

Министерство здравоохранения Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Ижевская государственная медицинская академия»
кафедра медбиофизики, информатики и экономики

УЧЕБНЫЙ ТЕЗАУРУС
КУРСА МЕДИЦИНСКОЙ И БИОЛОГИЧЕСКОЙ
ФИЗИКИ
Часть II

Учебное пособие

Ижевск, 2016

УДК 534.7:539.1.047 (075.8)

ББК 22.2+5+28я73

У 913

Рецензенты: доктор медицинских наук, профессор **А.Н. Марков** ФГБОУ ВО «Ижевская государственная медицинская академия», кандидат физико-математических наук, доцент **В.П. Бовин** ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет»

Рекомендовано центральным координационным методическим советом ФГБОУ ВО ИГМА

Авторы – составители: **Е.В. Ворсина, Т.А. Снигирева, Т.Г. Станкевич, М.С. Рябчикова, Е.Г. Булатова, Н.П. Пенкин, Л.В. Баранова**

У 913 Учебный тезаурус курса медицинской и биологической физики: учеб. пособ. Часть II / Е.В. Ворсина [и др.]. – Ижевск, 2016. – 102 с.

В работе представлены базовые понятия курса медицинской и биологической физики (определения, формулы, уравнения, законы и т.п.) по темам: «Основы геометрической и волновой оптики», «Биофизические основы применения теплового излучения в медицине», «Электрические и магнитные свойства тканей и окружающей среды», «Биологическая ткань при подключении к источнику постоянной и переменной э.д.с.», «Воздействие на биологические ткани различными электрическими факторами. Основы электротерапии», «Физические процессы в биологических мембранах», «Биофизические основы применения рентгеновского излучения в медицине», «Биофизические основы использования радиоактивного излучения в медицине», «Биофизические основы воздействия ионизирующих излучений на организм», соответствующие требованиям федерального государственного образовательного стандарта.

Работа представляет интерес в качестве учебного пособия для студентов, изучающих биологическую и медицинскую физику, а также для преподавателей физики высших и других профессиональных учебных заведений.

УДК 534.7:539.1.047 (075.8)

ББК 22.2+5+28я73

© Е.В. Ворсина и [др.], 2016 г.

© ФГБОУ ВО «Ижевская государственная медицинская академия», 2016 г.

Введение

Согласно ФГОС ВО выпускник, получающий медицинскую специальность, должен быть ориентирован на медицинскую деятельность, организационно-управленческую и на научно-исследовательскую работу в области своей профессиональной деятельности [5]. Медицинская деятельность предполагает, в том числе, проведение сбора и медико-статистического анализа информации о показателях здоровья населения и диагностику заболеваний пациентов, а научно-исследовательская деятельность – участие в проведении статистического анализа, участие в решении отдельных научно-исследовательских и научно-прикладных задач в области здравоохранения. Для решения своих профессиональных задач выпускник должен быть готов использовать основные физико-химические, математические и иные естественнонаучные понятия и методы, должен быть готов выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе своей профессиональной деятельности, использовать для их решения соответствующий физико-химический и математический аппарат. А также он должен овладеть современными технологиями сбора, обработки и интерпретации полученных экспериментальных данных и современными методами исследований.

К циклу естественнонаучных дисциплин относится дисциплина «Медбиофизика», которая изучается студентами специальностей «Лечебное дело», «Педиатрия», «Стоматология» на первом курсе. Её изучение студентами направлено на усвоение наиболее важных, базовых, элементов образовательного стандарта (физических явлений, законов, закономерностей, принципов, понятий, определений и т.п.). Основная цель дисциплины – формирование у студентов базы знаний по физике и биофизике, необходимых и достаточных для профессиональной деятельности по специальности.

При переходе на федеральные государственные стандарты (ФГОС) третьего поколения возникает необходимость корректировки учебных и

рабочих программ и разработки соответствующего им методического обеспечения. Образовательный процесс, осуществляемый согласно требованиям ФГОС, предполагает увеличение доли часов для самостоятельной работы студентов от общего числа часов, отведенных на изучение дисциплины. При этом ставится задача сохранения и даже повышения уровня освоения учебного материала. Для реализации этой задачи в рамках дисциплины «Медбиофизика» разработано настоящее пособие.

Цель пособия – создание методического сопровождения при изучении дисциплины «Медбиофизика» студентами медицинского вуза и оказание помощи студентам в изучении данной дисциплины.

Пособие выполнено в виде учебного тезауруса, т.е. в виде базы понятий, определений, фундаментальных законов, положений, принципов, теорий. Это позволяет структурировать изучаемую информацию, что дает возможность студентам ориентироваться в теоретическом материале при самостоятельной подготовке.

Содержание

Введение.....	3
1. Основы геометрической и волновой оптики	8
Природа света	9
Геометрическая оптика. Законы геометрической оптики.....	11
Полное внутреннее отражение света.....	12
Разрешающая способность оптических приборов. Предел разрешения	13
Поляризация света	14
Рассеяние света.....	16
Поглощение света	17
Таблица 1. Оптические методы исследования в медицине (часть 1)	19
2. Биофизические основы применения теплового излучения в медицине	21
Тепловое излучение. Основные свойства теплового излучения.....	22
Количественные характеристики теплового излучения	22
Абсолютно черное тело. Серые тела	24
Закон Кирхгофа	25
Законы теплового излучения абсолютно черного тела (закон Стефана-Больцмана, закон Вина).....	26
Виды спектров. Спектральный анализ.....	27
Люминесценция	27
Таблица 2. Использование теплового излучения в медицине.....	30
Таблица 3. Биологическое действие ультрафиолетового излучения	30
Таблица 4. Оптические методы исследования в медицине (часть 2)	31
3. Электрические и магнитные свойства биологических тканей и окружающей среды	33
Основные понятия	34
Таблица 5. Сравнительная характеристика электрического и магнитного поля	36
Таблица 6. Классификация веществ по электрическим свойствам.....	37
Электрические свойства клетки	38
Электрические свойства тканей организма.....	39
Таблица 7. Удельное сопротивление (ρ) некоторых тканей организма при температуре $t = 37^{\circ}\text{C}$	40
Процессы, происходящие в клетке под действием внешнего постоянного электрического поля	40
Таблица 8. Относительная диэлектрическая проницаемость тканей человека при температуре $t = 37^{\circ}\text{C}$	42
Магнитные свойства вещества	42
Таблица 10. Классификация веществ по магнитным свойствам.....	42
Таблица 9. Процессы, происходящие в клетке, помещённой в постоянное электрическое поле	43
Моделирование электрических процессов в биологической ткани при подключении к источникам постоянной и переменной э.д.с.	44
Исследование зависимости силы тока от времени для живой биологической ткани при подключении к источнику постоянной э.д.с.	45
Таблица 11. Моделирование процессов в биологической ткани при подключении к источнику постоянной э.д.с. с помощью электрических схем	45

Исследование зависимости импеданса живой биологической ткани от частоты при подключении к источнику переменной э.д.с.	47
Таблица 12. Моделирование зависимостей $z(\omega)$ отдельных элементов эквивалентной электрической схемы ткани организма при подключении к источнику переменной э.д.с.	48
Реография.....	50
5. Воздействие на биологические ткани различными электрическими факторами. Основы электротерапии	51
Раздражение. Возбуждение. Порог раздражения.....	52
Таблица 13. Реакция человека на протекание электрического тока	53
Раздражающее действие электрического тока	53
Раздражающее действие электрических импульсов тока	54
Зависимость силы порогового тока от скорости нарастания силы тока.....	55
Зависимость силы порогового тока от длительности прямоугольных импульсов.....	56
Зависимость порогового тока от частоты импульса	57
Влияние изменения частоты колебаний электрического тока на величину раздражающего действия.....	58
Таблица 14. Классификация основных методов электротерапии	59
Удельное количество теплоты, выделяющееся в тканях при некоторых физиопроцедурах	59
6. Физические процессы в биологических мембранах	62
Строение мембраны.....	62
Основные функции мембран.....	63
Характеристики состояния системы с помощью градиентов	64
Таблица 15. Виды явлений переноса в мембране	65
Пассивный транспорт веществ	65
Виды пассивного транспорта	65
Пассивный транспорт молекул через мембрану	66
Пассивный транспорт ионов через мембрану	68
Активный транспорт веществ	68
Мембранные потенциалы.....	69
7. Биофизические основы применения рентгеновского излучения в медицине	73
Природа рентгеновского излучения.....	73
Свойства рентгеновского излучения.....	74
Устройство рентгеновской трубки.....	74
Тормозное рентгеновское излучение	75
Характеристическое рентгеновское излучение.....	78
Виды взаимодействия рентгеновского излучения с веществом	80
Таблица 16. Виды взаимодействия рентгеновского излучения с веществом.....	80
Рентгеновское излучение в медицине	82
8. Биофизические основы использования радиоактивного излучения в медицине	84
Структурные элементы и характеристики атома.....	85
Таблица 17. Структурные элементы атома и их характеристики	85
Таблица 18. Основные характеристики ядра	86

Энергия связи атомных ядер	86
Таблица 19. Вычисление энергии связи ядра	87
Ядерные силы	88
Радиоактивность	88
Виды радиоактивного излучения	89
Таблица 20. Основные типы радиоактивности	90
Основной закон радиоактивного распада	91
Характеристики радиоактивного распада	91
Таблица 21. Применение радиоактивных изотопов в медицине	93
9. Биофизические основы воздействия ионизирующих излучений на организм	95
Ионизирующее излучение	96
Характеристики взаимодействия ионизирующего излучения с веществом	97
Таблица 22. Основные характеристики ионизирующего излучения	98
Таблица 23. Количественная оценка действия ионизирующего излучения (и. и.). Дозиметрия	99
Таблица 24. Детекторы ионизирующего излучения	101
Литература	102

1. Основы геометрической и волновой оптики

При изучении темы необходимо усвоить:

понятия и определения

оптика
оптическое излучение
электромагнитная волна
световой вектор
абсолютный показатель преломления вещества
квант энергии
постоянная Планка
фотон
геометрическая оптика
полное внутреннее отражение света
предельный угол падения лучей
разрешающая способность оптического прибора
предел разрешения
рассеяние света
оптически неоднородная среда
молекулярное рассеяние
поляризация света
поляризованный свет
поляризатор
анализатор
поглощение света

свойства и явления

двойственная природа света (квантово-волновой дуализм)
условия возникновения полного внутреннего отражения
рассеяние света в мутных средах (явление Тиндаля)
оптически активные вещества

классификации

шкала электромагнитных волн
оптическое излучение

формулы и уравнения

уравнение светового вектора
скорости распространения света
кванта энергии
предела разрешения микроскопа (формула Аббе)
разрешающей способности микроскопа
светового вектора плоско поляризованного света
концентрации оптически активного вещества
зависимости интенсивности излучения от толщины слоя вещества

законы и гипотезы

гипотеза Планка

закон отражения световой волны

закон преломления световой волны

закон Рэлея

критерий Рэлея

закон Малюса

закон Би́о

закон Буге́ра

закон Бера

закон Бугера-Ламберта-Бера

закон ослабления электромагнитных волн

графические объекты

ход луча падающего, отраженного и преломленного при:

а) $n_1 < n_2$; б) $n_1 > n_2$

ход луча падающего, отраженного и преломленного при $\alpha = \alpha_{np}$

графическая интерпретация закона Бугера

методы

волоконная оптика

эндоскопия

рефрактометрия

поляриметрия

сахариметрия

концентрационная колориметрия

Природа света

Оптика – раздел физики, в котором рассматриваются явления и закономерности излучения, распространения и взаимодействия света с веществом.

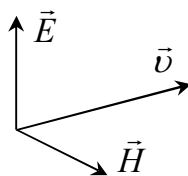
Свет или **оптическое излучение** – излучение, испускаемое атомами или молекулами веществ, находящихся в возбуждённом состоянии.

Природа света двойственна (квантово-волновой дуализм или корпускулярно-волновой дуализм): свет может проявлять свойства электромагнитной волны (интерференция, дифракция, поляризация и др.) или потока частиц (фотонов) (тепловое излучение, люминесценция, поглощение и др.).

Теория электромагнитного поля – световые волны имеют электромагнитную природу (разработана в 60-х годах XIX в. английским учёным Д. Максвеллом).

Электромагнитная волна – это процесс распространения в пространстве взаимно порождающих друг друга переменных электрических и магнитных полей.

Электромагнитная волна, испущенная отдельным атомом, характеризуется взаимно перпендикулярными векторами напряжённостей



электрического ($\vec{E}$) и магнитного ($\vec{H}$) полей, лежащих в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения волны. Таким образом световая волна поперечна, монохроматична и плоскополяризована.

Физиологическое, фотоэлектрическое, фотохимическое действия световой волны вызываются колебаниями вектора напряженности электрического поля ($\vec{E}$), который называют **световым вектором**.

Световой вектор – вектор напряженности электрического поля ($\vec{E}$).

Уравнение светового вектора или уравнение волны, испускаемой одним атомом (*уравнение плоской гармонической волны*)

$$E = E_{\max} \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right),$$

где E – напряженность электрического поля; $E_{\max}$ – амплитуда (максимальное значение) напряженности электрического поля; ω – циклическая частота; t – время; x – координата вдоль направления распространения волны; v – скорость распространения волны.

Скорость распространения волны зависит от оптических свойств среды – ее относительных электрической ϵ и магнитной μ проницаемостей

$$v = \frac{c}{n},$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с максимально возможная скорость света – скорость света в вакууме; $n = \sqrt{\varepsilon\mu}$ – абсолютный показатель преломления вещества для световых волн; характеризует оптическую плотность среды.

Шкала электромагнитных волн



ИК – инфракрасное излучение;

В – видимое излучение;

УФ – ультрафиолетовое излучение;

R – рентгеновское излучение;

γ – гамма-излучение.

На шкале электромагнитных волн к оптическому диапазону относят инфракрасное излучение, видимый свет и ультрафиолетовое излучение.

Гипотеза Планка – гипотеза о дискретном (прерывистом) характере излучения электромагнитных волн (1900 г. М. Планк, немецкий ученый)

Гипотеза Планка: свет излучается дискретно: отдельными порциями (квантами). Или: энергия излучения кратна некоторой величине ε , названной **квантом энергии** (лат. *quantum* – количество).

$$\varepsilon = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda},$$

где ν – частота; $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка.

Геометрическая оптика. Законы геометрической оптики

Геометрическая оптика – раздел оптики, в котором изучаются законы распространения света в прозрачных средах на основе представления о свете как о совокупности световых лучей – линий, вдоль которых распространяется энергия света. Природой света пренебрегают.

В однородной среде лучи являются прямыми линиями. На границе различных однородных сред происходит отражение и преломление (рефракция) лучей.

Законы геометрической оптики:

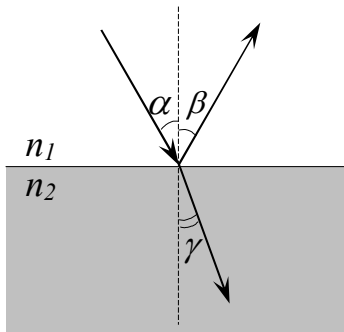
1) Луч падающий, отражённый, преломлённый и перпендикуляр к границе раздела сред лежат в одной плоскости.

2) Закон отражения световой волны

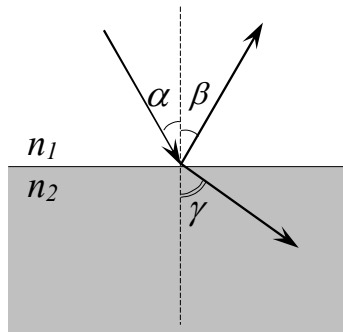
Угол отражения равен углу падения $\beta = \alpha$

3) Закон преломления световой волны

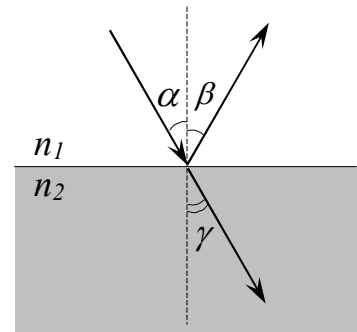
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$



$$\begin{aligned} n_1 &< n_2 \\ v_1 &> v_2 \\ \alpha &> \gamma \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} n_1 &> n_2 \\ v_1 &< v_2 \\ \alpha &< \gamma \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} n_1 &= n_2 \\ v_1 &= v_2 \\ \alpha &= \gamma \end{aligned}$$

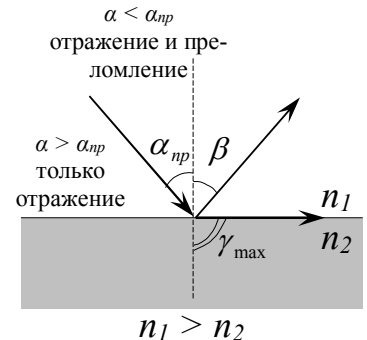
Полное внутреннее отражение света

Пусть свет переходит из оптически более плотной среды в оптически менее плотную: $n_1 > n_2$. По закону преломления $\gamma > \alpha$.

При увеличении угла падения α угол преломления γ тоже увеличивается и при некотором α преломлённый луч будет скользить по поверхности раздела. То есть $\gamma = \gamma_{\max} = \pi/2$ (90°).

Предельный угол ($\alpha_{\text{пр}}$) – угол падения, при котором угол преломления $\gamma = \pi/2$.

Если $\alpha > \alpha_{\text{пр}}$, то преломлённый луч отсутствует.



Полное внутреннее отражение света – явление, при котором свет полностью отражается от границы раздела двух сред (нет преломлённого луча).

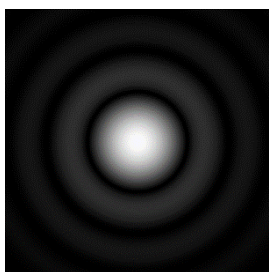
Условия возникновения полного внутреннего отражения:

1) свет падает на границу раздела сред из оптически более плотной среды ($n_1 > n_2$); 2) угол падения превышает предельный угол ($\alpha > \alpha_{пр}$).

Разрешающая способность оптических приборов. Предел разрешения

Разрешающая способность оптических приборов ограничена вследствие дифракции, возникающей при соизмеримости размера препятствия и длины волны; невозможно сфокусировать луч в пятно диаметром менее $\lambda/2$, а, следовательно, невозможно получить изображение точки (предмета) таких размеров.

Вследствие волновой природы света изображение точки, даваемое линзой, имеет вид пятнышка, представляющего собой центральный максимум дифракционной картины.

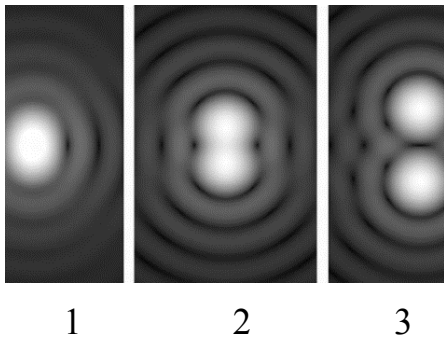


Дифракционная картина одной точки

Разрешающая способность оптического прибора (R) – это способность прибора давать отдельные изображения двух близко расположенных точек предмета.

Критерий Рэлея (1896 г.): две точки предмета еще видны раздельно, если центральный максимум дифракционной картины первой точки совпадает с первым минимумом дифракционной картины другой.

Предел разрешающей способности (предел разрешения) (z) – это минимальное расстояние r между двумя точками предмета, на котором они еще видны раздельно (т.е. разрешены, различимы). $[z] = m$



Дифракционная картина двух источников

1. $r < z$, две точки воспринимаются как одна
2. $r = z$, две точки различимы
3. $r > z$, две точки различимы

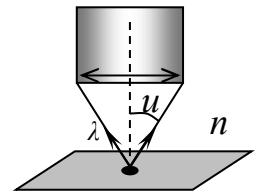
Предел разрешающей способности микроскопа (по теории нем. учёного Э. Аббе)

$$z = \frac{0,5\lambda}{n \cdot \sin u}$$

λ – длина волны света;

n – показатель преломления вещества между предметом и объективом;

u – апертурный угол; равен половине угла между крайними лучами конического светового пучка, входящего в объектив.



Связь между разрешающей способностью и пределом разрешения

$$R = \frac{1}{z}, [R] = \text{м}^{-1}.$$

Поляризация света

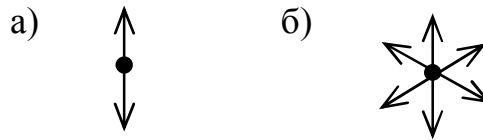
Поляризация света (многозначный термин):

- свойство света, заключающееся в пространственно-временной упорядоченности ориентации светового вектора;
- процесс получения поляризованного света из неполяризованного.

Поляризованным называется свет, если направления колебаний светового вектора упорядочены каким-либо образом.

Например: отдельный атом излучает *плоскополяризованную* волну (рис. а), т.е. световой вектор совершает колебания в плоскости. Естественный свет является суммой излучений огромного числа атомов со всевозможными равновероятными направлениями световых векторов, поэтому

он – *неполяризован* (рис. б). На рисунках вектор скорости перпендикулярен плоскости рисунка.



Глаз не отличает естественный свет от поляризованного, но имеется ряд явлений, свойственных только поляризованному свету, благодаря которому он обнаруживается и применяется.

Естественный свет можно преобразовать в плоскополяризованный с помощью поляризатора.

Поляризатор – устройство, пропускающего составляющую $E_{\parallel}$ светового вектора, лежащую в определённой плоскости, называемой *главной плоскостью поляризатора (ГПП)*. Примеры поляризаторов – кристаллы турмалина, призмы определённой конструкции.

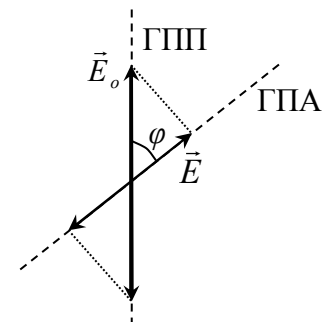
Для анализа поляризованного света используют второй поляризатор, называемый в данном случае **анализатором**.

Пусть φ – угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора. Плоско-поляризованный свет с амплитудой светового вектора $\vec{E}_0$ падает на анализатор, который пропустит только некоторую составляющую, равную $E = E_0 \cos \varphi$.

Закон Малюса (французский физик)

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

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



Оптически активные вещества – вещества, проходя через которые, происходит поворот плоскости плоскополяризованного света (например, кварц, скипидар, сахар, раствор сахара в воде и др.).

Закон Биб: для определённой длины волны угол α поворота плоскости поляризации пропорционален расстоянию x , пройденному светом в оптически активном веществе $\alpha = \alpha_0 \cdot x$,

где α_0 – постоянная вращения, $[\alpha_0] = \text{град/мм}$.

Для растворов: $\alpha = [\alpha_0] \cdot C \cdot x$,

где C – концентрация оптически активного вещества; x – толщина слоя раствора; $[\alpha_0]$ – удельное вращение.

Рассеяние света

Рассеяние света – изменение направления света в оптически неоднородной среде.

Оптически неоднородная среда – среда, в которой абсолютный показатель преломления меняется от точки к точке.

Рассеяние света – следствие дифракции света на большом числе препятствий.

Молекулярное рассеяние – рассеяние света в чистом веществе, в котором изменение показателя преломления вещества происходит из-за изменения его плотности за счет теплового движения молекул.

Например, рассеяние света в атмосфере, голубой цвет неба.

Закон Рэля – интенсивность рассеянного света прямо пропорциональна частоте волны в четвертой степени или обратно пропорциональна длине волны света в четвертой степени.

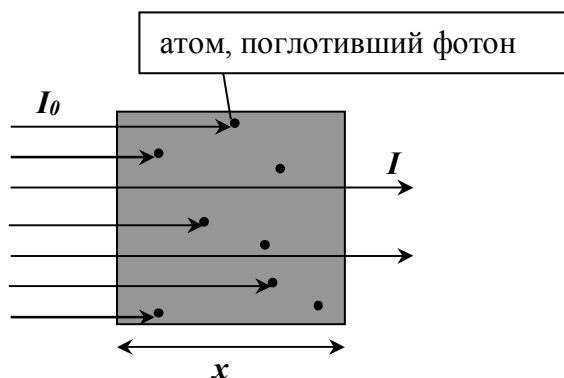
$$I_{\text{рас}} \sim \nu^4 \text{ или } I_{\text{рас}} \sim \frac{1}{\lambda^4}$$

Например, цвет неба голубой, т.к. в атмосфере сильнее всего рассеиваются волны, обладающие большими частотами (фиолетовый, синий, голубой).

Рассеяние света в мутных средах (явление Тиндаля) – рассеяние света из-за присутствия в среде различных инородных частиц (дым, туман, взвеси, суспензии и т.д.). Интенсивность рассеянного света подчиняется закону Рэля.

Поглощение света

При прохождении света через вещество часть фотонов захватывается (поглощается) атомами или молекулами вещества, и световой поток ослабляется. Чем больше атомов и молекул встретится на пути светового потока, тем больше вероятность захвата фотона и тем сильнее поглощение света.



Поглощение света в веществе – это преобразование энергии электромагнитного поля волны во внутреннюю энергию вещества.

Закон Бугёра: в каждом слое вещества одинаковой толщины x поглощается одинаковая доля интенсивности $\frac{dI}{I}$ падающей на него световой волны.

$$\frac{dI}{I} = -\alpha x$$

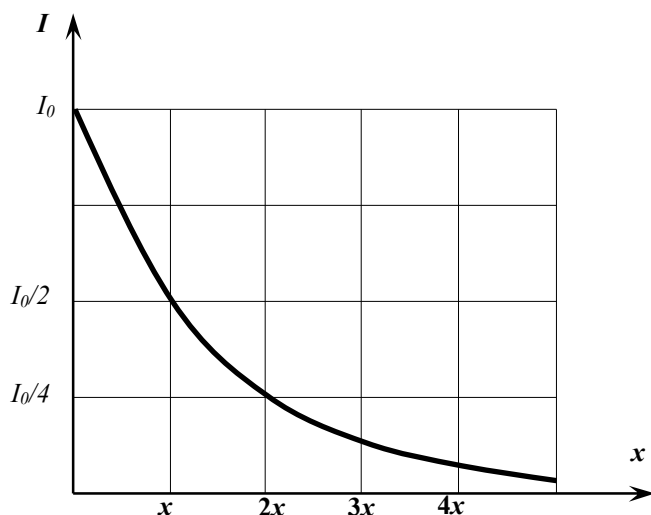
Зависимость интенсивности излучения от толщины слоя вещества

$$I = I_0 e^{-\alpha x}$$

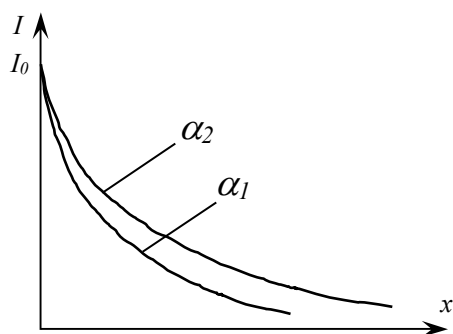
где I_0 , I – интенсивности света на входе ($x = 0$) и выходе из слоя вещества толщины x ;

α – коэффициент поглощения, он зависит от λ и характеризует долю интенсивности поглощённого света слоем единичной толщины.

Графическая интерпретация закона Бугера



На рисунке: в каждом слое толщиной x поглощается половина интенсивности падающего на него света



$$\alpha_1 > \alpha_2$$

Закон ослабления интенсивности электромагнитных волн вследствие процессов поглощения и рассеяния

$$I = I_0 e^{-(\alpha + \mu)x},$$

где μ – коэффициент рассеяния.

Закон Бера (нем. ученый, 1852 г.): при поглощении света молекулами вещества, растворённого в непоглощающем (прозрачном) растворителе, показатель поглощения пропорционален концентрации раствора

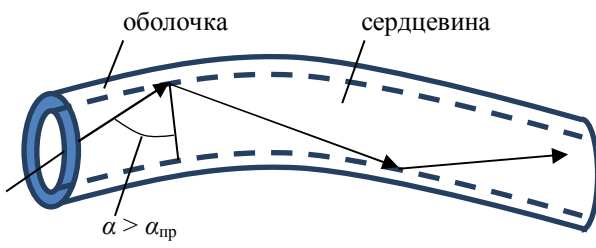
$$\alpha = \chi \cdot C,$$

где χ – коэффициент поглощения света на единицу концентрации вещества.

Закон Бугера-Ламберта-Бера

$$I = I_0 e^{-\chi C x}$$

Таблица 1. Оптические методы исследования в медицине (часть 1)

волоконная оптика, эндоскопия	
Суть метода	<i>эндоскоп</i> – оптическая система, при помощи которой осматривают внутренние полые органы (например, желудок, пищевод, кишечник) и полости (брюшную, таза). В устройство эндоскопа входит волоконно-оптический световод, подсоединённый к телевизионной камере или окуляру.  <i>Световод</i> – тонкое гибкое волокно, состоящее из кварцевой сердцевины с высоким показателем преломления и окружающей её оболочки из кварца с меньшим показателем преломления. Часть волокон проводит свет внутрь органа или полости пациента, остальные – передают изображение на телекамеру или окуляр
Явление, закон, свойства, лежащие в основе метода	полное внутреннее отражение, закон преломления
Примечание	передача света и изображения поверхности полого органа по любым траекториям и с малыми потерями энергии
рефрактометрия	
Суть метода	метод определения показателя преломления веществ; рефрактометрия (от лат. <i>refractus</i> – преломленный и греч. <i>metreo</i> – измеряю) – это метод исследования веществ, основанный на определении показателя преломления (рефракции).
Явление, закон, свойства, лежащие в основе метода	преломление, закон преломления
Примечание	применяется для идентификации химических соединений, количественного и структурного анализа, определения физико-химических параметров веществ (например, содержание белка в крови и т.п.)

поляриметрия, сахариметрия	
Суть метода	метод определения концентрации веществ
Явление, закон, свойства, лежащие в основе метода	поляризация, оптическая активность веществ $C = \frac{\alpha}{[\alpha_0]x},$ где C – концентрация оптически активного вещества; α – угол поворота плоскости поляризации; x – толщина слоя раствора; $[\alpha_0]$ – удельное вращение
Примечание	определение концентрации сахара в моче
концентрационная колориметрия	
Суть метода	метод количественного анализа, основанный на определении концентрации вещества в растворе путем измерения интенсивности света, поглощенной этим раствором
Явление, закон, свойства, лежащие в основе метода	поглощение, закон Бугера – Ламберта – Бера $I = I_0 e^{-\epsilon Cx}$
Примечание	определение концентрации исследуемого раствора Пусть есть два раствора одного и того вещества, концентрация C_1 и толщина слоя x_1 известны. Изменяя толщину слоя x_2 раствора искомой концентрации C_2, добиваются равенства интенсивностей света на выходе. Искомая концентрация равна $C_2 = \frac{x_1}{x_2} C_1$

2. Биофизические основы применения теплового излучения в медицине

При изучении темы необходимо усвоить:

понятия и определения

тепловое излучение

внутренняя энергия вещества

энергетическая светимость (полная излучательная способность)

спектральная плотность энергетической светимости

коэффициент поглощения

монохроматический коэффициент поглощения (спектральная поглощательная способность)

абсолютно черное тело (АЧТ)

серое тело

спектры поглощения АЧТ, серого тела

спектр излучения (линейчатый, полосатый, сплошной)

спектральный анализ

люминесценция

люминофоры

флюоресценция

фосфоресценция

свойства и явления

свойства теплового излучения

механизм возникновения фотолюминесценции

классификации

классификация люминесценции в зависимости от внешнего источника возбуждения

классификация фотолюминесценции по длительности

формулы

полной излучательной способности

спектральной излучательной способности

полной поглощательной способности

спектральной поглощательной способности

аналитическое выражение для универсальной функции $f(\lambda, T)$

энергии кванта

законы и гипотезы

закон Кирхгофа

гипотеза Планка

закон Стефана-Больцмана

закон Вина

правило Стокса

модели

абсолютно черного тела

графические объекты

график $\varepsilon_{\lambda T} = f(\lambda)$

график, иллюстрирующий правило Стокса

методы

тепловидение

термография

спектральный анализ (качественный, количественный)

люминесцентный анализ

приборы

тепловизор

Тепловое излучение. Основные свойства теплового излучения

Тепловое излучение – электромагнитное излучение, которое испускается веществом за счёт внутренней энергии.

За счёт внутренней энергии вещества излучаются волны инфракрасного, видимого и ультрафиолетового диапазона шкалы электромагнитных волн.

Внутренняя энергия вещества (в молекулярной физике) – это энергия, обусловленная кинетической энергией движения его атомов и молекул и потенциальной энергией их взаимодействия.

Чем больше величина внутренней энергии вещества, тем выше его температура.

Свойства теплового излучения:

1) *универсальность* – всякое тело является источником теплового излучения, и тепловое излучение имеет место при любой температуре (при $T > 0 \text{ К}$; $t > -273 \text{ }^{\circ}\text{C}$);

2) *одновременность процессов излучения и поглощения*: любое тело, являясь источником теплового излучения, одновременно и поглощает падающее на него электромагнитное излучение;

3) *стремление теплоизолированной системы к тепловому равновесию* – состоянию, при котором количество излучаемой энергии равно количеству поглощаемой энергии $W_{\text{изл}} = W_{\text{погл}}$ т.е. $T = \text{const}$.

Количественные характеристики теплового излучения

Характеристики излучения

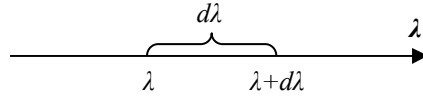
Энергетическая светимость (R_e) – энергия электромагнитных волн W_T , излучаемая телом при данной температуре T за единицу времени t с единицы площади S на всех длинах волн

$$R_e = \frac{W_T}{St}, \quad [R_e] = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

Спектральная плотность энергетической светимости ($r_{\lambda T}$) – энергия электромагнитных волн W_T , излучаемая телом при данной темпе-

ратуре T за единицу времени t с единицы площади S на данном интервале длин волн $d\lambda$

$$r_{\lambda T} = \frac{dR_e}{d\lambda}, \quad [r_{\lambda T}] = \frac{Bm}{M^3}$$

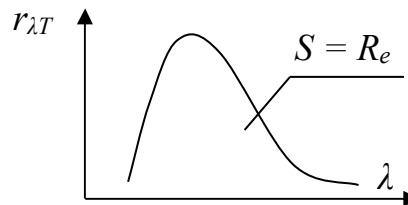


$r_{\lambda T}$ – часть R_e , которая приходится на интервал длин волн $d\lambda$.

Связь между этими характеристиками можно выразить соотношением

$$R_e = \int_0^{\infty} r_{\lambda T} d\lambda$$

Тогда геометрически, $R_e = S$ (площадь под спектральной кривой)



Характеристики поглощения

Коэффициент поглощения (α) – отношение энергии электромагнитного излучения, поглощаемой телом, к энергии падающего на него излучения

$$\alpha = \frac{W_{T_{\text{погл}}}}{W_{T_{\text{пад}}}}$$

$$0 \leq \alpha \leq 1$$

α – безразмерная величина

Спектральная поглощательная способность ($\alpha_{\lambda T}$) – отношение энергии электромагнитного излучения с длинами волн от λ до $\lambda + d\lambda$, поглощаемой телом, к энергии падающего на него излучения того же диапазона

$$\alpha_{\lambda T} = \frac{W_{\lambda T_{\text{погл}}}}{W_{\lambda T_{\text{пад}}}}$$

$$0 \leq \alpha_{\lambda T} \leq 1;$$

$\alpha_{\lambda T}$ – безразмерная величина

Абсолютно черное тело. Серые тела

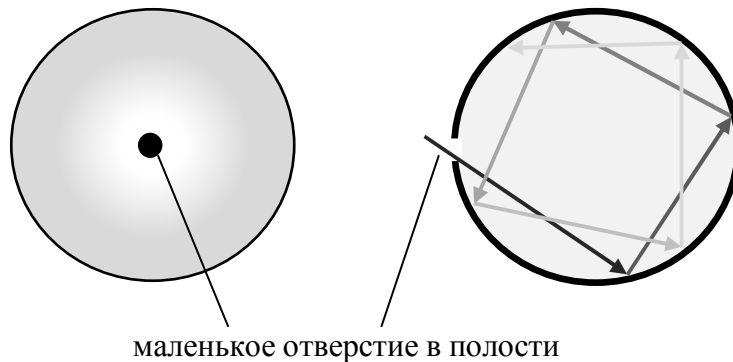
Абсолютно черное тело (АЧТ) – тело, спектральная поглощательная способность которого на всех длинах волн равна 1 ($\alpha_{\lambda T} = 1$ и $\alpha = 1$).

То есть абсолютно черное тело полностью поглощает всё падающее на него излучение на всех длинах волн, ничего не отражая.

Абсолютно черных тел в природе не существует, это понятие – физическая абстракция. Но существуют объекты, материалы, близкие по свойствам к абсолютно черному телу.

Модель абсолютно черного тела

Моделью абсолютно черного тела служит замкнутая полость, внутренняя поверхность которой нагрета до температуры T , с отверстием, малым по сравнению с размерами полости. Излучение, попадающее внутрь

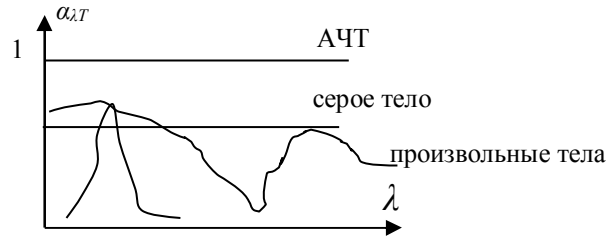


сквозь это отверстие, после многократных отражений полностью поглощается стенками. Никакая часть попавшего в отверстие излучения не отражается от него обратно. При этом полость имеет собственное излучение, соответствующее ее температуре. Именно температура абсолютно черного тела определяет сколько излучения оно испускает в инфракрасном, видимом, ультрафиолетовом и др. диапазонах. Поэтому абсолютно черного тела, несмотря на свое название, при достаточно высокой температуре будет излучать в видимом диапазоне и визуально иметь цвет.

Серое тело – тело, спектральная поглощательная способность которого одинакова на всех длинах волн, но меньше 1 ($\alpha_{\lambda T} = \text{const}$, $\alpha_{\lambda T} < 1$).

Серое тело – тоже физическая абстракция. Чаще всего тело бывает серым в определенном интервале длин волн. Например, тело человека в инфракрасном диапазоне можно считать серым телом $\alpha_{\lambda T} = 0,9$.

Спектры поглощения



Закон Кирхгофа

Закон Кирхгофа (немецкий физик): при тепловом равновесии отношение спектральной плотности энергетической светимости к спектральной поглотительной способности одинаково для всех тел и является одной и той же универсальной функцией длины волны и температуры

$$\left(\frac{r_{\lambda T}}{\alpha_{\lambda T}} \right)_{1\text{тело}} = \left(\frac{r_{\lambda T}}{\alpha_{\lambda T}} \right)_{2\text{тело}} = \dots = \left(\frac{r_{\lambda T}}{\alpha_{\lambda T}} \right)_{\text{АЧТ}} = f(\lambda, T),$$

где $f(\lambda, T)$ – функция Кирхгофа.

Из данного закона следует, что чем больше поглотительная способность какого-либо тела, тем больше и его энергетическая светимость, а т.к. $\alpha_{\lambda T} \leq 1$, то $r_{\lambda T} \leq r_{\lambda T}^{\text{АЧТ}}$ и, таким образом, абсолютно черное тело обладает наибольшей энергетической светимостью.

Кирхгоф не нашел аналитического выражения для $f(\lambda, T)$.

Формулу для функции Кирхгофа вывел Планк, руководствуясь представлениями о квантовом характере излучения

$$f(\lambda, T) = \varepsilon_{\lambda T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1},$$

где $\varepsilon_{\lambda T} = r_{\lambda T}^{\text{АЧТ}}$ – спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела;

c – скорость света в вакууме; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

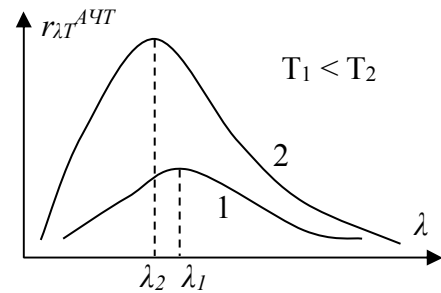
Гипотеза Планка: свет излучается дискретно: отдельными порциями (квантами). Или: энергия излучения кратна некоторой величине ε , названной **квантом энергии** (лат. *quantum* – количество).

$$\varepsilon = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda},$$

где ν – частота; $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка.

Законы теплового излучения абсолютно черного тела (закон Стефана-Больцмана, закон Вина)

При исследовании излучения моделей абсолютно черного тела были экспериментально получены спектры их излучения при разных температурах (см. рис.).



Анализ этих зависимостей привел к установлению законов теплового излучения абсолютно черного тела.

Закон Стефана-Больцмана: энергетическая светимость абсолютно черного тела прямо пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры

$$R_e^{AЧТ} = \sigma \cdot T^4$$

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана

Для серого тела $R_e^c = \alpha \cdot \sigma \cdot T^4$

Закон Вина: длина волны, на которую приходится максимум энергии излучения абсолютно черного тела, обратно пропорциональна его абсолютной температуре

$$\lambda_{r_{\lambda T} \max} = \frac{b}{T}$$

$b = 2,89 \cdot 10^{-3}$ м·К – постоянная Вина ($b = h \cdot c / k$)

Закон Вина справедлив и для серых тел.

На основе законов *Стефана-Больцмана* и *Вина* можно определить температуру тел посредством измерения излучения этих тел.

Виды спектров. Спектральный анализ

Источники света создают излучения, в которых интенсивности разных длин волн, как правило, неодинаковы.

Спектр излучения – распределение интенсивности излучаемых телом электромагнитных волн по длинам волн.

Виды спектров, испускаемых нагретыми телами, зависят от природы тела и его температуры и могут быть сплошными, полосатыми или линейчатыми.

Разреженные одноатомные газы, пары металлов, состоящие из отдельных, не взаимодействующих друг с другом атомов, дают при свечении **линейчатые** спектры. Это связано с квантовыми свойствами атомов, внутренняя энергия которых меняется не непрерывно, а может принимать лишь определённые дискретные значения.

Молекулярные спектры, например спектры многоатомных газов или паров (CO_2 , H_2O), состоят из **полос**, образованных большим числом линий, расположенных очень близко друг от друга. Объединение линий в полосы объясняется тем, что в молекулах, состоящих из взаимодействующих атомов, появляются дополнительные энергетические уровни.

Сплошные спектры теплового излучения тел обусловлены электромагнитным излучением, происходящим за счёт внутренней энергии теплового движения множества взаимодействующих между собой частиц вещества.

Люминесценция

Люминесценция (лат. *luminus* – свет, *escent* – суффикс, означающий слабое действие) – излучение, представляющее собой избыток над тепловым излучением тела при данной температуре.

Люминофоры – люминесцирующие вещества (например, пары серы, йода, соли ряда элементов, разные виды красителей и многие другие вещества). Световое излучение люминофора возникает за счёт энергии возбуж-

дения, поступающей от внешних источников, а не за счёт внутренней энергии тела.

Примеры люминесценции, обусловленной внешним возбуждением:

- **катодолюминесценция** – возникает при возбуждении атомов электронами (свечение экранов осциллографов, локаторов и др.);
- **рентгенолюминесценция** – возникает при возбуждении атомов рентгеновским и γ -излучением (свечение экрана при рентгеноскопии);
- **электролюминесценция** – возникает при возбуждении атомов электрическим полем (свечение люминесцентных осветительных устройств);
- **фотолюминесценция** возникает при возбуждении атомов видимым или УФ светом (свечение купюр, документов, микроорганизмов).

По длительности свечения вещества после прекращения поступления энергии от внешнего источника фотолюминесценцию делят на флуоресценцию и фосфоресценцию.

Флуоресценция – кратковременная фотолюминесценция (заканчивающаяся через 10^{-8} с после возбуждения атомов). **Фосфоресценция** – длительная фотолюминесценция.

Механизм возникновения фотолюминесценции

Фотолюминесценция начинается с акта поглощения фотона с энергией $h\nu$ атомом или молекулой, которые переходят в возбуждённое состояние. Если вещество состоит из практически не взаимодействующих атомов, возбуждённый атом возвращается в основное состояние и излучает фотон с той же энергией (рис. а).

а) для не взаимодействующих атомов б) для молекул

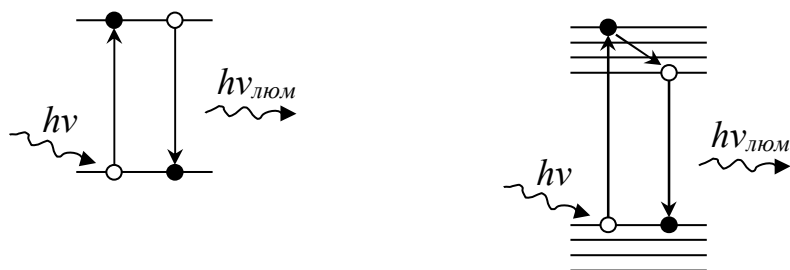


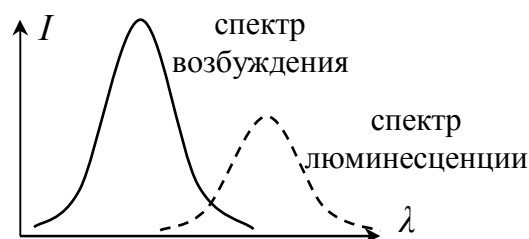
Рис. 1. Энергетические диаграммы люминесценции

На энергию электрона в молекуле оказывают влияние вращательное движение молекулы, а также колебания атомов в ней; поэтому энергетические диаграммы таких молекул состоят не из отдельных уровней, а из полос, в каждой из которых имеется много близко расположенных друг от друга подуровней. Если падающий фотон поднимает электрон на один из верхних подуровней, то переход электрона в исходное состояние обычно начинается с перехода на один из низших возбуждённых подуровней (рис. б). Фотоны при этом не излучаются, и энергия электронов в молекуле переходит безызлучательно в тепловую энергию $W_{\text{тепл}}$ жидкости или кристаллической решётки. При переходе с нижнего возбуждённого подуровня на основной излучается фотон с энергией, меньшей энергии падающего фотона

$$h\nu_{\text{люм}} = h\nu - W_{\text{тепл}}, \text{ т.е. } \nu_{\text{люм}} < \nu, \text{ а } \lambda_{\text{люм}} > \lambda.$$

Поскольку электроны совершают переходы не между двумя уровнями, а между полосами, состоящими из многих подуровней, испускаемый свет имеет не одну частоту, а более или менее сложный спектр.

Правило Стокса (1852 г.): спектр люминесценции и его максимум сдвинуты по отношению к спектру поглощения (возбуждения) и его максимуму в сторону более длинных волн (рис.).



$$h\nu_{\text{люм}} = h\nu - W_{\text{тепл}}, \text{ т.е. } \nu_{\text{люм}} < \nu, \text{ а } \lambda_{\text{люм}} > \lambda$$

Таблица 2. Использование теплового излучения в медицине

		Инфракрасное излучение	Видимое излучение	Ультрафиолетовое излучение
условные границы диапазонов				
источники излучения		излучение атомов и молекул		излучение атомов
действие на организм		фотобиологические процессы		
		активация терморорецепторов	активация зрительных рецепторов	фотохимические реакции на поверхности кожи
применение в медицине	диагностика	картирование тепловых полей организма – тепловидение, термография	люминесцентные методы	
	терапия	тепловое лечение – прогревание	светолечение, лазерная терапия	светолечение, УФ-терапия, синтез витамина D

Таблица 3. Биологическое действие ультрафиолетового излучения

Название диапазона	Биологическое действие	Примечание
УФ-А антирахитная (315-380 нм)	вызывает: - образование витамина D из провитаминов, находящихся в организме; - загар; - фотоаллергические реакции	УФ-А не задерживается озоновым слоем, проходит сквозь стекло и роговой слой кожи. За счет поглощения, отражения и рассеивания при прохождении через эпидермис, в дерму проникает только 20-30% УФ-А и около 1% от общей его энергии достигает подкожной клетчатки
УФ-В эритемная (280-315 нм)	вызывает: - образование витамина D из провитаминов, находящихся в организме; - загар; - ожог глаз; - канцерогенез	Большая часть УФ-В поглощается озоновым слоем, который «прозрачен» для УФ-А. Доля УФ-В во всей энергии ультрафиолетового излучения в летний полдень составляет всего около 3%. Он практически не проникает сквозь стекло, на 70% отражается роговым слоем, на 20% ослабляется при прохождении через эпидермис – в дерму проникает менее 10%.

Название диапазона	Биологическое действие	Примечание
УФ-С бактерицидная (200-280 нм)	вызывает: - эритему; - канцерогенез; - мутации; используется для дезинфекции	УФ-С поглощается озоновым слоем. В случае использования искусственного источника ультрафиолета, он задерживается эпидермисом и не проникает в дерму

Таблица 4. **Оптические методы исследования в медицине (часть 2)**

спектральный анализ	
Суть метода	совокупность методов качественного и количественного определения состава объекта, основанных на изучении спектров
Явление, закон, свойства, лежащие в основе метода	тепловое излучение, закон Кирхгофа
Примечание	<i>Качественный</i> состав определяется путём сравнения спектра исследуемого вещества со спектром химических элементов. <i>Количественное</i> содержание элемента в данном веществе определяется по относительной или абсолютной интенсивностям линий или полос в спектрах
тепловидение	
Суть метода	совокупность методов качественного и количественного определения состава объекта, основанных на изучении спектров
Явление, закон, свойства, лежащие в основе метода	тепловое излучение
Примечание	служит для определения местоположения и формы объектов, находящихся в темноте или в оптически непрозрачных средах, а также для изучения степени нагретости отдельных участков сложных поверхностей и внутренней структуры тел, прозрачных в видимом свете. Регистрация теплового излучения осуществляется с помощью <i>тепловизоров</i> – технических систем, которые воспринимают ИК излучение с поверхности тела человека и преобразовывают его в видимый диапазон

термография	
Суть метода	диагностический метод, основанный на регистрации и измерении интенсивности теплового излучения поверхности тела человека или её отдельных участков
Явление, закон, свойства, лежащие в основе метода	тепловое излучение
Примечание	например, изучение кровоснабжения конечностей
люминесцентный анализ	
Суть метода	метод исследования различных объектов под действием УФ излучения, вызывающего люминесценцию этих объектов
Явление, закон, свойства, лежащие в основе метода	люминесценция
Примечание	позволяет исследовать вещество без его разрушения и при чрезвычайно малых количествах люминесцирующих примесей. В криминалистике: обнаружение невидимых следов крови; фальшивых денежных купюр; подлинность картин. В ветеринарно-санитарной экспертизе: контроль качества продуктов питания. В медицине: распознавание возбудителей инфекционных заболеваний (туберкулёз, сибирская язва, сальмонеллез и пр.); наличие подкожных кровоизлияний

3. Электрические и магнитные свойства биологических тканей и окружающей среды

При изучении темы необходимо усвоить:

понятия и определения

электрический ток
постоянный электрический ток
переменный электрический ток
сила тока
плотность электрического тока
напряжение
разность потенциалов
сопротивление
удельное сопротивление
удельная электропроводность
свободные заряды
связанные заряды
ток проводимости
ток поляризации
поляризация
относительная диэлектрическая проницаемость среды
плоский конденсатор
ёмкость
электрическое поле
вектор напряжённости электрического поля
источник тока
электродвижущая сила
реография

свойства и явления

электрические свойства клетки
электрические свойства тканей организма
процессы, происходящие в клетке, помещённой в постоянное электрическое поле
макроструктурная поляризация
дипольная (ориентационная) поляризация
электронная (деформационная) поляризация

классификации

веществ по электрическим свойствам
веществ по магнитным свойствам

формулы

силы электрического тока
плотности электрического тока
разности потенциалов
напряжения
электродвижущей силы
сопротивления
относительной диэлектрической проницаемости среды

законы и уравнения

закон Ома для участка цепи

модели (эквивалентные электрические схемы):

тока проводимости
макроструктурной поляризации

дипольной (ориентационной) поляризации
электронной (деформационной) поляризации

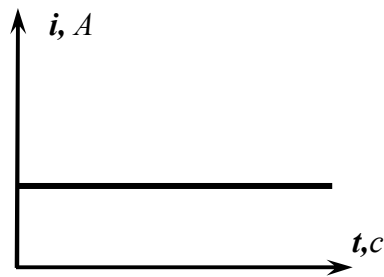
Основные понятия

Электрический ток – это направленное движение заряженных частиц. За направление тока принимают направление движения положительно заряженных частиц.

Сила тока (i) – характеризует величину электрического тока;

$i = \frac{dq}{dt}$; численно равна количеству электрического заряда, проходящего через поперечное сечение проводника за единицу времени;
 $[i] = \text{А}$ (Ампер).

Постоянный электрический ток – это ток, величина и направление которого не изменяются с течением времени.



Переменный электрический ток – это ток, величина и направление которого изменяются с течением времени.

Плотность тока (j) – физическая величина численно равная электрическому заряду q , проходящему через единицу площади S поперечного сечения проводника за единицу времени t или численно равная силе тока i , приходящейся на единицу площади S поперечного сечения проводника

$$j = \frac{q}{S \cdot t} = \frac{i}{S}; [j] = \text{А/м}^2$$

Разность потенциалов ($\Delta\varphi$) – это работа $A_{\text{эл}}$, совершаемая электрическим полем при перемещении единичного положительного заряда q из одной точки поля в другую

$$\Delta\varphi = \frac{A_{\text{эл}}}{q}; \quad [\Delta\varphi] = \text{В (Вольт)}$$

Напряжение (U) – это работа сил электрического поля $A_{эл}$ и сторонних сил $A_{см}$ (сил неэлектрической природы) при перемещении единичного положительного заряда q из одной точки поля в другую

$$U = \frac{A_{эл} + A_{см}}{q}; [U] = \text{В (Вольт)}$$

При отсутствии сторонних сил разность потенциалов равна напряжению участка цепи

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = U$$

Источник тока – это устройство, способное создавать и поддерживать разность потенциалов за счет работы сил неэлектрического происхождения (сторонние силы).

Электродвижущая сила (э.д.с.) (ε); характеристика источника тока; $\varepsilon = \frac{A_{см}}{q}$; численно равна работе сторонних сил $A_{см}$ при перемещении единичного положительного заряда q ; $[\varepsilon] = \text{В}$.

Условное обозначение источников э.д.с. в схеме

Источник постоянной э.д.с. 

Источник переменной э.д.с. 

Закон Ома для участка цепи, не содержащего э.д.с. $i = \frac{U}{R}$,

где R – сопротивление проводника; $[R] = \text{Ом}$;

для линейного проводника $R = \rho \frac{l}{S}$,

где ρ – удельное сопротивление; характеризует материал проводника; $[\rho] = \text{Ом} \cdot \text{м}$; l – длина проводника; $[l] = \text{м}$; S – площадь поперечного сечения проводника; $[S] = \text{м}^2$.

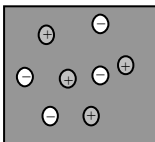
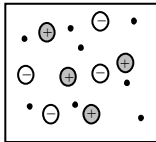
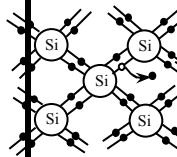
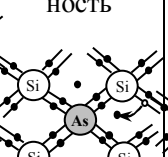
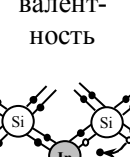
Удельное электрическое сопротивление, или просто удельное сопротивление вещества (ρ); характеризует его способность препятствовать прохождению электрического тока; $[\rho] = \text{Ом} \cdot \text{м}$.

Удельная электропроводность (σ) – величина, обратная удельному сопротивлению; $\sigma = \frac{1}{\rho}$; $[\sigma] = \text{См (Сименс)}$

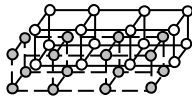
Таблица 5. Сравнительная характеристика электрического и магнитного поля

Сравнительные характеристики	Электростатическое поле	Постоянное магнитное поле
Определение	Особая форма существования материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между неподвижными электрическими зарядами	равномерно движущимися электрическими зарядами
Поле порождается	неподвижными электрическими зарядами	1) постоянным магнитом; 2) равномерно движущимися электрическими зарядами; 3) проводниками с постоянным током
Можно обнаружить	по действию на пробный электрический заряд, внесенный в поле	по действию на движущиеся электрические заряды или магнитную стрелку
Силовая характеристика поля	$\vec{E}$ – вектор напряженности электрического поля; $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$; численно равен силе электрического поля, действующей на пробный положительный заряд, помещенный в данную точку поля, к величине этого заряда; $[E] = \text{Н/Кл}$ или $[E] = \text{В/м}$.	$\vec{B}$ – вектор магнитной индукции; $B = \frac{F_A}{Il \sin \alpha}$, где F_A – сила Ампера (сила, действующая на проводник с током со стороны магнитного поля); I – сила тока в проводнике; l – длина проводника; α – угол между направлением вектора магнитной индукции и направлением тока в проводнике; $[B] = \text{Тл}$ (Тесла)
Скалярная характеристика поля	φ – потенциал; численно равен потенциальной энергии пробного положительного заряда в данной точке поля к величине этого заряда; $\varphi = \frac{W_p}{q}$; $[\varphi] = \text{В}$	Φ – магнитный поток через поверхность контура с током $\Phi = BS \cos \alpha$, где B – модуль вектора магнитной индукции; S – площадь, ограниченная контуром; α – угол между перпендикуляром, восстановленным к центру поверхности контура и направлением вектора магнитной индукции; $[\Phi] = \text{Вб}$ (Вебер)
Характеристика среды	ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды – физическая величина, показывающая, во сколько раз напряженность электрического поля в однородном диэлектрике (E) меньше, чем напряженность электрического поля в вакууме (E_0); $\varepsilon_r = \frac{E_0}{E}$	μ_r – относительная магнитная проницаемость среды – физическая величина, показывающая, во сколько раз индукция магнитного поля в однородной среде (B) отличается от магнитной индукции внешнего (намагничивающего) поля в вакууме (B_0); $\mu_r = \frac{B}{B_0}$

Таблица 6. Классификация веществ по электрическим свойствам

Класс веществ	Проводники			Полупроводники		
Характеристики	I рода металлы	II рода электролиты	плазма	химически чистые	с примесями	
					n-типа	p-типа
Особенности строения	в узлах кристаллической решётки расположены «+» ионы, а между ними хаотически движутся свободные электроны 	вещества, распадающиеся в воде на ионы 	сильно ионизированный газ 	кристаллические вещества, атомы которых имеют ковалентную связь. В результате теплового движения электрон может оторваться от атома. Образовавшийся при этом «+» заряд называется дыркой		
					примесные атомы имеют большую валентность 	примесные атомы имеют меньшую валентность 
Примеры	Pt, Ag, Au, Cu	растворы кислот, щелочей, солей	звёзды, газовые туманности, слои ионосферы	Si, Ge, In, As	Si+ <u>As</u>	Si+ <u>In</u>
Основные носители заряда	свободные			свободные		
	электроны	ионы	электроны ионы	электроны дырки	электроны	дырки
Основной процесс под действием электрического поля	упорядоченное движение свободных зарядов по всему объёму вещества – ток проводимости			упорядоченное движение свободных зарядов от атома к близко расположенным атомам – ток проводимости		
Название процесса	электронная проводимость	ионная проводимость	электронная и ионная проводимость	собственная проводимость	примесная проводимость	
					электронная	дырочная
Удельное сопротивление ρ , Ом·м	$10^{-8} \div 10^{-6}$			$10^{-3} \div 10^6$		
Характер изменения удельного сопротивления при увеличении температуры	увеличивается вследствие усиления теплового движения электронов и ионов и увеличения числа их столкновений	уменьшается за счет увеличения числа свободных зарядов вследствие				
		диссоциации		ионизации		

продолжение табл. 6

Класс веществ	Диэлектрики		
Характеристики	с полярными молекулами	с неполярными молекулами	ионные кристаллы
Особенности строения	Молекулы у которых центры симметрии «+» и «-» зарядов не совпадают – диполи 	Молекулы у которых центры симметрии «+» и «-» зарядов совпадают 	В узлах кристаллической решётки расположены «+» и «-» ионы. Кристалл в целом можно рассматривать как систему вдвинутых одна в другую подрешёток 
Примеры	H ₂ O, NH ₃ , SO ₂ , CO	N ₂ , H ₂ , O ₂ , CO ₂ , CH ₄	NaCl, KCl, KBr
Основные носители заряда	связанные		
	ядра атомов и электроны		ионы
Основной процесс под действием электрического поля	упорядоченное ограниченное смещение связанных зарядов в пределах атома, молекулы, макроструктуры – ток поляризации		
Название процесса	дипольная (ориентационная) поляризация	электронная (деформационная) поляризация	ионная (макроструктурная) поляризация
Удельное сопротивление ρ , Ом·м	$10^6 \div 10^{15}$		
Характер изменения удельного сопротивления при увеличении температуры	уменьшается за счет увеличения числа свободных зарядов вследствие ионизации		

Электрические свойства клетки

Ткани организма состоят из структурных элементов – клеток, которые омываются хорошо проводящей электрический ток тканевой жидкостью – межклеточным веществом. Цитоплазма, находящаяся внутри клетки, также является хорошим проводником. *Межклеточное вещество и цитоплазма – проводники II-го рода.* Они разделены между собой слоем клеточной мембраны – диэлектриком.

Проводники клетки содержат положительные и отрицательные заряды.

С точки зрения поведения электрических зарядов при воздействии внешнего электрического поля их делят на свободные и связанные.

Свободные заряды – отдельно взятые положительные или отрицательные заряды, которые под действием внешнего электрического поля могут упорядоченно перемещаться по всему объему вещества.

Связанные заряды – положительные и отрицательные заряды, которые находятся в пределах одной структуры – атомов, молекул или макроструктур (например, клетки); под действием внешнего электрического поля смещаются относительно друг друга внутри этой структуры.

Плоский конденсатор – система из двух плоских проводящих пластин (обкладок), расположенных параллельно друг другу на малом по сравнению с размерами пластин расстоянии и разделенных слоем диэлектрика.

Емкостью конденсатора (C) называется физическая величина, равная отношению заряда q одной из пластин конденсатора к разности потенциалов $\Delta\varphi$ между ними; $C = \frac{q}{\Delta\varphi} = \frac{q}{U}$; $[C] = \Phi$ (Фарад).

Клетку можно рассматривать как конденсатор, две обкладки которого – это цитоплазма и межклеточное вещество, а между ними диэлектрик – билипидный слой – мембрана с относительной диэлектрической проницаемостью равной $\epsilon = 2$.

Электрические свойства тканей организма

Ткани организма по электрическим свойствам можно отнести к двум группам. Органические вещества (белки, жиры, углеводы и др.), из которых состоят плотные части тканей, являются **диэлектриками**. Однако все ткани и клетки в организме содержат жидкости или омываются ими (кровь, лимфа, различные тканевые жидкости). Эти жидкости являются растворами электролитов, поэтому они являются **проводниками II рода**.

Наименьшим сопротивлением обладают жидкости организма (спинномозговая жидкость, кровь, лимфа и др.), а также ткани, обильно пропитанные тканевой жидкостью, например, мышечная. Ткани с малым содержанием тканевой жидкости, уплотненные структуры (соединительная, жировая, костная ткани, сухая кожа) имеют высокое сопротивление и, соответственно, низкую удельную электропроводность.

Таблица 7. Удельное сопротивление (ρ) некоторых тканей организма при температуре $t = 37^\circ\text{C}$

	Биологическая ткань	ρ , Ом м
1	Спинномозговая жидкость	0,55
2	Кровь	1,66
3	Мышечная ткань	2,09
4	Мозговая и нервная ткань	14,3
5	Жировая ткань	33,3
6	Сухая кожа	10^5
7	Кость без надкостницы	10^7

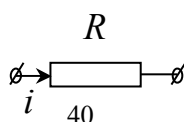
Процессы, происходящие в клетке под действием внешнего постоянного электрического поля

Под действием внешнего постоянного электрического поля свободные и связанные заряды в клетке приходят в движение и образуют ток проводимости и ток поляризации.

Ток проводимости – упорядоченное движение свободных зарядов по всему объёму вещества.

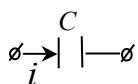
Ток поляризации – упорядоченное ограниченное смещение связанных зарядов в пределах атома, молекулы, макроструктуры.

Движение электрических зарядов, как правило, сопровождается преобразованием энергии электрического поля в другие виды энергии (тепловую, механическую, химическую). Этот процесс моделируют резистором.



Резистор сопротивлением R – идеальный элемент электрической схемы, с помощью которого учитывают необратимые преобразования электрической энергии в другие виды энергии (тепловую, механическую, химическую).

Разделение и накопление связанных зарядов моделируют конденсатором.



Конденсатор емкостью C – идеальный элемент электрической схемы, с помощью которого учитывают процесс разделения и накопления электрических зарядов.

Пояснения к табл. 9.

При приложении внешнего электрического поля в диэлектриках возникает противоположно направленное электрическое поле (поляризационное поле) вследствие разделения зарядов (явление поляризации), которое уменьшает внешнее электрическое поле.

Поляризация – процесс смещения связанных зарядов в пределах атома, молекулы, макроструктуры под действием внешнего электрического поля.

Поляризация – явление образования поляризационного поля; $\vec{E}'$ – вектор напряженности поляризационного поля (внутреннего электрического поля диэлектрика).

Относительная диэлектрическая проницаемость среды (ε_r) – физическая величина, которая показывает, во сколько раз напряженность электрического поля в данной среде ($E_0 - E'$) меньше напряженности внешнего электрического поля E_0

$$\varepsilon_r = \frac{E_0}{E_{рез}} = \frac{E_0}{E_0 - E'}$$

Таблица 8. Относительная диэлектрическая проницаемость тканей человека при температуре $t = 37^{\circ}\text{C}$

Ткань	Относительная диэлектрическая проницаемость на частотах	
	1 Гц	10 Гц
жир	50	20
легкие	85	25
мышцы	130	55
печень	145	55
сердечная мышца	320	100

Магнитные свойства вещества

Относительная магнитная проницаемость среды (μ_r) – физическая величина, показывающая, во сколько раз индукция магнитного поля в однородной среде (B) отличается от магнитной индукции внешнего (намагничивающего) поля в вакууме (B_0); $\mu_r = \frac{B}{B_0}$.

Для вакуума относительная магнитная проницаемость $\mu_r = 1$.

В зависимости от значения относительной магнитной проницаемости все вещества делят на три группы: диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики.

Таблица 10. Классификация веществ по магнитным свойствам

	Название вещества		
	Диамагнетики	Парамагнетики	Ферромагнетики
Относительная магнитная проницаемость среды μ_r	$\mu_r < 1$	$\mu_r > 1$	$\mu_r \gg 1$
Влияние на внешнее магнитное поле	внешнее магнитное поле незначительно ослабляется	внешнее магнитное поле незначительно усиливается	внешнее магнитное поле существенно усиливается
Примеры веществ	вода, органические соединения, <i>Zn, Pb, Ag, Au</i> и др.	<i>N₂, O₂, Mn, Cr, Pt</i> и др.	<i>Fe, Ni, Co</i> и их сплавы

Ткани организма в основном диамагнитны, что объясняется высоким содержанием в них воды. Присутствуют и парамагнетики $\sim 0,01\%$, ферромагнетиков нет. В целом, магнитное поле живого организма очень слабое.

Таблица 9. Процессы, происходящие в клетке, помещённой в постоянное электрическое поле

Вид зарядов	Описание процесса	Схема процесса	Время процесса τ , с	Название процесса	Эквивалентная электрическая схема
Свободные ионы	Свободные ионы проходят сквозь мембрану, что сопровождается тепловыми потерями, т.е. преобразованием электрической энергии в тепловую энергию.	$\vec{E}_0$ – вектор напряжённости внешнего электрического поля 	$10^{-18} \div 10^{-16}$	ток проводимости	
Связанные ионы	Ионы перемещаются внутри и вне клетки и скапливаются около клеточных мембран. Происходит разделение зарядов. Сопровождается потерей энергии.	$\vec{E}'$ – вектор напряжённости внутреннего электрического поля 	$10^{-8} \div 10^{-3}$	ток макроструктурной поляризации	
Связанные заряды в полярной молекуле	Связанные заряды в полярной молекуле (диполи) поворачиваются, ориентируясь по электрическому полю. Процесс сопровождается потерями энергии.	$\vec{E}_0 = 0$ 	$10^{-13} \div 10^{-7}$	ток дипольной (ориентационной) поляризации	
Связанные заряды в неполярной молекуле	Электроны смещаются вдоль линий напряжённости. Происходит деформация электронных оболочек. Молекулы становятся полярными. Процесс происходит почти без потерь энергии.	$\vec{E}_0 = 0$ 	$10^{-16} \div 10^{-14}$	ток электронной (деформационной) поляризации	

4. Процессы в биологической ткани при подключении ее к источникам постоянной и переменной э.д.с.

При изучении темы необходимо усвоить:

понятия и определения

электрический ток
постоянный электрический ток
переменный электрический ток
сила тока
свободные заряды
связанные заряды
ток проводимости
ток поляризации
конденсатор
емкость

свойства и явления

биологическая ткань при подключении к источнику постоянной э.д.с.
биологическая ткань при подключении к источнику переменной э.д.с.

формулы

тока проводимости
тока поляризации
общего тока
импеданса для резистора
импеданса для конденсатора
импеданса для резистора и конденсатора, соединенных последовательно

законы и уравнения

закон Ома для участка цепи

модели (эквивалентные электрические схемы):

тока проводимости
тока поляризации
тканей организма

графические объекты

тока проводимости $i_1 = f(t)$

тока поляризации $i_2 = f(t)$

общего тока $i = f(t)$

зависимости импеданса от частоты при прохождении переменного тока через:

- резистор;
- конденсатор;
- резистор и конденсатор, соединенных последовательно;
- живую биологическую ткань;
- мертвую биологическую ткань.

методы

реография

Моделирование электрических процессов в биологической ткани при подключении к источникам постоянной и переменной э.д.с.

При изучении электрических процессов, происходящих в ткани используется метод моделирования. Представим живую биологическую

ткань эквивалентной электрической схемой, временные и частотные зависимости для которой будут соответствовать экспериментальным кривым.

Исследование зависимости силы тока от времени для живой биологической ткани при подключении к источнику постоянной э.д.с.

К источнику постоянной э.д.с. ($\varepsilon = \text{const}$) подключим участок биологической ткани.

Экспериментально установлено, что в момент замыкания ключа K ($t = 0$) сила тока скачком возрастает (участок 1), затем начинает уменьшаться (участок 2), и через некоторое время устанавливается на постоянном уровне (участок 3).

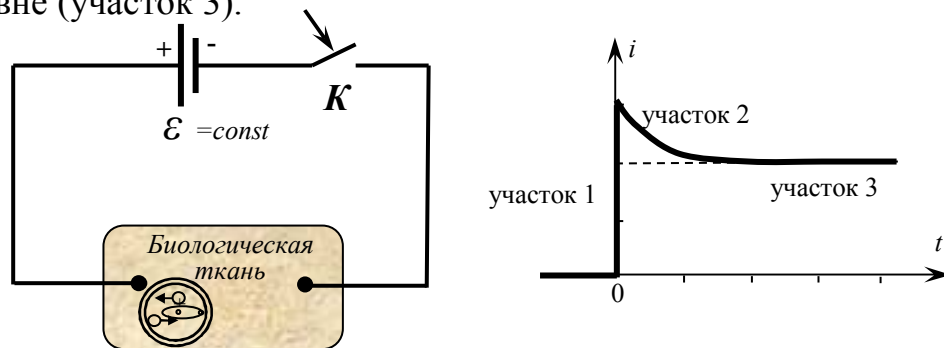
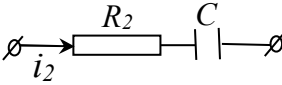
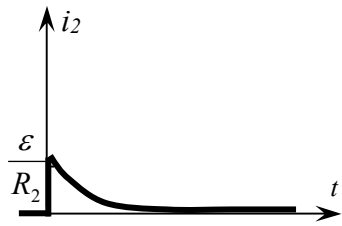
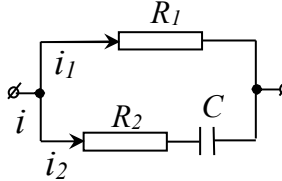
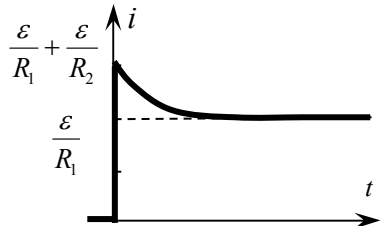


Рис. 2. Экспериментальный график зависимости силы тока от времени для живой биологической ткани

Моделирование процессов в биологической ткани при подключении к источнику постоянной э.д.с. рассмотрим в виде табл. 11.

Таблица 11. Моделирование процессов в биологической ткани при подключении к источнику постоянной э.д.с. с помощью электрических схем

Физический процесс	Электрическая схема	Формула	График
упорядоченное движение свободных зарядов (ток проводимости)	1	$i_1 = \frac{\varepsilon}{R_1}$	

Физический процесс	Электрическая схема	Формула	График
упорядоченное движение связанных зарядов (ток поляризации)	2 	$i_2 = \frac{\varepsilon}{R_2} e^{-\frac{t}{R_2 C}}$ при $t \rightarrow 0 \quad i_2 \rightarrow \frac{\varepsilon}{R_2}$ при $t \rightarrow \infty \quad i_2 \rightarrow 0$	
совместное движение свободных и связанных зарядов; общий ток $i = i_1 + i_2$	3 	$i = \frac{\varepsilon}{R_1} + \frac{\varepsilon}{R_2} e^{-\frac{t}{R_2 C}}$ при $t \rightarrow 0 \quad i \rightarrow \frac{\varepsilon}{R_1} + \frac{\varepsilon}{R_2}$ при $t \rightarrow \infty \quad i \rightarrow \frac{\varepsilon}{R_1} = i_1$	

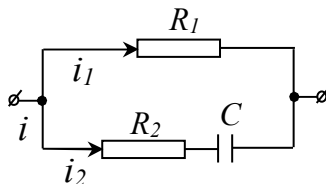
Пояснения к табл. 11:

Рассмотренные процессы, а именно – ток проводимости (схема 1) и ток поляризации (схема 2) протекают в ткани одновременно. Общий ток (i) представляет собой сумму токов $i = i_1 + i_2$, что соответствует параллельному соединению рассмотренных схем 1 и 2.

Таким образом, с помощью третьей схемы можно получить график зависимости силы тока от времени аналогичный экспериментальному.

Третью схему называют *эквивалентной электрической схемой ткани организма*.

Эквивалентная электрическая схема ткани организма



где i_1 – ток проводимости, возникающий в межклеточной среде (тканевой жидкости);

R_1 – сопротивление межклеточной среды (тканевой жидкости);

i_2 – ток поляризации, возникающий в цитоплазмах клеток;

R_2 – сопротивление цитоплазм клеток;

C – поляризационная емкость (эквивалентная емкость участка ткани);

i – общий ток; $i = i_1 + i_2$

Исследование зависимости импеданса живой биологической ткани от частоты при подключении к источнику переменной э.д.с.

К источнику переменной э.д.с. подключим участок биологической ткани. Э.д.с. источника тока меняется по гармоническому закону $\varepsilon = \varepsilon_m \sin(\omega t + \varphi_\varepsilon)$ где ω – частота изменения э.д.с. источника тока.

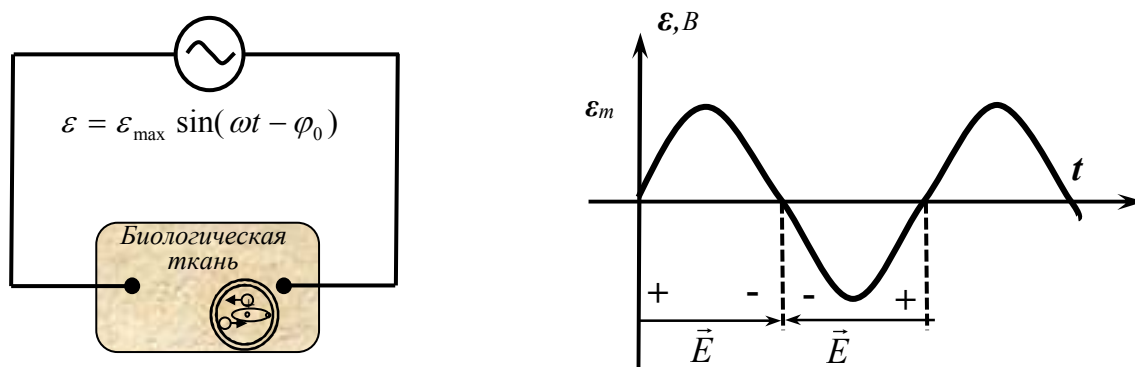


Рис. 3. Подключение живой биологической ткани к источнику переменной э.д.с.

Так как каждые полпериода меняется направление электрического поля, и, следовательно, направление движения зарядов, то заряды будут совершать вынужденные колебания с частотой источника э.д.с., т.е. ток будет изменяться по гармоническому закону $i = i_m \sin(\omega t + \varphi_i)$.

Импеданс (z) – полное сопротивление переменному току; $[z] = \text{Ом}$

Экспериментально установлено, что импеданс живой биологической ткани зависит от частоты источника э.д.с.

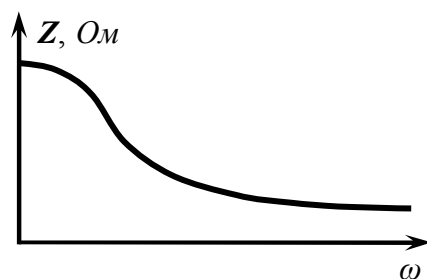
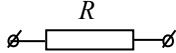
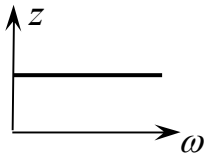
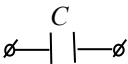
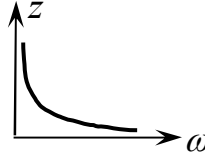


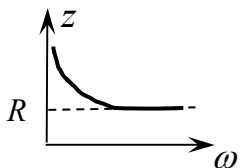
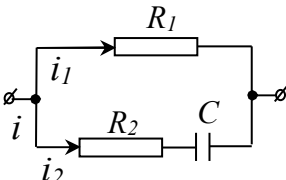
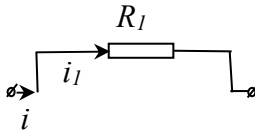
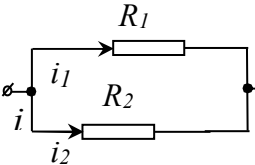
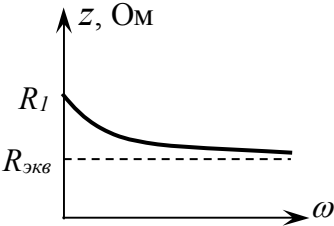
Рис. 4. Экспериментальный график зависимости импеданса живой биологической ткани от частоты

Импеданс живой ткани можно рассматривать как совокупность омического сопротивления R , не зависящего от частоты ω переменного тока и емкостного сопротивления $z = \frac{1}{\omega C}$, зависящего от частоты ω переменного тока.

Моделирование зависимостей $z(\omega)$ отдельных элементов эквивалентной электрической схемы ткани организма при подключении к источнику переменной э.д.с. рассмотрим в виде таблицы 12.

Таблица 12. Моделирование зависимостей $z(\omega)$ отдельных элементов эквивалентной электрической схемы ткани организма при подключении к источнику переменной э.д.с.

Электрическая схема	Формула импеданса	Зависимость импеданса от частоты	График зависимости $z(\omega)$
	$z = R$	не зависит	
	$z = \frac{1}{\omega C}$	$\omega \rightarrow 0 \quad z \rightarrow \infty$ $\omega \rightarrow \infty \quad z \rightarrow 0$	

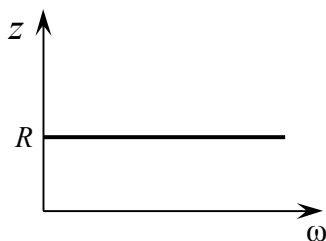
Электрическая схема	Формула импеданса	Зависимость импеданса от частоты	График зависимости $z(\omega)$
	$z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$	$\omega \rightarrow 0 \quad z \rightarrow \infty$ $\omega \rightarrow \infty \quad z \rightarrow R$	
	$z_1 = R_1$ $z_2 = \sqrt{R_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$	$\omega \rightarrow 0$ $z_1 = R_1$ $z_2 \rightarrow \infty$  $z \rightarrow z_1 = R_1$ $\omega \rightarrow \infty$ $z_1 = R_1$ $z_2 \rightarrow R_2$  $z \rightarrow \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = R_{экв}$	

Полученная теоретическая зависимость $z(\omega)$ эквивалентной электрической схемы ткани организма в целом аналогична экспериментальной, при этом на низких частотах имеются некоторые отличия в графиках.

При увеличении частоты переменного тока уменьшается емкостное сопротивление, уменьшается импеданс биоткани. Это связано с уменьшением поляризации.

При отмирании ткани нарушается структура клеточной мембраны и ткань будет обладать лишь омическим сопротивлением R .

График зависимости $z(\omega)$ для мертвой ткани



Реография

Импеданс тканей организма зависит от множества физиологических условий, основным из которых является состояние кровообращения, в частности, кровенаполнение сосудов. Импеданс изменяется в зависимости от фазы сердечного цикла. Во время систолы при наполнении ткани кровью (проводник тока), проводимость ткани увеличивается, импеданс уменьшается; а во время диастолы проводимость ткани уменьшается, импеданс увеличивается.

Исследование частотной зависимости импеданса ткани, используется как один из тестов физиологического состояния ткани (например, жизнеспособности консервированной кожи, кости, роговицы и т.д. в трансплантационной хирургии).

Реография – метод исследования функции сердца и кровоснабжения органов путем регистрации колебаний импеданса, т.е. полного (омического и емкостного) сопротивления переменному току высокой частоты, связанных с изменениями кровенаполнения исследуемых участков тела.

С помощью этого метода получают реограммы головного мозга (реоэнцефалограмма), сердца (реокардиограмма), магистральных сосудов легких, печени и конечностей.

Реограмма – графическая зависимость, отражающая изменения во времени полного электрического сопротивления ткани.

При снятии реограмм используют прибор реограф, измерения обычно производят на частоте 30 кГц.

5. Воздействие на биологические ткани различными электрическими факторами. Основы электротерапии

При изучении темы необходимо усвоить:

понятия и определения

раздражение
возбуждение
порог раздражения
сила порогового тока
скорость нарастания силы тока
длительность импульса
реобазис
хронаксия
удельное количество теплоты

свойства и явления

первичное действие постоянного тока на биологическую ткань
физические процессы в клетке при изменении длительности импульса тока
физические процессы в клетке при изменении частоты электрического тока

классификации физиопроцедур

по физическому фактору воздействия (электрический ток, электрическое и магнитное поле)
по режиму воздействия (импульсный, непрерывный)
по лечебному эффекту (раздражающий, тепловой)

формулы

удельное количество теплоты, выделяющееся в ткани при
а) диатермии
б) УВЧ-терапии в тканях-проводниках, в тканях диэлектриках

законы и уравнения

закон Дюбуа-Реймона
уравнение Вейса-Лапика
закон Джоуля-Ленца

графические объекты

график зависимости (кривая электровозбудимости) $i_n = f(t_u)$
график зависимости $i_n = f(\nu)$

физиопроцедуры

гальванизация
лечебный электрофорез
электростимуляция
дарсонвализация
диатермия
аэроионизация
статдуш
франклинизация
магнитотерапия
УВЧ-терапия
индуктотермия
микроволновая терапия

Раздражение. Возбуждение. Порог раздражения

Раздражение – воздействие на живые клетки, ткани или органы различных факторов внешней или внутренней среды.

Возбуждение – ответная реакция на раздражение.

Физиологическим проявлением процесса возбуждения является специализированная форма ответной реакции: у мышечной ткани – сокращение (расслабление), у нервной – проведение нервного импульса, у секреторной – синтез и выделение биологически активных веществ.

Все раздражители (раздражающие факторы) можно разделить на три группы: физические, химические и физико-химические. К физическим раздражителям относятся механические, температурные, электрические, световые, звуковые.

Для того чтобы наступило возбуждение биологической ткани, величина, характеризующая раздражающий фактор, должна преодолеть порог раздражения.

Порог раздражения – минимальное значение величины раздражающего фактора, вызывающего ответную реакцию возбудимой ткани.

Например, при воздействии звуковой волны, порог раздражения – это порог слышимости.

В случае электрического раздражения, порог раздражения – это пороговая сила тока.

Пороговая сила тока (i_n) – минимальное значение силы тока, при которой возникает ответная реакция ткани организма.

В физиологии электрический ток, вызывающий возбуждение нервных клеток, называется *ощутимым током*.

Порогом ощутимого тока называют наименьшую силу тока, раздражающее действие которого ощущает человек. Его величина зависит от места и площади контакта тела с подведенным напряжением, частоты тока.

Неотпускающий ток – это ток, при воздействии которого человек не может самостоятельно освободиться от проводника – источника напряжения.

Порог неотпускающего тока – минимальное значение электрического тока заданной частоты и формы, вызывающее непроизвольное непреодолимое сокращение мышц.

Таблица 13. Реакция человека на протекание электрического тока

Сила тока, мА	Характер воздействия	
	переменный ток 50-60 Гц	постоянный ток
0,6-1,5	начало ощущения, легкое дрожание пальцев рук	не ощущается
2-3	сильное дрожание пальцев рук	не ощущается
5-7	начало судорог в руках	зуд, ощущение нагрева
8-10	руки трудно, но еще можно оторвать от электродов; сильные боли	усиление нагрева
20-25	паралич рук; дыхание затруднено	еще большее усиление нагрева; незначительное сокращение мышц рук
50-80	паралич дыхания; начало трепетания желудочков сердца	сильное ощущение нагрева; сокращение мышц рук; судороги, затруднение дыхания
90-100	фибрилляция сердца; при длительности 3с и более – паралич сердца	паралич дыхания

Раздражающее действие электрического тока

Воздействие электрическим током определенной формы и силы может вызвать изменение функционального состояния биологической ткани.

Первичное действие постоянного электрического тока на ткани организма (сила которого превышает порог раздражения) обусловлено смещением связанных ионов тканевых электролитов вдоль силовых линий электрического поля. Происходит их разделение и накопление вблизи клеточных мембран. Возникает поляризация. При этом изменяется обычный состав ионов по обе стороны клеточной мембраны. Изменение ионной сре-

ды может вызвать изменение функционального состояния клетки в сторону возбуждения или торможения ее деятельности.

Постоянный ток при установившейся силе тока (ниже порогового значения) раздражающего действия на ткани организма почти не оказывает. Возбуждение ткани возникает при изменении силы тока и зависит от скорости, с которой это изменение происходит.

Закон Дюбуа-Реймона (фр. ученый, 1845 г.)

Раздражающее действие электрического тока прямо пропорционально зависит от скорости нарастания силы тока

$$\varepsilon \sim \frac{di}{dt},$$

где ε – раздражающее действие электрического тока, $\frac{di}{dt}$ – скорость нарастания (изменения) силы тока.

Сила тока в электролитах зависит как от числа движущихся ионов, так и от скорости их перемещения. Раздражающее действие тока обусловлено ускорением ионов тканевых электролитов.

Раздражающее действие электрических импульсов тока

Электростимуляция – применение электрического раздражения для изменения функционального состояния клеток, органов и тканей.

Электрический импульс – кратковременное действие тока или напряжения.

Для электростимуляции используются электрические токи одного направления и различной формы (треугольные, пилообразные, экспоненциальные, прямоугольные и др.).

Применяются:

- 1) одиночные импульсы;
- 2) посылки (серии), состоящие из определенного числа импульсов;
- 3) импульсы, повторяющиеся периодически с определенной частотой.

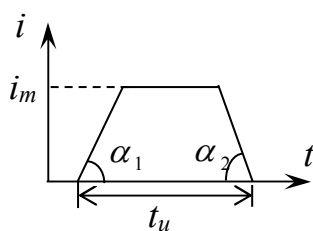
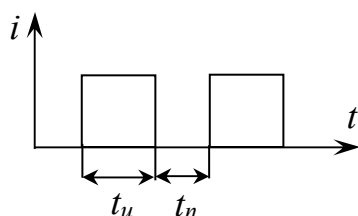


Рис. 5. Графическое изображение одиночного импульса

Раздражающее действие одиночного импульса тока зависит от его характеристик (см. рис.):

- формы импульса (преимущественное значение имеет **крутизна фронта импульса** (S); $S = \operatorname{tg} \alpha$); величина углов α_1 определяет передний, α_2 задний фронт нарастания;
- длительности импульса — t_u ;
- амплитуды силы тока — i_m

Наибольшая крутизна фронта у прямоугольных импульсов тока ($\alpha_1 \rightarrow \frac{\pi}{2}$, $\operatorname{tg} \alpha_1 \rightarrow \infty$), следовательно, они обладают наибольшим раздражающим действием.



t_u — длительность импульса;

t_n — длительность паузы;

T — период прямоугольных импульсов;

$$T = t_u + t_n$$

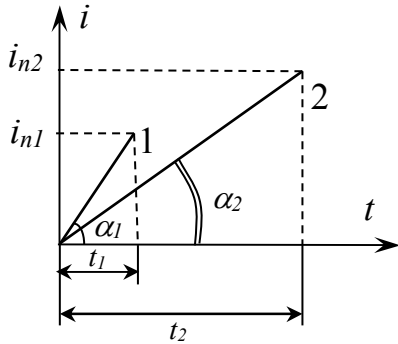
Рис. 6. График прямоугольных импульсов тока

Зависимость силы порогового тока от скорости нарастания силы тока

Согласно закону Дюбуа-Реймона, раздражающее действие тока зависит от скорости нарастания силы тока, т.е. от крутизны переднего фронта импульса. Эта зависимость связана со свойством возбудимых тканей повышать порог («приспосабливаться») к постепенно нарастающей силе раздражения. Такое свойство тканей называется **аккомодацией** и характеризуется снижением порогового тока i_n при возрастании крутизны переднего фронта одиночных достаточно длительных импульсов.

Аккомодация – это свойство возбудимых тканей приспосабливаться к постепенно нарастающей силе раздражения.

Рассмотрим экспериментальный график зависимости силы порогового тока от скорости нарастания силы тока



При быстром нарастании силы тока (прямая 1) возбуждение ткани наступает за меньшее время (t_1) и при меньшем значении силы тока (i_{n1}); таким образом, пороговый ток при быстром нарастании силы тока больше, чем пороговый ток при медленном нарастании силы тока: $i_{n2} > i_{n1}$.

Сила порогового тока обратно пропорциональна скорости нарастания силы тока

$$i_n \sim \frac{1}{\frac{di}{dt}},$$

$\frac{di}{dt} = i'$ – первая производная силы тока по времени. На основании геометрического смысла производной $i' = tg\alpha$. Чем больше α , тем больше скорость нарастания силы тока. $\left(\frac{di}{dt}\right)_1 > \left(\frac{di}{dt}\right)_2 \Rightarrow \varepsilon_1 > \varepsilon_2$.

Сила порогового тока обратно пропорциональна раздражающему действию электрического тока $i_n \sim \frac{1}{\varepsilon}$.

Зависимость силы порогового тока от длительности прямоугольных импульсов

Уравнение Вейса-Ланика для прямоугольных импульсов тока
(Л. Ланик, Ж. Вейс, фр. физиологи, 1901 г.)

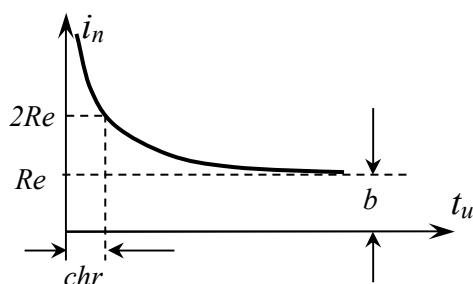
$$i_n = \frac{a}{t_u} + b,$$

где i_n – пороговая сила тока;

t_u – длительность импульса;

a и b – коэффициенты, зависящие от природы раздражения и функционального состояния ткани.

Кривая электровозбудимости – график зависимости силы порогового импульсного тока от длительности импульса.



если $t_u \rightarrow 0$ $i_n \rightarrow \infty$;

если $t_u \rightarrow \infty$ $i_n \rightarrow b$, где $b = Re$

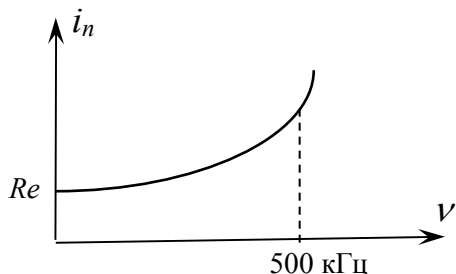
Рис. 7. График зависимости $i_n = f(t_u)$

Реобаза (Re) (греч. *ρεος* – течение) – сила порогового тока, при которой может наблюдаться возбуждение при сколь угодно большой длительности импульса; $[Re] = A$

Хронаксия (chr) (греч. *χρονος* – время, *ακσια* – мера) – длительность импульса при $i_n = 2Re$; $[chr] = c$

Реобаза и хронаксия являются характеристиками возбудимости органа или ткани, а также могут служить показателями их функционального состояния или диагностическим признаком при их поражении.

Зависимость порогового тока от частоты импульса



если

$\nu \rightarrow 0$; $t_u \rightarrow \infty$; $i_n \rightarrow b = Re$;

если

$\nu \rightarrow \infty$; $t_u \rightarrow 0$; $i_n \rightarrow \infty$

Рис. 8. График зависимости $i_n = f(\nu)$

Влияние изменения частоты колебаний электрического тока на величину раздражающего действия

Под действием электрического тока, периодически изменяющегося с определенной частотой, ионы смещаются в пределах мембраны клетки. Если частота колебаний электрического тока мала, смещение ионов настолько велико, что происходит их разделение и накопление вблизи клеточных мембран. Наступает поляризация, возникает возбуждение.

При увеличении частоты электрического тока амплитуда колебаний ионов уменьшается, происходит их частичное разделение и накопление вблизи клеточных мембран. Поляризация уменьшается, уменьшается возбуждение.

При достаточно высоких частотах электрического тока амплитуда колебаний ионов настолько уменьшается, что становится соизмеримой с амплитудой колебаний ионов вследствие теплового хаотического движения. Энергия электрического тока переходит в тепловую энергию клетки. Концентрация ионов вблизи мембран не изменяется, поляризации нет, нет раздражающего действия.

Чем больше частота электрического тока, тем меньше раздражающее действие. Опытным путем установлено, что при $\nu = 500 \text{ кГц}$ и выше раздражающее действие исчезает, электрический ток оказывает только тепловое действие.

Экспериментально установлено, что раздражающее действие электрического тока обратно пропорционально зависит от частоты тока $\varepsilon \sim \frac{1}{\nu}$;

сила порогового тока прямо пропорционально зависит от частоты $i_n \sim \nu$; тепловое действие электрического тока (тепловой эффект T) также прямо пропорционально зависит от частоты.

Таблица 14. Классификация основных методов электротерапии

№ п/п	Физический фактор воздействия*	Режим действия	Название метода	Первичный лечебный эффект
I. Контактные методы.				
Воздействие током через контактно наложенные электроды				
1	Постоянный электрический ток	непрерывный	Гальванизация Лечебный электрофорез $U = 40-60 \text{ В}; i = 20-50 \text{ мА}$	раздражающий
2	Ток постоянного направления	импульсный	Электростимуляция (электросон, электро- наркоз, электроаналгезия и т.п.)	раздражающий
3	Переменный ток ВЧ	импульсный	Дарсонвализация $\nu \sim 500 \text{ кГц}$	раздражающий
4	Переменный ток ВЧ	непрерывный	Диатермия $\nu \sim 1-2 \text{ МГц}$	тепловой
II. Бесконтактные методы				
Воздействие электрическим, магнитным, электромагнитным полем				
1	Постоянное электрическое поле	непрерывный	Аэроионизация Статдуш Франклинизация	раздражающий
2	Постоянное магнитное поле	непрерывный	Магнитотерапия	раздражающий
3	Магнитное поле ВЧ	непрерывный	Индуктотермия $\nu \sim 10-15 \text{ МГц}$	тепловой
4	Электрическое поле УВЧ	непрерывный	УВЧ-терапия $\nu \sim 40-50 \text{ МГц}$	тепловой
5	Электромагнитное поле СВЧ	непрерывный	Микроволновая терапия	тепловой

*Где ВЧ – диапазон высоких частот ($\nu \sim 0,2 - 30 \text{ МГц}$); УВЧ – ультравысоких частот ($\nu \sim 30-300 \text{ МГц}$); СВЧ – сверхвысоких частот ($\nu > 300 \text{ МГц}$).

Удельное количество теплоты, выделяющееся в тканях

при некоторых физиопроцедурах

Закон Джоуля-Ленца для количества теплоты Q , выделяющейся в проводнике при прохождении электрического тока за время t

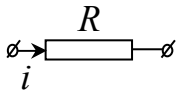
$$Q = I \cdot U \cdot t = I^2 \cdot R \cdot t = \frac{U^2}{R} t$$

Удельное количество теплоты (q) – количество теплоты, выделяющееся в единице объема ткани (V) за единицу времени t ;

$$q = \frac{Q}{V \cdot t}, [q] = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \text{с}} = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}$$

где Q – количество теплоты, выделяющееся в ткани; V – объем нагреваемой ткани; $V = Sl$; t – время нагрева.

Диатермия – метод электротерапии, при котором оказывается воздействие на ткани организма высокочастотным электрическим током.

эквивалентная электрическая схема 

$$q = \frac{i^2 R}{V} = \frac{i^2 \rho l}{S S l} = \frac{i^2 \rho}{S^2} = j^2 \rho,$$

где R – сопротивление; $R = \frac{\rho l}{S}$,

где ρ – удельное сопротивление ткани;

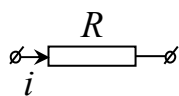
j – плотность электрического тока; $j = \frac{i}{S}$;

Удельное количество теплоты, выделяющееся в ткани при диатермии

$$q = j^2 \rho$$

УВЧ-терапия – метод электротерапии, при котором оказывается воздействие на ткани организма ультравысокочастотным электрическим полем.

а) **ткань-проводник** (спинномозговая жидкость, кровь, лимфа и т.д.)

эквивалентная электрическая схема 

$$q = \frac{U^2}{RV} = \frac{El^2 S}{\rho l S l} = \frac{E^2}{\rho},$$

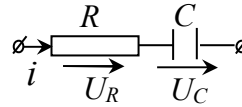
где U – напряжение; $U = El$; E – напряженность электрического поля.

Удельное количество теплоты, выделяющееся в тканях-проводниках при УВЧ-терапии

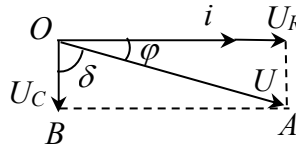
$$q = \frac{E^2}{\rho}$$

а) **ткань-диэлектрик** (сухая кожа, кость без надкостницы, связки, сухожилия, жировая ткань и т.д.)

эквивалентная электрическая схема



векторная диаграмма



φ – угол между i и U ;

δ – угол диэлектрических потерь

Чем больше δ , тем большее количество теплоты будет выделяться на резисторе $R \Rightarrow U_R > U_C$

$$q = \frac{U_R i}{V};$$

$$\text{из } \Delta OAB \Rightarrow U_R = U_C \operatorname{tg} \delta$$

$$U_C = i \cdot z_C, \text{ где } z_C - \text{импеданс конденсатора; } z_C = \frac{1}{\omega C},$$

где C – емкость плоского конденсатора;

ω – частота изменения электрического поля;

$$U_C = i \cdot \frac{1}{\omega C} \Rightarrow i = U_C \omega C; \quad U_C = El; \quad C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{l},$$

где ε_0 – электрическая постоянная;

ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость ткани;

$$q = \frac{U_R i}{V} = \frac{U_C \operatorname{tg} \delta U_C \omega C}{V} = \frac{U_C^2 \omega C \operatorname{tg} \delta}{V} = \frac{E^2 l^2 \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r S \operatorname{tg} \delta}{l S l} = E^2 \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r \operatorname{tg} \delta$$

Удельное количество теплоты, выделяющееся в тканях-диэлектриках при УВЧ-терапии

$$q = E^2 \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r \operatorname{tg} \delta$$

6. Физические процессы в биологических мембранах

При изучении темы необходимо усвоить:

понятия и определения

градиент величины

явления переноса:

- массы
- заряда

простая диффузия

диффузия через поры

облегченная диффузия (с помощью подвижных и неподвижных молекул-переносчиков)

мембранный потенциал

потенциал покоя

потенциал действия

равновесное состояние

неравновесное состояние

стационарное состояние

свойства и явления

функции мембран

пассивный транспорт

активный транспорт

мембранный потенциал

характеристики состояния системы с помощью градиентов

фаза деполяризации

фаза реполяризации

классификации

транспорт веществ (пассивный и активный)

формулы и уравнения

уравнения:

- переноса в общем виде
- диффузии (Фика)
- электропроводности
- диффузии через поры
- пассивного транспорта молекул через мембрану (уравнение диффузии молекул через мембрану)

уравнение Нернста-Планка (уравнение электродиффузии)

уравнение Гольдмана

графические объекты

строение мембраны

график зависимости плотности потока массы от градиента концентрации:

- для простой диффузии;
- облегченной диффузии

зависимости потенциала действия от времени

Строение мембраны

Клеточная мембрана представляет собой двойной слой (бислои) фосфолипидов, молекулы которых имеют гидрофильную полярную («го-

ловку») и гидрофобный неполярный («хвост») (рис. 9). Гидрофобные участки молекул обращены внутрь, а гидрофильные — наружу.

Биологическая мембрана включает различные белки:

- интегральные – пронизывают мембрану насквозь,
- полуинтегральные – погружены одним концом во внешний или внутренний липидный слой,
- поверхностные – расположены на внешней или прилегают к внутренней сторонам мембраны.

Некоторые из интегральных белков выполняют функцию ионных каналов, различных транспортеров и рецепторов.

Толщина мембраны $\sim 6-10$ нм; радиус пор $R \sim 0,4$ нм.

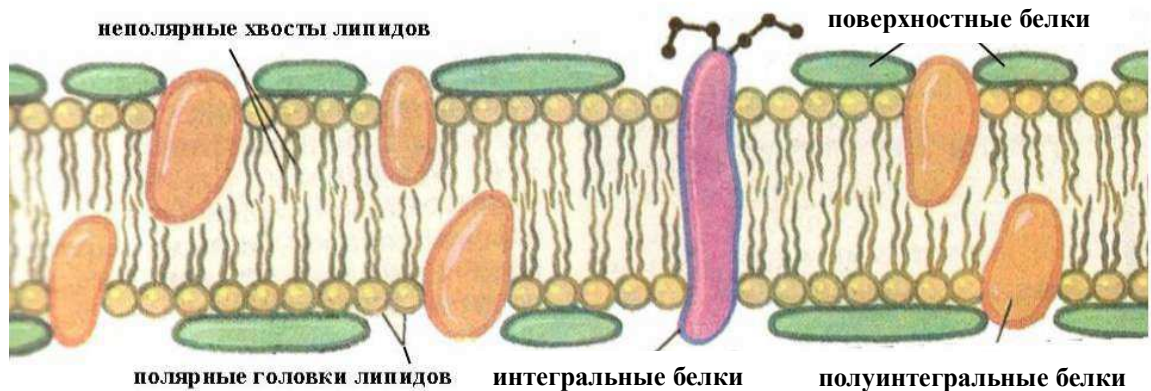


Рис. 9. Строение мембраны

Основные функции мембран

- 1) матричная – обеспечивает определенное взаиморасположение и ориентацию мембранных белков, их оптимальное взаимодействие;
- 2) механическая – обеспечивает автономность клетки, ее внутриклеточных структур, также соединение с другими клетками (в тканях);
- 3) барьерная – обеспечивает регулируемый, избирательный обмен веществ с окружающей средой;

- 4) транспортная – через мембрану происходит транспорт веществ в клетку и из клетки;
- 5) участвует в генерации и проведении биопотенциалов.

Характеристики состояния системы с помощью градиентов

Градиент величины A ; $gradA = \frac{dA}{dx}$ – это производная величины по

координате; она характеризует скорость изменения величины в пространстве. Это может быть изменение концентрации, потенциала, температуры, скорости и т.п.

Равновесным называется состояние системы, при котором в каждой точке пространства физическая величина имеет одно и тоже значение. $A_1 = A_2 = const$ и следовательно, $gradA = 0$

Неравновесным называется состояние системы, при котором в каждой точке пространства физическая величина имеет различные значения $A_1 \neq A_2$ и следовательно, $gradA \neq 0$.

Стационарным называется состояние системы, которое она сохраняет в течении достаточно длительного промежутка времени ($gradA = 0$ или $gradA = const$).

Нестационарным называется состояние системы, которое изменяется во времени.

Живая клетка организма существует в стационарном неравновесном состоянии за счет пассивного и активного транспорта, осуществляемых одновременно.

Явления переноса в мембране

Явления переноса – это процессы переноса физической величины (массы, энергии, импульса, заряда и др.) в пространстве вследствие неоднородности среды.

Диффузия – процесс взаимного проникновения и перемешивания соприкасающихся веществ, вследствие теплового движения молекул.

Электропроводность – процесс переноса электрических зарядов.

Таблица 15. Виды явлений переноса в мембране

Явление	Название (примеры)	Неоднородность	Градиент	Плотность потока	Уравнение
Перенос массы m	диффузия (распространение запахов, растворение веществ)	концентрации (C)	$grad C = \frac{dC}{dx}$	$J_m = \frac{m}{t \cdot S}$, где J_m – плотность потока массы; $[J_m] = \frac{кг}{с \cdot м^2}$	диффузии (уравнение Фика) $J_m = -D \frac{dC}{dx}$, где D – постоянная диффузии (Фика)
Перенос заряда q	электропроводность (электрический ток)	электрического потенциала (φ)	$grad \varphi = \frac{d\varphi}{dx}$	$J_q = \frac{q}{t \cdot S}$, где J_q – плотность потока заряда; $[J_q] = \frac{Кл}{с \cdot м^2}$	электропроводности $J_q = -\sigma \frac{d\varphi}{dx}$, где σ – удельная электропроводность

Пассивный транспорт веществ

Транспорт веществ – это перенос веществ через клеточную мембрану.

Пассивный транспорт – перенос веществ, проходящий без затрат энергии (из области с большей концентрацией в область с меньшей концентрацией) путем диффузии.

Виды пассивного транспорта

- 1) **простая диффузия** – осуществляется непосредственно через билипидный слой (таким образом переносятся O_2 , CO_2 , спирты, стероидные гормоны);
- 2) **облегченная диффузия** – диффузия, при которой веществу помогает пройти через мембрану какая-либо специфическая молекула:
 - диффузия через поры – специфические транспортные каналы в некоторых интегральных белках (для определенного вещества – свой канал). Многие каналы управляемые – в зависимости от потребности клетки могут закрываться и открываться.

– диффузия с помощью специальных молекул-переносчиков (подвижных и неподвижных белковых молекул). Они специфичны для переносимых молекул.

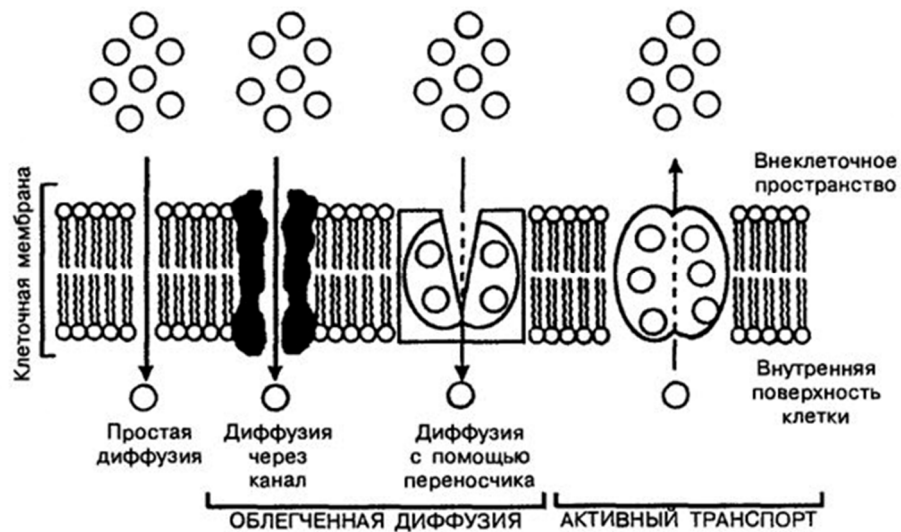


Рис. 10. Виды транспорта

Пассивный транспорт молекул через мембрану

Диффузию (пассивный транспорт) описывает *уравнение Фика*

$$J_m = -D \frac{dC}{dx}$$

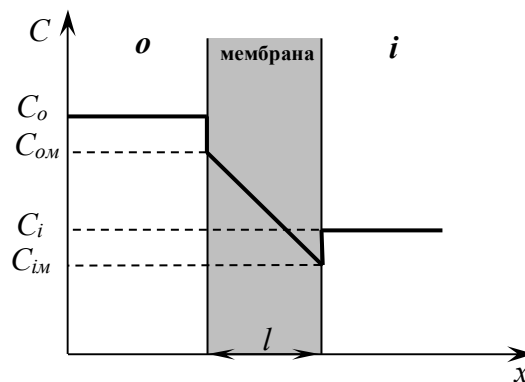


Рис. 11. Распределение концентрации вещества

Пояснения к рис. 11:

o (*out* – внешняя среда клетки); *i* (*in* – внутренняя среда клетки); C_o – концентрация вещества внешней среды; $C_{o,м}$ – концентрация вещества внешней среды вблизи мембраны; C_i – концентрация вещества внутри клетки; $C_{i,м}$ – концентрация вещества внутри клетки вблизи мембраны (эти концентрации могут быть измерены экспериментально).

Предположим, что внутри мембраны концентрация изменяется по линейному закону, то

$$\frac{dC}{dx} = \frac{C_{0,m} - C_{i,m}}{l} = \frac{k(C_0 - C_i)}{l},$$

$$k = \frac{C_{0,m}}{C_0} = \frac{C_{i,m}}{C_i} - \text{коэффициент распределения вещества.}$$

$$J_m = -\frac{Dk(C_0 - C_i)}{l} = \frac{Dk(C_i - C_0)}{l} = P(C_i - C_0) = P\Delta C,$$

где $P = \frac{Dk}{l}$ – проницаемость мембраны;

$\Delta C = C_i - C_0$ – разность концентраций.

Уравнение пассивного транспорта молекул через мембрану (уравнение диффузии молекул через мембрану) $J_m = P\Delta C$

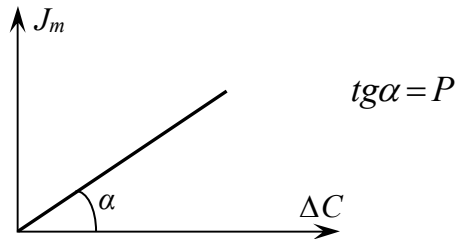


Рис. 12. Зависимость плотности потока массы от разности концентраций для простой диффузии, диффузии через поры

Проницаемость мембраны в случае диффузии через поры $P = \frac{D\pi R^2 n}{l}$;

где D – коэффициент диффузии,

R – радиус поры (канала),

n – число пор (число каналов) на единицу площади,

l – толщина мембраны.

В случае диффузии с помощью переносчиков, количество переносимых молекул зависит не только от разности концентраций внутри и снаружи мембраны, но и от количества переносчиков. При определенной разности концентраций все молекулы-переносчики оказываются заняты транспортом и дальнейшее увеличение разности концентраций уже не приводит к увеличению плотности потока молекул через мембрану – наступает насыщение.

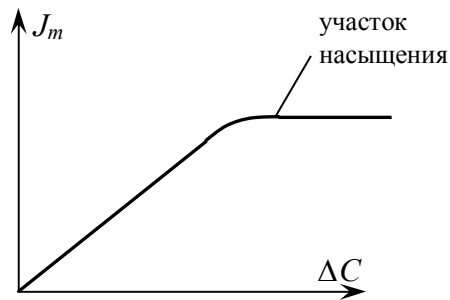


Рис. 13. Зависимость плотности потока массы от разности концентраций для диффузии с помощью молекул переносчиков

Пассивный транспорт ионов через мембрану

Пассивный транспорт ионов обусловлен наличием градиента концентрации и градиента потенциала между внутренней и наружной сторонами мембраны.

Уравнение Нернста-Планка (уравнение электродиффузии)

$$J_{\text{ионов}} = J_m + J_q = -D \frac{dC}{dx} - \sigma \frac{d\varphi}{dx},$$

где $D = uRT$, $\sigma = uCFz$;

u – подвижность ионов,

R – универсальная газовая постоянная ($R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}$),

T – абсолютная температура,

C – концентрация,

F – постоянная Фарадея ($F = 96485 \frac{\text{Кл}}{\text{моль}}$),

z – валентность иона.

Активный транспорт веществ

Активный транспорт – перенос, требующий затрат энергии и проходящий (из области с меньшей концентрацией в область с большей концентрацией).

Ионный насос – система белков, осуществляющая активный транспорт.

Калий-натриевый насос

Источником энергии для перекачки ионов Na^+ и K^+ против их градиентов является АТФ (аденозинтрифосфорная кислота).

Калий-натриевый насос – это особый белок в мембране. За один цикл работы насос выбрасывает наружу 3 иона Na^+ и закачивает внутрь клетки 2 иона K^+ за счет энергии гидролиза АТФ.

Работа калий-натриевого насоса:

- 1) изнутри клетки насос «забирает» 3 иона Na^+ , затем расщепляет молекулу АТФ (при этом выделяется энергия) и присоединяет к себе фосфат;
- 2) «выбрасывает» ионы Na^+ в межклеточное вещество и присоединяет 2 иона K^+ из внешней среды;
- 3) отсоединяет фосфат, «выбрасывает» внутрь клетки 2 иона K^+ .

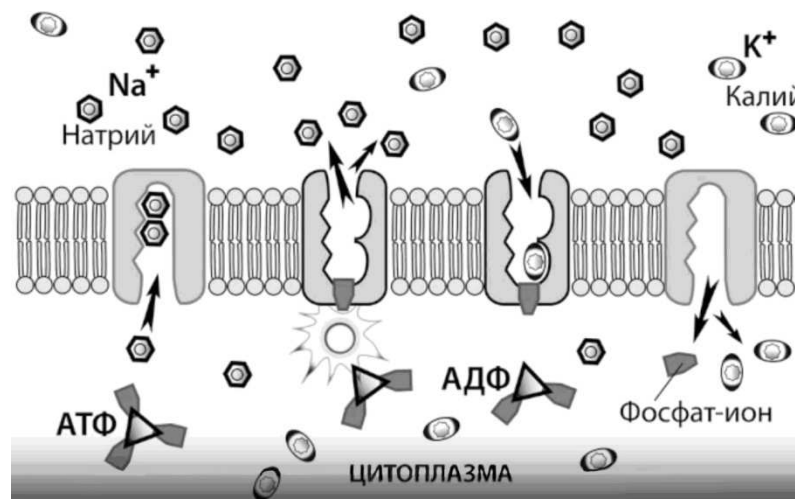


Рис. 14. Работа калий-натриевого насоса

Мембранные потенциалы

Мембранный потенциал (φ_m) – это разность потенциалов между внутренней и наружной поверхностью мембраны; $\varphi_m = \varphi_i - \varphi_o$

Мембранный потенциал имеет физико-химическую природу и обусловлен разностью концентраций ионов K^+ , Na^+ , Cl^- внутри и снаружи клетки и их диффузией.

В стационарном состоянии суммарная плотность потока равна нулю, т.е. число различных ионов, приходящих в единицу времени через мембрану внутрь клетки, равно числу ионов, выходящих из клетки через мембрану.

$$J_{K^+} + J_{Na^+} + J_{Cl^-} = 0$$

Потенциал покоя – мембранный потенциал в состоянии физиологического покоя.

Внутри клетки (в цитоплазме) концентрация ионов K^+ выше, чем снаружи (в межклеточном веществе); снаружи выше концентрации ионов Na^+ и Cl^- . Эта разность концентраций поддерживается активным транспортом (работой насосов).

В состоянии физиологического покоя открыты калиевые каналы клеточных мембран, а натриевые – практически все закрыты. Проницаемость мембраны аксона кальмара для соответствующих ионов находится в соотношении:

$$P_{K^+} : P_{Na^+} : P_{Cl^-} = 1 : 0,04 : 0,45$$

Как следствие в состоянии физиологического покоя наблюдается:

- диффузия K^+ , в результате которой положительный заряд переносится на внешнюю сторону мембраны;
- диффузия Cl^- , в результате которой отрицательный заряд переносится на внутреннюю сторону мембраны;
- избыток ионов Na^+ на внешней стороне мембраны.

Вследствие этих процессов внутренняя среда клетки заряжается отрицательно, наружная – положительно.

Таким образом, потенциал покоя отрицательный и его величина для различных клеток составляет $\varphi_m \sim -(45 \div 100) \text{ мВ}$.

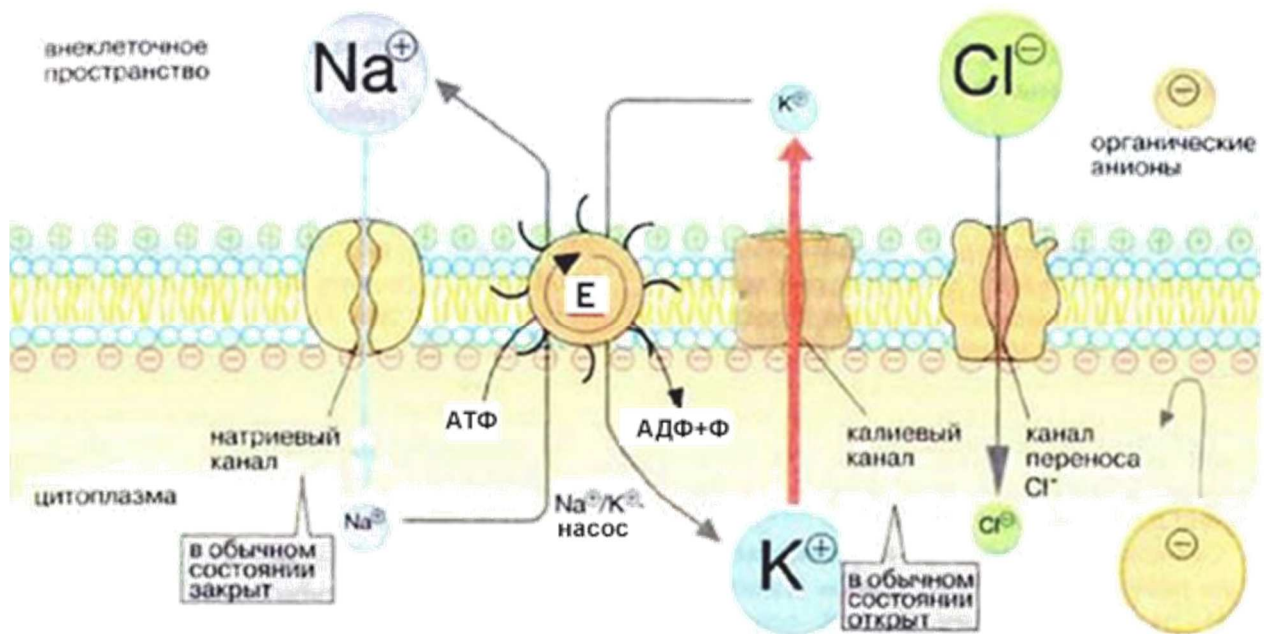


Рис. 15. Процессы в клетке в состоянии физиологического покоя (образование потенциала покоя)

Уравнение Гольдмана-Ходжкина-Катца для потенциала покоя

$$\varphi_m = \frac{RT}{zF} \ln \frac{P_{K^+}[K^+]_o + P_{Na^+}[Na^+]_o + P_{Cl^-}[Cl^-]_i}{P_{K^+}[K^+]_i + P_{Na^+}[Na^+]_i + P_{Cl^-}[Cl^-]_o},$$

где P – проницаемость мембраны для данного типа ионов;

$[ион]_o$ – концентрация иона снаружи клетки,

$[ион]_i$ – концентрация иона внутри клетки;

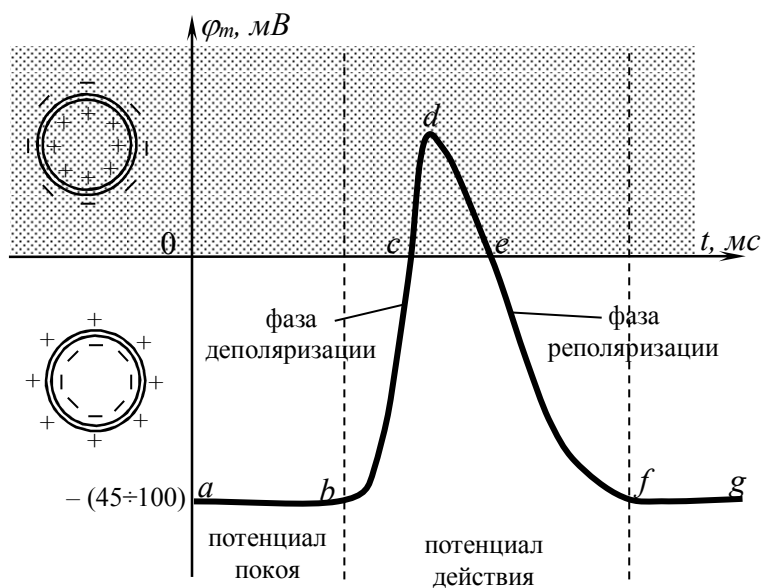
R – универсальная газовая постоянная;

T – абсолютная температура;

z – валентность иона;

F – постоянная Фарадея.

Потенциал действия – изменение мембранного потенциала, происходящее при воздействии на клетку внешнего раздражителя любой природы (механического, химического, теплового, электрического и т.п.), величина которого превышает пороговое значение.



участок ab – потенциал покоя;

участок $bcdef$ – потенциал действия;

участок bcd – фаза деполяризации;

участок def – фаза реполяризации;

На участке cde $\varphi_m > 0$, внутренняя среда клетки заряжена положительно, наружная – отрицательно

участок fg – потенциал покоя

Рис. 16. Потенциал действия

Потенциал действия имеет две фазы:

Фаза деполяризации связана с увеличением мембранного потенциала. При внешнем воздействии на клетку открываются натриевые каналы, в результате чего увеличивается проницаемость мембраны для ионов Na^+ (для аксона кальмара: $P_{K^+} : P_{Na^+} : P_{Cl^-} = 1 : 20 : 0,45$) и происходит диффузия Na^+ внутрь клетки, при этом происходит перезарядка мембраны – внутренняя среда клетки заряжается положительно, наружная – отрицательно ($\varphi_m > 0$).

Фаза реполяризации связана с уменьшением мембранного потенциала. Открываются управляемые калиевые каналы, в результате чего увеличивается проницаемость мембраны для ионов K^+ и происходит диффузия K^+ из клетки, при этом внутренняя среда клетки заряжается отрицательно, наружная – положительно ($\varphi_m > 0$), т.е. восстанавливается потенциал покоя.

Волна возбуждения – распространение потенциала действия по нервному волокну. Эта волна не затухает, т.к. получает энергию из среды – от заряженной мембраны. Волна возбуждения является автоволной в активной среде возбудимых клеток.

7. Биофизические основы применения рентгеновского излучения в медицине

При изучении темы необходимо усвоить:

понятия и определения

рентгеновское излучение

энергия ионизации

мягкое рентгеновское излучение

жесткое рентгеновское излучение

термоэлектронная эмиссия

тормозное рентгеновское излучение

спектр тормозного рентгеновского излучения

поток рентгеновского излучения

граница тормозного рентгеновского излучения

характеристическое рентгеновское излучение

спектр характеристического рентгеновского излучения

свойства и явления

свойства рентгеновского излучения

механизм возникновения тормозного рентгеновского излучения

коротковолновая граница в спектре тормозного рентгеновского излучения

механизм возникновения характеристического рентгеновского излучения

свойства характеристического рентгеновского излучения

первичные процессы, вызываемые рентгеновским излучением в веществе:

- когерентное рассеяние;
- фотоэффект;
- некогерентное рассеяние (Комптон эффект)

формулы

потока рентгеновского излучения

коротковолновой границы в рентгеновском спектре

коэффициента поглощения

законы

закон Мозли

закон ослабления электромагнитного излучения – закон Бугера

графические объекты

шкала электромагнитных волн

спектры тормозного излучения при различных напряжениях в трубке

спектры тормозного излучения при различной силе тока накала катода

спектры тормозного излучения при различных порядковых номерах элементов вещества анода

методы

рентгеноскопия

рентгенография

флюорография

томография

компьютерная томография

рентгенотерапия

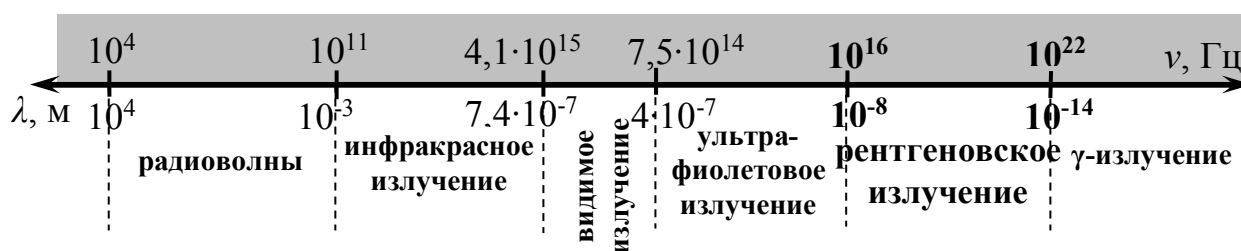
Природа рентгеновского излучения

Рентгеновское излучение открыто немецким ученым В.К. Рентгеном в 1895 году (первый лауреат Нобелевской премии).

Рентгеновское излучение – это электромагнитные волны с длиной волны от 80 нм до 10^{-5} нм или поток фотонов с энергией от 100 эВ до 250 кэВ.

Природа рентгеновского излучения двойственна. Волновая природа была обнаружена М. Лауэ в 1912 году в опытах по дифракции рентгеновского излучения на кристаллах. В явлениях когерентного, некогерентного рассеяния и фотоэффекте проявляет свойства частиц – фотонов.

Шкала электромагнитных волн



Мягкое рентгеновское излучение – это излучение с длиной волны $\lambda > 0,2$ нм

Жесткое рентгеновское излучение – это излучение с длиной волны $\lambda < 0,2$ нм

Свойства рентгеновского излучения:

- 1) вызывает ионизацию атомов и молекул вещества;
- 2) невидимо;
- 3) обладает химическим действием (засвечивает фотоплёнки);
- 4) вызывает рентгенолюминесценцию;
- 5) обладает высокой проникающей способностью.

Устройство рентгеновской трубки

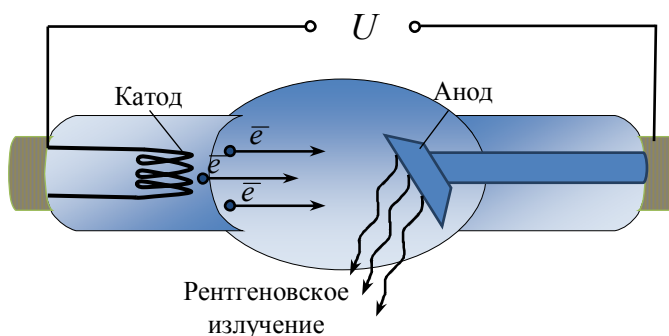


Рис. 17. Устройство рентгеновской трубки

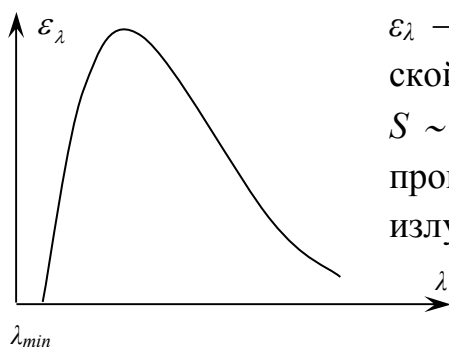
Трубка представляет собой стеклянную колбу (с высоким вакуумом: давление в ней порядка 10^{-6} мм. рт. ст.) с двумя электродами: анодом **А** и катодом **К**, к которым приложено высокое напряжение U (несколько тысяч вольт). Катод является источником электронов (за счет явления термоэлектронной эмиссии). Анод – металлический стержень из хорошо теплопроводящего материала для отвода теплоты, образующейся при его бомбардировке электронами. На скошенном торце анода имеется пластинка (зеркальце) из тугоплавкого металла (например, вольфрама, молибдена и т.п.). Анод охлаждают водой или маслом, или делают его вращающимся. В процессе ускорения-торможения лишь около 1% кинетической энергии электрона идёт на рентгеновское излучение, 99% энергии превращается в тепло.

Тормозное рентгеновское излучение

Электроны, испущенные катодом (в результате термоэлектронной эмиссии) ускоряются электрическим полем между катодом и анодом. Попадая на зеркальце анода, они взаимодействуют с атомами его вещества. При торможении электронов возникает рентгеновское излучение.

Механизм возникновения тормозного рентгеновского излучения объясняет *классическая теория* – теория Максвелла. Движущиеся электроны, как и всякий электрический ток, образуют вокруг себя магнитное поле. Резкое изменение скорости электронов при взаимодействии с веществом анода приводит к изменению магнитного поля, в результате чего и возникают электромагнитные волны.

Особенности спектра тормозного рентгеновского излучения



ε_λ – спектральная плотность энергетической светимости;

$S \sim \Phi$ (площадь под спектральной кривой пропорциональна потоку рентгеновского излучения)

Рис. 18. Спектр тормозного рентгеновского излучения

1) спектр тормозного рентгеновского излучения – *сплошной*.

В результате работы электрического поля кинетическая энергия вылетающих с катода электронов становится равной $E = eU$.

где e – заряд электрона, U – напряжение между катодом и анодом.

При торможении электронов на аноде полученная ими кинетическая энергия переходит в энергию излучаемого фотона ($h\nu$) и тепловую энергию на нагревание анода (Q)

$$eU = h\nu + Q$$

Соотношение между этими слагаемыми случайное, зависит от условий торможения электрона. На анод попадает поток электронов, у каждого из которых различные условия торможения. Поэтому излучаемые фотоны имеют различные значения энергии, частоты и длины волн. Этим объясняется сплошной спектр тормозного излучения.

2) граница спектра тормозного рентгеновского излучения (λ_{min} или ν_{max})

В спектре тормозного рентгеновского излучения имеется четко выраженная коротковолновая граница (λ_{min}), наличие которой объясняется с точки зрения *квантовой физики*.

Из уравнения $eU = h\nu + Q$ при условии, что вся энергия тормозящего электрона (eU) переходит в энергию излучаемого фотона ($h\nu_{max}$) (при этом на нагревание анода энергия не расходуется ($Q=0$))

$$eU = h\nu_{max} = \frac{hc}{\lambda_{min}} \Rightarrow \lambda_{min} = \frac{hc}{eU},$$

где λ_{min} – минимальная длина волны тормозного излучения (коротковолновая граница рентгеновского спектра);

h – постоянная Планка, $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$;

c – скорость света в вакууме, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$;

e – заряд электрона, $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$;

U – напряжение между катодом и анодом

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eU} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot U} = \frac{1,23 \cdot 10^{-6}}{U}; [\lambda_{\min}] = \text{м}$$

$$\text{или } \lambda_{\min} = \frac{1,23}{U}, \text{ где } [U] = \text{кВ}; [\lambda] = \text{нм}$$

т.о. минимальная длина волны тормозного излучения обратно пропорциональна напряжению в трубке.

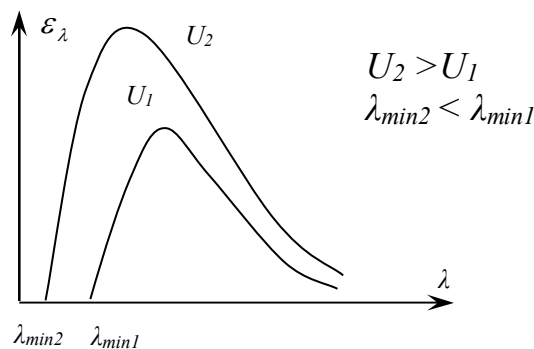
3) поток рентгеновского излучения (Φ)

$$\Phi = k \cdot U^2 \cdot I \cdot Z,$$

где k – коэффициент пропорциональности; U – напряжение между катодом и анодом; I – сила тока в трубке (определяется количеством электронов, летящих от катода к аноду); Z – порядковый номер элемента зеркальца анода.

$$\Phi \approx \int_{\lambda_{\min}}^{\infty} \varepsilon_{\lambda} d\lambda$$

Спектры тормозного рентгеновского излучения при различных напряжениях в трубке



Изменяя напряжение между анодом и катодом можно:

- 1) регулировать жесткость излучения, т.е. изменять проникающую способность излучения;
- 2) изменять поток излучения.

Спектры тормозного рентгеновского излучения при различных значениях силы тока накала катода

При увеличении силы тока накала катода (I_n) увеличивается количество электронов, испускаемых катодом за единицу времени,

увеличивается сила тока в трубке, но жесткость рентгеновского излучения, а значит проникающая способность при этом **не изменяется**.

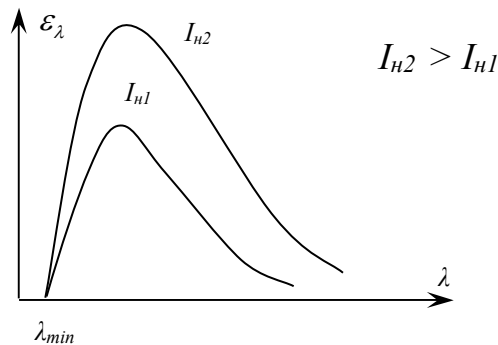
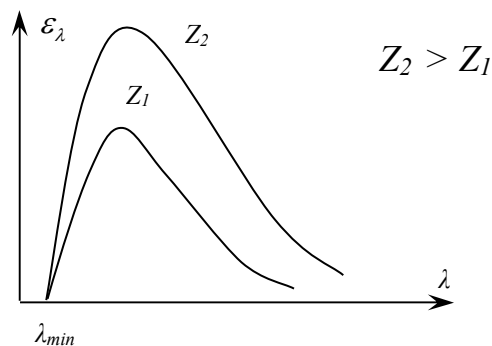


Рис. 19. Спектры тормозного рентгеновского излучения при различных значениях силы тока накала катода

Спектры тормозного рентгеновского излучения при различных порядковых номерах элемента зеркальца анода



При изменении порядкового номера элемента зеркальца анода жесткость рентгеновского излучения (проникающая способность) **не изменяется**.

Характеристическое рентгеновское излучение

Механизм возникновения характеристического рентгеновского излучения

При определенном высоком напряжении в рентгеновской трубке, (зависящем от порядкового номера зеркальца анода) на фоне сплошного спектра появляются отдельные линии, которые соответствуют характеристическому рентгеновскому излучению.

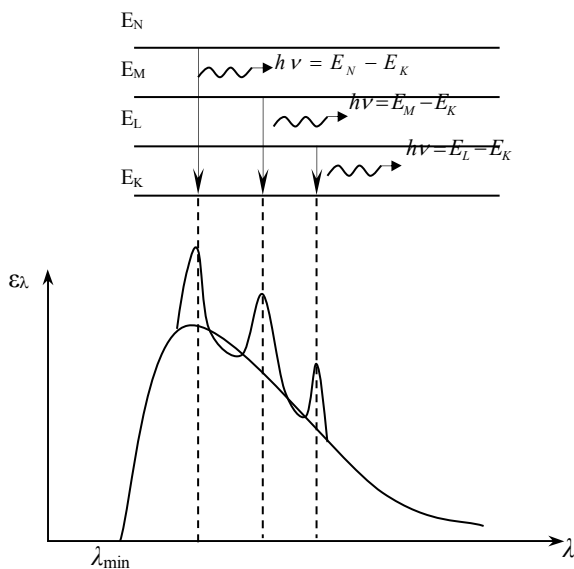
Механизм возникновения и спектр характеристического рентгеновского излучения объясняет *квантовая физика*: при высоком

напряжении энергии ускоренных электронов становится достаточно для выбивания электронов с внутренних оболочек атомов вещества анода. В результате квантовых переходов электронов с верхних уровней на вакантные места образуются фотоны характеристического излучения.

Особенности спектра характеристического рентгеновского излучения

1) спектр характеристического рентгеновского излучения – **линейчатый**, т. к. значения энергий уровней атома дискретны.

2) линии в спектрах объединены в серии (*K*-серия, *L*-серия, *M*-серия и т.д.);



Например, *K*-серия образуется при переходах электронов на уровень с энергией E_K

Рис. 20. Возникновение *K*-серии характеристического рентгеновского излучения

3) характеристические спектры различных атомов однотипны, т.к. внутренние электронные оболочки у разных атомов одинаковы;

4) спектры данного элемента не зависят от химического соединения, в котором он состоит. Например, характеристические спектры кислорода для соединений O_2 ; H_2O ; H_2O_2 и т.д. будут одинаковы;

5) характеристические спектры с увеличением порядкового номера элемента сдвигаются в сторону больших частот:

Закон Мозли – корень квадратный из частоты характеристического излучения есть линейная функция порядкового номера элемента

$$\sqrt{\nu} = a \cdot (Z - b),$$

где ν – частота спектральной линии, Z – порядковый номер испускающего элемента; a, b – постоянные для данной серии линий.

Электроны разных атомов, находящиеся на одних энергетических уровнях, отличаются энергией из-за различного силового воздействия со стороны ядер, которое увеличивается с возрастанием порядкового номера элемента.

Виды взаимодействия рентгеновского излучения с веществом

Ионизация – процесс превращения атома или молекулы в ион в результате удаления электрона.

Энергия ионизации (E_u) (или работа выхода электрона из атома (A_e)) – это энергия, необходимая для удаления электрона за пределы атома или молекулы.

Энергия ионизации тем больше, чем ближе электрон к ядру, т.е. E_u электронов внутренних оболочек больше, чем электронов внешних оболочек.

Энергия фотона рентгеновского излучения – $h\nu$.

Таблица 16. **Виды взаимодействия рентгеновского излучения с веществом**

Название процесса	Условие возникновения	Уравнение процесса	Результат взаимодействия
Когерентное рассеяние	$h\nu < E_u$	$h\nu = h\nu'$ $\nu = \nu'$	Изменяется только направление распространения фотона, при этом частота фотона не меняется
Фотоэффект	$h\nu \geq E_u$	$h\nu = A_e + \frac{m\nu^2}{2}$	Фотон поглощается, при этом • атом возбуждается; • из атома вылетает электрон (ионизация); • электрон получает кинетическую энергию

Название процесса	Условие возникновения	Уравнение процесса	Результат взаимодействия
Некогерентное рассеяние (Комптон-эффект)	$h\nu \gg E_u$	$h\nu = A_e + \frac{m v^2}{2} + h\nu'$ $h\nu > h\nu'$ $\nu' < \nu$	Фотон поглощается, при этом - из атома вылетает электрон (ионизация); - электрон получает кинетическую энергию; - излучается вторичный фотон с меньшей частотой

В результате взаимодействия рентгеновского излучения с веществом происходит ослабление его интенсивности (в соответствии с **законом Бугера**)

$$I = I_0 e^{-(\mu_n + \mu_p) \cdot x},$$

где I_0 – начальная интенсивность излучения;

I – интенсивность излучения на глубине вещества толщиной x ;

μ – коэффициент ослабления излучения;

$$\mu = \mu_p + \mu_n,$$

где μ_p – коэффициент рассеяния (учитывает когерентное рассеяние);

μ_n – коэффициент поглощения (учитывает фотоэффект, Комптон-эффект).

$$\mu_n = k\rho\lambda^3 z^3,$$

где k – коэффициент пропорциональности;

λ – длина волны рентгеновского излучения;

z – порядковый номер элемента или эффективный атомный номер $z_{эф}$ вещества.

$$\mu_{m,n} = \frac{\mu_n}{\rho} = k\lambda^3 z^3,$$

где $\mu_{m,n}$ – массовый коэффициент поглощения.

Рентгеновское излучение в медицине

Рентгенологический метод – это способ изучения строения и функции различных органов и систем, основанный на качественном и количественном анализе интенсивности рентгеновского излучения, прошедшего через тело человека. Методики:

- **рентгеноскопия**
- **рентгенография**
- **флюорография**
- **компьютерная томография (КТ)**

Рентгеновская диагностическая система состоит из рентгеновского излучателя (трубки), объекта исследования (пациента), приемника рентгеновского излучения и врача-рентгенолога.

Принцип рентгенодиагностики заключается в визуализации органов с помощью направленного на объект исследования рентгеновского излучения, обладающего высокой проникающей способностью, с последующей регистрацией его после выхода из объекта каким-либо приемником рентгеновских лучей.

Технологии получения рентгеновского изображения в настоящее время существуют в трех вариантах:

- **аналоговые рентгеновские изображения** на флюоресцентном экране и на фотоэмульсионном слое прозрачных материалов (фотопластинке, фотоплёнке);
- **цифровые рентгеновские изображения** на матрицах фотосенсоров.

Рентгенодиагностика – методы получения изображений внутренних органов с использованием рентгеновских лучей.

Физической основой этих методов является закон ослабления рентгеновского излучения в веществе. Однородный по сечению поток рентгеновского излучения после прохождения *неоднородной ткани* станет неоднородным. Эта неоднородность может быть зафиксирована на фотоплёнке,

флуоресцирующем экране или с помощью матричного фотоприемника. Например, массовые коэффициенты ослабления костной ткани – $Ca_3(PO_4)_2$ – и мягких тканей – в основном H_2O – различаются в 68 раз ($\mu_m \text{ кости} / \mu_m \text{ воды} = 68$). Плотность кости также выше плотности мягких тканей. Поэтому на рентгеновском снимке получается светлое изображение кости на более темном фоне мягких тканей.

Если исследуемый орган и окружающие его ткани имеют близкие коэффициенты ослабления, то применяют специальные *контрастные вещества*. Так, например, при рентгеноскопии желудка обследуемый принимает кашеобразную массу сульфата бария ($BaSO_4$), у которого массовый коэффициент ослабления в 354 раза больше, чем у мягких тканей.

Рентгенотерапия – использование рентгеновского излучения в лечебных целях (например, для уничтожения злокачественных образований, лечения некоторых патологий суставов).

8. Биофизические основы использования радиоактивного излучения в медицине

При изучении темы необходимо усвоить:

понятия и определения

атом

размеры атома, ядра атома

атомный номер

массовое число

нуклоны

атомная единица массы

протон

нейтрон

электрон

изотопы

изобары

энергия связи атомных ядер

удельная энергия связи

дефект массы

радиоактивность

период полураспада

активность

ядерные силы

виды радиоактивного излучения:

α -излучение

β -излучение

γ -излучение

свойства и явления

свойства ядерных сил

свойства радиоактивного излучения

свойства радиоактивного распада

формулы

энергии связи атомных ядер

удельной энергии связи

зависимости числа нераспавшихся ядер от времени

законы и правила

правило Содди для:

α -распада

β -электронного распада

β -позитронного распада

электронного захвата (e- или k-захват)

спонтанного деления

закон радиоактивного распада

графические объекты

график числа нераспавшихся ядер от времени

график числа распавшихся ядер от времени

Структурные элементы и характеристики атома

Атом – мельчайшая частица химического элемента, сохраняющая его свойства.

Атом состоит из положительно заряженного ядра и отрицательно заряженной оболочки, образованной электронами.

Размеры атома $R_a \sim 10^{-10}$ м; **размеры ядра атома** $R_y \sim 10^{-15}$ м

Нуклоны – составные части ядра атома – протоны и нейтроны (модель ядра атома Д.Д. Иваненко и В. Гейзенберга; 1932 г.)

Атомная единица массы (а.е.м.) – 1/12 массы атома изотопа углерода $^{12}_6\text{C}$; 1 а.е.м. = $1,66 \cdot 10^{-27}$ кг.

Обозначение ядра атома $^A_Z X$, например: $^{27}_{13}\text{Al}$,

где A – массовое число; Z – зарядовое число.

Таблица 17. Структурные элементы атома и их характеристики

	Атом электрически нейтрален		
	Атомное ядро положительно заряжено		Атомная оболочка отрицательно заряжена
	Заряд ядра равен $+eZ$		Суммарный заряд электронов в атоме равен $-eZ$
	нуклоны		электроны
Название частиц	протоны	нейтроны	
Обозначение	^1_+p	1_0n	$^0_{-1}e$ или $^0_{-1}\beta$
Заряд q	$+1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл	0	$-1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Масса покоя m_0	$m_p = 1,672 \cdot 10^{-27}$ кг или $m_p = 1,007595$ а.е.м. ≈ 1 а.е.м.	$m_n = 1,675 \cdot 10^{-27}$ кг или $m_n = 1,008982$ а.е.м. ≈ 1 а.е.м.	$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг т.к. $m_e \ll 1$ а.е.м, принято в обозначении электрона указывать ноль
	т.к. $m_p \gg m_e$ и $m_n \gg m_e$, то почти вся масса атома сосредоточена в ядре		

Изотопы – химические элементы, у которых одинаковое зарядовое число Z , но различные массовые числа A .

Например, изотопы водорода: ^1_1H ; ^2_1H ; ^3_1H ; изотопа урана: $^{238}_{92}\text{U}$; $^{239}_{92}\text{U}$; $^{235}_{92}\text{U}$

Изобары – ядра атомов, у которых одинаковые A , но различные Z .

Например, ${}^{40}_{18}\text{Ar}$; ${}^{40}_{19}\text{K}$; ${}^{40}_{20}\text{Ca}$

Таблица 18. Основные характеристики ядра

Название, характеристики	Обозначение	Определение	Формула для нахождения
Атомный номер	Z	Номер химического элемента в периодической системе элементов. Равен числу протонов в ядре, числу электронов в электронной оболочке	
Массовое число	A	Число нуклонов в ядре	$A = Z + N$, где N – число нейтронов в ядре
Энергия связи ядра	$E_{св}$	Это энергия, которая выделяется при образовании ядра из свободных нуклонов, или энергия, которую необходимо затратить, чтобы разделить ядро на свободные нуклоны	$E_{св} = \Delta m \cdot c^2$
Дефект массы	Δm	Разность между суммарной массой покоя нуклонов и массой покоя ядра	$\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - M_{я}$
Удельная энергия связи	$\varepsilon_{св}$	Средняя энергия связи, приходящаяся на один нуклон	$\varepsilon_{св} = \frac{E_{св}}{A}$

Энергия связи атомных ядер

Установлено, что масса покоя ядра всегда меньше суммы масс покоя составляющих его протонов и нейтронов

$$M_{я} < Z \cdot m_p + N \cdot m_n$$

Энергия связи ядра – физическая величина, численно равная энергии, которая выделяется при образовании ядра из свободных нуклонов или энергии, которую необходимо затратить, чтобы разделить ядро на свободные нуклоны.

$$E_{св} = \Delta m c^2 = [(Z \cdot m_p + N \cdot m_n) - M_{я}] \cdot c^2,$$

где c – скорость света в вакууме; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с; Δm – дефект массы.

Таблица 19. **Вычисление энергии связи ядра**

в СИ	во внесистемных единицах
$E_{св} = \Delta m \cdot c^2$	$E_{св} = 931,5 \cdot \Delta m$
$[\Delta m] = \text{кг}$	$[\Delta m] = \text{a.е.м.}$
$[E] = \text{Дж}$	$[E] = \text{МэВ}$

Дефект массы – величина, равная разности массы покоя свободных нуклонов и массы покоя ядра

$$\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - M_{\text{я}}$$

Удельная энергия связи – средняя энергия связи, приходящаяся на один нуклон ядра или средняя энергия необходимая для удаления нуклона

$$\text{из ядра } \varepsilon_{св} = \frac{E_{св}}{A}, [\varepsilon_{св}] = \text{МэВ/нуклон}$$

Удельная энергия связи характеризует устойчивость ядер (способность ядер сохранять свой состав неизменным): чем больше удельная энергия связи, тем устойчивее ядро.

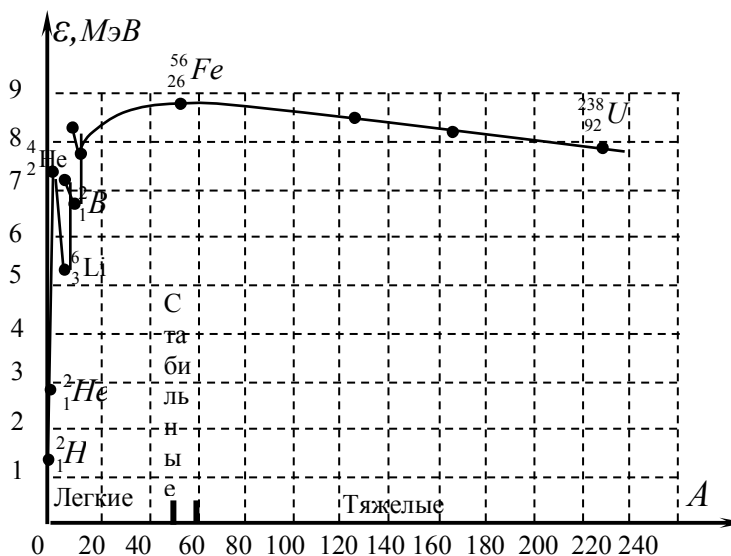


Рис. 21. **Зависимость удельной энергии связи от массового числа**

Наиболее устойчивыми являются ядра с массовыми числами 50 – 60. Тяжелые и легкие ядра менее устойчивы. Энергетически выгодны процессы, при которых удельная энергия связи увеличивается, а именно слияние легких ядер (реакция синтеза ядер) или распад (деление) тяжелых ядер.

Ядерные силы

Ядерные силы – силы взаимодействия нуклонов в ядре.

Основные свойства ядерных сил:

- 1) являются короткодействующими – действуют в пределах ядра;
- 2) относятся к сильному взаимодействию (превосходят все силы в природе);
- 3) зарядовая независимость – величина сил не зависит от наличия или отсутствия заряда нуклонов;
- 4) насыщения – каждый нуклон взаимодействует только с ограниченным числом соседних нуклонов.

Радиоактивность

Явление радиоактивности открыто французским ученым А. Беккерелем в 1896 г.

Радиоактивность – свойство атомных ядер самопроизвольно (спонтанно) превращаться в ядра других элементов с испусканием радиоактивного излучения (элементарных частиц и γ - квантов). Само явление (превращение) называется *радиоактивным распадом*.

Самопроизвольность распада означает, что процесс происходит вне зависимости от внешних условий – температуры, давления, освещенности, а также происходит ли в веществе, состоящем из химически чистого элемента или в химическом соединении этого элемента, т.к. радиоактивность – свойство ядер.

Распад данного ядра – событие случайное, имеющее определенную вероятность.

Естественная радиоактивность – радиоактивность, наблюдаемая у ядер, встречающихся в природных условиях.

Искусственная радиоактивность – радиоактивность изотопов, полученных в лабораторных условиях.

Им присущи общие закономерности.

Виды радиоактивного излучения

К *радиоактивному излучению* относят три вида излучения: α , β , γ .

α -излучение – это поток α -частиц; α -частица – это ядро атома гелия;
 ${}^4_2\alpha$ или ${}^4_2\text{He}$.

β -излучение – это поток электронов (${}^0_{-1}\beta$ или ${}^0_{-1}e$) или позитронов (${}^0_{+1}\beta$ или ${}^0_{+1}e$).

γ -излучение – это электромагнитные волны с очень малой длиной волны (поток фотонов с очень большой энергией).

Свойства радиоактивного излучения:

- 1) вызывает ионизацию атомов и молекул вещества;
- 2) невидимо;
- 3) можно обнаружить:
 - а) по химическому действию (вызывает почернение фотопленок);
 - б) возбуждает люминесценцию некоторых веществ (радиолюминесценция);
- 4) обладает проникающей способностью;
- 5) α , β -излучения отклоняются в электрическом и магнитном поле, γ -излучение не отклоняется.

Таблица 20. Основные типы радиоактивности

Тип радиоактивности	Реакция внутриядерных превращений	Уравнение распада (согласно правилу Содди сохраняются сум- марные массовые числа и заряды)	Пример	Спектр излучения*
α-распад характерен для тяжелых ядер $A > 200$	$2_1^1p + 2_0^1n \rightarrow 2_2^4\alpha$	${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}Y + {}_2^4\alpha$ где X – материнское ядро, Y – дочернее ядро	${}_{88}^{236}\text{Ra} \rightarrow {}_{86}^{232}\text{Rn} + {}_2^4\alpha$	линейчатый
β-электронный распад для ядер с $N > Z$	${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + ({}_0^0e + {}_0^0\bar{\nu})$ (в скобках частицы, вылетающие из ядра)	${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AY + {}_0^0e + \bar{\nu}$ где $\bar{\nu}$ – антинейтрино	${}_{6}^{14}\text{C} \rightarrow {}_{7}^{14}\text{N} + {}_0^0e + \bar{\nu}$	сплошной
β-позитронный распад для ядер с $N < Z$	${}_1^1p \rightarrow {}_0^1n + ({}_0^0e + \nu)$	${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-1}^AY + {}_0^0e + \nu$ где ν – нейтрино	${}_{7}^{13}\text{N} \rightarrow {}_{6}^{13}\text{C} + {}_0^0e + \nu$	
Электронный захват один электрон с ближайшей к ядру электронной оболочки за- хватывается ядром атома	${}_1^1p + {}_{-1}^0e \rightarrow {}_0^1n + (\nu)$	${}_Z^AX + {}_{-1}^0e \rightarrow {}_{Z-1}^AY + \nu$	${}_4^7\text{Be} + {}_{-1}^0e \rightarrow {}_3^7\text{Li} + \nu$	линейчатый
Спонтанное деление – деле- ние ядра на 2 осколка пример- но равных масс и зарядов		${}_Z^AX \rightarrow 2 \cdot {}_{Z/2}^{A/2}Y$		линейчатый

* **Линейчатость спектров** α -излучения, электронного захвата и спонтанного деления ядра объясняется тем, что энергия нуклонов в ядре может принимать, аналогично энергии атома, только дискретные значения.

Сплошной спектр β -излучения обусловлен тем, что из ядер вылетают одновременно две частицы: электрон и антинейтрино или позитрон и нейтрино, энергия между которыми распределяется случайным образом.

Линейчатый спектр γ -излучения объясняется дискретностью значений энергии атомных ядер. Если дочернее ядро находится в возбужденном состоянии, то при переходе в основное состояние оно испускает кванты электромагнитного излучения в γ -диапазоне.

Основной закон радиоактивного распада

Основной закон радиоактивного распада – за одинаковые промежутки времени распадается одинаковая доля от числа радиоактивных ядер, имеющих в наличии на данный момент времени.

Число N нераспавшихся ядер с течением времени t убывает по закону

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

где N_0 – наличное число радиоактивных ядер в момент времени $t = 0$, (начальное число радиоактивных ядер); λ – постоянная распада.

Характеристики радиоактивного распада

Постоянная распада (λ) – характеристика радиоактивного химического элемента, которая численно равна доле $\frac{dN}{N}$ наличных ядер, распадающихся за единицу времени.

$$\lambda = \frac{\left(\frac{dN}{N} \right)}{dt}$$

Она характеризует вероятность распада; зависит от вида атомного ядра.

Период полураспада ($T_{1/2}$) – время, в течение которого распадается половина от наличного числа радиоактивных ядер.

Связь периода полураспада и постоянной распада $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$

Активность (A) – число распадов ядер за единицу времени;

$$A = \frac{dN}{dt}; \quad [A] = \frac{\text{расп}}{с} = с^{-1} = \text{Бк (Беккерель)}$$

Внесистемные единицы измерения активности

$$1 \text{ Ки (Кюри)} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$$

1 Ки приблизительно равен радиоактивности 1 г изотопа ^{226}Ra .

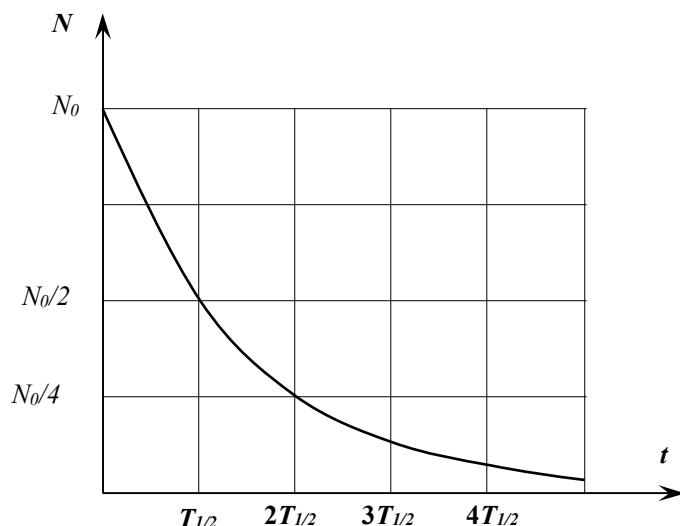
С течением времени активность радиоактивного элемента уменьшается по экспоненциальному закону $A = A_0 e^{-\lambda t}$

Связь активности с периодом полураспада $A = \frac{\ln 2 \cdot N}{T_{1/2}}$

Связь активности с постоянной распада $A = \lambda \cdot N$,

где N – число нераспавшихся ядер.

График числа нераспавшихся ядер от времени



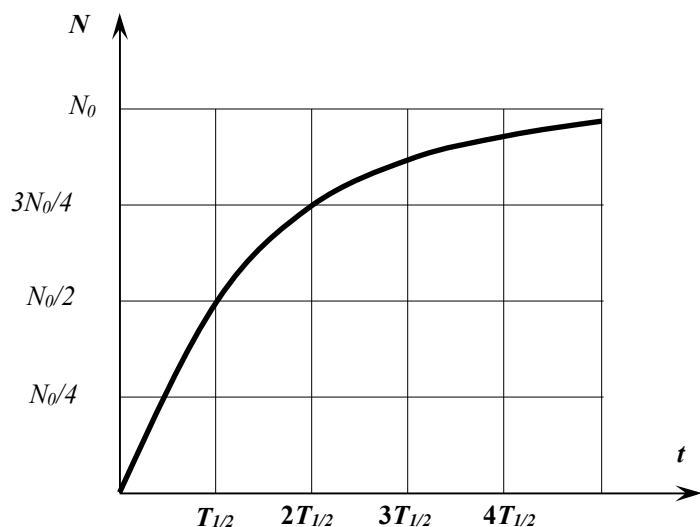
при $t = 0$ $N = N_0$

при $t \rightarrow \infty$ $N \rightarrow 0$

Рис. 22. График числа нераспавшихся ядер от времени

График числа распавшихся ядер от времени

$$N_{расч} = N_0 - N$$



при $t = 0$ $N_{расч} = 0$

при $t \rightarrow \infty$ $N_{расч} \rightarrow N_0$

Рис. 23. График числа распавшихся ядер от времени

Таблица 21. Применение радиоактивных изотопов в медицине

Название метода	Суть метода	Изотоп	Вид излучения	Область применения
Диагностика				
Метод меченых атомов	Радиоактивные изотопы вводят в организм и определяют их местоположение и активность	$^{125}_{53}\text{I}$ или $^{131}_{53}\text{I}$	β^- , γ	Заболевания щитовидной железы
		$^{24}_{11}\text{Na}$	β^- , γ	Параметры крови: скорость кровотока, общее количество крови
		$^{32}_{15}\text{P}$	β^-	Диагностика раковых опухолей, расположенных вблизи от поверхности тела или в легко доступных тканях (гортань, пищевод и др.)
		$^{198}_{79}\text{Au}$	β^- , γ	Диагностика внутренних органов
		$^{15}_8\text{O}$	β^+	Окислительные процессы
		$^{14}_6\text{C}$	β^-	Обмен веществ

Терапия				
<i>γ-терапия</i>	Воздействие на область организма γ-излучением, создаваемым γ-пушкой	$^{60}_{27}\text{Co}$	β^{-}, γ	Разрушение раковых опухолей
<i>β-терапия</i>	Радиоактивные изотопы вводят в организм, где они концентрируются в определенных органах и, распадаясь, действуют своим излучением на близлежащие ткани	$^{131}_{53}\text{I}$	$\underline{\beta^{-}}, \gamma$	Лечение болезней щитовидной железы
		$^{32}_{15}\text{P}$	β^{-}	Восстановление кроветворной функции костного мозга трубчатых костей
<i>α-терапия</i>	Воздействие α-частицами - при контакте с организмом (ванны) - при введении внутрь ▪ ингаляция ▪ питье	$^{222}_{86}\text{Rn}$	α	Лечение: кожных заболеваний ▪ органов дыхания ▪ органов пищеварения

9. Биофизические основы воздействия ионизирующих излучений на организм

При изучении темы необходимо усвоить:

понятия и определения

ионизация
ионизирующее излучение
энергия ионизации
условие ионизации атома
линейная плотность ионизации
линейная тормозная способность
пробег
средний линейный пробег
проникающая способность ионизирующего излучения
реакция аннигиляции электронно-позитронной пары
реакция образования электронно-позитронной пары
дозиметрия
экспозиционная доза
поглощенная доза
эквивалентная биологическая доза
мощности экспозиционной, поглощенной, эквивалентной биологической доз
переходной коэффициент
коэффициент качества

свойства и явления

свойства ионизирующего излучения
первичные процессы, вызываемые ионизирующим излучением
виды ионизирующего излучения:
 электромагнитные волны;
 потоки частиц

формулы

линейной плотности ионизации
линейной тормозной способности
реакции аннигиляции электронно-позитронной пары
реакции образования электронно-позитронной пары
экспозиционной дозы
поглощенной дозы
эквивалентной биологической дозы
мощности экспозиционной, поглощенной эквивалентной биологической доз
связь между экспозиционной, поглощенной и эквивалентной биологической дозами

законы

закон ослабления гамма (рентгеновского) излучения – закон Бугера

приборы

дозиметр
счетчики: сцинтилляционный, Черенковский, ионизационная камера, газоразрядный (пропорциональный, Гейгера-Мюллера)
трековые детекторы: камера Вильсона, диффузионная камера, пузырьковая камера, ядерные фотоэмульсии, искровая камера

Ионизирующее излучение

Ионизация – процесс превращения атомов в ионы.

Условие ионизации атома $E_{ин} \geq E_{и}$ (энергия ионизирующего излучения ($E_{ин}$) должна быть не меньше энергии ионизации атома или молекулы).

Энергия ионизации ($E_{и}$) или **работа выхода** электрона из атома (A_{ϕ}) – это энергия, необходимая для удаления электрона за пределы атома или молекулы.

Энергия ионизации тем больше, чем ближе электрон к ядру и чем больше заряд ядра атома.

Ионизирующее излучение – излучение, которое, проходя через вещество, вызывает ионизацию его атомов и молекул.

Источниками ионизирующего излучения могут быть природные и искусственные радиоактивные вещества, различного рода ядерно-технические установки, медицинские препараты, многочисленные контрольно-измерительные устройства, рентгеновские аппараты, космические лучи и т.д.

К ионизирующему излучению относят

- электромагнитные волны: коротковолновое ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма- излучения, а также лазерное (высокоинтенсивное видимое) излучение;

- частицы: α -излучение, β -излучение, потоки протонов, нейтронов, позитронов и т.д.

Свойства ионизирующего излучения:

- 1) вызывает ионизацию атомов и молекул вещества;
- 2) невидимо;
- 3) обладает химическим действием (засвечивает фотоплёнки);
- 4) вызывает люминесценцию вещества;
- 5) обладает проникающей способностью.

Характер взаимодействия ионизирующего излучения с веществом зависит как от свойств излучения (вида излучения, заряда частицы, массы, скорости, энергии), так и от свойств вещества (энергии ионизации, плотности и т.п.).

Характеристики взаимодействия ионизирующего излучения с веществом

Линейная плотность ионизации (ЛПИ) (i) – физическая величина, равная числу пар ионов, образованных ионизирующим излучением на единице длины пути в веществе

$$i = \frac{dn}{dl}; [i] = \frac{\text{число пар ионов}}{\text{см}}$$

Линейная тормозная способность или линейная передача энергии (ЛПЭ) (S) – физическая величина, равная энергии, которую теряет ионизирующее излучение при прохождении единицы длины пути в веществе

$$S = \frac{dE}{dl}; [S] = \frac{\text{эВ}}{\text{см}}$$

Пробег – максимальное расстояние, на которое ионизирующее излучение проникает в вещество.

Средний линейный пробег – среднее расстояние, на которое ионизирующее излучение проникает в вещество.

Пояснения к таблице 22.

Реакция аннигиляции электронно-позитронной пары

${}^0_{-1}e + {}^0_{+1}e \rightarrow 2\gamma$, где ${}^0_{-1}e$ – электрон; ${}^0_{+1}e$ – позитрон; γ – гамма-квант.

Реакция образования электронно-позитронной пары $2\gamma \rightarrow {}^0_{-1}e + {}^0_{+1}e$

Таблица 22. Основные характеристики ионизирующего излучения

Тип ионизирующего излучения	Энергия частиц (МэВ)	Первичные процессы, вызываемые ионизирующим излучением	Основные характеристики ионизирующего излучения			Защита от внешнего ионизирующего излучения
			Линейная плотность ионизации в воздухе	Пробег в воздухе	Пробег в тканях организма	
α-излучение (альфа частица – ${}^4_2\alpha$ – ядро атома гелия)	4-9	- возбуждение атомов и молекул вещества; - ионизация; - ядерные реакции; - упругое рассеяние	10^4 <i>пар ионов</i> <i>см</i>	2 – 8,5 см	около 0,01 мм	тонкий слой вещества (одежда); роговой слой кожи
β-излучение (электроны ${}^0_{-1}e$ или позитроны ${}^0_{+1}e$)	1-2	- возбуждение атомов и молекул вещества; - ионизация; - тормозное рентгеновское излучение; - аннигиляция пары электрон-позитрон: ${}^0_{-1}e + {}^0_{+1}e \rightarrow 2\gamma$; - упругое рассеяние	$\sim 10^2$ <i>пар ионов</i> <i>см</i>	несколько метров	до 15 мм	слой стекла, дерева – 1-2 см, алюминий – 2 мм; излучение с энергией от 0,1 до 2 МэВ поглощается в покровных тканях и опасно для кожи; с энергией больше 2 МэВ влияет на хрусталик глаза
γ-излучение (электромагнитная волна)	0,01-5	- ионизация: а) фотоэффект; б) Комптон-эффект - образование пары электрон-позитрон: $2\gamma \rightarrow {}^0_{-1}e + {}^0_{+1}e$; - ядерный фотоэффект	~ 10 <i>пар ионов</i> <i>см</i>	100-1000 м	насквозь	толстый слой воды или 10 см свинца

Таблица 23. Количественная оценка действия ионизирующего излучения (и. и.). Дозиметрия

Название дозы	Обозначение	Определение	Формула	Единицы измерения		Связь между дозами
				СИ	внесистемные	
Экспозиционная доза (количественная характеристика и. и.)	X	Суммарный заряд ионов одного знака, образующийся при ионизации 1 кг сухого воздуха при нормальных условиях	$X = \frac{q}{m}$	$[X] = \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$	$1 \text{ Рентген} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$	
Мощность экспозиционной дозы	$\dot{X}$	Суммарный заряд ионов одного знака образуемый при ионизации 1 кг сухого воздуха за 1 сек	$\dot{X} = \frac{X}{t} = \frac{q}{m \cdot t}$	$[\dot{X}] = \frac{\text{Кл}}{\text{кг} \cdot \text{с}}$	$\frac{\text{Р}}{\text{с}}$	
Поглощенная доза (результат взаимодействия и.и. с веществом)	D	Энергия излучения, поглощенная единицей массы вещества за все время излучения	$D = \frac{W}{m}$	$[D] = \text{Гр} (\text{Грей})$	$1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Гр}$	$D = f \cdot X$ f – переходный коэффициент; зависит от атомного номера элемента и энергии фотона (приводится для внесистемных единиц)
Мощность поглощенной дозы	$\dot{D}$	Энергия излучения, поглощенная единицей массы вещества за единицу времени излучения	$\dot{D} = \frac{D}{t} = \frac{W}{m \cdot t}$	$[\dot{D}] = \frac{\text{Гр}}{\text{с}}$	$\frac{\text{рад}}{\text{с}}$	
Эквивалентная биологическая доза	H	Энергия излучения, поглощенная единицей массы живого биологического объекта за все время излучения	$H = k D$	$[H] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} = 3\text{в}$ (Зиверт)	$1 \text{ бэр} = 10^{-2} 3\text{в}$ бэр (биологический эквивалент рада)	$H = k \cdot D = k \cdot f \cdot X$ k – коэффициент качества, безразмерная величина, учитывает биологическую эффективность отдельных видов излучений
Мощность эквивалентной биологической дозы	$\dot{H}$	Энергия излучения, поглощенная единицей массы живого биологического объекта за единицу времени излучения	$\dot{H} = k \dot{D}$	$[\dot{H}] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{с}} = \frac{3\text{в}}{\text{с}}$	$\frac{\text{бэр}}{\text{с}}$	$\dot{H} = k \dot{D} = k f \dot{X}$

Устройство дозиметра

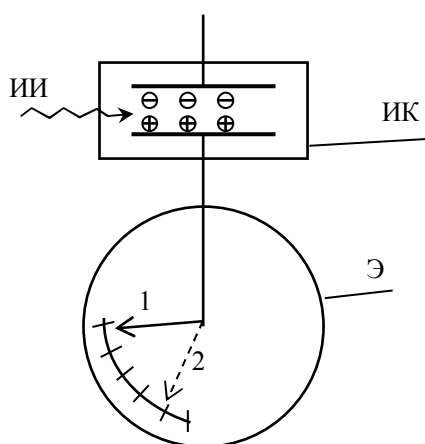


Рис. 24. Устройство дозиметра

Дозиметр – прибор для измерения экспозиционной дозы рентгеновского или γ -излучения. Ионизационная камера (ИК) – закрытый сосуд объемом V , заполненный чистым сухим воздухом под атмосферным давлением. В нее помещены два электрода, один из которых соединен с электрометром (Э) (прибор, измеряющий электрический потенциал φ). Предварительно электрометр емкостью C заряжают до q_1 (положению стрелки 1 соответствует потенциал φ_1).

При облучении воздуха камеры ионизирующим излучением (ИИ), образовавшиеся в результате ионизации заряды притягиваются к электроду электрометра и частично нейтрализуют его заряд до величины q_2 (положению стрелки 2 соответствует потенциал φ_2). Поскольку известен объем камеры, а, значит, и масса воздуха внутри нее, то экспозиционная доза определяется как

$$X = \frac{q_1 - q_2}{m} = \frac{C\varphi_1 - C\varphi_2}{m} = \frac{C}{m} \cdot \Delta\varphi = k\Delta\varphi.$$

Таблица 24. Детекторы ионизирующего излучения

Тип	Назначение	Название	Принцип работы
1. Счетчики	Регистрация частиц и измерение их энергии	1. Сцинтилляционный	Вспышка света при попадании быстрых частиц на флуоресцирующий экран – сцинтилляция
		2. Черенковский	Вспышка света при движении заряженной частицы со скоростью, большей скорости света в данной среде $v > \frac{c}{n}$
		3. Ионизационная камера	Ионы, возникающие в газе при прохождении заряженной частицы, собираются на обкладках конденсатора, к которым подведено постоянное напряжение
		4. Газоразрядный а) пропорциональный б) Гейгера-Мюллера	Явление электрического разряда в газах а) несамостоятельный (гаснет при прекращении действия внешнего ионизатора) б) самостоятельный (поддерживается после прекращения действия внешнего ионизатора)
2. Трековые детекторы	Наблюдение траекторий частиц, измерение скорости, энергии, массы, заряда частиц	1. Камера Вильсона	Пересыщенные пары (полученные при адиабатическом расширении газа) конденсируются на ионах, возникших при прохождении частицы
		2. Диффузионная камера	Пересыщенные пары (полученные диффузией паров спирта от нагретой крышки (10°C) ко дну, охлаждаемому углекислотой (-60°C)) конденсируются на ионах, возникших при прохождении частицы
		3. Пузырьковая камера	Перегретая (находящаяся под давлением) жидкость (жидкие водород, пропан, ксенон) при прохождении частицы вскипает и на ионах образуются пузырьки пара.
		4. Ядерные фотоэмульсии	Расщепление молекул бромистого серебра движущейся заряженной частицей приводит к появлению центров скрытого изображения
		5. Искровая камера	Искровой разряд в газах

Литература

1. Антонов, В.Ф. Физика и биофизика. Курс лекций для студентов медицинских вузов: 2-е изд., испр. и доп. / В.Ф. Антонов, А.В. Коржуев. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2006. – 240 с.
2. Белановский, А.С. Основы биофизики в ветеринарии: учеб. пособие для вузов: 4-е изд., перераб. и доп. / А.С. Белановский – М.: Дрофа, 2007. – 332 с.
3. Ремизов, А.Н. Медицинская и биологическая физика: учеб. для вузов / А.Н. Ремизов, А.Г. Максина, А.Я. Потапенко. – 9-е изд. – М.: Дрофа, 2009. – 560 с.
4. Ремизов, А.Н. Медицинская и биологическая физика: учеб. для вузов / А.Н. Ремизов. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2013. – 648 с.
5. ФГОС ВО «Лечебное дело», «Педиатрия», «Стоматология», 2013.
6. Федорова, В.Н. Медицинская и биологическая физика. Курс лекций с задачами: учеб. пособие / В.Н. Федорова, Е.В. Фаустов. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2008. — 592 с.
7. Физика и биофизика: учебник / Под ред. В.Ф. Антонова. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2008. – 480 с.
8. Физика с элементами биофизики [Электронный ресурс]: учебник / Е.Д. Эйдельман. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2013.

Учебное издание

Ворсина Екатерина Викторовна

Снигирева Татьяна Александровна

Станкевич Татьяна Геннадьевна

Рябчикова Марина Сергеевна

Булатова Елена Галавтеевна

Пенкин Николай Павлович

Баранова Любовь Владимировна

УЧЕБНЫЙ ТЕЗАУРУС КУРСА МЕДИЦИНСКОЙ
И БИОЛОГИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

Учебное пособие

Часть II

Компьютерный набор Т.А. Снигирева, Е.В. Ворсина,

М.С. Рябчикова

Подписано в печать 16.12.16. Формат 60х84/8

Гарнитура «Times New Roman» Усл. печ. л. 11,6 Тираж 200 экз.

Отпечатано в МУП г. Сарапула «Сарапульская типография»

427960, г. Сарапул, ул. Раскольников, 152.