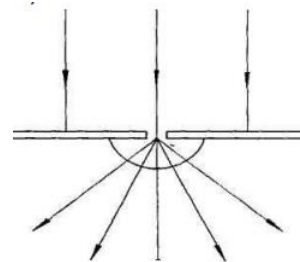


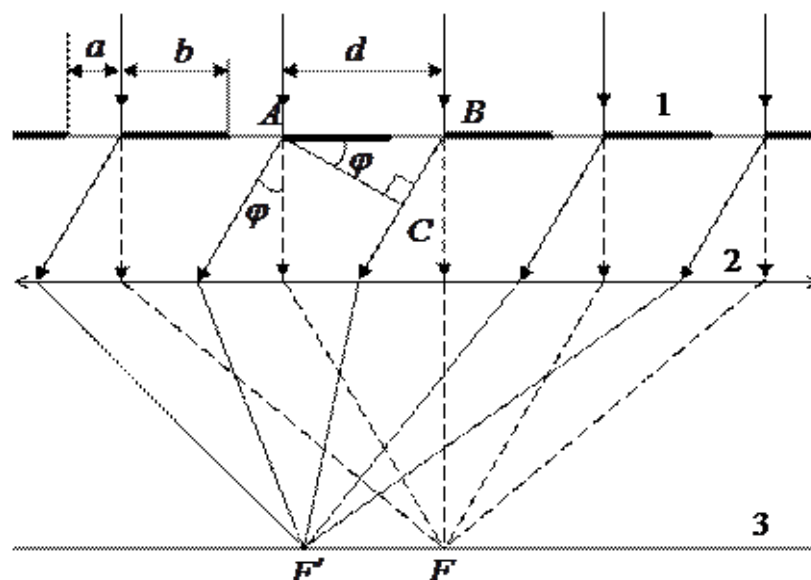
Рис.1

До экрана фронт волны представляет собой плоскость. Согласно **принципу Гюйгенса**, каждую точку волнового фронта можно рассмотреть, как вторичный самостоятельный источник сферических волн. Следовательно, за экраном появляется пучок не параллельных, а расходящихся лучей. Френель существенно развил этот принцип, дополнив его идеей интерференции вторичных волн. Согласно **принципу Гюйгенса – Френеля**, световая волна, возбуждаемая каким-либо источником, может быть представлена

как результат *суперпозиции когерентных вторичных волн*, «излучаемых» фиктивными источниками.

Большое практическое значение имеет дифракция, наблюдаемая при прохождении света через дифракционную решетку. *Дифракционная решетка* представляет собой правильно чередующиеся прозрачные и непрозрачные полосы, поперечные размеры которых сравнимы с длиной световой волны. Обычно, решетки — это стеклянные пластинки, на которых нанесены при помощи специальной машины параллельные одинаковые штрихи, расположенные на строго одинаковых расстояниях друг от друга. Число штрихов доводит до нескольких тысяч на 1 мм. *Периодом* или *постоянной дифракционной решетки* называется сумма ширины прозрачного и непрозрачного промежутка:  $\mathbf{a + b = d}$ .

Пусть на решетку падает перпендикулярно ее поверхности монохроматический пучок параллельных лучей. Волновой фронт параллелен плоскости решетки. Каждая щель решетки ведет себя как точечный источник вторичных когерентных волн. После решетки лучи идут во всех направлениях, следовательно, углы отклонения лучей от первоначального направления имеют значения от  $0^\circ$  и до  $90^\circ$  вправо и влево. Если за решеткой поместить собирающую линзу, то в фокальной плоскости линзы можно наблюдать дифракционную картину, являющуюся результатом двух процессов: дифракции света от каждой щели и многолучевой интерференции света от всех щелей. Результирующая картина, наблюдаемая на экране Э, состоит из множества минимумов (гашения лучей при интерференции) и максимумов (усиления световых потоков при интерференции), различных по интенсивности. Максимумы, которые образуются в результате интерференции лучей, отклонившихся на один и тот же угол от разных щелей, и разность хода которых кратна длине волны называются главными. На рис.2 схематично изображен ход лучей через дифракционную решетку в линзу.



**Рис. 2. Ход лучей в дифракционной решетке.**

1-дифракционная решетка; 2 – линза; 3 – экран;  $a$  – ширина щели,  $b$  – ширина штриха,  $d$  – период решетки (AB),  $\varphi$  - угол дифракции.

Разность хода ( $\Delta$ ) между волнами от краев соседних щелей равна отрезку AC. Линза фокусирует волны, идущие под углом  $\varphi$ , в одной точке ( $F'$ ) на фокальной плоскости, где они складываются, усиливают или ослабляют друг друга. Из рисунка

$$AC = AB \cdot \sin \varphi, \quad AB \cdot \sin \varphi = d \sin \varphi.$$

Максимумы будут наблюдаться под углом определяемым условием:

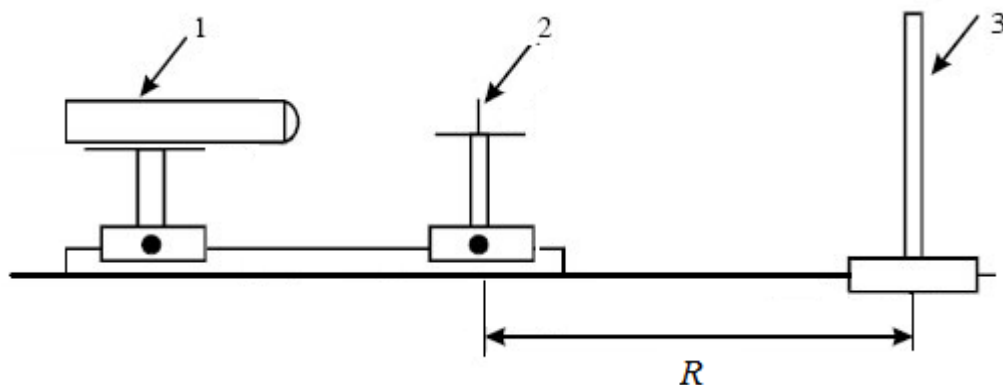
$$d \sin \varphi = k \lambda, \quad \text{где } k=0,1,2 \dots \text{ – порядок максимума} \quad (1)$$

В направлении не отклоненных волн ( $\varphi = 0, k = 0$ ) наблюдается нулевой максимум, являющийся центром дифракционной картины. При  $k = 1$  по обе стороны от нулевого максимума будут максимумы первого порядка: при  $k = 2$  – максимумы второго порядка и так далее. Дифракционная картина представляет систему чередующихся светлых и темных полос, расположенных симметрично нулевому максимуму. При освещении дифракционной решетки немонахроматическим светом (например, белым) в фокальной плоскости линзы вместо светлых полос будут видны спектры, разделенные темными промежутками.

Таким образом, зная период решетки  $d$ , порядок максимума  $k$  и угол дифракции  $\varphi$ , можно найти длину световой волны  $\lambda$ .

## Порядок выполнения работы

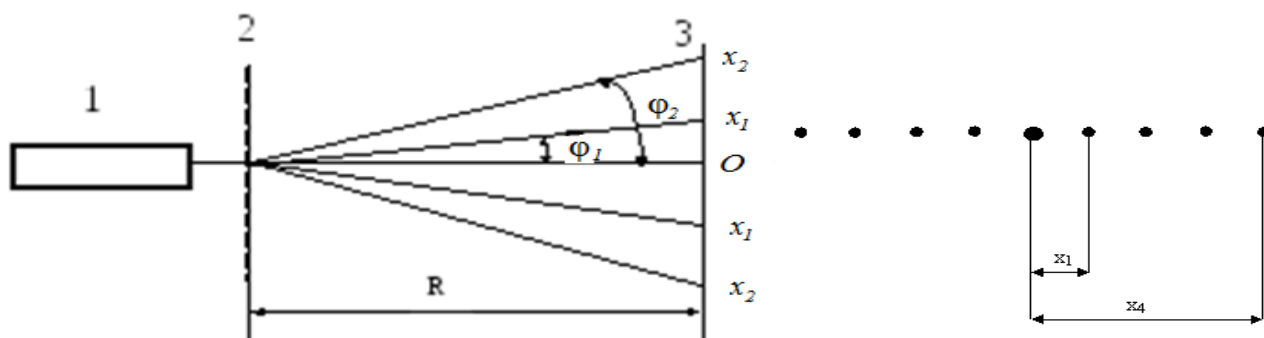
1. Установите на оптической скамье дифракционную решетку и экран-линейку перпендикулярно оси лазера (рис. 3).



**Рис. 3. Установка для наблюдений дифракции лучей лазера на дифракционной решетке.**

1 – лазер; 2 – дифракционная решетка; 3 – экран;  
R – расстояние между решеткой и экраном.

2. Включите лазер.
3. Установите экран так, чтобы луч лазера, пройдя через дифракционную решетку, образовал максимум нулевого порядка на нулевой отметке шкалы.
4. Измерьте расстояние  $x_1$  от середины главного максимума до середины первого. Таким же способом измерьте положение второго, третьего и четвертого максимумов (рис. 4).



**Рис. 4. Схема образования дифракционной картины**

1 – лазер; 2 – дифракционная решетка; 3 – экран; R – расстояние между решеткой и экраном; O – положение главного максимума нулевого порядка;  $x$  – расстояние между выбранным максимумом и максимумом нулевого порядка;  $\varphi$  – угол дифракции для выбранного максимума.

5. Выключите лазер.
6. Измерьте расстояние  $R$  от лазера до экрана.
7. Вычислите длину световой волны по формуле:

$$d \sin \varphi = k \cdot \lambda,$$

где  $d$  – период дифракционной решетки (1/100 мм); т.к. углы малы,

$$\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi, \quad \sin \varphi \approx \frac{x}{R}.$$

8. Вычислите относительную погрешность.

$$\varepsilon = \frac{\Delta \lambda_{\text{ср}}}{\lambda_{\text{ср}}} = \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta R}{R},$$

где  $\Delta d = 0,5 \cdot 10^{-5}$  м,  $\Delta x = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м,  $\Delta R = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м.

В процентах относительная погрешность составляет:

$$\varepsilon = \frac{\Delta \lambda_{\text{ср}}}{\lambda_{\text{ср}}} \cdot 100\%$$

9. Максимальная абсолютная погрешность  $\Delta \lambda_{\text{ср}} = \lambda_{\text{ср}} \varepsilon$ .
10. Окончательный результат измерений записать в виде:

$$\lambda = \lambda_{\text{ср}} \mp \Delta \lambda_{\text{ср}}$$

11. Замените первый лазер лазером другого цвета и проделайте те же самые измерения.

№	Первый лазер							Второй лазер						
	$R, \text{ м}$	$x, \text{ м}$	$k$	$\sin \varphi$	$\lambda, \text{ м}$	$\Delta \lambda, \text{ м}$	$E, \%$	$R, \text{ м}$	$x, \text{ м}$	$k$	$\sin \varphi$	$\lambda, \text{ м}$	$\Delta \lambda, \text{ м}$	$E, \%$
1														
2														
3														
4														

ср														
----	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

### **Контрольные вопросы**

1. В чём заключается явление дифракции?
2. Что из себя представляет дифракционная решетка?  
Характеристики дифракционной решетки.
3. Какие свойства света подтверждает дифракция света?
4. При каких условиях наблюдается дифракция света?
5. Почему максимумы располагаются как слева, так и справа от нулевого максимума?

# ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ

## РАДИОАКТИВНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

**Цель работы.** Изучение закономерностей радиоактивных распадов и возникновения радиоактивных излучений, их взаимодействия с веществами и ознакомление с дозиметрией ионизирующих излучений.

### *Краткие теоретические сведения*

Ядро атома представляет собой квантомеханическую систему, состоящую из нуклонов: протонов и нейтронов. Нуклоны в ядре связаны между собой, так называемыми ядерными силами.

Свойства ядер определённых элементов самопроизвольно превращаться в ядра других элементов с испусканием радиоактивного излучения называется **радиоактивностью**. Само явление называется **радиоактивным распадом**.

**Радиоактивность** – самопроизвольное превращение ядер одних элементов в другие, при котором ядро переходит в более устойчивое состояние. Процесс сопровождается испусканием ионизирующих излучений (корпускулярных либо электромагнитных).

*Радиоактивные превращения характеризуются:*

- 1) способом выделения избыточной энергии, которая отдается либо в виде альфа- или бета частиц определенной энергии, либо электромагнитного излучения;
- 2) временем протекания радиоактивного распада и вероятностью распада ядра за единицу времени. Радиоактивный распад – явление статистическое. Нельзя предсказать, когда именно распадается данное нестабильное ядро. Для описания статистических закономерностей радиоактивного распада используется естественная статистическая величина, называемая постоянной распада  $\lambda$ , она не зависит от времени. Смысл величины  $\lambda$  состоит в том, что если взять большое число  $N$  одинаковых нестабильных ядер, то за единицу времени в среднем будет распадаться  $\lambda N$  ядер. Величина  $\lambda N$  называется активностью и характеризует излучение препарата в целом, а не отдельного ядра.

За единицы радиоактивности приняты:

- а) системная – **Беккерель (Бк, Вq)**. 1 Бк равен активности нуклида в радиоактивном источнике, в котором за время 1 с происходит 1 акт распада ( $1 \text{ Бк} = 1 \text{ расп/сек}$ ). Единица названа в 1975 г. в честь французского ученого А. Беккереля (А. Becquerel? 1852-1908 г.).
- б) традиционная (внесистемная) – **Кюри (Ки, Ci)**. Единица названа в честь французских ученых П. Кюри и М. Складовской-Кюри и введена в 1910 г. с 1956 г. означает такое количество радиоактивного вещества, которое распадается с интенсивностью  $3,7 \cdot 10^{10}$  распадов в 1 секунду, т.е.

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}, \quad 1 \text{ Бк} = 2,703 \cdot 10^{-11} \text{ Ки}.$$

Уменьшение количества активных ядер с течением времени происходит в соответствии с законом радиоактивного распада, который описывается экспоненциальной кривой (рис.1) и формулируется следующим образом: за равные промежутки времени происходит превращение равных долей активных атомов.

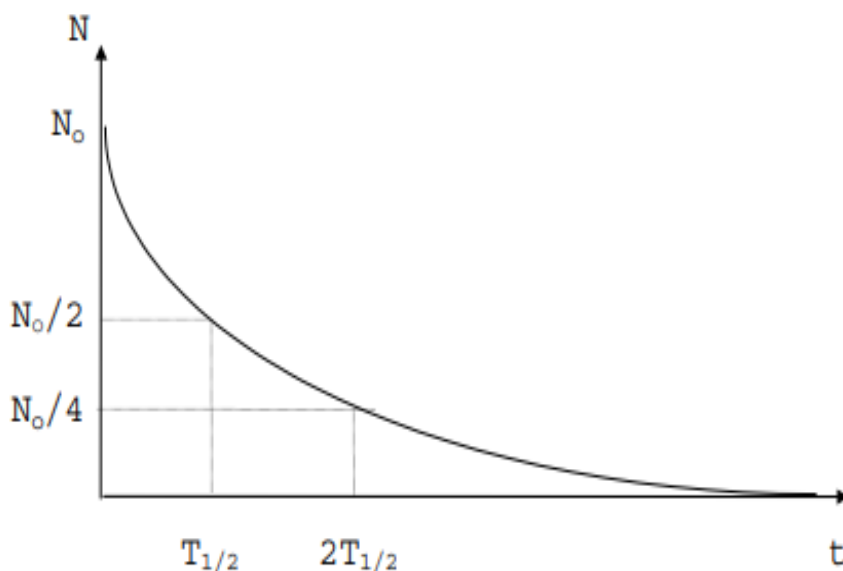


Рис.1. Изменение количества радиоактивных ядер с течением времени

Закон радиоактивного распада имеет следующее математическое выражение:

$$N_t = N_0 e^{\lambda t}, \quad [1]$$

где  $N_0$  - исходное количество радиоактивных ядер;  $N_t$  - количество активных ядер, оставшихся спустя время распада  $t$ ;  $e$  - основание натуральных логарифмов;  $\lambda$  - постоянная распада,  $t$  - время распада.

Постоянная распада  $\lambda$  связана с периодом полураспада  $T_{1/2}$ . Периодом полураспада называется время, в течение которого число радиоактивных ядер уменьшается вдвое. После математических преобразований формула [1] приобретает следующий вид:

$$N_t = N_0 e^{\frac{-0,693t}{T_{1/2}}} \quad [2]$$

Этой формулой пользуются для практических целей, когда дают рекомендации о возможности использования загрязненных радионуклеидами территорий продуктов питания, воды и т.п. так как через  $10 T_{1/2}$  остается практически чистая среда (т.е. остается меньше 0,1% от исходного количества радионуклида).

Например: I-131 имеет период полураспада, равный 8,05 суток; цельное молоко и листовые овощи местного производства запрещают использовать в течение 2-3 месяцев после выброса радиоактивного йода; у Cs-137, период полураспада равен 30,1 г; у Sr-90 период полураспад равен 29,12 г; т.е. земли, загрязненные Cs-137 и Sr-90 можно будет использовать спустя 300 лет после аварии на ЧАЭС.

В ядерной физике принято следующее обозначение ядер:  ${}_Z^A X$ . Здесь  $X$ -символ химического элемента,  $Z$  – зарядовое число ядра,  $A$  – массовое число ядра.  $Z$  указывает на число протонов в ядре, совпадает с порядковым номером элемента.  $A$  указывает на суммарное количество протонов и нейтронов в ядре:  $A = Z + N$ . Например, один из изотопов урана записывается так:  ${}_{92}U^{238}$

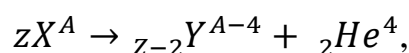
В этом ядре имеется  $Z = 92$  протонов. Суммарное количество протонов и нейтронов  $A = 238$ , а число нейтронов в ядре:  $N = A - Z = 238 - 92 = 146$ .

Нестабильные ядра претерпевают 4 основных типа радиоактивных превращений: альфа – распад бета – превращение, гамма – превращение и спонтанное деление ядер. Тип радиоактивных превращений определяется видом частиц,

испускаемых при распаде. Процесс радиоактивного распада всегда экзотермичен, т.е. идет с выделением энергии. Исходное ядро называется материнским (обычно в схемах обозначено символом  $X$ ), а получающееся после распада ядро – дочерним (обычно в схемах – символ  $Y$ ).

**1. Альфа ( $\alpha$ ) – распад.** При  $\alpha$  – распаде, испускаются  $\alpha$  – лучи. Альфа-лучи представляют собой поток ядер гелия  ${}^2_2\text{He}^4$ , вылетевшие из ядер радиоактивных веществ со скоростью  $10^9$  см/с. Энергия  $\alpha$  – частицы велика и в разных случаях  $\alpha$  – распада достигает 4 – 9 МэВ.

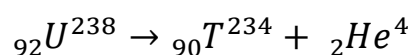
**Правило смещения для  $\alpha$ -распада:**



где  $X$  – означает химический символ распадающегося (материнского) ядра;  $Y$  – химический символ образующегося (дочернего) ядра;  $A$  – массовое число;  $Z$  – порядковый номер.

Известно более 200 альфа – активных ядер, почти все они имеют порядковый номер больше 83. Энергия  $\alpha$  – частиц тяжелых ядер чаще всего находится в интервале от 4 до 9 МэВ.

Примером может служить распад изотопа урана  ${}_{92}\text{U}^{238}$ , протекающий с образованием тория:

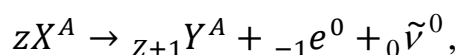


**2. Бета ( $\beta$ ) – распад.** Бетта – превращение ядер – это внутринуклонный процесс, т.е. в ядре распадается одиночный нуклон, происходит внутренняя перестройка ядра, вылетающего из ядра при  $\beta$  – распаде частицы (электрон  $e^-$ , позитрон  $e^+$ , нейтрино  $\nu$ , антинейтрино  $\bar{\nu}$ )

Существует три разновидности  $\beta$  – распада:

- а) электронный ( $\beta^-$ ) - распад
- б) позитронный ( $\beta^+$ ) - распад,
- в) электронный захват или  $K$ -захват.

**а) Правило смещения для  $\beta^-$  – распада.** Электронный  $\beta^-$  - распад протекает по схеме:



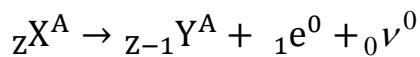
Один из нейтронов в ядре превращается в протон, электрон и антинейтрино, т.е.  ${}_0n^1 \rightarrow {}_1p^1 + {}_{-1}e^0 + {}_0\tilde{\nu}^0$ .

где  ${}_0n^1$  - нейтрон,  ${}_1p^1$  - протон,  ${}_{-1}e^0$  - электрон,  ${}_0\tilde{\nu}^0$  - антинейтрино.

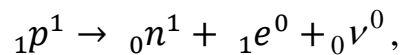
Например:  ${}_{90}Th^{234} \rightarrow {}_{91}Pa^{234} + {}_{-1}e^0 + {}_0\tilde{\nu}^0$ .

Торий  ${}_{90}Th^{234}$  превратился в протактиний  ${}_{91}Pa^{234}$ . Массовое число ядра не меняется. Порядковый номер ядра - продукта увеличивается на единицу.

**б) Правило смещения для ( $\beta^+$ ) - распада:**



Один из протонов ядра превращается в нейтрон, позитрон и нейтрино, т.е.

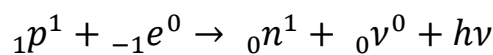


где,  ${}_1 e^0$  - позитрон,  ${}_0 \nu^0$  - нейтрино.

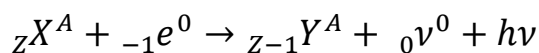
Например:  ${}_7 N^{13} \rightarrow {}_6 C^{13} + {}_1 e^0 + {}_0 \nu^0$

при этом азот  ${}_7 N^{13}$  превратился в углерод  ${}_6 C^{13}$ . Атомный номер дочернего ядра на единицу меньше, чем у материнского.

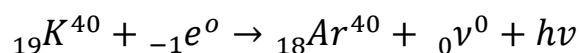
**в) Электронный захват или К - захват** заключается в том, что ядро поглощает один из электронов из К-оболочки атома, в результате чего один из протонов превращается в нейтрон, испуская при этом нейтрино:



Правило смещения для К-захвата:



Место в электронной оболочке, освобождённое захваченным электроном, заполняется электронами из вышележащих слоев, в результате чего возникают рентгеновские лучи. Примером К-захвата может служить превращение калия в аргон:



**4) Гамма-излучение.**  $\gamma$  – излучение представляет собой весьма коротковолновое электромагнитное излучение, возникающее при ядерных процессах.  $\gamma$  – излучение сопровождает, например,  $\alpha$  – и  $\beta$  – распады. Если дочернее ядро, возникающее при этих распадах, оказывается в возбужденном состоянии, то, переходя в нормальное состояние, оно испускает  $\gamma$  – квант.

Наличие линейчатого спектра  $\gamma$  – излучения свидетельствует о дискретности энергетических состояний ядра, которым соответствуют энергии  $E_1, E_2, E_3, \dots$ . Состояние с минимальной энергией  $E_1$  соответствует основному состоянию ядра, а остальные – возбужденным (рис.2). При переходе возбужденного ядра из состояния с большой энергией в состояние с меньшей энергией выделяется порция электромагнитного излучения в виде  $\gamma$  – кванта:

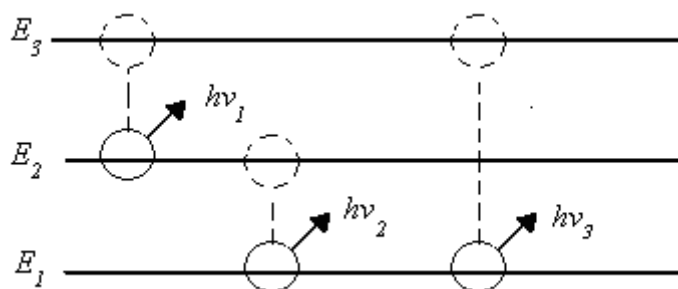


Рис. 2.

Частота гамма-излучения для различных ядерных процессов колеблется в пределах  $10^{19} - 10^{22}$  Гц. Этому интервалу частот соответствует энергия от 0,04 до 40 МэВ.

$\gamma$  – кванты не несут электрического заряда и их масса покоя равна нулю. В результате, они обладают достаточно высокой проникающей способностью при взаимодействии с веществом.

### **Проникающая и ионизирующая способности радиоактивного излучения.**

Радиоактивные лучи ( $\alpha$ ,  $\beta$  – частицы и  $\gamma$  – фотоны), обладающие высокой кинетической энергией, проникая в вещество, взаимодействуют с электронами атомов и, выбивая их из атомов, ионизируют последние. Вместе с ионизацией происходит и

возбуждение атомов с последующим излучением в оптическом диапазоне, а также активация молекул, приводящая к фотохимическим реакциям.

$\alpha$  – частицы, имеющие двойной элементарный заряд, производят интенсивную ионизацию и проникают относительно неглубоко. Пробег в воздухе в зависимости от энергии частиц колеблется от 2 до 8,5 см. В тканях организма они проникают на глубину до 0,1 мм. На 1 см пробега  $\alpha$  – частица образует до 30 тысяч пар ионов. Благодаря малой глубине проникновения (рис.3), защитой от  $\alpha$  – частиц может служить тонкий слой любого вещества: одежда, плотная бумага, целлофан и т.д. Основную опасность  $\alpha$  – частицы представляют при попадании на слизистую оболочку дыхательных или пищеварительных (при приёме пищи) путей.

$\beta$  – частицы, имеющие единичный заряд, а также меньшую энергию, производят значительно менее интенсивную ионизацию, чем  $\alpha$  – частицы, и поэтому проникают в вещество на большую глубину (рис.3). В зависимости от энергии пробег  $\beta$  – частиц в воздухе может иметь порядок от десятков сантиметров до десятков метров. В тканях организма  $\beta$  – частицы проникают на глубину до нескольких сантиметров. В воздухе  $\beta$  – частица образует от 50 до 250 пар ионов на 1 см пробега.

$\gamma$  – лучи отличаются очень высокой проникающей способностью (рис.3). Пробег в воздухе составляет десятки и сотни метров. В тканях организма  $\gamma$  – лучи проникают на большую глубину. Первичная ионизирующая способность  $\gamma$  – фотона невелика, на 1 см пути в воздухе образуется всего несколько пар ионов. Это связано с отсутствием у гамма – фотонов электрического заряда. В процессе взаимодействия  $\gamma$  – фотонов с веществом появляются вторичные электроны и позитроны. Эти частицы, обладая зарядом и достаточно большой энергией, производят достаточно эффективную ионизацию. Поэтому полный ионизационный эффект от действия  $\gamma$  – излучения может быть весьма значительным. Для защиты от  $\gamma$  – излучения могут применяться только толстые слои среды, земли, бетона, кирпичной стены, а также тяжёлые металлы, например свинец, толщиной в несколько сантиметров.

Ионизирующей способностью обладают также потоки протонов и нейтронов, фотоны рентгеновского излучения. Все эти

излучения объединяются под общим понятием ионизирующее излучение.

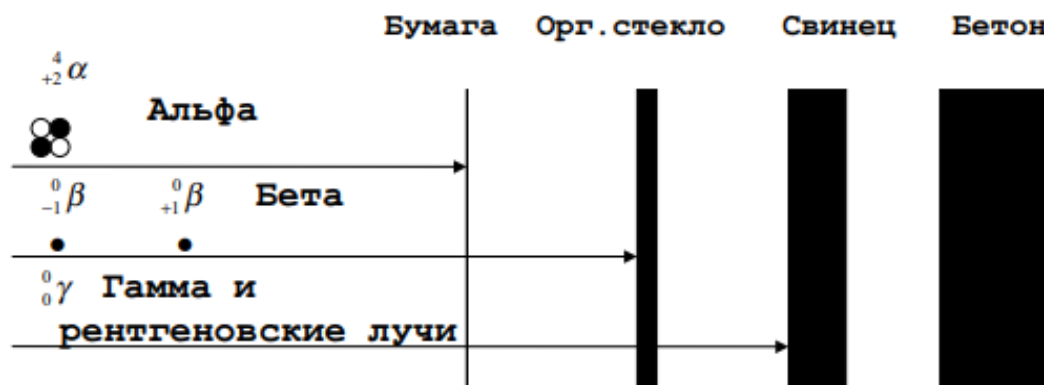


Рис. 3. Проникающая способность разных видов ионизирующего излучения.

### Дозиметрия ионизирующего излучения

**Дозиметрия** – это определение дозы или ее мощности (т.е. дозы в единицу времени).

Для оценки последствий воздействия ионизирующих излучений на вещества используется величина, называемая *поглощенная доза*. Поглощенная доза численно равна энергии излучений, поглощенной единицей массы вещества. Она широко применяется в радиационной физике, физике защиты и радиационной безопасности, радиационной химии, радиационной технологии, радиационной биологии и медицине. Единицей поглощенной дозы в СИ является Грэй, обозначается Гр. (1 Гр = 1 Дж/кг). Один Грэй-это энергия ионизирующего излучения в Дж, поглощенная веществом массой 1 кг. Если  $D$  и  $E$ , соответственно, поглощенная доза и энергия,  $m$ -масса облучаемого вещества, то при однородном распределении массы и энергии:  $D = E/m = E/V\rho$

Применяется также внесистемная единица, называемая **радом**. Рад есть доза любого вида ионизирующего излучения, при которой в 1 г массы вещества поглощается энергия излучения, равная 100 эрг (1 рад=100 эрг/г =  $10^{-2}$  Дж/кг). Поглощенная доза зависит как от природы вещества, которым она поглощается, так и от природы и свойства излучения.

Общее облучение дозой в 1000 рад смертельно для человека. Дозы 300-500 рад вызывают лучевую болезнь, 200-300 рад останавливают деление клеток, вызывают их гибель во многих

тканях организма, а также могут быть причиной появления аномалий в потомстве.

Скорость накопления поглощённой дозы характеризуется величиной называемой **мощностью поглощённой дозы** или **мощностью дозы излучения**.

Единицей мощности поглощенной дозы в СИ является грэй в секунду (Гр/с).  $1 \text{ Гр/с} = 1 \text{ Вт/кг}$ .

Непосредственное измерение поглощенной дозы в веществе и особенно в глубине тканей живого организма затруднительно. В связи с этим для прогнозирования величины поглощённой дозы рентгеновского или гамма-излучения, используется так называемая **экспозиционная доза**, которая представляет собой поглощённую дозу в воздухе. От экспозиционной дозы с помощью соответствующих коэффициентов переходят к дозе, поглощённой в объекте.

**Экспозиционная доза** – количественная характеристика поля источника ионизирующего излучения (гамма или рентгеновского) характеризующая величину ионизации сухого воздуха при атмосферном давлении.

Единица измерения экспозиционной дозы- кулон на килограмм (Кл/кг).  $1 \text{ Кл/кг}$  – есть экспозиционная доза рентгеновского или гамма – излучения, при которой в результате полной ионизации на  $1 \text{ кг}$  сухого атмосферного воздуха, образуются ионы, несущие зарядов в один кулон электричества каждого знака.

Применяется также внесистемная единица рентген. Рентген (Р) - есть экспозиционная доза рентгеновского или – излучения, при которой в результате полной ионизации массы в  $1,293 \text{ кг}$  атмосферного воздуха образуются ионы, несущие заряд в одну электростатическую единицу количества электричества каждого знака.  $1 \text{ Р} = 2.58 \cdot 10^{-4} \text{ А/кг}$ .

Скорость приращения экспозиционной дозы- есть её мощность. Единица измерения в СИ Дж/кг. Наряду с этим применяется внесистемная единица мощности экспозиционной дозы рентген в секунду (Р/с).  $1 \text{ Р/с} = 2.58 \cdot 10^{-4} \text{ А/кг}$ .

Для целей радиационной защиты широкое распространение получила **эквивалентная доза**. Единица измерения в СИ Джоуль на килограмм (ДЖ/кг). На практике в научной литературе используется специальное название этой единицы - **зиверт** (Зв).  $1 \text{ Зв} = 1(\text{Дж/кг})$ . До введения СИ в качестве единицы эквивалентной

дозы был принят биологический эквивалент рада - бэр. Эквивалентная доза - есть мера вредных последствий при облучении живого организма.

Эквивалентная доза  $D$  определяется выражением:  $D_3 = kD$  где  $D$ -поглощённая доза излучения в живой ткани, для которой определяется эквивалентная доза,  $k$  - коэффициент качества излучения. Коэффициент  $k$  представляет собой регламентированное значение относительной биологической эффективности (ОБЭ) излучения. ОБЭ применяется в биологических исследованиях и равна отношению поглощённой дозы образцового излучения  $D$  к поглощённой дозе данного вида излучения  $D_x$ , для которого определяется ОБЭ. (ОБЭ =  $D/D_x$ ). Характеристикой качества излучения в данном случае служит линейная передача энергии (ЛПЭ). Значения коэффициента качества излучения при внешнем облучении, рекомендованные международной комиссией по радиационной защите, приведены в табл. 1 в зависимости от ЛПЭ и видов излучения.

**Таблица 1**

ЛПЭ, КэВ/мкм воды	$k$	Виды излучения	$k$
3,5	1	Рентгеновское $\gamma$ -излучение и электроны	1
3,5 - 7,0	2		
7,0 - 23	2-5	Нейтроны, протоны и одиночные заряжённые частицы с $m > 1$ а.е.м.	10
23-53	5-10		
53-175	10-20	$\alpha$ – частицы и др. многозарядн. частицы	20

Риск развития стохастических последствий облучения организма человека зависит не только от эквивалентной дозы, но и от радиочувствительности тканей или органов, подвергшихся облучению. Величина воздействия ионизирующего излучения, используемая как мера риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов с учетом их радиочувствительности, называется **эффективная доза (E)**. E представляет собой сумму произведений

эквивалентных доз в тканях и органах тела на соответствующие взвешивающие коэффициенты и выражается соотношением:

$$E = \sum_T W_T H_T,$$

где  $H_T$  – эквивалентная доза в ткани или органе  $T$ ;  $W_T$  — весовой множитель ткани или органа  $T$ .

Взвешивающий коэффициент (весовой множитель)  $W_T$  характеризует отношение стохастического поражения какого-либо органа или ткани к риску поражения всего организма при равномерном облучении всего тела. Риск поражения всего организма принимают равным 1, т.е. сумма тканевых весовых множителей равна 1. Рекомендуемые весовых множителей  $W_T$  приведены в таблице 2.

**Таблица 2.**

### **ТКАНЕВЫЕ ВЕСОВЫЕ МНОЖИТЕЛИ**

<b>Ткань или орган</b>	<b><math>W_T</math></b>	<b>Ткань или орган</b>	<b><math>W_T</math></b>
Половые железы	0,20	Молочные железы	0,05
Красный костный мозг	0,12	Печень	0,05
Толстый кишечник	0,12	Пищевод	0,05
Легкие	0,12	Щитовидная железа	0,05
Желудок	0,12	Кожа	0,01
Мочевой пузырь	0,05	Остальные органы	0,05

При облучении отдельного человека говорят об индивидуальной дозе. При радиационных воздействиях на группу людей рассчитывают коллективные дозы:

- а) коллективная эквивалентная доза ( $S_T$ )** в ткани  $T$  применяется для выражения общего облучения конкретной ткани или органа у группы лиц, она равна произведению числа облученных лиц на среднюю эквивалентную дозу в органе или ткани;
- б) коллективная эффективная доза ( $S$ )** относится в целом, к облученной популяции. Она равна произведению средней эффективной дозы на число лиц облученной в группе.

В определении коллективной эквивалентной и коллективной эффективной доз не указано время, за которое получена доза.

Поэтому при расчете коллективных доз всегда должно быть четкое указание на период времени и группу лиц, по которым производится данный расчет.

Коллективные дозы используют для оценки лучевой нагрузки на популяцию и риска развития стохастических последствий действий ионизирующих излучений.

### Математическая обработка результатов измерений

Процесс радиоактивного распада имеет статистический характер. Кроме того, процессы взаимодействия излучения с веществом, которые лежат в основе регистрации излучения, также имеют вероятностный характер. Статистический характер явлений, рассматриваемых в ядерной физике, приводит к статистическим ошибкам.

Среднеквадратичная ошибка равна корню квадратному из числа сосчитанных частиц:  $\Delta N = \sqrt{N}$

Относительная статистическая ошибка равна:

$$\varepsilon = \frac{\Delta N}{N} \cdot 100\% \text{ или } \varepsilon = \frac{100\%}{\sqrt{N}}.$$

Отсюда можно найти число частиц, которое нужно сосчитать для достижения заданной точности.

Следовательно, чтобы измерить среднее число частиц со статистической ошибкой 10%, нужно сосчитать 100 частиц. Для того чтобы статистическая ошибка составила 1% необходимо сосчитать  $10^4$  частиц, а для достижения ошибки равной 0,1% -  $10^6$  частиц и т.д. Кроме того, необходимо учесть статистические ошибки, связанные с методикой измерения, точностью приборов и т.п.

### Контрольные вопросы

1. Каково строение атомного ядра?
2. Определить количество протонов и нейтронов в ядре  ${}_{92}U^{235}$
3. Напишите правило смещения для  $\alpha$  – распада и объясните.
4. Какое превращение происходит внутри ядра при  $\beta^-$  – распаде?
5. Напишите по правилу смещения  $\beta^+$  – распад ядра  ${}_{7}N^{13}$ .

6. Напишите по правилу смешения  $k$  – захват ядра  ${}_{19}K^{40}$ .
7. Какие условия необходимы для возникновения  $\gamma$  – излучений?
8. Что называется поглощенной дозой? В чем измеряется поглощенная доза в СИ?
9. Что такое экспозиционная доза?
10. Что такое эквивалентная доза?
11. Как определяется среднеквадратичная ошибка счета радиоактивных частиц?
12. Как определяется относительная ошибка измерения количества радиоактивных частиц?

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Лабораторная работа № 6.</i>	Регистрация и анализ электрокардиограммы человека с построением средней электрической оси сердца в треугольнике Эйнтховена.....	3
<i>Лабораторная работа № 7.</i>	Определение показателя преломления стекла.....	14
<i>Лабораторная работа № 8.</i>	Определение длины волны лазерного излучения с помощью дифракционной решетки .....	20
<i>Физический практикум</i>	Радиоактивные излучения .....	25

Подписано в печать \_\_\_\_\_.  
Формат \_\_\_\_\_  
Усл.печ. л. \_\_\_\_\_ .  
Тираж \_\_\_\_\_ экз.  
Типография \_\_\_\_\_  
Университет Адам.  
индекс, г. Бишкек, ул. 7-Апреля, 4