

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

А. А. Кузнецов

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ БИОМЕДИЦИНСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Учебное пособие



Владимир 2019

УДК 611/612:53
ББК 53.6
К89

Рецензенты:

Доктор медицинских наук, профессор
зав. кафедрой нормальной физиологии
Южно-Уральского государственного медицинского университета
С. Л. Сашенков

Доктор физико-математических наук
профессор кафедры инфокоммуникационных технологий
Южно-Уральского государственного университета (г. Челябинск)
В. И. Тамбовцев

Доктор технических наук, профессор
зав. кафедрой биомедицинских и электронных средств и технологий
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
Л. Т. Сушкова

Издается по решению редакционно-издательского совета ВлГУ

Кузнецов, А. А.

К89 Физические основы биомедицинских технологий : учеб. пособие / А. А. Кузнецов ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2019. – 128 с. – ISBN 978-5-9984-1036-9.

Содержит теоретические и прикладные вопросы курсов «Биофизические основы живых систем», «Биофизика ионизирующих излучений» и «Биофизика неионизирующих излучений», а также практический и расчетно-графический материал для самостоятельного обучения студентов.

Предназначено для студентов очной формы обучения по направлению подготовки 12.03.04 – Биотехнические системы и технологии и профилю подготовки «Биомедицинская инженерия».

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Табл. 2. Ил. 23. Библиогр.: 13 назв.

УДК 611/612:53
ББК 53.6

ISBN 978-5-9984-1036-9

©ВлГУ, 2019

Предисловие

Понятие «медицинские технологии» может трактоваться как искусство или умение (через искусство) врачевания людей по определенным сложившимся (стандартным) приемам и алгоритмам, основанным на заданных природой физиологических правилах и закономерностях, подмеченных, накопленных и систематизированных к применению врачевателями от Гиппократ, Галена и Ибн-Сины до Везалия, Гарвея, Парацельса, Паре, Сиденхема и Пирогова. Термин «биомедицинские технологии», вероятно, обретает расширительное толкование объекта применения, включая, с одной стороны, все живые системы, а с другой – задавая процедурный исследовательский характер в части методик и техник измерения. С развитием анатомического и экспериментального методов объективного исследования людей расширялась база естествознания (биологии, физики, химии, математики) с ростом числа и качества биомедицинских технологий, которые и обусловили становление современной научной медицины.

Учебное пособие «Физические основы биомедицинских технологий» полностью соответствует требованиям государственного образовательного стандарта, создано на основе конспектов лекций автора и апробировано на лекционных и практических занятиях группы бакалавриата «Биотехнические системы и технологии» (2017 г.) по направлению обучения «Биомедицинская инженерия».

По содержанию пособие имеет блоковую структуру по тематическим разделам. Каждый блок содержит теоретическую часть в форме лекции (лекций), основные термины, определения, расчетные формулы и графический материал в помощь для решения практических задач, примеры решения типовых задач и собственно условия задач с ответами для практических занятий. В отдельный раздел (№ 6) вынесена расчетно-графическая работа с таблицей вариантов и условиями задач по каждой из пройденных тем (см. Введение). Таким образом, учебное пособие не претендует на полноту охвата вопросов, но содержит полную минимально необходимую информацию по указанному учебному курсу.

ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие предназначено для проведения лекционных и практических занятий, а также самостоятельного обучения студентов. Представлено десять лекционных тем, каждая из которых содержит основные термины и определения, примеры решений типовых задач и набор тематических задач для решения на практических занятиях.

Самостоятельное обучение в форме расчетно-графических работ (РГР) выполняется студентами во внеучебное время. Курс лекций, основные формулы и определения, примеры решения задач и задачи, решенные на практических занятиях, – основная учебная база при выполнении РГР.

Требования к выбору, оформлению и защите РГР:

1. За время изучения курса студент должен представить расчетно-графическую работу (РГР).

2. Номера задач РГР определяются по таблице вариантов. Вариант определяется по последней цифре номера в списке студентов группы, поданном старостой группы в электронном формате в начале семестра.

3. РГР выполнять в простой тонкой (12 – 18 листов) школьной тетради, на обложке которой привести сведения:

Иванова В. В. Группа БТС116 РГР 1 Вариант 8

4. Условия задач в распечатанном виде аккуратно вклеить в размер листа перед решениями задач соответствующего варианта в тетради.

5. В части «Дано» все данные должны быть переведены в СИ. Рисунки выполнять карандашом по линейке.

6. Если работа при рецензировании не зачтена, студент представляет ее на повторную рецензию с исправленными решениями в разделе «Работа над ошибками».

7. Все РГР должны быть приняты и зачтены преподавателем за месяц до начала экзаменационной сессии и находиться у преподавателя.

8. При отсутствии у преподавателя зачетной расчетно-графической работы студент не допускается к зачетному занятию по курсу «Физические основы биомедицинских технологий».

Зачет – результирующая качественная оценка по четырем зачетным единицам: две рейтинговые работы, практические занятия и РГР.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В МЕДИЦИНЕ

1.1. Рентгеновское излучение. Дозиметрия

Тормозное рентгеновское излучение. Источником электронов в вакуумной электронной рентгеновской трубке с разрежением до 10^{-5} атмосфер служит раскаленная вольфрамовая спираль (К). При создании между полюсами трубки электрического поля высокого напряжения электроны нити накала отбрасываются от катода К с кинетической энергией, зависящей от напряжения на полюсах трубки (рис. 1). Непрерывный поток электронов (катодные лучи) падает на мишень – скошенное зеркальце А антикатада.

В момент удара об антикатод почти весь запас их кинетической энергии переходит в тепло. Поэтому антикатод изготавливают из тугоплавких металлов. Малая часть энергии (0,5 – 1,5 %) катодных лучей преобразуется в рентгеновское излучение торможения как потока квантов энергии электромагнитной природы разной частоты, так электроны по-разному гасят скорость на глубине проникновения в металл антикатада. Рентгеновское излучение торможения обретает сплошной энергетический спектр с коротковолновой границей, определяемой из соотношения $h\nu_{\max} = q_e U$, или $\lambda_{\min} = \frac{hc}{q_e U}$, или

$\lambda_{\min} = \frac{1,23 \cdot 10^4}{U}, \text{ \AA}$, где q_e – величина заряда электрона; U – напряжение на рентгеновской трубке; h – постоянная Планка, c – скорость света в вакууме.

Меняя напряжение главного трансформатора (см. рис. 1), получают проникающие – жесткие, с более короткими длинами волн или слабопроникающие – мягкие, с более длинными волнами, рентгеновские лучи.

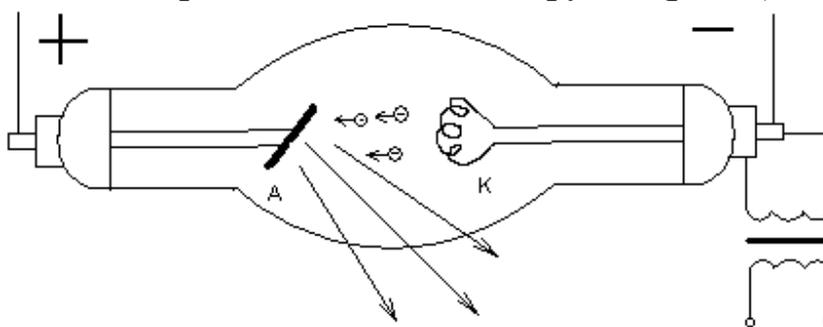


Рис. 1

Интенсивность рентгеновских лучей торможения определяется энергией квантов, уходящих с 1 м^2 поверхности антикатода за 1 с. Если каждый электрон при ударе в антикатод создает один квант энергии (луч), тогда число ударов электронов в антикатод равно числу созданных рентгеновских квантов. Число эмитирующих электронов определено силой тока через трубку и регулируется силой тока накала спирали. Тогда поток рентгеновского излучения: $\Phi = kIU^2Z$, где I и U – сила тока и напряжение в рентгеновской трубке, Z – порядковый номер элемента вещества анода, коэффициент пропорциональности $k = 10^{-9}, \text{ В}^{-1}$. При повышении напряжения на полюсах трубки интенсивность рентгеновских лучей увеличивается за счет роста числа и кинетической энергии эмитируемых электронов, предопределяя энергию квантов.

Рентгеновское излучение – электромагнитное излучение с длиной волны от 10 нм (124 эВ) до 0,001 нм (1,24 МэВ). В спектре первичного рентгеновского излучения торможения правая граница – длинноволновые (мягкие) рентгеновские лучи близки по длине волны и действию к ультрафиолетовым лучам, левая граница – короткие (жесткие) рентгеновские лучи – к гамма-лучам радия.

Характеристическое излучение. Совместно с первичным излучением в рентгеновской трубке возникают и монохроматические излучения с линейчатым спектром – вторичное характеристическое излучение с длинами волн, заданными структурой атомов вещества мишени (анода).

Поясним появление характеристического излучения на модели атома Бора. В системе атома ядро несет положительный заряд $+Z$, а электроны – суммарный отрицательный заряд $-Z$. Электроны движутся по заданным системой атома стационарным энергетическим орбитам, не излучая. Орбиты составляют слои K, L, M, N, O, P . Наименьший энергетический уровень – в ближайшем слое K к ядру, более высокие уровни – в периферических слоях: L, M, N, O, P . Распределение электронов по орбитам определяется законами квантовой механики и принципом запрета Паули, согласно которому два электрона в одной системе не могут находиться в одинаковом квантовом состоянии.

Энергия свободных электронов в рентгеновской трубке, заданная напряжением главного трансформатора, может возрасти настолько, что при их соударении об анод будет выделяться энергия, доста-

точная, чтобы заставить электроны внутренних орбит атомов вещества анода перескакивать на внешние орбиты. Возбужденный атом возвратится в состояние покоя переходами электронов с внешних орбит на свободные внутренние орбиты с выделением квантов энергии. Переход электрона с i -й орбиты с энергией E_L на орбиту меньшей энергии E_K происходит скачком и сопровождается электромагнитным излучением дискретной порции (кванта) энергии $h\nu = E_L - E_K$, где h – постоянная Планка; ν – частота излучения. Освобождаются кванты энергии характеристического излучения. Так как слои электронов в атоме каждого элемента строго определены и зависят от его места в таблице элементов, то получаемые от данного атома вторичные лучи имеют волны строго определенной длины, характеризующей данный элемент по появлению в спектрах рентгеновского излучения.

Если электрон выбит за пределы атома, то на освободившееся место переходит электрон из вышележащих слоев с излучением кванта с частотой, определяемой законом Мозли: $\omega = CR(Z - \sigma)^2$, где ω – частота линий рентгеновского спектра; Z – атомный номер элемента антикатаода, излучающего этот спектр; постоянная Ридберга $R = 2,07 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}$; σ – постоянная экранирования; $C = (1/k^2 - 1/n^2)$, k и n – номера орбит.

Ближайший к ядру электронный K -слой содержит два электрона. Если один из них (2) оказывается выбитым из K -слоя за пределы атома быстрым элект-

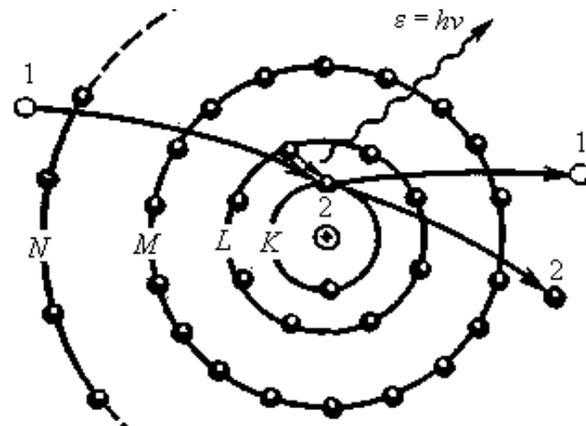


Рис. 2

троном 1, то его место займет электрон из вышележащих слоев (рис. 2). При этом возникнет линия K -серии (прил. 1, табл. П1.1.), для которой постоянная экранирования $\sigma = 1$. Для K_α -линий наибольшей длины волны ($k = 1, n = 2, C = 3/4$):

$$\omega_{K\alpha} = \frac{3}{4}R(Z - 1)^2 \text{ и}$$

$$\frac{1}{\lambda_{K\alpha}} = \frac{3}{4}R'(Z - 1)^2,$$

где штрихованная постоянная Ридберга $R' = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$; $1/\lambda = \omega/(2\pi c)$.

Для получения рентгеновского излучения большой интенсивности требуется материал с высокой температурой плавления и содержащий элементы с большими атомными номерами (Z), для которых число энергетических слоев растет. Поэтому для получения рентгеновского излучения используют вольфрам ($Z = 74$) или золото ($Z = 79$), у которых высоки и атомная масса, и температура плавления (прил. 1, табл. П1.2).

Если любой атом, где бы он ни находился (например, в теле человека), поглотит квант лучистой энергии, то эту энергию он вернет в виде вторичного кванта характеристического излучения.

Рентгенодиагностика. Просвечивание объектов живой и неживой природы с диагностической целью основано на принципе контраста, возникающего из-за различия поглощения рентгеновских лучей разными веществами. Чем больше плотность вещества, тем оно менее проницаемо для рентгеновских лучей, например: одинаковые рентгеновские лучи задерживаются слоем до 10 см алюминия или слоем до 1 см свинца.

Грубоструктурный метод исследования основан на просвечивании объектов рентгеновскими лучами с получением их теневых изображений. Тонкоструктурный метод исследования основан на интерференции и дифракции рентгеновских лучей при их отражении от атомных плоскостей.

При рентгенодиагностике внутренних органов для уменьшения повреждений поверхностных тканей мягкие лучи отсеивают, проставляя между трубкой и телом металлические пластины – фильтры для поглощения мягких лучей. При рентгеноскопии изображение рассматривают на экране, при рентгенографии и флюорографии изображение фиксируется на фотопленке и малоформатной пленке с экрана соответственно.

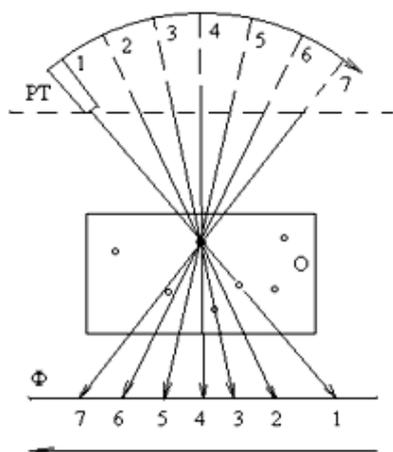


Рис. 3

На рентгенограмме различные органы и ткани затеняют друг друга. Однако, если периодически согласованно в противофазе относительно заданного центра объекта исследования перемещать (качать) рентгеновскую трубку РТ и фотопленку Φ (рис. 3), то рент-

геновские лучи при любом положении рентгеновской трубки 1, 2 и так далее будут проходить через эту точку (центр) объекта – точечного небольшого непрозрачного включения. Теневое изображение включения перемещается вместе с Ф, занимая последовательно положения 1, 2 и так далее. Остальные включения (белые кружки) создают на Ф фон. Изменяя положение центра качания, получают послойное рентгеновское изображение объекта – *томографию* (послойную запись).

Применяя вместо фотопленки матрицу из полупроводниковых детекторов ионизирующего излучения и используя тонкий пучок рентгеновского излучения, можно на ЭВМ обработать теневое изображение при томографии. Компьютерная рентгеновская томография (Г. Хаунсфилд и Мак-Кормак) позволяет получать послойные изображения тела на экране детально, различая даже небольшие опухолевые образования.

1.2. Радиоактивность

Альфа-, бета- и гамма-излучения. Изучая люминесценцию веществ, Антуан Анри Беккерель в 1896 г. обнаружил, что соли урана излучают и без предварительного их освещения. Проведя разделение компонент урановой руды, Мария Склодовская-Кюри и Пьер Кюри в 1898 г. выделили два элемента (радий и полоний), излучающие в миллионы раз интенсивнее, чем сам уран. Эрнест Резерфорд разделил в магнитном поле радиоактивные излучения на три компоненты, названные α -, β - и γ -лучи.

1. α -лучи. При ударе об экран из сернистого цинка α -частица вызывала «сцинтилляцию». Определяя их число в единицу времени ($\Delta N/\Delta t$), определили число a испускаемых α -частиц одним граммом радия в заданном размером экрана телесном угле Ω :
$$a = \frac{\Delta N}{\Delta t} \frac{4\pi}{\Omega} \approx 3,7 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}.$$

По отношению приходящего на экран секундного суммарного заряда к числу a определили положительный заряд α -частицы, равный по величине двум зарядам электрона. По отклонению α -частиц в магнитном поле определили массу α -частицы, равную массе ядра атома гелия.

Число образующихся пар ионов пропорционально начальной энергии частицы. В воздухе при нормальных условиях испускаемые радием α -частицы создают около $1,3 \cdot 10^5$ пар ионов. Средняя кинетическая энергия, теряемая α -частицей на каждый акт ионизации, составляет 34 эВ. Двигаясь в веществе, α -частица быстро растрчивает энергию и, пройдя пробег R , останавливается, захватывает два электрона, превращаясь в атом гелия.

2. β -лучи. Измерения удельного заряда потока второй компоненты показали, что β -частицы потока являются электронами больших скоростей (до $0,999 c$). При такой скорости интервалы времени взаимодействия сокращаются, что уменьшает вероятность ионизации встречных атомов. Благодаря малой массе и единичному отрицательному заряду свободный электрон отклоняется от своего пути и орбитальными электронами и положительно заряженными ядрами атомов. Вследствие дискретных случайных отклонений электрон «скачет» от одного столкновения к другому, обретая извилистые траектории и минуя сотни атомов. Число пар ионов на единице пути в воздухе в сотни раз меньше удельной ионизации от α -частиц; толщина слоя проникновения β -частиц в десятки раз превышает пробег α -частиц.

3. Гамма-лучи (γ -лучи). Поток третьей компоненты в магнитном поле не отклонялся, указывая на электронейтральность. Скорость распространения γ -квантов в воздухе близка к скорости света, а пробег достигает сотен метров. Задержать γ -излучение может бетонная плита или сантиметровая толщина свинца. При этом γ -излучение вызывает несравнимо меньшую ионизацию среды, чем α - и β -частицы.

Гамма-лучи – электромагнитное излучение с длиной волны порядка 1 пм (в десятки раз меньше жестких рентгеновских лучей), испускаемое ядрами при радиоактивном распаде, аннигиляции электрон-позитронной пары и распаде некоторых частиц, например π^0 -мезона. В природе редки радиоактивные процессы, не сопровождающиеся излучением γ -квантов (β -распад трития или стронция-90). В качестве источников гамма-лучей используют изотопы ^{60}Co и ^{137}Cs (прил. 2, табл. П2.1). Гамма-кванты большей энергии получают торможением электронов высоких энергий в ускорителях заряженных частиц.

Гамма-лучи представлены квантами одного или нескольких уровней энергии, поэтому γ -спектры – линейчатые, без постоянного фона, присущего рентгеновскому излучению.

Законы радиоактивного распада. Энергия α -, β -частиц и γ -фотонов достигает 10 МэВ, превышая в 10^6 раз энергии связи внешних электронов (6 – 10 эВ) и химических превращений (2 – 5 эВ), и поэтому не может быть связана со структурой электронных оболочек. Следовательно, α -, β - и γ -частицы покидают «материнское» ядро. Но α - и β -частицы несут электрический заряд. Значит, при их вылете это ядро сменит заряд и атомный номер с обретением качества иного химического элемента.

При α -распаде «материнское» ядро X испускает α -частицу, превращаясь в «дочернее» ядро элемента Y . С учетом сохранения заряда и массы реакция записывается в форме $X_Z^A \rightarrow Y_{Z-2}^{A-4} + \alpha_2^4$. Дочерний элемент Y имеет атомный номер на две единицы меньше и сдвинут по таблице Менделеева на две клетки влево относительно X .

Уравнение β -распада: $X_Z^A \rightarrow Y_{Z+1}^A + e_{-1}^0$. При испускании электрона заряд и номер (Z) дочернего элемента Y увеличиваются на единицу, и он сдвигается по таблице Менделеева на одну клетку вправо относительно X с сохранением массового числа A .

Радиоактивность – самопроизвольное превращение одних атомных ядер в другие, сопровождаемое испусканием элементарных частиц.

Естественный процесс радиоактивного распада ядер протекает самопроизвольно с постоянной скоростью, характеризуемой периодом полураспада T , в течение которого половина наличных ядер испытывает радиоактивный распад. Пусть период полураспада полония равен 140 дням. Значит, от 1 г полония через 140 дней останется 0,5 г. От 0,5 г полония останется половина (0,25 г) ровно через 140 дней. Через 560 дней от исходного грамма останется 1/16 г полония, которая абсолютно ничем не отличается от 1/16 г исходного грамма полония. Тогда при неизменности свойств радиоактивных ядер во времени число распадающихся ядер пропорционально числу наличных.

Обозначим число ядер данного типа в момент t через $N(t)$. Убыль ядер dN за время dt пропорциональна числу наличных ядер N , т. е.

$$-dN = \lambda N dt, \quad (1)$$

где постоянная величина λ названа постоянной распада.

Перепишем уравнение (1) в виде $\frac{dN}{N} = -\lambda dt$ и проинтегрируем

обе части $\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt$ с решением $\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$ или

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

где N_0 – начальное число распадающихся атомов, т. е. N при $t = 0$.

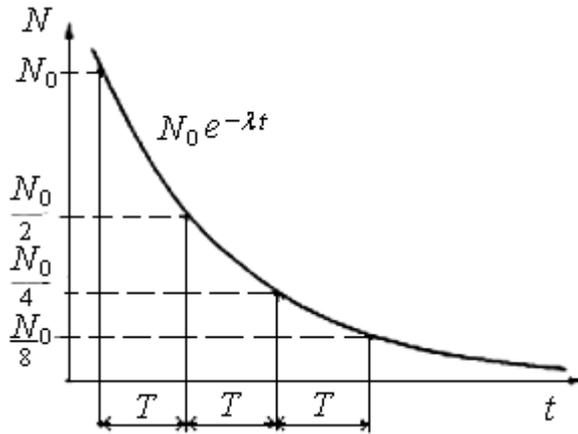


Рис. 4

Число $N(t)$ распадающихся ядер данного сорта убывает со временем по экспоненциальному закону (рис. 4). Число распадов в единицу времени задает активность данного препарата:

$$A = -dN / dt = \lambda N. \quad (3)$$

В СИ единицей активности любого нуклида в радиоактивном источнике принят 1 беккерель (Бк, Bq) = 1 расп/с. Внесистемная

единица активности 1 Кюри: 1Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ расп/с и определена активностью 1 г радия без учета продуктов его распада.

Из (2) и (3) следует, что активность нуклида убывает со временем соответственно убывли числа нераспавшихся ядер. Из N_0 наличных ядер через время T остается половина, следовательно:

$$N(T) = N_0 e^{-\lambda T} = \frac{1}{2} N_0, \text{ и } e^{-\lambda T} = \frac{1}{2}, \text{ или}$$

$$T = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{1}{2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0,693}{\lambda}. \quad (4)$$

Характеристикой скорости распада является среднее время жизни τ . Количество ядер, испытывающих превращение за промежуток времени от t до $t + dt$, определится модулем выражения (1): $dN(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} dt$. Если время жизни каждого из этих ядер равно t , то сумма времен жизни всех изменившихся ядер получается интегрированием выражения $t dN(t)$. Среднее время жизни радиоактивного ядра $t dN(t) / N_0$. Заменяв переменную $x = \lambda t$ и проинтегрировав по частям (см. прил. 1) от $t = 0$ до ∞ , получим

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t \lambda N_0 e^{-\lambda t} dt = \lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt = 1/\lambda. \quad (5)$$

Тогда величина λ равна вероятности распада одного ядра за единицу времени. Уравнение (2) примет вид $N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$, а если в него ввести T , то $N = N_0 e^{-\frac{t}{T}}$. Отсюда с учетом (4) следует $T = \ln 2 \cdot \tau \approx 0,693\tau$.

Обозначим для материнских ядер X_1 постоянную распада λ_1 ; дочерних X_2 – λ_2 . Согласно уравнению (1) убыль первых за dt будет определяться $-dN_1 = \lambda_1 N_1 dt$ и будет в точности равна прибыли дочерних ядер X_2 . Обозначая прибыль ядер элемента X_2 через $d^{(+)}N_2$, имеем $d^{(+)}N_2 = \lambda_1 N_1 dt$. С другой стороны, дочерние сами будут распадаться, причем убыль $d^{(-)}N_2$ определяется постоянной распада λ_2 и $d^{(-)}N_2 = \lambda_2 N_2 dt$. Равновесие наступит, когда прибыль и убыль сравняются, т. е. когда будет иметь место соотношение $d^{(+)}N_2 = d^{(-)}N_2$, т. е. $\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2$.

Если элемент X_2 в свою очередь распадается, порождая элемент X_3 , элемент $X_3 \rightarrow X_4$ и так далее, то равновесное соотношение между числами ядер N_1, N_2, N_3, \dots определится аналогично: $\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2$, $\lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3$, $\lambda_3 N_3 = \lambda_4 N_4, \dots$, т. е. когда $\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3 = \dots = \lambda_k N_k$.

При равновесии активности $A_i = \lambda_i N_i$ всех исходных и промежуточных продуктов одинаковы, а общая активность препарата равна активности исходного продукта, умноженной на число наличных звеньев. Конечным продуктом цепочки радиоактивных превращений является устойчивый изотоп, содержание которого нарастает по мере распада.

1.3. Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом

Типы взаимодействия. Взаимодействие рентгеновского и γ -излучения с веществом определяется тремя типами процессов: фотоэлектрический эффект, комптоновское рассеяние и эффект образования пар. Их событийные вероятности зависят от зарядов ядер и энергии квантов. Первые два типа определены взаимодействием фотонов с электронами вещества; третий – процессом поглощения в пределах сильного поля атомного ядра.

Иные взаимодействия не производят никакого действия, например: при *классическом рассеивании* фотон с малой энергией, проходя через атом, может лишь поменять вектор импульса без потери энер-

гии, так как не имеет ее в достаточном количестве для выбивания электрона с орбиты.

Фотоэлектрическое поглощение (фотоэффект). Фотоэффект как основной процесс поглощения при малых энергиях излучений наблюдается и в газах на отдельных атомах и молекулах (фотоионизация). Фотон с энергией $h\nu$, большей энергии E_K связи K -электрона в атоме, выбивает его из электронной оболочки (рис. 5, а), затрачивая энергию на разрыв связи и сообщение электрону кинетической энергии. Фотон исчезает. Возникает быстрый фотоэлектрон с кинетической энергией: $E_{kin} = h\nu - E_K$. Далее образуется пара ионов – положительный ион (атом, из которого выбит электрон) и отрицательный (атом, к которому присоединяется выбитый электрон). «Вакантное место» выбитого K -электрона занимает один из внешних электронов с

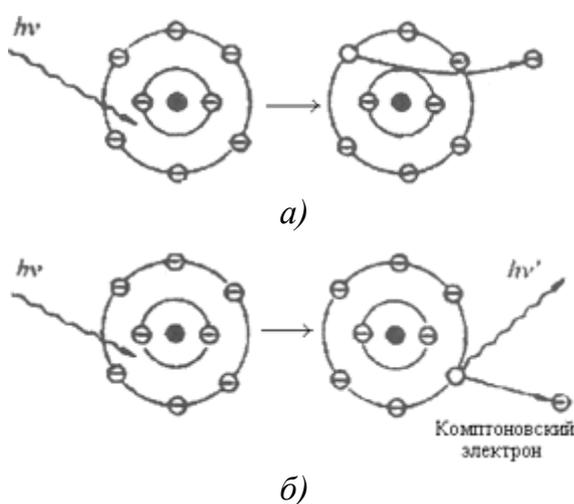


Рис. 5

высвечиванием фотона характеристического излучения.

Коэффициент фотоэлектрического поглощения одинаково пропорционален длине волны ($\sim \lambda^3$) и номеру элементов ($\sim Z^3$).

Некогерентное рассеивание. Если для фотоэффекта уместна аналогия пушечного ядра, выбивающего камни из цементированной кладки, то рассеяние фотонов средней по величине энергии на электронах атомов подобно упругому соударению твердых шаров. Фотоны из диапазона 0,3 – 5 МэВ чаще испытывают упругое рассеяние на относительно слабо связанных электронах внешних слоев. Фотон тратит часть энергии на выбивание электрона с орбиты, а сам с меньшей энергией уходит в ином направлении (рис. 5, б). Это явление называют эффектом квантового рассеивания, или комптон-эффектом. В результате возникает быстро движущийся электрон отдачи и рассеянный фотон малой остаточной энергии, для которого возрастает вероятность последующего фотоэффекта.

При больших энергиях превалирует третий процесс – *эффект образования пар*. Это процесс вообще не наблюдается для фотонов с энергией ниже энергетического порога $E_n = 2m_0c^2 = 1,022$ МэВ. При

этом эффекте высокоэнергетичный квант электромагнитного излучения в поле ядра превращается в две античастицы: электрон и позитрон. Остаток энергии выше энергетического порога преобразуется поровну в кинетическую энергию возникающих заряженных античастиц, разлетающихся в противоположных направлениях. Вероятность эффекта образования пар $\sim Z^2$.

Поглощение рентгеновских лучей и γ -лучей. В вакууме рентгеновские лучи расходятся от источника по квадратичному закону. При мягком излучении происходит его ослабление за счет поглощения, при жестком излучении – за счет рассеивания.

Проникающая способность определяется ослаблением излучения поглощением с ростом плотности и толщины слоя вещества и с уменьшением жесткости лучей. Убыль интенсивности – dI при прохождении слоя вещества пропорциональна толщине слоя dx и интенсивности падающего пучка: $-dI = \mu dx$. Интенсивность пучка, прошедшего сквозь пластину толщиной x , определяется расчетной формулой $I = I_0 e^{-\mu x}$, где I_0 – интенсивность падающего на пластинку моноэнергетического пучка, μ – линейный коэффициент поглощения $\mu = \mu_m \rho = k \lambda^3 Z^3 \rho$, где $\mu_m = k \lambda^3 Z^3$ – массовый коэффициент ослабления, λ – длина волны рентгеновских лучей или γ -лучей, ρ – плотность вещества, k – коэффициент пропорциональности, Z – порядковый номер элемента вещества-поглотителя.

В однородном веществе коэффициент ослабления обязан быть пропорционален числу встречных атомов на единице длины пути пучка γ -лучей. При числе n атомов вещества в единице объема получим

$$-\frac{dI}{I} = \mu dx = \frac{\mu}{n} n dx = \sigma n dx,$$

где величина *эффективного сечения* суммарного поглощения $\sigma = \mu / n$, м².

Излучение и поглощение α -частиц. Альфа-частицы – ядра атома гелия с массовым числом 4 и зарядовым числом 2 испускаются в ходе α -распада, характерного для элементов конца периодической системы. Естественным первичным процессом образования (источником в земной коре) α -частиц является радиоактивный распад радия:



Ионизирующие излучения передают свою энергию возбуждением и ионизацией вещества. Массивная α -частица благодаря относительно медленному движению, взаимодействует почти с каждым атомом среды на своем пути, поэтому всю энергию она отдает на небольшом отрезке пути. Проходя через вещество, α -частица вызывает сильное притяжение отрицательно заряженных орбитальных электронов атомов. В результате ионизации образуется пара: положительно заряженный ион и электрон. Если ионизации не происходит, то вызывается «возбуждение» увеличением энергии орбитальных электронов атомов. Ионизированные и возбужденные молекулы сосредоточены в объеме трека α -частицы. Ионы внутри трека α -частицы расположены близко, образуя сплошной «чулок», экранирующий сам непрерывный прямой и плотный трек.

Линейная плотность ионизации, или удельная ионизация, как число ионных пар, образованных на единицу трека α -частицы, зависит как от энергии и заряда частицы, так и от плотности (атомного номера Z) среды. Скорость, с которой происходит потеря энергии по мере продвижения частицы, пропорциональна квадрату заряда частицы. Альфа-частица теряет энергию в 4 раза быстрее протона при равных скоростях движения.

Альфа-частицы задерживаются тонким слоем бумаги и не способны проникнуть через слой эпидермиса отмерших клеток кожи, поэтому при внешнем облучении опасности для человека не представляют. Длина их пробега (при энергии 4 МэВ) в воздухе составляет 2,5 см, в биологической ткани – 0,03 мм, в алюминии – 0,016 мм. Опасность становится большой в случае проникновения α -частиц внутрь организма (при инкорпорации нуклидов): через открытую рану, с пищей или воздухом. Удельная ионизация α -частиц в тысячи раз выше, чем β -частиц и γ -лучей. По мере продвижения α -частицы в веществе большее число взаимодействий (ионизации и возбуждений) требует большой скорости потери ее энергии. Уменьшение скорости частицы и приводит к росту ионизации до максимума с последующим быстрым падением до нуля, когда остановившаяся α -частица превращается в атом гелия (прил. 2, табл. П2.2).

Излучение и поглощение электронов. Радиоактивные превращения большинства нуклидов не приводят к изменению состава ядра,

но сопровождаются внутриядерными превращениями нейтрона в протон и наоборот, в результате которых испускается электрон (электронный распад) или позитрон (позитронный распад). При электронном захвате атомное ядро захватывает один из электронов с внутренних электронных оболочек атома: *K*-захват (у *K*-оболочки). В результате *K*-захвата один из протонов ядра превращается в нейтрон, а на место захваченного ядром электрона переходит электрон с удалённой оболочки с выделением кванта характеристического излучения. Электроны как продукты радиоактивного распада называют бета-частицами (β -частицами), заряженными отрицательно (электронный β -распад) или положительно (позитронный β -распад).

Бета-излучение проходит в ткани организма на глубину 1 – 2 см. Длина пробега в воздухе (при энергии 4 МэВ) достигает 17,8 м, в воде – 2,6 мм. При прохождении 1 см нормального воздуха β -частицы создают 50 – 70 пар ионов, а в биологической ткани – 8 – 10 пар ионов на 0,01 мм пробега. Пары ионов вдоль траектории образуются не сплошной, а пунктирной извилистой «дорожкой». По мере снижения энергии снижается скорость электрона, увеличивая вероятность взаимодействия.

Излучение заряженных частиц больших энергий. Быстрые заряженные частицы – большей частью протоны, ядра гелия и в небольшом числе иные составляют первичную компоненту космических лучей.

Протоны с энергией в пределах 10^{10} – 10^{18} эВ испытывают столкновения с мгновенно испаряющимися ядрами атомов атмосферы. В направлении движения первичной частицы «рождаются» π -мезоны (пионы) – кванты ядерного поля, излучаемые при ускорении частиц, несущих ядерный заряд, аналогично тому, как фотоны – кванты электромагнитного поля – излучаются при ускорении частиц, несущих электрический заряд. Однако для рождения пиона нужна энергия более 140 МэВ.

Если пионы π^+ и π^- не успели поглотиться ядром атома, то они распадаются на мюоны и мюонные нейтрино. Мюоны представляют «жесткую» часть вторичного космического излучения. При среднем времени жизни 2,2 мкс они достигают поверхности земли и проникают под землю и под воду на сотни метров. Мягкую компоненту вторичного космического излучения представляют электроны, позитроны и фотоны с более слабой проникающей способностью.

1.4. Дозиметрия ионизирующих излучений

Дозы ионизирующих излучений и единицы измерения. На первых рентгеновских аппаратах (с малым напряжением) воздействие на человека затрагивало лишь покровные мягкие ткани. Качественной мерой поля излучения служил биологический индикатор – реакция кожи человека (эритема). Для дозиметрии был необходим достоверный количественный индикатор облучения в виде физического и химического эффекта или свойства самого излучения. Физической единицей условились считать число пар ионов, которые излучение образует вблизи рентгеновских трубок и аппаратов в 1 см^3 сухого воздуха при нормальных условиях. Назвали это число единицей экспозиционной дозы [$D_{\text{экс}}$] – рентген $1\text{Р} = 2,083 \cdot 10^9$ пар ионов/ см^3 воздуха, производимых эмиссией электронов в 1 см^3 сухого воздуха при температуре 0°C и давлении 760 мм рт. ст. и несущих по одному элементарному заряду. Тогда же в дозиметрии сформировалось практическое правило: доза 1Р накапливается за 1 ч на расстоянии 1 м от источника радия массой 1 г, т. е. активностью 1 Ки.

В СИ экспозиционная доза определяется в форме удельного заряда: $D_{\text{экс}} = dQ/dm$, Кл/кг, или $D_{\text{экс}} = \Delta Q/\Delta m$, где ΔQ – суммарный заряд всех ионов одного знака по завершении (экспозиции) ионизационных процессов в воздухе. Мощность экспозиционной дозы $P_{\text{экс}} = dD_{\text{экс}}/dt$, Кл/(кг · с).

По мере повышения напряжения на рентгеновских трубках до 180 – 250 кэВ для облучения глубоко лежащих очагов заболеваний появились проблемы переносимой и допустимой доз облучения и ограниченности понятия $D_{\text{экс}}$ при выявлении вредного и полезного (терапевтического) действия больших доз. В одном поле излучения и при одной величине $D_{\text{экс}}$ радиационный эффект оказывался разным в веществах и средах с разными значениями Z . Мерой радиационного эффекта воздействия глубинных доз проникающих излучений была принята поглощенная энергия без учета того, каким образом она поглощается, но с учетом реакции вещества на излучение, или перехода между характеристиками поля излучения и реакцией вещества на облучение, заданного переходным коэффициентом f . Тогда $D_{\text{п}} = fD_{\text{экс}}$.

В СИ поглощенная доза $D_{\text{п}} = dE/dm$ – удельная энергия, т. е. энергия, принятая от излучения единицей массы вещества. На прак-

тике величина $D_{\text{п}}$ оценивается средней энергией излучения, принятого единицей массы. В СИ единица поглощенной дозы 1 Грей (Гр): $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$. Скорость накопления поглощенной дозы называют мощностью поглощенной дозы излучения $P_{\text{п}} = dD_{\text{п}}/dt$, Гр/с. Внесистемная единица поглощенной дозы – рад (англ. *radiation absorbed dose*): $1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Гр}$. В поле рентгеновского или гамма-излучений для мягких тканей единице экспозиционной дозы $D_{\text{экс}} = 1 \text{ Р}$ соответствует $D_{\text{п}} = 0,88 \cdot 10^{-2} \text{ Гр}$.

По технологии исследования ожидаемых радиационных эффектов в объеме все точки одинаковых значений $D_{\text{п}}$ формируют семейство кривых изодоз. На основе их достоверности возникли индивидуальные фотодозиметры, количественно характеризующие интенсивность излучения, исходя из того, что они получают ту же дозу, что и ткани тела. Первые фотодозиметры были выполнены в виде нескольких кадров запакованных в светонепроницаемую черную бумагу рентгеновской пленки (фотокассеты). Такой фотометод определения доз облучения по степени почернения кадров безынерционен. При аварийных дозах облучения из-за «насыщения» фотоэмульсии почерневшими зернами серебра появлялась недооценка снижением фактической дозы, поэтому кадры проставлялись тонкими слоями металла.

Обнаружение отдаленных последствий облучения показало, что действие ионизирующих излучений на живой организм сложнее, чем на неживой объект. Радиобиологический эффект определен не только величиной поглощенной энергии излучения. Так, при постоянной поглощенной дозе радиобиологический эффект рос вместе с плотностью ионизации в треке, определенной видом излучения. Для количественной оценки этого фактора влияния ввели понятие численного коэффициента качества (КК) излучения, равного отношению величин поглощенных доз эталонного γ -излучения (энергия 180 – 250 кэВ) и любого другого вида излучения, вызывающих один и тот же радиобиологический эффект. Значит, для γ -излучения $\text{КК} = 1$; для электронов, позитронов и β -излучения – 1; для протонов – 10; для нейтронов (20 кэВ) – 3, для быстрых нейтронов (0,1 – 10 МэВ) – 10, для α -частиц – 20. Например: доза, при которой лучевая катаракта кроликов развивается при воздействии γ -излучения, составляет 2 Гр, а при воздействии быстрых нейтронов – 0,2 Гр.

Эквивалентная доза излучения в объеме ткани $D_{\text{экв}} = D_{\text{п}} \cdot \text{КК}$ с единицей измерения (СИ) 1 зиверт (Зв): $1 \text{ Зв} = 1 \text{ Дж/кг}$ и внесистемной единицей – биологический эквивалент рада (бэр): $1 \text{ бэр} = 10^{-2} \text{ Зв}$.

Итак, понятие «излучение» применимо к источнику и полю. Сила источника характеризуется его активностью, а поля – экспозиционной дозой. Термин «облучение» применим к объектам: неживые объекты характеризуются поглощенной дозой, а живые – эквивалентной дозой.

Второй фактор – разная радиочувствительность органов и тканей. Поэтому эквивалентные дозы облучения корректируют коэффициентами радиационного риска для критических органов и тканей. По суммарному эффекту облучения организма используют эффективную эквивалентную дозу (ЭЭД): $H_{\text{эфф}} = \sum W_i H_i$, Зв, где H_i – среднее значение $D_{\text{экв}}$ в органе или ткани; W_i – отношение ущерба облучения i -го органа (ткани) к ущербу облучения всего организма при одной $D_{\text{экв}}$.

В качестве интегрального критерия радиочувствительности применяют летальную дозу LD_{50} , вызывающую гибель 50 % биообъектов за заданный промежуток времени. Часовая LD_{50} : для человека – 4 Гр, для рыб и птиц – 10 – 20 Гр, для растений – 10 – 1500 Гр, для насекомых – 1000 Гр. При превышении в 10 раз абсолютной летальной дозы, вызывающей гибель 100 % организмов, смерть наступает во время облучения.

Третьим фактором является фракционированное во времени облучение в дискретных разовых дозах (фракциях). В паузах между фракциями повреждения репарируются, и результирующий биологический эффект оказывается меньше, чем при однократном облучении той же дозы.

Источники ионизирующего излучения. Полюсы как стоки заряженных космических частиц получают больше радиации, чем экваториальные области. Уровень облучения быстро растет с высотой и уменьшением защитного слоя воздушного экрана. На уровне моря средних широт ЭЭД от космического излучения составляет 0,37 мЗв/год.

Земные источники радиации обеспечивают 5/6 всей среднегодовой ЭЭД вследствие внутреннего облучения. Наибольший вклад среди всех источников радиации имеет невидимый, без вкуса и запаха, тяжёлый (в 7,5 раз тяжелее воздуха) газ радон. Он проникает в здания из грунта и выделяется строительными материалами (асбест, гранит, пемза, цемент, фосфогипс), содержащими малые количества

урана-238. Основную часть среднегодовой ЭЭД от радона (1,3 мЗв) человек получает в непроветриваемом помещении. Там, где близко к поверхности подходят гранитные массивы, грунты с высокой концентрацией радионуклидов, вблизи облицованных гранитом домов, фон достигает 1,5 мЗв/год.

Опасные и неопасные дозы облучения. ЭЭД среды обитания человека составляет до 4 мЗв/год при принятой норме естественного радиационного фона 0,88 – 1,75 мЗв/год.

Дозы облучения (выше 100 Гр) всего тела вызывают поражение центральной нервной системы (ЦНС), смерть наступает во время облучения. При $D_{II} = 10 - 50$ Гр человек умирает через 1 – 2 недели от кровоизлияний в желудочно-кишечном тракте (ЖКТ). Дозы 3 – 5 Гр равны LD_{50} из-за разрушения клеток красного костного мозга. Красный костный мозг и элементы кроветворной системы теряют способность функционировать уже при дозах облучения 0,5 – 1 Гр, но обладая способностью к регенерации восстанавливают функции полностью в паузах между фракциями.

Общая теории экологии содержит правило 11 %: любая устойчивая система в среднем статистически выносит без нарушения системных функций изменения не более 11 % ее составляющих. Если фоновое естественное облучение от всех источников (космические лучи, радон и др.) для 95 % человечества составляет 0,3 – 0,6 мЗв/год, то приемлемо опасной должна быть дополнительная доза облучения 0,03 – 0,06 мЗв/год.

Общая теория риска считает приемлемой смерть 1 человека/млн · год, убитого молнией. По правилу пропорционального риска принятый допустимый предел дозы искусственного облучения 1 мЗв/год соответствует генетическому поражению 35 человек на миллион новорожденных. Но учет хронического облучения в череде многих поколений даст еще 450 – 3400 случаев наследственных аномалий. Это уменьшает безопасную ЭЭД до 0,01 мЗв/год, т. е. значительно меньше дозы естественного фона.

Правило пропорционального риска в этой задаче не работает. Не может быть одинакового для всех приемлемо-опасного уровня облучения для разных временных сезонов, местностей и возрастно-половых и этнических групп населения. Кроме того, величина дозы

зависит от ее фракционирования. Органы залечивают радиационные повреждения в паузах.

Шведский радиобиолог Р. М. Зиверт в 1950 г. пришел к заключению, что для действия радиации на живые организмы нет порогового уровня, т. е. уровня облучения, ниже которого не обнаруживается поражений у любого облученного организма – *детерминированный* (предопределенный) эффект. При облучении в малых дозах эффект *стохастический* (случайный), т. е. определенные изменения среди группы облученных обязательно возникнут, но у кого и какие именно – заранее неизвестно.

Радиоизотопная диагностика. Радиоизотопная диагностика основана на индикации введенных в организм радиоактивных изотопов и меченых соединений для распознавания болезней органов. Радиоактивные изотопы регистрируются как источники ионизирующих излучений по распределению, перемещению, превращению и выведению из организма.

Лабораторная радиометрия позволяет при исследовании порций крови, мочи установить содержание в них меченого соединения. Клиническая радиометрия основана на свойстве органов аккумулировать строго определенные элементы в формах меченых соединений. Клиническая радиография регистрирует скорость прохождения меченого соединения через органы, определяя их физиологическую активность.

Радиационная генетика. Сразу после открытия рентгеновских лучей и получения радия были начаты исследования действия лучей на клетку морфологическими методами (под микроскопом).

Правило Бергонье и Трибондо (1906 г): радиочувствительность клеток к излучению прямо пропорциональна их способности к делению и обратно пропорциональна их уровню дифференциации. Чувствительность организмов к облучению тем больше, чем выше их организация.

В соответствии с этим правилом быстро размножающиеся (часто делящиеся) клетки чувствительны к облучению, а зрелые функционально специализированные клетки (не расположенные к делению), менее чувствительны. Клетка обретает радиочувствительность в процессе деления.

Острые радиационные эффекты происходят рано в быстро делящихся тканях, а отдаленные эффекты проявляются поздно в медленно

пролиферирующих тканях. Отдаленные последствия у многоклеточных организмов проявляются в формах ослабления иммунитета, перерождения тканей. Массовый радиационный канцерогенез у подвергшихся облучению в Хиросиме и Нагасаки произошел через 8 лет.

Методы радиационной генетики применяют в сельском хозяйстве для отбора и закрепления в потомстве полезных признаков мутационных изменений, обусловленных ионизирующими излучениями. Радиационно-генетические принципы однополой стерилизации насекомых используют для уничтожения вредителей. Радиационная биотехнология включает в себя предпосевную обработку семян, глазков и саженцев для повышения всхожести и урожайности и радиационную стерилизацию овощей, пищевых консервов, перевязочного материала.

1.5. Основные термины, определения и формулы

Тормозное и характеристическое излучение. Коротковолновая граница сплошного спектра тормозного рентгеновского излучения

$$\lambda_{\min} = \frac{1,23 \cdot 10^4}{U}, \text{ \AA},$$

где q_e – величина заряда электрона; U – напряжение, приложенное к рентгеновской трубке; h – постоянная Планка, c – скорость света в вакууме.

Поток рентгеновского излучения

$$\Phi = kIU^2Z,$$

где I и U – сила тока и напряжение в рентгеновской трубке, Z – порядковый номер элемента вещества анода, коэффициент пропорциональности $k = 10^{-9}, \text{ В}^{-1}$.

Если один из электронов, принадлежащий электронному слою, оказывается выбитым за пределы атома быстрым электроном извне, то на освободившееся место переходит электрон из вышележащих слоев с излучением кванта с частотой (*закон Мозли*)

$$\omega = CR(Z - \sigma)^2,$$

где ω – частота линии рентгеновского спектра; Z – атомный номер элемента антикатада, излучающего спектр; постоянная Ридберга $R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$; σ – постоянная экранирования; $C = (1/k^2 - 1/n^2)$, k и n – номера орбит.

Для K_{α} -линий наибольшей длины волны (см. прил. 1, табл. П1.1, П1.2):

$$\omega_{K_{\alpha}} = \frac{3}{4} R(Z-1)^2 \text{ и } \frac{1}{\lambda_{K_{\alpha}}} = \frac{3}{4} R'(Z-1)^2,$$

где штрихованная постоянная Ридберга $R' = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$, $\sigma = 1$, $k = 1$, $n = 2$, $C = 3/4$.

Радиоактивность. Основной закон радиоактивного распада

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

где N_0 – начальное число радиоактивных ядер, N – число не распавшихся атомов к моменту времени t , постоянная распада $\lambda = \ln 2 / T$, T – период полураспада – интервал времени, за который число нераспавшихся атомов уменьшается в два раза.

Среднее время жизни $\tau = 1/\lambda$ радиоактивного ядра – интервал времени, за который число нераспавшихся ядер уменьшается в e раз.

Основной закон радиоактивного распада в дифференциальной форме

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N.$$

Здесь $A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N$ – активность нуклида в радиоактивном веществе (источнике). Для активности основной закон радиоактивного распада примет вид $A = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$. Обозначив активность изотопа $A_0 = \lambda N_0$ в начальный момент времени ($t = 0$), получаем $A = A_0 e^{-\lambda t}$, активность изотопа изменяется со временем по тому же закону, что и число нераспавшихся ядер (см. выше).

Удельная (массовая) активность радиоактивного препарата равна скорости актов распада в единице массы вещества: $a = A/m$.

Если в смеси ряда радиоактивных изотопов, образующихся один из другого, постоянная распада λ первого члена ряда много меньше постоянных всех остальных членов ряда, то в смеси устанавливается состояние радиоактивного равновесия, при котором активности всех членов ряда равны между собой: $\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \dots = \lambda_k N_k$.

Счетчик Гейгера – Мюллера. Фоновая радиация (космическая, солнечная, скального грунта, радиоизотопов) существует всегда и везде. Для ее измерения служит счетчик Гейгера – Мюллера. Этот прибор, как и сцинтилляционный счетчик, регистрирует отдельные

частицы. Импульсы фиксируются по числу ионизирующих частиц (см. прил. 2, табл. П2.1)

Проанализируем возможные причины изменения числа импульсов в минуту на разных примерах. Пусть регистрируются 1500 импульсов в минуту при нормальных условиях с размещением плутония-239 в непосредственной близости от окна трубки счетчика. Проставим лист бумаги между ними и зафиксируем резкий спад числа импульсов до фонового счета. Уберем лист бумаги и, постепенно отводя держатель источника от окна, зафиксируем тот же резкий спад на расстоянии около 4 см. И лист бумаги, и слой воздуха толщиной ~ 4 см при атмосферном давлении полностью поглощают α -частицы. Пробег α -частиц в воздухе – около 4 см. При превышении этого расстояния между источником и окном трубки детектора исследование теряет смысл из-за отсутствия α -частиц.

При отведении кобальта-60 от окна детектора скорость счета падает не потому, что γ -лучи поглощаются, а потому, что интенсивность излучения (и скорость счета) линейно падает с ростом квадрата расстояния. Скорость счета практически не меняется при простановках листов бумаги или алюминия, но убывает экспоненциально в зависимости от толщины свинца между источником и окном трубки (см. прил. 2, табл. П2.2).

При исследовании характеристик β -частиц (β^-) дополнительно используется коллиматорная трубка – металлическая трубка с узкой прорезью для уменьшения расхождения и формирования относительно параллельного пучка. Поместим стронций-90 со стороны прорези. Увеличивая расстояние между коллиматорной трубкой и окном счетчика, обнаруживаем слабое падение скорости счета, указывающее на значимый пробег β -частиц в воздухе. Пусть указанное расстояние достигло 15 см. Проставим последовательно разные поглотители между источником и окном. Листы бумаги практически не оказывают влияния на скорость счета, а суммарная толщина в 4 мм листов алюминия его уменьшает, доводя до фонового. Такой же эффект создает и более тонкая свинцовая пластина.

При установке радия-226 на расстоянии менее 4 см от окна детектора фиксируется очень большая скорость счета. При отделении источника и детектора листом бумаги скорость счета резко падает, оставаясь значительно больше фонового. Значит, кроме α -частиц источник испускает и иные виды излучения. Замена листа бумаги листом алюминия толщиной 4 мм резко уменьшает скорость счета, но

опять оставляя его выше фонового. Следовательно, кроме β -частиц, поглощаемых алюминием, излучение содержит и γ -лучи, которые может поглотить лишь свинцовая пластина толщиной более 5 см.

Поглощение рентгеновских лучей и γ -лучей. Интенсивность пучка рентгеновских лучей, прошедших сквозь пластину толщиной x , определяется расчетной формулой $I = I_0 e^{-\mu x}$, где I_0 – интенсивность падающего на пластинку моноэнергетического пучка, μ – линейный коэффициент поглощения: $\mu = \mu_m \rho = k\lambda^3 Z^3 \rho$, где $\mu_m = k\lambda^3 Z^3$ – массовый коэффициент ослабления, λ – длина волны рентгеновского излучения, ρ – плотность вещества, k – коэффициент пропорциональности, Z – порядковый номер элемента вещества-поглотителя.

На рис. 6. приведены графические зависимости коэффициента линейного поглощения разных сред от энергии γ -фотонов. Массовые коэффициенты поглощения рентгеновских лучей приведены в прил. 2, табл. П2.3.

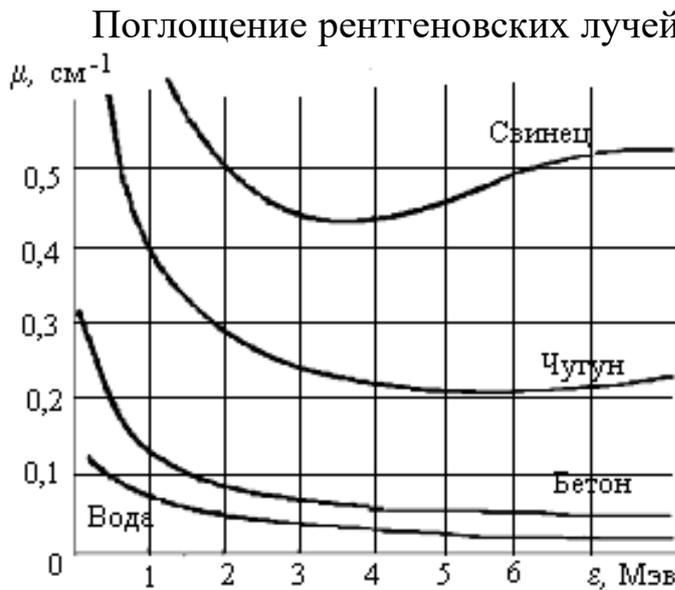


Рис. 6

Поглощение рентгеновских лучей и γ -излучения веществами характеризуют «слоем половинного ослабления», равным толщине $x_{1/2}$ пластины, уменьшающей вдвое интенсивность падающих лучей, или

$$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} = 0,693 / \mu.$$

Поглощение рентгеновских лучей практически не зависит от того, в каком соединении атом представлен в веществе. Это позволяет оценить в форме отношения массовые коэффициенты ослабления разных веществ.

Зная атомные номера атомов, представляющих молекулы, имеем

$$\frac{\mu_{m1}}{\mu_{m2}} = \frac{k\lambda^3 \sum_i n_i Z_i^3}{k\lambda^3 \sum_j m_j Z_j^3} = \frac{\sum_i n_i Z_i^3}{\sum_j m_j Z_j^3},$$

где n_i , m_j – число атомов в молекуле сопоставляемых веществ 1 и 2 соответственно.

Существенное различие поглощения рентгеновского излучения разными тканями позволяет в теневой проекции видеть изображения глубоко лежащих органов тела.

Дозиметрия ионизирующих излучений. Поглощенная доза излучения

$$D_{\text{п}} = \Delta W / \Delta m, \text{ Дж/кг},$$

где ΔW – энергия ионизирующего излучения, переданная элементу облучаемого вещества массой Δm . Единица измерения 1 Гр = 1 Дж/кг.

Мощность поглощенной дозы излучения $P_{\text{п}} = D_{\text{п}} / \Delta t$, Гр/с, где Δt – время поглощения элементом дозы $D_{\text{п}}$ (прил. 3, табл. ПЗ.1).

Экспозиционная доза ($D_{\text{экс}}$, или X) гамма- и рентгеновского излучения

$$D_{\text{экс}} = Q / m, \text{ Кл/кг},$$

где Q – суммарный электрический заряд ионов одного знака к массе m этого воздуха. На практике применяют единицу измерения 1 рентген (Р). При $X = 1$ Р в 0,001293 г воздуха при нормальных условиях образуется $2,08 \cdot 10^9$ пар ионов. На образование одной пары в среднем требуется энергия 34 эВ (см. прил. 3, табл. ПЗ.1).

Мощность экспозиционной дозы излучения $P_{\text{экс}} = D_{\text{экс}} / \Delta t$, или в иных обозначениях $\dot{X} = \frac{\Delta X}{\Delta t}$, А/кг, где Δt – интервал времени облучения.

Экспозиционная доза рентгеновского и γ -излучений, падающих на объект, экранированный защитным слоем толщиной x :

$$X = X_0 e^{-\mu x},$$

где X_0 – экспозиционная доза при отсутствии защитного слоя.

Экспозиционная доза γ -излучения, падающего за время t на объект, находящийся в воздухе на расстоянии r от точечного источника, $X = \dot{X} t / r^2$, где \dot{X} – мощность экспозиционной дозы на расстоянии $r = 1$ м. Поглощением γ -излучения в воздухе обычно пренебрегают.

Связь поглощенной $D_{\text{п}}$ и экспозиционной дозы X : $D_{\text{п}} = fX$, где f – переходный коэффициент (для воды и мягких тканей человека $f = 1$).

Эквивалентная доза облучения:

$$D_{\text{экр}} = K D_{\text{п}},$$

где K – коэффициент качества излучения (прил. 3, табл. ПЗ.2).

Эффективная эквивалентная доза $H_{\text{эфф}} = \sum W_i H_i$, $\sum W_i = 3$, где H_i – среднее значение эквивалентной дозы в органе или ткани; W_i – отношение ущерба облучения i -го органа (ткани) к ущербу облучения всего тела. Коэффициенты радиационного риска:

яичники или семенники – 0,25; красный костный мозг – 0,12, легкие – 0,12; молочная железа – 0,05; костная ткань – 0,03; щитовидная железа – 0,03; прочие ткани – 0,3.

1.6. Примеры решения задач

Пример 1. Определить напряжение U , под которым работает рентгеновская трубка, если в спектре тормозного рентгеновского излучения коротковолновая граница $\lambda_{\min} = 15,5$ пм.

Решение. В рентгеновской трубке электрон приобретает кинетическую энергию $T = |q_e|U$. Тормозное рентгеновское излучение возникает за счет энергии, теряемой электроном при торможении.

В соответствии с законом сохранения максимальная энергия фотона определится равенством $\hbar\omega_{\max} = T = |q_e|U$. Так как $\lambda_{\min} = 2\pi c/\omega_{\max}$, то

$$U = \frac{2\pi\hbar c}{|q_e|\lambda_{\min}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1,05 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,55 \cdot 10^{-11}} = 7,98 \cdot 10^4 \text{ В} = 79,8 \text{ кВ.}$$

Пример 2. Определить длину волны $\lambda_{K\alpha}$ и энергию $\varepsilon_{K\alpha}$ фотона K_{α} -линии рентгеновского спектра, излучаемого вольфрамом при его бомбардировке быстрыми электронами.

Решение. При бомбардировке вольфрама ($Z = 74$) быстрыми электронами возникает рентгеновское излучение с линейчатым спектром. Если один из двух электронов из ближайшего к ядру K -слоя оказывается выбитым за пределы атома, то на его место переходит электрон из слоя L , M или N . При переходе электрона с L -слоя на K -слой излучается наиболее интенсивная K_{α} -линия рентгеновского спектра с определяемой законом Мозли длиной волны $\lambda_{K\alpha} = \frac{4}{3R'(Z-1)^2} =$

$$= 22,8 \text{ пм. Энергия фотона } \varepsilon_{K\alpha} = hc/\lambda = 6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 / 22,8 \cdot 10^{-12} = 0,87 \cdot 10^{-14} \text{ Дж} = 54,4 \text{ кэВ.}$$

Пример 3. С учетом фонового счета исходная скорость счета равна 4000 мин^{-1} , а через 20 мин – 125 мин^{-1} . Определить период полураспада T радиоактивного элемента источника.

Решение. Определим число периодов полураспада в 20 мин с учетом уменьшения скорости счета наполовину в течение каждого периода. В первый период скорость падает с 4000 до 2000, во второй – с 2000 до 1000, в третий – с 1000 до 500, в четвертый – с 500 до 250, в пятый – с 250 до 125. Активность уменьшалась наполовину 5 раз за 20-минутный интервал, и период полураспада T составит $20/5 = 4$ мин.

Оформим эту логику математически, обозначив исходную скорость счета $A_0 = 4000 \text{ мин}^{-1}$, предполагаемое число периодов полураспада n , конечную скорость счета $A_n = 125 \text{ мин}^{-1}$. Тогда $A_0/A_n = 2^n$ и $4000/125 = 2^n$. Отсюда: $n = 5$, $T = 20/5 = 4$ мин.

Пример 4. Счетчик импульсов за одну минуту в начале наблюдения ($t = 0$) насчитал 250 импульсов в минуту, а через час – 92 импульса в минуту. Определить постоянную радиоактивного распада λ и период полураспада T радиоактивного изотопа.

Решение. Число импульсов Δn , регистрируемых счетчиком за интервал времени Δt , пропорционально числу распавшихся атомов ΔN . При первом измерении $\Delta n_1 = k\Delta N_1 = kN_1(1 - e^{-\lambda\Delta t})$, где N_1 – количество радиоактивных атомов к моменту начала отсчета; k – коэффициент пропорциональности, постоянный для данного прибора и заданного относительного расположения прибора и радиоактивного изотопа.

При повторном измерении с неизменным взаимным расположением прибора и изотопа $\Delta n_2 = k\Delta N_2 = kN_2(1 - e^{-\lambda\Delta t})$, где N_2 – количество радиоактивных атомов к моменту начала второго измерения.

В обоих случаях Δt одинаков, $N_2 = N_1 e^{-\lambda t}$ и $\frac{\Delta n_1}{\Delta n_2} = e^{\lambda t}$, где t – интервал времени между первым и вторым измерениями.

$$\text{Тогда } \lambda = \frac{1}{t} \ln \frac{\Delta n_1}{\Delta n_2} = \frac{1}{1} \ln \frac{250}{92} = 1 \text{ ч}^{-1}.$$

$$\text{Период полураспада } T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{1} = 0,693 \text{ ч, или } 41,5 \text{ мин.}$$

Пример 5. Определить, сколько атомов эманации радия (радона) распадается за сутки из 1 млн атомов.

Решение. Скорость распада атомов радиоактивного вещества равна скорости убыли его атомов: $\frac{dN}{dt} = -\lambda N$. Применять эту форму-

лу для конечного промежутка времени Δt можно в качестве оценки, но лишь при $\Delta t \ll T$. Период полураспада T радона равен 3,8 сут (см. прил. 2, табл. П2.1) и соизмерим с заданным интервалом времени 1 сут. Поэтому для определения числа распадающихся за сутки атомов радона следует использовать интегральную форму $N = N_0 e^{-\lambda t}$.

Искомое число $\Delta N = N_0 - N = N_0(1 - e^{-\lambda t}) = 10^6(1 - 0,833) = 16,7 \cdot 10^4 \text{ сут}^{-1}$.

Используя оценочную форму, получим $\Delta N = N_0 \ln 2 (\Delta t / T) = 10^6 \cdot 0,693 / 3,8 = 18,2 \cdot 10^4 \text{ сут}^{-1}$, допуская погрешность более 10 %.

Пример 6. Определить активность 1 мкг радиоактивного изотопа лития ${}^8_3\text{Li}$.

Решение. $A = \frac{m}{M} N_A \lambda = \frac{10^{-9} \cdot 6 \cdot 10^{23} \cdot 0,693}{8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,842} = 6,4 \cdot 10^{16} \text{ Бк}$, или $17,3 \cdot 10^5 \text{ Ки}$.

Пример 7. Определить активность радона, образовавшегося из 1 г радия ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ за 2 ч.

Решение. Радон – продукт радиоактивного распада радия. Для определения его активности необходимо знать постоянные радиоактивного распада исходного и конечного продукта (см. прил. 2, табл. П2.1) и начальное число атомов радона, равное числу атомов распавшегося радия.

Постоянные распада радия и радона:

$$\lambda_{\text{Ra}} = 0,693 / (1620 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600) = 1,356 \cdot 10^{-11} \text{ с}^{-1},$$

$$\lambda_{\text{Rn}} = 0,693 / (3,8 \cdot 24 \cdot 3600) = 2,11 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}.$$

Число распавшихся атомов радия: $N_{\text{Ra}} = N_0(1 - e^{-\lambda t}) = m N_A (1 - e^{-\lambda t}) / M = 10^{-3} \cdot 6 \cdot 10^{23} [1 - \exp(-1,356 \cdot 10^{-11} \cdot 7200)] / 226 \cdot 10^{-3} = 2,6 \cdot 10^{14}$.

А так как $N_{\text{Ra}} = N_{\text{Rn}}$, то $A = \lambda_{\text{Rn}} N_{\text{Rn}} = 2,11 \cdot 10^{-6} \cdot 2,6 \cdot 10^{14} = 5,5 \cdot 10^8 \text{ расп/с}$.

Пример 8. В предположении, что все атомы радиоактивного изотопа магния ${}_{12}^{27}\text{Mg}$ массой $m = 0,2$ мкг радиоактивны, определить начальную активность A_0 и активность A по истечении времени $t = 1$ ч.

Решение. Начальная активность изотопа $A_0 = \lambda N_0$. Если учесть, что $\lambda = \ln 2 / T$, $N_0 = \frac{m}{M} N_A$, то формула примет вид $A_0 = \frac{m}{MT} N_A \ln 2$. Проведем вычисления (см. прил. 3, табл. П3.1): $A_0 = 5,15 \cdot 10^{12}$ Бк = $= 5,15$ ТБк.

Активность изотопа:

$A = A_0 e^{-\lambda t}$, или $A = A_0 (e^{\ln 2})^{-t/T} = A_0 2^{-\frac{t}{T}}$ при $\lambda = \ln 2 / T$. Подставим числовые значения суток (см. прил. 2, табл. П2.2) и получим $A = 80,5 \cdot 10^9$ Бк = $80,5$ ГБк.

Пример 9. При прохождении через слой костной ткани толщиной 20 мм поток рентгеновского излучения спал в два раза. Определить линейный коэффициент ослабления.

Решение. Линейный коэффициент ослабления $\mu = 0,693 / x_{1/2} = = 0,693 / 0,02 = 34,7$ м $^{-1}$.

Пример 10. Вычислить толщину слоя половинного ослабления $x_{1/2}$ параллельного пучка γ -излучения для воды. Линейный коэффициент ослабления $\mu = 4,7$ м $^{-1}$.

Решение. При прохождении γ -излучения через слой вещества в результате действия фотоэффекта, эффекта Комптона и образования электрон-позитронных пар интенсивность γ -излучения экспоненциально убывает в зависимости от толщины слоя: $I = I_0 e^{-\mu x}$.

Пройдя поглощающий слой толщиной, равной толщине слоя половинного ослабления $x_{1/2}$, пучок γ -излучения будет иметь интенсивность $I = I_0 / 2 = I_0 e^{-\mu x_{1/2}}$, или $1 / 2 = e^{-\mu x_{1/2}}$ и $x_{1/2} = \ln 2 / \mu = 0,693 / 0,047 = 0,147$ м.

Слой воды толщиной 14,7 см снижает вдвое интенсивность γ -излучения.

Пример 11. Тело массой 30 кг в течение 2 ч поглотило энергию 3 Дж ионизирующего излучения. Определить поглощенную дозу и мощность поглощенной дозы в единицах СИ и во внесистемных единицах.

Решение. $D_{\text{п}} = \Delta W / \Delta m = 3 / 30 = 0,1$ Дж/кг = $0,1$ Гр, или 10 рад.

Мощность поглощенной дозы

$P_{\text{п}} = D_{\text{п}}/\Delta t = 0,1/(2 \cdot 3600) = 1,39 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/кг} = 1,39 \cdot 10^{-5} \text{ Гр/с}$, или $1,39 \cdot 10^{-3} \text{ рад/с}$.

Пример 12. Воздух, находящийся при нормальных условиях, облучается рентгеновскими лучами. Доза излучения равна одному рентгену. Найти число пар ионов, образованных излучением в объеме $V = 1 \text{ см}^3$.

Решение. Ионы, образованные в массе m воздуха экспозиционной дозой X рентгеновского излучения, переносят заряд $q = X m$. Масса воздуха $m = \frac{pVM}{RT}$, где p – давление воздуха, T – температура воздуха, M – масса одного моля, R – газовая постоянная.

Искомое число пар ионов равно $N = q/q_e$, где q_e – величина элементарного электрического заряда, равная заряду каждого иона.

Тогда $N = X \frac{pVM}{q_e RT} = 2,1 \cdot 10^9$ пар ионов.

При расчете принято: $X = 1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг сут}$ (см. прил. 3, табл. ПЗ.1), $p = 10^5 \text{ Н/м}^2$, $M = 29,1 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$, $T = 273 \text{ К}$, $V = 10^{-6} \text{ м}^3$.

Пример 13. Космическое излучение на экваторе на уровне моря образует в среднем $N = 24$ пары ионов в воздухе объемом $V = 1 \text{ см}^3$ за время $t_1 = 10 \text{ с}$. Определить экспозиционную дозу X , получаемую человеком за время $t_2 = 1 \text{ г}$.

Решение. Получаемая человеком экспозиционная доза $X = \dot{X} t_2$, где $\dot{X} = Q/(m t_1)$ – мощность экспозиционной дозы, Q – заряд ионов одного знака, образуемых излучением за время t_1 в воздухе массой $m = \rho V$, ρ – плотность воздуха, V – объем воздуха. Заряд всех ионов одного знака найдем, помножив элементарный заряд на число ионов $Q = q_e N$. С подстановкой данных формула экспозиционной дозы перепишется в виде $X = \dot{X} t_2 = Q t_2 / (m t_1) = q_e N t_2 / (\rho V t_1)$. Подставив значения величин (в СИ) и выполнив вычисления, получим $X = 9,41 \text{ мкКл/кг}$.

Пример 14. Воздух в объеме V облучается рентгеновскими лучами. Доза излучения равна 4,5 Р. Какая доля атомов, находящихся в данном объеме, будет ионизована этим излучением?

Решение. Ионы, образованные в массе m воздуха экспозиционной дозой X , рентгеновского излучения переносят заряд $q = X m$. Масса воздуха $m = \frac{pVM}{RT}$, где p – давление воздуха, T – температура воздуха, M – масса одного моля, R – газовая постоянная.

Число пар ионов $N_1 = q/q_e$, где q_e – величина элементарного электрического заряда, равная заряду каждого иона.

$$\text{Тогда } N_1 = \frac{Xm}{q_e} = \frac{XpVM}{RTq_e}; \quad N = \frac{pVN_A}{RT}.$$

Искомая доля ионизованных атомов:

$$\frac{N_1}{N} = \frac{XM}{N_A q_e} = \frac{4,5 \cdot 29,1 \cdot 10^{-3}}{3876 \cdot 6 \cdot 10^{23} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 3,52 \cdot 10^{-10}.$$

Пример 15. На расстоянии $r_1 = 40$ см от точечного источника мощность экспозиционной дозы γ -излучения $P_{\text{экс}} = 4,30$ мкА/кг. Определить интервал времени t , в котором можно находиться на расстоянии $r_2 = 6$ м от источника при предельно допустимой экспозиционной дозе $X = 5,16$ мкКл/кг. Поглощением γ -излучения в воздухе пренебречь.

Решение. Так как поглощением γ -излучения в воздухе пренебрегаем, потери мощности экспозиционной дозы могут быть из-за геометрического расхождения: $P_2 = P_1(r_1/r_2)^2 = 4,3 \cdot 10^{-6} \cdot (0,4/6)^2 = 0,0191$ мкА/кг. Искомое время $t = X_{\text{пред}}/P_2 = 5,16 \cdot 10^{-6}/(0,0191 \cdot 10^{-6}) = 270,16$ с, или 4,5 мин.

Пример 16. Определить в единицах СИ и внесистемных единицах эквивалентную дозу и мощность эквивалентной дозы для костной ткани человека, если при 1,5-минутном рентгеновском обследовании мощность экспозиционной дозы 6,1 пКл/(кг · с). Переходный коэффициент $f = 4$.

Решение. Экспозиционная доза $X = P_{\text{экс}} \Delta t = 6,1 \cdot 10^{-12} \cdot 90 = 5,5 \cdot 10^{-10}$ Кл/кг, или $2,13 \cdot 10^{-6}$ Р = 2,13 мкР. Эквивалентная доза $H = DK = fKX = 4 \cdot 1 \cdot X = 22 \cdot 10^{-10}$ Кл/кг, или $2,2 \cdot 10^{-9}$ Зв, или $2,2 \cdot 10^{-7}$ бэр. Коэффициент качества для рентгеновского излучения $K = 1$.

Мощность $P_{\text{экв}} = H/\Delta t = 22 \cdot 10^{-10}/90 = 0,24 \cdot 10^{-10}$ Зв/с, или $0,24 \cdot 10^{-8}$ бэр/с.

1.7. Задачи для практических занятий

Рентгеновское излучение

1. Найти коротковолновую границу непрерывного рентгеновского спектра для случаев, когда к рентгеновской трубке приложена разность потенциалов: 30 кВ, 40 кВ и 50 кВ. [0,413 Å, 0,310 Å, 0,248 Å].

2. Определить материал анодного зеркала рентгеновской трубки, если при напряжении 90 кВ анодом и катодом КПД трубки составил 0,1 %. Коэффициент пропорциональности $k = 1,5 \cdot 10^{-10} \text{ В}^{-1}$. [$Z = 74$, вольфрам].

3. Как можно увеличить силу тока в рентгеновской трубке, не меняя напряжения в ней? [Увеличить силу тока накала катода или напылить на поверхность вещество с меньшей работой выхода].

4. Какое наименьшее напряжение надо приложить к рентгеновской трубке, чтобы получить все линии K -серии, если в качестве материала антикатода использовать: 1) медь, 2) серебро, 3) вольфрам и 4) платину? Данные взять в прил. 1, табл. П1.2. [9 кВ, 25,3 кВ, 69 кВ, 79 кВ].

5. Найти наибольшую длину волны K -серии рентгеновских лучей в трубке с антикатодом из: молибдена, тантала, вольфрама, платины. Данные взять в прил. 1, табл. П1.2. [0,72 Å, 0,234 Å, 0,228 Å, 0,205 Å].

Радиоактивность

1. Определить массу радона с активностью 1 Ки. [6,5 мкг].

2. При нормальных условиях средний свободный пробег вылетающей из радона α -частицы равен 3,5 см (см. прил. 2, табл. П2.2). Какое количество тепла выделяет 1 Ки радона в час и за среднее время жизни? [$1,4 \cdot 10^4$ Дж].

3. Активность радона в закрытом сосуде 500 мКи. Определить изотоп радона и время, через которое активность радона в сосуде станет равной $3 \cdot 10^9$ Бк. Постоянная распада $\lambda = 0,181 \text{ сут}^{-1}$. [^{222}Rn , 10,11 сут].

4. Постоянная распада λ радиоактивного изотопа натрия, входящего в состав тканей организма человека, равна $1,28 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$. Чему равны среднее время жизни и процент распада изотопа за это время? [78125 с, 63 %].

5. Возраст древнего деревянного предмета приближенно определяется по удельной массовой активности изотопа $^{14}_6\text{C}$ в нем. Сколько лет тому назад было срублено дерево, которое пошло на изготовление предмета, если удельная массовая активность углерода в нем составляет 75 % от удельной массовой активности растущего дерева? [2379 лет].

Регистрация. Радиоактивность (баланс). Поглощение

1. Счетчик детектора альфа-, бета- и гамма-излучения фиксирует большую скорость счета. При вставке листа бумаги между радиоактивным источником и детектором скорость счета резко падает, оставаясь выше фонового. При вставке листа алюминия скорость счета практически не меняется. Определить с разъяснением вид излучения. [Сочетание альфа- и гамма-излучения].

2. Сколько ядер из одного моля радиоактивного кобальта ${}^{60}_{27}\text{Co}$ распадается за первый, второй и третий месяцы? [$6,3 \cdot 10^{21}$].

3. Количество N_0 радона помещено в пустой сосуд. Построить кривую зависимости относительного изменения количества радона N/N_0 в сосуде от времени в интервале $0 \leq t \leq 10$ сут через каждые 2 сут. По кривой найти период полураспада T .

4. В закрытой ампуле находится препарат с 1,5 г радия ${}^{226}_{88}\text{Ra}$. Определить массу m радона ${}^{222}_{86}\text{Rn}$, который накопится по истечении полупериода ($T/2$) полураспада радона? [$m = 4,8 \cdot 10^{-9}$ кг].

5. Определить число N слоев половинного ослабления, уменьшающих интенсивность I узкого пучка γ -излучения в $k = 128$ раз. [7].

6. Определить изменение интенсивности рентгеновских лучей с длиной волны $0,2 \text{ \AA}$ при прохождении слоя железа толщиной $0,15$ мм. Массовый коэффициент поглощения железом этой длины волны $\mu_m = 1,1 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$. Определить толщину слоя половинного ослабления для железа. [81 мкм].

7. На какую глубину нужно погрузить в воду источник узкого пучка γ -излучения (энергия γ -фотона $\varepsilon = 1,6$ МэВ), чтобы интенсивность I пучка, выходящего из воды, уменьшилась в $k = 1000$ раз? При решении использовать данные рис. 5. [1,15 м].

8. Объяснить принцип теневого контраста при рентгенодиагностике на примере сопоставления массовых коэффициентов поглощения кости с превалированием содержания $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ и мягких тканей и мышц с превалированием молекул воды H_2O . [$\mu_{mK}/\mu_{mTк} = 68$].

Облучение и дозиметрия

1. Тело массой 36 кг в течение 1,5 ч поглотило энергию 7,2 Дж ионизирующего излучения. Определить поглощенную дозу и мощность поглощенной дозы. [0,2 Гр, или 20 рад; $3,7 \cdot 10^{-5}$ Гр/с, или $3,7 \cdot 10^{-3}$ рад/с].

2. Определить величину поглощенной дозы $D_{\text{п}}$ излучения воздухом при нормальных условиях и энергетически эквивалентную экспозиционную дозу $X = 1$ Р. [8,8 Дж/кг].

3. У карманного дозиметра с электроемкостью $C = 2$ пФ эффективная вместимость V ионизационной камеры равна 1 см^3 . Камера содержит воздух при нормальных условиях. Дозиметр заряжен до потенциала $\varphi_1 = 150 \text{ В}$. Под действием излучения потенциал снизился до $\varphi_2 = 110 \text{ В}$. Определить экспозиционную дозу X излучения. $[62,4 \text{ мкКл/кг}]$.

4. Определить в единицах СИ и внесистемных единицах поглощенную дозу и ее мощность в костной ткани ($f = 4$) человека, если мощность экспозиционной дозы при рентгеновской томографии равна $6,1 \text{ пКл}/(\text{кг} \cdot \text{с})$ при времени процедуры $1,5 \text{ мин}$. $[22 \cdot 10^{-10} \text{ Гр}, 24,4 \cdot 10^{-12} \text{ Вт/кг}]$.

5. Под действием космических лучей за промежуток времени $\Delta t = 1 \text{ мин}$ в воздухе объемом $V = 1 \text{ см}^3$ при нормальных условиях образуется в среднем $N = 120$ пар ионов. Определить экспозиционную дозу X излучения, действию которого подвергается человек за $t = 1 \text{ сут}$. $[22 \text{ нКл/кг}]$.

6. Рентгеновская трубка создает на некотором расстоянии мощность дозы в 258 мкА/кг . Определить скорость образования пар ионов в одном грамме воздуха на этом расстоянии. $[1,6 \cdot 10^{12}]$.

7. На расстоянии $r = 1 \text{ м}$ от точечного источника мощность экспозиционной дозы γ -излучения $P_{\text{экс}} = 50 \text{ мР/мин}$. Определить минимальное расстояние от источника, на котором можно ежедневно работать по 6 ч без защиты. Предельно допустимой эквивалентной дозой считать 5 бэр/год . Поглощение γ -излучения воздухом не учитывать. $[1,84 \text{ м}]$.

8. Определить эквивалентную дозу для костной ткани человека, поглощающей α -частицы. Экспозиционная доза составила при этом величину $3 \cdot 10^{-13} \text{ Кл/кг}$. Ответ дать в единицах СИ и внесистемных единицах. Переходный коэффициент $f = 3$. $[18 \cdot 10^{-12} \text{ Кл/кг}, \text{ или } 7 \cdot 10^{-8} \text{ Зв}, \text{ или } 7 \cdot 10^{-6} \text{ бэр}]$.

9. Выразить величину мощности $P_{\text{эkv}} = 4000 \text{ мкЗв/год}$ эквивалентной дозы для рентгеновского и γ -излучений в единицах мощности экспозиционной дозы во внесистемных единицах мкР/час , принимая переходный коэффициент $f = 2$. $[883,7 \text{ мкР/час}]$.

10. При получении организмом дозы 10 Гр ионизирующей радиации тепловой эквивалент поглощенной энергии позволил бы нагреть 1 г живой ткани на $2 \cdot 10^{-3}$ градуса. Определить среднюю удельную теплоемкость живой ткани. $[5 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})]$.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АКУСТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В МЕДИЦИНЕ

2.1. Акустические излучения

Природа и физические характеристики звука. Звуки делят на тоны, шумы и звуковые удары. Гармоническому колебанию камертона соответствует *простой (чистый)* тон; *ангармоническому* колебанию музыкальных инструментов и аппарата речи – *сложный* тон, который может быть разложен на простые. Наименьшая частота ν_0 разложения соответствует *основному тону*, остальные гармоники (*обертонны*) имеют частоты $2\nu_0$, $3\nu_0$ и т. д. Набор частот с указанием их относительной интенсивности называется *акустическим спектром*. Спектр сложного тона линейчатый. Слышимость тона зависит от звукового давления и от частоты. Здоровый человек различает частоты в диапазоне от 20 Гц до 20 кГц.

Шум – звук неповторяющейся временной зависимости. Акустический спектр шума – сплошной. *Звуковой удар* – кратковременное звуковое воздействие: хлопок, взрыв и т. п.

Рассмотрим плоскую звуковую волну в среде. Выделим объем V в форме прямоугольного параллелепипеда (рис. 7) с площадью оснований S и длиной ребра dl так, что вектор скорости распространения волны $v = dl/dt$. Энергия W волны проходит через площадку S за 1 с, организуя поток звуковой энергии (звуковую мощность) $P = dW/dt$. Механические продольные колебания частиц среды характеризуются объемной плотностью энергии $\omega_p = dW/dV = dW/(Sdl)$. Тогда

$$P = \omega_p S v. \quad (6)$$

Поток энергии волны, отнесенный к площади, нормальной (S_{\perp}) направлению распространения волны, называют *плотностью потока энергии волны*, или *интенсивностью*: $I = P/S_{\perp} = \omega_p v$, Вт/м². В векторной форме записи получаем *вектор Умова*

$$\vec{I} = \omega_p \vec{v}. \quad (7)$$

Для звуковой волны максимальная скорость колебаний отдельной молекулы воздуха составляет несколько сантиметров в секунду,

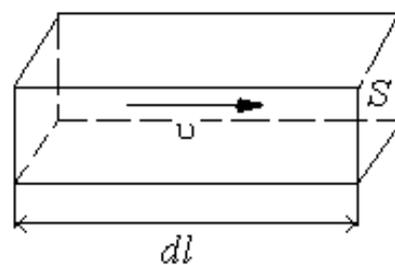


Рис. 7

что соответствует малым возмущениям среды и значительно меньше скорости волны (около 330 м/с). При больших возмущениях (сверхзвуковое движение тел, мощный электрический разряд) скорость колеблющихся частиц среды может стать сравнимой со скоростью звука.

Энергия, переносимая упругой волной, складывается из потенциальной энергии деформации и кинетической энергии колеблющихся частиц. Если в формулу полной механической энергии колебательной системы вместо массы отдельной частицы подставить плотность ρ вещества, то получим

$$\omega_p = \rho A^2 \omega_0^2 / 2. \quad (8)$$

Подставляя (8) в (7), получаем

$$\vec{I} = \frac{\rho A^2 \omega_0^2}{2} \vec{v}. \quad (9)$$

Для плоской волны интенсивность связана со звуковым давлением соотношением $I = p^2 / 2\rho v$, где ρ – плотность среды, v – скорость звука.

Нормальное человеческое ухо воспринимает диапазон интенсивностей звука на частоте 1 кГц от $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м² или $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па (порог слышимости) до $I_{\max} = 10$ Вт/м² или $p_{\max} = 60$ Па (порог болевого ощущения). Отношение этих интенсивностей 10^{13} , поэтому используют логарифмическую шкалу с единицей измерения 1 бел (Б)

$$L_{\text{Б}} = \lg(I / I_0), \quad (10)$$

а для звукового давления $L_{\text{Б}} = 2\lg(p / p_0)$.

При использовании децибел (дБ):

$$L_{\text{дБ}} = 10\lg(I / I_0) \text{ и } L_{\text{дБ}} = 20\lg(p / p_0). \quad (11)$$

Это объективные характеристики уровней звука, но звук – объект слуховых ощущений, и поэтому оценивается человеком субъективно.

Характеристики слуховых ощущений. *Высота* звука – субъективная характеристика частоты основного тона; *тембр* определен спектральным составом сложного тона; *громкость* – субъективная оценка уровня слухового ощущения, и может быть оценена сравнением слухового ощущения от двух источников с известными характеристиками.

В основе шкалы уровней громкости лежит *психофизический закон Вебера – Фехнера*: если увеличивать раздражение в геометрической прогрессии, то ощущение этого раздражения возрастает в арифметической прогрессии. Это означает, что если интенсивность звука принимает ряд последовательных значений: aI_0, a^2I_0, a^3I_0 ($a > 1$), то им будут соответствовать ощущения громкости: $E_0, 2E_0, 3E_0$. Отсюда следует, что громкость звука пропорциональна логарифму интенсивности звука. Если действуют два звуковых раздражения с интенсивностями I и I_0 порога слышимости, то на основании закона Вебера – Фехнера громкость

$$E = k \lg(I/I_0). \quad (12)$$

Сильная зависимость k от частоты и интенсивности звука не позволяет измерение громкости свести к простому использованию формулы (12). Условно считают, что на частоте 1 кГц шкалы громкости и интенсивности звука полностью совпадают, и по аналогии с формой (11):

$$E_{\text{ф}} = 10 \lg(I/I_0). \quad (13)$$

Для отличия в шкале громкости децибел называют «фон».

Громкость звуков на иных частотах оценивают, сравнивая со звуком частоты 1 кГц. Для этого с помощью звукового генератора создают звук частотой 1 кГц и меняют интенсивность звука до тех пор, пока не возникнет слуховое ощущение громкости исследуемого звука.

Волновое сопротивление. Отражение звуковых волн. Если плоская звуковая волна падает нормально к границе раздела сред, то коэффициентом проникновения называют отношение интенсивности I_2 волны во второй среде к интенсивности I_1 в первой среде:

$$\tau = I_2 / I_1. \quad (14)$$

Коэффициент проникновения звука рассчитывают по формуле Релея

$$\tau = 4 \frac{v_1 \rho_1 / (v_2 \rho_2)}{[v_1 \rho_1 / (v_2 \rho_2) + 1]^2}, \quad (15)$$

где $\rho v = p/v_{\text{ср}}$ – *удельный акустический импеданс*, или волновое сопротивление, p – звуковое давление, $v_{\text{ср}}$ – скорость частиц среды.

При значении $\tau_{\text{max}} = 1$ выполняется $v_1 \rho_1 = v_2 \rho_2$, и звуковая волна (при нормальном падении) пройдет границу раздела без отражения. Если $v_2 \rho_2 \gg v_1 \rho_1$, то $v_1 \rho_1 / (v_2 \rho_2) \ll 1$, и вместо формы (15) получим

$$\tau \approx 4v_1 \rho_1 / (v_2 \rho_2). \quad (16)$$

Используем форму (16) для оценки коэффициента проникновения звуковой волны из воздуха ($\rho v = 440, \text{ кг} \cdot \text{ м}^{-2} \cdot \text{ с}^{-1}$) в бетон ($\rho v = 4\,800\,000, \text{ кг} \cdot \text{ м}^{-2} \cdot \text{ с}^{-1}$) и в воду ($\rho v = 1\,440\,000, \text{ кг} \cdot \text{ м}^{-2} \cdot \text{ с}^{-1}$) (прил. 4, табл. П4.1):

$$\tau = \frac{4 \cdot 440}{4800000} 100 \% = 0,037 \%, \quad \tau = \frac{4 \cdot 440}{1440000} 100 \% = 0,122 \%$$

Видим, что проходит только малая часть энергии звуковой волны.

Реверберация – процесс затухания звука в закрытых помещениях посредством большого числа отражений после выключения источника. При постройке аудиторий и залов указывают оптимальное время реверберации. Время реверберации заполненного (пустого) зала Большого театра составляет 1,55 с (2,06 с).

Ультразвук. Частотный диапазон ультразвуков $2 \cdot 10^4 - 10^9$ Гц. Диапазон ультразвуков $10^9 - 10^{13}$ Гц называют гиперзвуковым. Из-за малой длины волны характер его распространения определяется межмолекулярной структурой среды, т. е. зависит от агрегатного состояния. Жидкости и твердые тела – хорошие проводники ультразвука со слабым затуханием. Газы (воздух) – плохие проводники ультразвука.

Для генерации ультразвуков используют электромеханические УЗ излучатели, работающие на явлении обратного пьезоэлектрического эффекта. Основная часть такого излучателя – вещество с пьезоэлектрическими свойствами (кварц, сегнетова соль). Если к нему приложить переменное электрическое напряжение, то пластина начинает вибрировать, излучая механическую волну резонансной частоты. Для пластин толщиной 1 мм резонанс возникает для сегнетовой соли 1,5 МГц, титаната бария 2,75 МГц и кварца на частоте 2,87 МГц.

Инфразвук. Частотный диапазон инфразвуков (0,01 – 20) Гц. Искусственные источники инфразвука: транспорт, самолеты, корабли, кондиционеры и устройства, которые посредством движения больших поверхностей или выталкивания газов возбуждают колебания воздуха. Самые сильные источники инфразвуков – атомные и термоядерные взрывы.

Естественные источники инфразвука на поверхности Земли: ветровая турбулентность, водопады, поверхности больших бассейнов и сейсмические явления. Естественный инфразвук образуется там же, где и звуки слышимых частот, формируя нижнюю границу спектра, но имеет малые амплитудные значения и практически не воспринимается человеком.

В атмосфере источниками инфразвука являются метеорологические и вулканические явления, атмосферная турбулентность, мощные восходящие потоки воздуха от больших пожаров, ветровые потоки, обтекающие горные системы, входящие в атмосферу метеориты и разряды молний.

Ионосфера и верхние слои атмосферы из-за слабого затухания инфразвука постоянно подвержены его воздействию. Суммарный поток инфразвуковой энергии, идущей от земной поверхности, имеет порядок сотен миллионов киловатт.

Первичный механизм действия инфразвука на организм имеет резонансную природу. Частота собственных колебаний тела человека: в положении лежа – (3 – 4) Гц, стоя – (5 – 12) Гц. Частота собственных колебаний грудной клетки – (5 – 8) Гц, брюшной полости – (3 – 4) Гц, кишечника – 16 Гц, головы – (20 – 30) Гц, глазного яблока – (60 – 90) Гц.

Инфразвук всегда оказывает неблагоприятное влияние на функциональное состояние систем организма: усталость, головная боль, сонливость, раздражение, аритмия.

Звуковые методы исследований в медицине. *Аускультация* (выслушивание) известна со II в. до н.э. Для аускультации используют стетоскоп или фонендоскоп.

При *перкуссии* выслушивают звучание частей тела. При простукивании поверхности тела из широкого диапазона колебаний усиливаются только совпадающие с собственными частотами объекта. По высоте и тембру тонов определяют топографию и состояние органов.

Локационные методы УЗ диагностики:

- *эхо-энцефалография* – определение опухолей и отека головного мозга;
- *ультразвуковая кардиография* – измерение размеров сердца в динамике;
- *ультразвуковая локация* – определение размеров глазных сред.

С помощью эффекта Доплера определяют динамику сердечных клапанов и скорость кровотока.

Первичным механизмом ультразвуковой физиотерапии являются механическое и тепловое действия на ткань. Для терапевтических целей применяют ультразвук частотой 800 кГц с интенсивностью около 1 Вт/см². Сжатия и разрежения, создаваемые ультразвуком, приводят к образованию разрывов сплошности жидкости – *кавитаций*. Кавитации существуют недолго – быстро схлопываются, при этом локально выделяется энергия с разогревом вещества и диссоциацией, а иногда и ионизацией молекул.

2.2. Основные термины, определения и формулы

Эффект Доплера. Наблюдатель воспринимает частоту ν' :

1. При приближении со скоростью v_n к неподвижному относительно среды источнику волны частотой ν : $\nu'_1 = \frac{v + v_n}{v} \nu$.

2. При приближении со скоростью v_n источника к неподвижному относительно среды наблюдателю: $\nu'_2 = \nu/\lambda'_2 = \nu\nu/(v - v_n)$.

3. В общем виде при совместном и одновременном сближении или удалении наблюдателя и источника волны $\nu' = \frac{v \pm v_n}{v \pm v_n} \nu$. При уда-

лении источника и наблюдателя знаки у v_n и v_n в уравнениях меняются: «верхние» знаки в формуле работают при сближении источника и приемника волн, а «нижние» – при их удалении. Здесь v – скорость распространения звуковой волны в среде.

Пусть генератор ультразвука совмещен с приемником в одной технической системе, неподвижной относительно среды. В среде со скоростью v_0 движется объект. Генератор излучает ультразвук с частотой ν_r . Движущимся объектом (как наблюдателем) воспринимается частота $\nu_1 = \nu_r(v + v_n)/v$. Ультразвуковая волна с частотой ν_1 отражается движущимся объектом в сторону технической системы. Неподвижный приемник воспринимает другую частоту $\nu_{пр} = \nu/\lambda'_2 = \nu\nu_1/(v - v_n)$, или $\nu_{пр} = \nu_r(v + v_n)/(v - v_n)$.

Разность частот $\nu_d = \nu_{пр} - \nu_r = 2\nu_0\nu_r/(v - v_0)$ называют *доплеровским сдвигом частоты*. При $v \gg v_0$ выполняется $\nu_d = 2\nu_0\nu_r/v$, где $v_0 = v_n = v_n$.

Характеристики излучения и восприятия звуковых волн. Интенсивность (плотность потока энергии) звуковой волны $I = \omega_p v$,

где $\omega_p = \rho A^2 \omega_0^2 / 2$ – объемная плотность энергии колебательного движения, v – скорость звуковой волны в среде плотностью ρ .

Связь интенсивности I и звукового давления p для плоской волны $I = p^2 / 2\rho v$, где ρv – удельное акустическое сопротивление вещества среды (см. прил. 4, табл. П4.1).

Коэффициент отражения звука на границе сред (формула Рэлея)

$$r = \left(\frac{\rho_1 v_1 - \rho_2 v_2}{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2} \right)^2.$$

Коэффициент проникновения звука из среды 1 в среду 2 на границе раздела $\tau = 1 - r$.

Уровень L_B интенсивности звука I относительно порога слышимости I_0 , выраженный в белах (Б):

$$L_B = \lg(I / I_0), \quad I = 10^{L_B} \cdot I_0,$$

или в децибелах (дБ): $L_{дБ} = 10 \lg(I / I_0), \quad I = 10^{L_{дБ}/10} \cdot I_0$.

$$\text{Откуда следует } \lg \frac{I}{I_0} = \lg \frac{p^2}{p_0^2} = 2 \lg \frac{p}{p_0}.$$

Психофизический закон Вебера – Фехнера $E = k \lg \left(\frac{I}{I_0} \right)$, фон,

где k – коэффициент, зависящий от частоты и интенсивности звуковой волны.

При частоте гармонической волны 1 кГц шкалы численные значения громкости (в единицах «фон») и уровня интенсивности звука (в дБ) полагаются совпадающими ($k = 10$) и $E_{\text{Ф}} = L_{\text{дБ}} = 10 \lg(I / I_0)$.

Соответствие между громкостью и интенсивностью звука на разных частотах задается кривыми одинаковой громкости (рис. 8), построенными по средним данным людей с нормальным слухом. Чувствительность человеческого уха растет при приближении слева и справа к частотному интервалу 2500 – 3000 Гц.

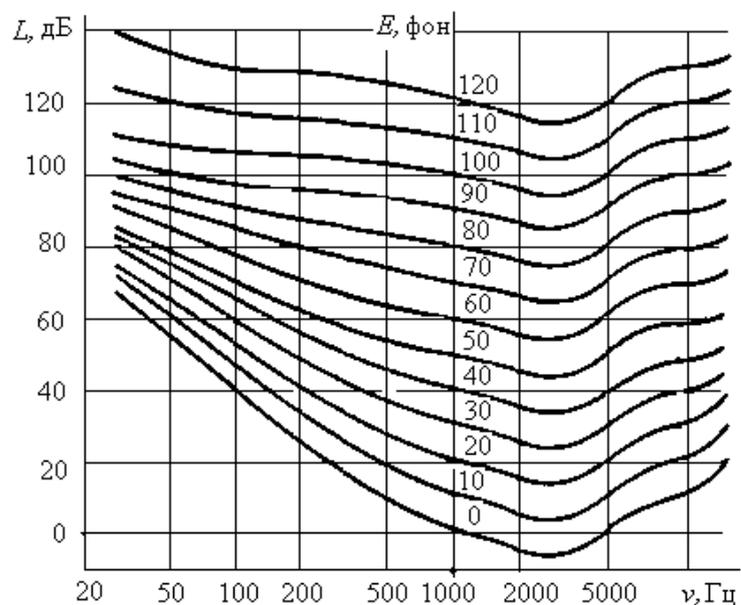


Рис. 8

Чувствительность человеческого уха растет при приближении слева и справа к частотному интервалу 2500 – 3000 Гц.

Каждая промежуточная кривая отвечает одинаковой громкости, но разной интенсивности звука для разных частот. По отдельной кривой равной громкости определяют интенсивности, вызывающие при определенных частотах ощущение этой громкости. Используя совокупность кривых равной громкости, можно найти для разных частот громкости, соответствующие определенной интенсивности. Например, пусть интенсивность звука частотой 100 Гц равна 60 дБ. Какова громкость этого звука? На рис. 8 находим точку с координатами (100 Гц, 60 дБ). Она оказывается принадлежащей кривой уровня громкости 30 фон.

Нижняя кривая соответствует порогу слышимости: для всех частот $E_{\text{ф}} = 0$, для 1 кГц интенсивность звука $I_0 = 1 \text{ пВт/м}^2$; верхняя кривая соответствует порогу болевого ощущения (прил. 4, табл. П4.2).

Скорость звука в газах и жидкостях

$$v_0 = (k_s \rho_0)^{-1/2},$$

где ρ_0 – невозмущенная плотность среды, кг/м^3 ; k_s – адиабатный коэффициент сжатия, Па^{-1} . В газах $k_s = (\gamma p_0)^{-1}$; в жидкостях k_s определяется эмпирически.

Скорость распространения акустических колебаний в газах

$$v = \sqrt{\frac{1}{k_s \rho_0}} = \sqrt{\frac{\gamma p_0}{\rho_0}} = \sqrt{\frac{\gamma R T}{M}},$$

где M – молярная масса газа, T – абсолютная температура газа, R – газовая постоянная, $\gamma = c_p / c_v$, c_p – теплоемкость газа при постоянном давлении, c_v – теплоемкость газа при постоянном объеме. Экспериментальные величины скорости звука при нормальных условиях в разных веществах приведены в табл. П4.3 (см. прил. 4).

Скорость распространения акустических колебаний в упругой среде

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

где E – модуль Юнга, ρ – плотность среды (см. прил. 4, табл. П4.3, П4.4).

Частота основного тона струны

$$v = \frac{\sqrt{F}}{2l\sqrt{\rho S}},$$

где l – длина струны, F – сила натяжения струны, S – площадь поперечного сечения струны, ρ – плотность материала струны.

2.3. Примеры решения задач

Пример 1. Оценить величину скорости звука при температурах 0 и 27 °С для разных приближений состава воздушной среды: а) одноатомного азота, б) двухатомного азота, в) смеси двух атомных газов ($N_2 - 80\%$, $O_2 - 20\%$), г) реального влажного воздуха (приближение трехатомного газа). Составить таблицу. Провести параметрический анализ.

Решение. Скорость распространения акустических колебаний в газах $v = \sqrt{\frac{1}{k_s \rho_0}} = \sqrt{\frac{\gamma p_0}{\rho_0}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$, где M – молярная масса газа, T – абсолютная температура газа, R – газовая постоянная, $\gamma = c_p/c_v$, c_p – теплоемкость газа при постоянном давлении, c_v – теплоемкость газа при постоянном объеме.

а) $i = 3$, $\gamma = (i + 2)/2 = 1,66$, $A_N = 14 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, $T = 273$ К.

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{A}} = \sqrt{\frac{1,66 \cdot 8,31 \cdot 273}{14 \cdot 10^{-3}}} \approx 519 \text{ м/с}, \quad v = \sqrt{\frac{1,66 \cdot 8,31 \cdot 300}{14 \cdot 10^{-3}}} \approx 544 \text{ м/с}.$$

Аналогично оцениваются величины скоростей других заданных приближений. Результаты занесены в таблицу примера (табл. 1).

Табл. 1. Результаты расчета (пример 1)

№	T К	A (М), г/моль	i	γ	v , м/с
а)	273	$14 \cdot 10^{-3}$	3	1,66	519
	300	$14 \cdot 10^{-3}$	3	1,66	544
б)	273	$28 \cdot 10^{-3}$	5	1,4	337
	300	$28 \cdot 10^{-3}$	5	1,4	353
в)	273	$29,1 \cdot 10^{-3}$	5	1,4	330
	300	$29,1 \cdot 10^{-3}$	5	1,4	346
г)	273	$29,1 \cdot 10^{-3}$	6	1,33	322
	300	$29,1 \cdot 10^{-3}$	6	1,33	338

Для заданной газовой системы скорость звука зависит только от температуры и растет с ее ростом. С ростом числа атомов и усложнением молекул газовой среды скорость звука в ней падает.

Пример 2. Человеческое ухо воспринимает звуковые волны в интервале частот от $\nu_1 = 20$ Гц до $\nu_2 = 20$ кГц (см. рис. 8). Определить соответствующий диапазон длин волн в воздухе и воде. Скорости звука в воздухе и воде равны $v_1 = 340$ м/с и $v_2 = 1400$ м/с соответственно.

Решение. В принятом частотном интервале границы длинноволнового диапазона в воздухе

$$\lambda_1 = \frac{v_1}{\nu_1} = \frac{340}{20} = 17 \text{ м}, \quad \lambda_2 = \frac{v_2}{\nu_2} = \frac{340}{20 \cdot 10^3} = 17 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Диапазон длин волн $\lambda_2 \div \lambda_1 \cong (0,017 \div 17) \text{ м}$.

Для воды $\lambda_1 = v_1/\nu_1 = 1400/20 = 70 \text{ м}$, $\lambda_2 = v_2/\nu_2 = 1400 / 20 \cdot 10^3 = 0,07 \text{ м}$.

Пример 3. Частота и скорость звуковой волны от камертона равны 200 Гц и 330 м/с соответственно. Определить разность фаз $\Delta\varphi$ колебаний в точках, находящихся на одной прямой с камертоном, на расстояниях 15 и 20 м.

Решение.

$$\Delta\varphi = \omega t - \varphi_1 - (\omega t - \varphi_2) = \frac{2\pi\nu}{v}(x_2 - x_1) = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 200}{330}(20 - 15) = 19 \text{ рад}.$$

Пример 4. Определить разность фаз в пульсовой волне между двумя точками артерии, расположенными на расстоянии $\Delta x = 20 \text{ см}$. Скорость пульсовой волны принять равной $v = 10 \text{ м/с}$, а колебания сердца – гармоническими с частотой $\nu = 1,2 \text{ Гц}$.

Решение.

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \omega t - \frac{\omega x_1}{v} - \omega t + \frac{\omega x_2}{v} = \frac{\omega \Delta x}{v} = \frac{2\pi\nu \Delta x}{v} = \frac{2\pi \cdot 1,2 \cdot 0,2}{10} = 0,048 \pi.$$

Пример 5. Звуковая волна проходит через слуховой проход и частично отражается от барабанной перепонки. В результате интерференции падающей и отраженной волн может возникнуть акустический резонанс. Это возникает тогда, когда длина волны в четыре раза больше длины наружного слухового прохода. При длине слухового прохода у человека $l = 2,3 \text{ см}$ определить частоту акустического резонанса.

Решение. По определению частота, скорость и длина волны связаны соотношением $\nu = \frac{v}{\lambda}$. Тогда $\nu_p = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{4l} = \frac{3,3 \cdot 10^2}{4 \cdot 2,3 \cdot 10^{-2}} = 3,6 \text{ кГц}$.

Пример 6. В лаборатории уровень интенсивности шума достигал 80 дБ. Для уменьшения шума стены обили звукопоглощающим материалом, уменьшающим интенсивность звука в 1500 раз. Оценить уровень интенсивности шума в лаборатории после обивки.

Решение. Уровень интенсивности звука в децибелах определяется соотношением $L = 10 \lg(I / I_0)$, где $I_0 = 1 \text{ Вт/м}^2$ – условный нулевой уровень интенсивности.

При изменении интенсивности звука изменение уровня интенсивности звука $\Delta L = L_2 - L_1 = 10 \lg \frac{I_2}{I_0} - 10 \lg \frac{I_1}{I_0} = 10 \left(\lg \frac{I_2}{I_0} - \lg \frac{I_1}{I_0} \right) =$
 $= 10(\lg I_2 - \lg I_0 - \lg I_1 + \lg I_0) = 10(\lg I_2 - \lg I_1) = 10 \lg \frac{I_2}{I_1}$.

Отсюда $L_2 = L_1 + 10 \lg \frac{I_2}{I_1}$. Подставим числовые значения

$$L_2 = 80 + 10 \lg \frac{1}{1500} = 80 - 10 \lg 1500 = 80 - 10(\lg 1,5 + 3) = 80 - 10 \cdot 3,176 =$$

$$= 48,24 \text{ дБ.}$$

Пример 7. Два звука частотой $\nu = 1 \text{ кГц}$ отличаются по громкости на 1 фон. Во сколько раз отличаются их интенсивности?

Решение. Уровень интенсивности звука в децибелах определяется соотношением $L = 10 \lg \frac{I}{I_0}$. Для гармонической волны с частотой 1 кГц по величине L и E совпадают, тогда $E = 10 \lg(I/I_0)$ и для двух случаев:

$$\begin{cases} E_1 = 10 \lg(I_1 / I_0) \\ E_2 = 10 \lg(I_2 / I_0) \end{cases}, \text{ и решая } \Delta E = 10 \lg[I_1/I_2], \text{ откуда } I_1/I_2 = 10^{0,1} = 1,25.$$

Пример 8. Уровень громкости звука частоты $\nu = 5000 \text{ Гц}$ равен $E = 50$ фон. Найти интенсивность этого звука.

Решение. По кривым одинаковой громкости (см. рис. 8) $L = 50 \text{ дБ}$. Тогда $L = 10 \lg(I/I_0)$; $50 = 10 \lg(I/I_0)$; $I/I_0 = 10^5$, $I = 10^5 \cdot 10^{-12} = 10^{-7} \text{ Вт/м}^2$.

Пример 9. Определить величину громкости и амплитуду звукового давления, если интенсивность звуковой волны в воздухе была равна 10^{-6} Вт/м^2 . Волну считать гармонической с частотой 1 кГц.

Решение. Так как интенсивность звуковой волны $I = p^2 / 2\rho\nu$, то $p = \sqrt{2I\rho\nu} = \sqrt{2 \cdot 10^{-6} \cdot 427} = 0,029 \text{ Н/м}^2 = 29 \text{ мПа}$.

А для гармонической волны с частотой 1 кГц по величине L и E совпадают, тогда $E = 10 \lg(I_1/I_0) = 10 \lg(10^{-6}/10^{-12}) = 60 \text{ фон}$.

Пример 10. На границу раздела между водой 1 и воздухом 2 падает плоская звуковая волна с интенсивностью $0,5 \text{ Вт/м}^2$. Определить интенсивность прошедшего в воду звука.

Решение. Интенсивность звука в воде равна интенсивности звука в воздухе, умноженной на коэффициент τ проникновения звука из воздуха в воду, равный $\tau = 1 - r$, где r – коэффициент отражения на границе раздела двух сред, вычисляемый по формуле Рэлея

$$r = \left(\frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} \right)^2 = \left(\frac{1 - \frac{\rho_1 v_1}{\rho_2 v_2}}{1 + \frac{\rho_1 v_1}{\rho_2 v_2}} \right)^2,$$

где ρ и v – соответственно плотность среды и скорость звука в этой среде, а произведение ρv – акустическое сопротивление среды.

Подставим числовые значения:

$$r = \left(\frac{1 - \frac{1,29 \cdot 331}{1497 \cdot 10^3}}{1 + \frac{1,29 \cdot 331}{1497 \cdot 10^3}} \right)^2 = \left(\frac{1 - 0,285 \cdot 10^{-3}}{1 + 0,285 \cdot 10^{-3}} \right)^2.$$

При $x = 0,285 \cdot 10^{-3} \ll 1$ воспользуемся правилом приближенных вычислений: $\frac{1}{1+x} \cong 1-x$ и $\frac{1-x}{1+x} \cong (1-x)^2 \cong 1-2x$; $\left(\frac{1-x}{1+x} \right)^2 \cong (1-2x)^2 \cong 1-4x$.

Коэффициент отражения $r = 0,998$. При коэффициенте проникновения $\tau = 1 - r = 1,14 \cdot 10^{-3}$, а интенсивность звука, прошедшего в воду: $I_2 = I_1 \tau = 0,5 \cdot 1,14 \cdot 10^{-3} = 0,57 \text{ мВт/м}^2$.

Пример 11. Определить скорость распространения звука в алюминии.

Решение. Скорость распространения звука в алюминии определяется соотношением $v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$.

Данные по плотности и модулю Юнга для алюминия взяты из табл. П4.3 (см. прил. 4) и равны 69 ГПа и $2,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ соответственно. Подставив эти данные в указанное соотношение, вычислим величину скорости распространения звука в алюминии:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{0,69 \cdot 10^{11}}{2,7 \cdot 10^3}} = 5,06 \text{ км/с}.$$

2.4. Задачи для практических занятий

Эффект Доплера. Характеристики излучения и восприятия звуковых волн

1. Одинаковой ли высоты будет казаться звук в случаях: *а)* источник звука движется навстречу неподвижному наблюдателю со скоростью $v_{И} = 40$ м/с; *б)* наблюдатель движется навстречу неподвижному источнику с той же скоростью; *в)* в каком случае при $v_{И} = v_{Н}$ они могут быть одинаковыми; *г)* для какого значения $v_{И}$ они станут одинаковыми, если $v_{Н} = 40$ м/с? Частота источника звука $\nu = 600$ Гц. Скорость звука в среде 331 м/с. [*а)* 683 Гц, *б)* 673 Гц, *в)* $v_{И} = v_{Н} = 0$; *г)* $v_{И} = 35,7$ м/с].

2. Две машины движутся навстречу со скоростями $v_1 = 20$ м/с и $v_2 = 10$ м/с. Первая машина подает сигнал с частотой $\nu_1 = 800$ Гц. Какой частоты сигнал услышит водитель второй машины: *а)* до встречи машин; *б)* после встречи машин? Температура воздуха 15°C. [*а)* 877 Гц, *б)* 732 Гц].

3. Ультразвуковая волна с частотой колебаний 1 МГц отражается от поверхности клапана сердца, движущегося навстречу распространению волны со скоростью 6 см/с. Определить изменение частоты колебаний в отраженной волне, вызванное эффектом Доплера. [39 Гц].

4. Определить скорость эритроцитов, движущихся с потоком крови в сонной артерии, если доплеровская частота при отражении ультразвука от эритроцитов оказалась 2,997 МГц. Частота ультразвука, падающего под углом 60° к оси артерии равна 3 МГц. Необходимые данные взять в прил. 4, табл. П4.3. [0,75 м/с].

5. Определить скорость движения стенки артерии, если частота ультразвука 1,2 МГц, а сдвиг частоты за счет доплер-эффекта составил 3,0 Гц. Необходимые данные взять в прил. 4, табл. П4.3. [1,9 мм/с].

6. Уровни интенсивности звуков с частотами $\nu_1 = 100$ Гц и $\nu_2 = 3000$ Гц равны $L = 50$ дБ. Определить уровни громкости этих звуков. [По кривым одинаковой громкости: 15 фон, 55 фон].

7. При разговоре студентки уровень интенсивности шума 50 дБ. Определить уровень интенсивности шума разговора 9 студенток. [60 дБ].

8. Шуму на оживленной улице соответствует уровень громкости звука $E_1 = 70$ фон, крику $E_2 = 80$ фон. Определить уровень громкости звука при сложении крика и шума улицы при частоте, равной $\nu = 1$ кГц. [80,41 фон].

9. Оценить скорость распространения звука в серебре. [7,05 км/с].

3. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ БИОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТОБИОЛОГИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

3.1. Физические основы электрофизиологии

Биоэлектрогенез. Электрические свойства биологических тканей и жидкостей. Лунд в начале XIX в. предположил, что природа электрической полярности многоклеточного организма определена полярностью составляющих его клеток и их электрическим взаимодействием. Так была сформулирована гипотеза биоэлектрической системы регуляции (БСР) управления жизнедеятельностью многоклеточного организма.

Плазматическая мембрана клетки всегда поляризована: ее наружная сторона заряжена положительно, а внутренняя – отрицательно. При мембранном потенциале до 0,1 В и средней толщине 10 нм напряженность электрического поля мембраны равна 10 В/мкм. Такие электрические поля складывают своеобразную матрицу общего электрического поля, внутри которой происходит системное развитие тканей и органов.

В 1964 г. английский кибернетик Бир сформулировал два необходимых условия принципиальной возможности управления многокомпонентной системой посредством одного управляющего параметра:

1. Управляющий параметр должен содержать в себе полную информацию об управляемой им системе, а для этого – активно функционировать в каждом элементе управляемой системы.

2. Резкое изменение параметра индуцирует в любой части управляемой системы фазовый переход на иной уровень функционирования.

Оба необходимых условия функционирования однопараметрической системы регуляции выполняются, если роль управляющего параметра играет средний мембранный потенциал клетки. Мембранный потенциал клетки функционирует в каждом элементе многоклеточного организма.

Макроскопические участки ткани в форме большого числа плотно упакованных клеток рассматриваются с позиций электродинамики как непрерывная среда. Токи биоэлектрических генераторов растекаются в неоднородном по пассивным электрическим характе-

ристикам теле. По значению удельной электрической проводимости ткани и органы сильно отличаются: от 10^{-7} См/м костной ткани, 0,05 – 0,95 См/м разных отделов сердца до 1,5 См/м для сыворотки крови и спинномозговой жидкости.

Первичное действие постоянного тока на ткани организма. Под влиянием электрического поля ионы, имея разные коэффициенты амбиполярной диффузии, движутся с разными векторами скоростей и скапливаются около клеточных мембран, образуя встречное *поляризационное* электрическое поле (прил. 5).

Действие постоянного тока на организм зависит от силы тока и электрических свойств кожи и тканей. Влага и пот уменьшают сопротивление, что даже при малом напряжении вызывает значительный ток. Постоянный ток при напряжении 60 – 80 В и предельно допустимой плотностью 0,1 мА/см² используют как лечебный метод физиотерапии – гальванизацию. Продукты электролиза, содержащегося в тканях раствора поваренной соли, вызывают прижигание, поэтому между электродами из листового станиоля толщиной 0,3 – 0,5 мм и кожей помещают влажные гидрофильные прокладки. Так же поступают при электрофорезе лекарственных веществ через кожу и слизистые оболочки, но прокладку активного электрода смачивают раствором лекарственного вещества. Гальванизацию и электрофорез лекарственных веществ проводят погружением конечностей пациента в жидкостные электроды – ванны.

Воздействие на ткани переменным электрическим полем. В физиотерапии используют электрические поля ультравысокой частоты (*УВЧ-терапия*). Для оценки эффективности действия поля УВЧ определяют выделяющееся в проводниках и диэлектриках количество теплоты.

Поместим проводящее электрический ток тело в переменное электрическое поле конденсатора без касания электродов. Поэтому количество теплоты, выделяющееся за 1 с в 1 м³ ткани, целесообразно выразить не через плотность тока, а через напряженность E электрического поля в проводящем теле, используя форму закона Джоуля – Ленца $q = E^2/\rho$.

В тканях, помещенных в переменное электрическое поле, возникают токи смещения и токи проводимости. Поэтому рассмотрим теперь диэлектрик с относительной диэлектрической проницаемо-

стью ϵ_r , находящийся в переменном электрическом поле. При разности фаз φ между силой тока и напряжением расчетное среднее значение мощности в цепи переменного тока

$$P = \left(\frac{U_{\max} I_{\max}}{2}\right) \cos\varphi = U_{\text{эф}} I_{\text{эф}} \cos\varphi.$$

Применяя эту формулу только к конденсатору, при $\varphi = \pi/2$ получаем $P = 0$. Мощность в конденсаторе не поглощается и ток смещения — полностью реактивный. В реальном диэлектрике небольшой ток проводимости и периодическое изменение поляризации вызывают небольшое поглощение подводимой электрической мощности, диэлек-

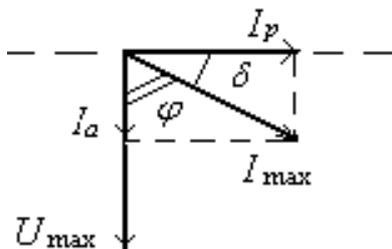


Рис. 9

трик греется, на что расходуется часть энергии переменного электрического поля, т. е. имеют место диэлектрические потери. На токовой диаграмме (рис. 9) показано, что при наличии потерь в диэлектрике между силой тока и напряжением сдвиг по фазе $\varphi \neq \pi/2$.

Представим вектор тока I реактивной I_p и активной I_a составляющими. Реактивная составляющая сдвинута по фазе относительно напряжения U на $\pi/2$ и не вызывает диэлектрических потерь, активная составляющая направлена вдоль вектора напряжения и обуславливает диэлектрические потери. Угол δ между I и I_p называют *углом диэлектрических потерь* (см. рис. 9). Чем больше активная составляющая силы тока, тем больше тангенс угла диэлектрических потерь: $I_a = I_p \operatorname{tg}\delta$. При этом $I_a = I_{\max} \cos\varphi$. Сопоставляя две эти формы записи, имеем

$$I_{\max} \cos\varphi = I_p \operatorname{tg}\delta. \quad (17)$$

Преобразуем с учетом (17) расчетную формулу для мощности

$$P = \left(\frac{U_{\max}}{2}\right) I_p \operatorname{tg}\delta. \quad (18)$$

Амплитуда реактивной составляющей силы тока I_p фактически соответствует амплитуде силы тока идеального конденсатора, поэтому

$$I_p = U_{\max} C \omega. \quad (19)$$

Подставляя (19) в (18), раскрывая выражения для емкости плоского конденсатора и эффективного значения $U_{\text{эф}}^2 = U_{\max}^2/2$, получаем

$$P = U_{\text{эф}}^2 \omega (\epsilon_r \epsilon_0 S / l) \operatorname{tg}\delta.$$

Отсюда, выражая напряжение через напряженность электрического поля, получаем $P = \omega E^2 \varepsilon_r \varepsilon_0 S l \operatorname{tg} \delta$, где $Sl = V$ – объем диэлектрика.

Объемная плотность мощности $P_V = \omega E^2 \varepsilon_r \varepsilon_0 \operatorname{tg} \delta$.

Выделяемое количество теплоты пропорционально квадрату эффективной напряженности $E = E_{\max} / \sqrt{2}$ электрического поля зависит от характеристик среды, а для диэлектрика – и от частоты поля. *В аппаратах УВЧ используют частоту 40,58 МГц, при которой диэлектрические ткани организма нагреваются интенсивнее проводящих.*

Воздействие на ткани переменными импульсными токами. При низких, звуковых и ультразвуковых частотах переменный ток, как и постоянный, вызывает раздражающее действие на биологические ткани. Теперь раздражение зависит от формы импульсного тока, длительности импульса и его амплитуды. Увеличение крутизны фронта импульса уменьшает пороговую силу тока, вызывающую сокращение мышц. Это указывает на то, что мышцы приспосабливаются к изменению силы тока включением ионных компенсационных процессов. Крутизна прямоугольного импульса бесконечная, поэтому для таких импульсов пороговая сила тока наименьшая. Функциональная связь между пороговой амплитудой I_{\max} и длительностью прямоугольного импульса, вызывающего раздражение, имеет форму обратной экспоненты. Каждой точке кривой и точкам, лежащим выше кривой, соответствуют импульсы, которые вызывают сокращение мышц. Точки, расположенные ниже кривой, отображают импульсы, не вызывающие раздражения. Такая кривая называется *характеристикой возбуждения*. Она специфична для разных органов и систем, поэтому для стимуляции центральной нервной системы (электросон, электронаркоз), нервно-мышечной системы, сердечно-сосудистой системы (кардиостимуляторы, дефибрилляторы) используют токи с разной временной зависимостью.

Ток с импульсами прямоугольной формы с длительностью импульсов $\tau_{\text{и}} = 0,1 - 1$ мс и диапазоном частот $5 - 150$ Гц используют для лечения электросном; токи с $\tau_{\text{и}} = 0,8 - 3$ мс и диапазоном частот $1 - 1,2$ Гц применяют в имплантируемых кардиостимуляторах; токи с импульсами треугольной формы ($\tau_{\text{и}} = 1 - 1,5$ мс, частота 100 Гц), а также токи экспоненциальной формы, импульсы которых медленно

нарастают и сравнительно быстро спадают ($\tau_n = 3 - 60$ мс, частоты 8 – 80 Гц), применяют для возбуждения мышц при электрогимнастике.

Действие переменного (гармонического) тока на организм при низких, звуковых и ультразвуковых частотах оценивается *порогом ощутимого тока* и *порогом неотпускающего тока* (рис. 10).

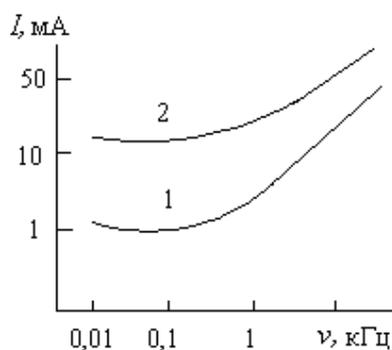


Рис. 10

Порог ощутимого тока – наименьшая сила тока, ощущаемая раздражающим действием. У мужчин на участке предплечье – кисть (см. рис. 10, кривая 1) порог ощутимого тока со средним значением 1 мА на частоте 50 Гц. Увеличивая силу тока, можно вызвать состояние сустава, при котором человек не сможет разжать руку и освободиться от проводника.

Минимальную силу такого тока называют порогом неотпускающего тока. На рис. 10 (кривая 2) представлена зависимость среднего по группе значения порога неотпускающего тока от частоты. Токи меньшей силы – отпускающие.

Постоянный ток, ток низкой, звуковой и ультразвуковой частот при нагреве ткани могут привести к электролизу и разрушению ткани из-за своей величины, поэтому для нагревания используют токи высокой частоты. При частотах более 500 кГц смещение ионов становится соизмеримым с их смещениями при молекулярно-тепловых движениях, поэтому ток или электромагнитная волна не вызывают раздражающего действия. Основным первичным эффектом является тепловое воздействие. Подбирая соответствующую частоту, проводят «термоселективное» воздействие в нужных тканях и органах (в отличие от грелки). Регулируя мощность генератора, управляют мощностью тепловыделения во внутренних органах с дозированием прогрева.

Пропускание тока высокой частоты через ткань используют в физиотерапевтических процедурах: *диатермии* и местной *дарсонвализации*. При диатермии применяют напряжение 100 – 150 В при силе тока несколько ампер, частотой около 1 МГц со слабозатухающими колебаниями. При расчетах используют закон Джоуля – Ленца с оценкой объемной плотности мощности, численно равной количеству теплоты q , выделяющейся в 1 м³ за 1 с:

$$q = j^2 \rho. \quad (20)$$

Наибольшим удельным сопротивлением обладают кожа, жир, кости, мышцы, поэтому они и нагреваются сильнее. Наименьшее нагревание у органов, богатых кровью или лимфой: легкие, печень, лимфатические узлы. Недостаток диатермии – опасная сила тока и выделение в слое кожи и подкожной клетчатке большого количества теплоты.

Для местной дарсонвализации применяют напряжение десятки киловольт при силе тока 10 – 15 мА с частотой 100 – 400 кГц.

Токи высокой частоты используются в *электрохирургии*: *диатермокоагуляции* – прижигании и «сваривании» тканей при плотности тока 6 – 10 мА/мм², *диатермотомии* – рассечении тканей электроножом при плотности тока до 40 мА/мм².

3.2. Физические основы магнитобиологии и биомагнетизма

Магнитобиология исследует влияния внешних магнитных полей на биосистемы. Из внешних магнитных полей наиболее сильное естественное поле Земли. Основное (постоянное) магнитное поле Земли (геомагнитное) определено в пределах 50 – 70 мкТл и испытывает медленные (вековые) изменения. Его вклад (99 %) в геомагнитное поле объясняют процессами (динамо-эффект), протекающими в жидком металлическом ядре Земли и формирующими магнитный диполь. Напряженность геомагнитного поля убывает от магнитных полюсов к магнитному экватору от 55,7 (0,7 Э) до 33,4 А/м (0,42 Э). Эрстед (Э) – единица напряженности магнитного поля в системе СГС: $1 \text{ Э} = 10^3/4\pi = 79,5775 \text{ А/м}$.

Переменная составляющая геомагнитного поля (1 %) определена частотным диапазоном 10^{-5} – 10^2 Гц. Малоамплитудные периодические солнечно-суточные и лунно-суточные магнитные вариации записывают через стотысячные доли Э ($1 \gamma = 10^{-5} \text{ Э}$): 30 – 70 γ и 1 – 5 γ соответственно.

Магнитная ось составляет с географической осью угол (10 – 11)°, и магнитные полюсы Земли не совпадают с географическими полюсами. Силовые линии направлены от магнитного полюса, который расположен в Южном полушарии (здесь расположен Северный магнитный полюс) к Южному магнитному полюсу в Северном полушарии.

Открытое солнечной корпускулярной радиации пространство над магнитными полюсами имеет формы двух воронок, или «овалов полярных сияний», через которые заряженные частицы проникают через магнитосферу в атмосферу, вызывая ионизацию атомов и молекул атмосферных газов. Общая сила тока достигает сотен тысяч ампер.

Непрерывное испарение плазмы солнечной короны создает солнечный ветер электрически заряженных частиц в межпланетное пространство. С дневной стороны магнитное поле Земли поджимается им вдвое ближе к Земле. На ночной стороне он вытягивает силовые линии магнитного поля на большие расстояния.

Дневная граница магнитосферы (магнитопауза) под давлением потока частиц может приблизиться к Земле до 4 радиусов Земли. На начальной фазе магнитной бури (4 – 6 ч) магнитное поле растет. Далее оно возвращается к норме, а затем – падает. Главная фаза мировой магнитной бури приходится на период пониженного магнитного поля 10 – 15 ч.

Возмущение магнитного поля оценивается в баллах индексами, которые с действием на биосистемы и человека связаны физическими факторами: 1. Возбуждение в ионосфере внутренних гравитационных и инфразвуковых волн; 2. Микропульсации магнитного поля Земли с частотами 0,01 – 10 Гц затормаживают работу нервной системы человека; 3. Потоки заряженных частиц и ультрафиолетового излучения меняют (до 40 %) концентрации стратосферного озона и химический состав атмосферы. Наиболее быстро погибают больные, страдающие тяжелыми расстройствами нервной системы и мозга, затем – сердечно-сосудистой системы.

Предполагают, что для здоровых организмов вариации слабых магнитного поля служат своеобразными «сигналами точного времени», синхронизируя работу внутренних органов, позволяя системно подстраивать внутреннюю ритмику организма под ритмику внешней среды. Вероятно, их воздействие является информационным, и длительное экранирование естественного магнитного поля приводит к ухудшению самочувствия.

Биомагнетизм исследует магнитные поля биоэлектрических генераторов, микроскопических магнитных частиц, попавших в организм извне или имеющих биологическое происхождение, с упорядоченной ориентацией или возникающих из-за неоднородности магнит-

ной восприимчивости тела под влиянием сильного внешнего магнитного поля. Биоэлектрическое и биомагнитное поля генерируются биологическими тканями и органами, клетки которых обладают электрогенными мембранами. Эти поля слабые – их амплитуды в миллионы раз меньше, чем флуктуации естественных и искусственных магнитных полей среды.

Органно-тканевое соотношение диа- и парамагнетизма в процессе жизни меняется из-за изменений в органах, богатых металлодержащими белками. Для выявления степени парамагнетизма металлодержащих протеинов изучают кровь, содержащую гемоглобин, органы, богатые ферритином (селезенка, печень) и чувствительные к воздействию магнитных полей (надпочечники, семенники). С развитием болезней диамагнетизм органов и тканей растет. Так, диамагнетизм циррозной печени возрастает в 1,5 раза.

Источники постоянных магнитных полей – мышцы тела и кожа. Вызванные прикосновением постоянные токи создают магнитные поля с градиентом 10 – 25 пТл/см, текут по коже головы, собираясь на темени. Но магнитное поле мозга в 10^3 раз слабее магнитного поля сердца.

Воздействие на организм переменным магнитным полем. Метод *индуктотермии* основан на том, что в массивных проводящих телах в переменном магнитном поле возникают вихревые токи. Эти токи могут использоваться для прогревания биологических тканей и органов. При воздействии импульсного магнитного поля по области приложения индуктора предпочтение отдается гипоталамусу. Индукционный способ воздействия на гипоталамус в течение 5 – 10 мин в диапазоне частот 5 – 30 Гц приводит к повышению лечебного эффекта. Низкочастотная магнитотерапия обладает обезболивающим действием при острых и хронических заболеваниях.

Рассмотрим факторы зависимости степени нагревания тканей при индуктотермии. Объект помещен в катушку переменного тока. Применяя частный случай закона электромагнитной индукции для токов в объеме объекта $I = -\frac{SdB}{Rdt}$ и выражая R через формулу для сопротивления, получаем $I = -\frac{k_1dB}{\rho dt}$, где $k_1 = (S^2/l)$ – коэффициент, учитывающий геометрические размеры ткани.

Предположим, что магнитная индукция поля меняется по гармоническому закону $B = B_{\max} \cos \omega t$, тогда с учетом формулы 20 имеем

$$q = k \frac{\omega^2}{\rho} B_{\max}^2 \sin^2 \omega t, \text{ где } k = (S/l)^2 - \text{коэффициент соотношения гео-$$

метрических размеров объекта. Количество теплоты, выделяющееся в 1 м^3 за 1 с при индуктотермии, пропорционально квадратам частоты и индукции переменного магнитного поля и обратно пропорционально удельному сопротивлению. Поэтому сильнее будут нагреваться ткани, богатые сосудами, мышцы – сильнее, жировые ткани – слабее.

При индуктотермии применяют как местное воздействие переменного магнитного поля, используя спирали, так и при общей дарсонвализации помещением пациента в клетку-соленоид, по виткам которого пропускают импульсный ток высокой частоты.

3.3. Основные термины, определения и формулы

Электрические характеристики биообъектов. Модуль момента силы, действующего на диполь в электрическом поле напряженностью E : $M = pE \sin \alpha$, где α – угол между векторами \vec{p} и \vec{E} .

В неоднородном электрическом поле в направлении оси OX на диполь действует сила $F_x = p_x \frac{dE_x}{dx}$, где p_x , E_x – проекции соответствующих векторов на ось OX , задающую выбранное направление исследования.

Вектор поляризации зависит от напряженности электрического поля и относительной диэлектрической проницаемости вещества

$$P_e = \varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1) E.$$

Емкость плоского конденсатора $C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}$, где S – площадь пластин, d – расстояние между пластинами конденсатора.

Энергия заряженного конденсатора $W = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2}$. Объемная плотность энергии электрического поля $\omega_{эл} = \varepsilon_r \varepsilon_0 E^2 / 2$.

Постоянный ток. Гальванизация. Плотность тока $\vec{j} = qn \langle \vec{v} \rangle$,
 $j = \frac{I}{S}$, где q , n , $\langle \vec{v} \rangle$ – электрический заряд, концентрация и средняя

скорость направленного движения носителей тока, $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$ – сила тока.

Закон Ома в электролитах: $I = (U - \mathcal{E}_n)/R$, где \mathcal{E}_n – ЭДС поляризации.

Закон электролиза (закон Фарадея): $m = \frac{1}{F} \frac{A}{z} It$, где m – масса
 выделенного вещества на электроде, z – валентность, A – атомная
 масса вещества.

Плотность тока в электролите $\vec{j} = qn(b_+ + b_-)\vec{E}$, где b_+ и b_- –
 подвижности ионов соответствующих знаков; E – напряженность
 электрического поля.

Закон Ома для участка цепи постоянного тока $I = \frac{U}{R}$.

Мощность постоянного тока $N = JU = J^2 R = \frac{U^2}{R}$.

Закон Джоуля – Ленца $Q = J^2 Rt$.

Зависимость термоэлектродвижущей силы от разности темпера-
 тур спаев: $\mathcal{E}_T = \beta \Delta T$, где β – коэффициент, численно равный термо-ЭДС,
 соответствующей $\Delta T = 1$ К.

Переменный ток. Диатермия. Дарсонвализация. Мощность
 тока, расходуемая на нагревание тканей:

$$P = I^2 R = \frac{j^2 S^2 \rho l}{S} = j^2 \rho V,$$

где I – сила тока; R – сопротивление; S – площадь электрода; j –
 плотность тока; $V = Sl$ – объем ткани; ρ – удельное сопротивление
 ткани.

Количество теплоты, выделяющееся за 1 с в 1 м³ проводника с
 удельным сопротивлением ρ при протекании тока плотностью j : $q = j^2 \rho$.

Переменное магнитное поле. Индуктотермия. Количество
 теплоты, выделяющееся при индуктотермии за 1 с в 1 м³ объема элек-

тропроводной ткани: $q = k \left(\frac{\omega^2}{\rho} \right) B_{\max}^2 \sin^2 \omega t$, Дж/(м³ · с),

где B_{\max} – амплитудное значение индукции магнитного поля, Тл; k – постоянная геометрических размеров образца, м²; ω – круговая частота колебаний, с⁻¹; ρ – удельное сопротивление биологической ткани, Ом · м.

Переменный ток высокой частоты. УВЧ-терапия. Полное сопротивление резистора для синусоидального переменного тока: активное омическое сопротивление $R = U_{\max R} / I_{\max}$, $U_{\max R}$ – амплитудное значение напряжения, I_{\max} – амплитудное значение тока.

Для индуктивной компоненты цепи:

$$\text{емкостное сопротивление в цепи переменного тока } X_C = \frac{1}{\omega C},$$

индуктивное сопротивление в цепи переменного тока $X_L = \omega L$, где L – индуктивность цепи, Гн; C – емкость конденсатора, Ф; ω – круговая частота, с⁻¹.

Полное сопротивление Z последовательной цепи переменного тока (прил. 4, табл. 4.5)

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}.$$

Тангенс угла сдвига фазы между током и напряжением при последовательном соединении элементов цепи переменного тока, состоящей из емкости и активного сопротивления: $\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_C}{R} = \frac{1}{\omega CR}$.

Количество теплоты, выделяющейся в 1 м³ объема ткани за 1 с при воздействии электрической компоненты УВЧ электромагнитного поля (УВЧ-терапия): $q_v = \frac{E^2}{\rho}$, Вт/м³, где E – эффективное значение амплитуды напряженности электрического поля, В/м; ρ – удельное сопротивление электролита, Ом · м.

Количество теплоты, выделенное в диэлектрике при воздействии электрической компоненты УВЧ электромагнитного поля:

$$q = \omega E^2 \varepsilon \varepsilon_0 \operatorname{tg} \delta, \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}),$$

где ω – круговая частота колебаний, с⁻¹; ε – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика; ε_0 – диэлектрическая постоянная, Ф/м; E – амплитуда напряженности электрической компоненты электромагнитного поля УВЧ, В/м; δ – угол диэлектрических потерь.

3.4. Примеры решения задач

Пример 1. Напряжение на плоском воздушном конденсаторе $U = 24$ В. Человек, стоя на изолирующей подставке, касается руками противоположных обкладок конденсатора, и при этом их общее напряжение U_{Σ} становится 21,4 В. Определить емкость C_2 человека, если площадь пластин конденсатора $S = 1130$ см² и расстояние между ними $d = 10$ мм.

Решение. $C = \frac{\epsilon_0 S}{d} = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1130 \cdot 10^{-4}}{10^{-2}} = 100$ пФ, $q = CU =$
 $= 10^{-10} \cdot 24 = 2,4$ нКл, $C_{\Sigma} = \frac{q}{U_2} = \frac{24 \cdot 10^{-10}}{21,4} = 112$ пФ, $C_2 = C_{\Sigma} - C =$
 $= 112 - 100 = 12$ пФ.

Пример 2. Аппарат для гальванизации создает плотность тока $j = 0,12$ мА/см². Определить количество электричества, проходящее через объемный участок тела, если наложенные на поверхность кожи электроды имеют площадь $S = 1,5$ дм² и процедура гальванизации длится $\Delta t = 20$ мин. Определить сопротивление участка тела, если к электродам приложено напряжение $U = 45$ В.

Решение. Заданная аппаратом плотность тока $j = I/S = q/(\Delta t)$, тогда количество электричества, или полный электрический заряд, проходящий через объемный участок тела

$$q = jS\Delta t = 0,12 \cdot 10^{-3} \cdot 10^4 \cdot 1,5 \cdot 10^{-2} \cdot 20 \cdot 60 = 21,6 \text{ Кл.}$$

Активное сопротивление этого участка с учетом заданного на электродах напряжения $R = \frac{U}{jS} = \frac{45}{1,2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-2}} = 2,5$ кОм.

Пример 3. При некоторых заболеваниях крупного рогатого скота применяют электрофорез ионов кальция. Рассчитать интервал времени процедуры лечебного электрофореза, если через активный электрод площадью 350 см² вводят 7 мг кальция при плотности тока 0,2 мА/см².

Решение. Атомарная масса кальция $A_{Ca} = 40$ г/моль, но по условию задачи дано лишь 7 мг, т. е. $0,175 \cdot 10^{-3}$ моль. При условии полной ионизации число зарядов в одном моле $F \cdot 2 = 96500 \cdot 2 = 193 \cdot 10^3$ Кл/моль.

Тогда $0,175 \cdot 10^{-3}$ моль содержит полный электрический заряд $q = 193 \cdot 10^3 \cdot 0,175 \cdot 10^{-3} = 33,8$ Кл. Если вводятся ионы кальция, то вводится электрический заряд и течет ток. Время ввода заряда соответствует времени процедуры лечебного электрофореза и $\Delta t = q / (jS) = 33,8 / (0,2 \cdot 10^{-3} \cdot 10^4 \cdot 350 \cdot 10^4) = 483$ с, или 8 мин.

Пример 4. В цилиндрическом образце живой ткани поперечного сечения $s = 10,5$ см² и длиной $L = 2l = 6$ см последовательно соединены одинаковые по длине l участки мышечной и жировой ткани. Если к торцам образца приложить напряжение $U = 25$ В, то при ЭДС поляризации $E_{\text{п}} = 16$ В в образце возникает сила тока $I = 9$ мА. Проверить данные прил. 4, табл. П4.3 в столбце значений удельных сопротивлений, задавая удельное сопротивление жировой ткани $\rho_1 = 33$ Ом · м и вычисляя удельное сопротивление ρ_2 мышечной ткани, сопоставляя его расчетное значение с табличным.

Решение. Падение напряжения на последовательно соединенных участках и с учетом поляризации ткани $(U - E_{\text{п}}) = I(R_1 + R_2) = I(\rho_1 l / s + \rho_2 l / s) = Il / s(\rho_1 + \rho_2)$. Откуда $\rho_2 = (U - E_{\text{п}})s / Il - \rho_1 = (25 - 16) \cdot 10,5 \times 10^{-4} / (9 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^{-2}) - 33,3 = 1,7$ Ом · м. Расчетное значение снижено по сравнению с табличным на 15 %.

Пример 5. Оценить плотность тока в электролите с концентрацией ионов $n = 10^5$ см⁻³; подвижностью $b_+ = 4,5 \cdot 10^{-4}$ см²/(В · с); $b_- = 6,5 \cdot 10^{-4}$ см²/(В · с) и напряженностью электрического поля $E = 10$ В/см. Считая плотность тока одинаковой, найти силу тока, если площадь каждого электрода $S = 1$ дм². Принять заряд иона равным заряду электрона.

Решение. Плотность тока в электролите $\vec{j} = qn(b_+ + b_-)\vec{E}$, где b_+ и b_- – подвижности ионов соответствующих знаков; E – напряженность электрического поля.

В проекции на заданное однородным полем направление $j = qn(b_+ + b_-)E = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^5 \cdot 10^6 (4,5 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-4} + 6,5 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-4}) \cdot 10^3 = 17,6 \cdot 10^{-13}$ А/м².

Сила тока $I = jS = 17,6 \cdot 10^{-13} \cdot 10^{-2} = 17,6 \cdot 10^{-15}$ А.

Пример 6. Между двумя электродами, к которым приложено постоянное напряжение $U = 36$ В, помещен участок живой ткани. Условно можно считать, что ткань состоит из двух слоев сухой кожи (рис. 11) и мышц с сосудами крови. Толщина каждого слоя кожи $l_1 = 0,3$ мм, толщина внутренней ткани $l_2 = 9,4$ мм. Найти плотность тока j и падение напряжения в коже (U_1) и в мышечной (сосудистой) ткани (U_2), рассматривая их как проводники.



Рис. 11

Решение. При принятых условиях плотность тока в трехслойном участке живой ткани

$$j = \frac{U_{\Sigma}}{\rho_1 l_1 + \rho_2 l_2 + \rho_1 l_1} = \frac{U_{\Sigma}}{2\rho_1 l_1 + \rho_2 l_2} = \frac{36}{2 \cdot 10^6 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 9,4 \cdot 10^{-3}} = 0,06 \text{ А/м}^2.$$

Падение напряжения в двух слоях кожи и слое мышечной ткани соответственно: $U_1 = j2\rho_1 l_1 = 36$ В; $U_2 = j\rho_2 l_2 = 1,1$ мВ.

Величины удельных сопротивлений кожи $\rho_1 = 10^6$ Ом · м и мышечной ткани $\rho_2 = 2$ Ом · м определены по данным прил. 4, табл. П4.3.

Пример 7. Определить мощность тока и количество теплоты, выделяемой при дарсонвализации, считая, что электрическая мощность выделяется в слое кожи и подкожной клетчатки глубиной 2 мм. Сила тока 5 мА, а падение напряжения в слое 0,1 кВ. Площадь соприкосновения разряда с тканью 0,4 см².

Решение. Мощность тока $P = IU = 5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 \cdot 10^3 = 0,5$ Вт.

Количество теплоты, выделяющееся за 1 с в 1 м³,

$$q = P / V = \frac{P}{Sl} = \frac{0,5}{0,4 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 10^{-3}} = 0,625 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^3, \text{ или } 6,25 \text{ МВт/м}^3,$$

или для характерных размеров количество теплоты равно 6,25 Дж/см³.

Пример 8. Для регистрации переменных импульсных сигналов, создаваемых некоторыми аквариумными рыбами, измерительный прибор соединяют через емкость конденсатора с водой аквариума. Ток, создаваемый рыбой, проходит через активное сопротивление воды и последовательно соединенные с ней конденсатор и измерительный прибор. Определить величину тока в цепи, создаваемого рыбой

африканский слоник (*Gnathonemuss petersii*), если напряжение между головой и хвостом рыбы достигает максимального значения 4 В, сопротивление воды 1 кОм, емкость конденсатора 0,05 мкФ. Частота импульсов 3 кГц. Колебания напряжения, создаваемого рыбой, считать гармоническими. Сопротивлением тела рыбы пренебречь.

Решение. Активное (R) и емкостное ($X_C = 1/(\omega C)$) сопротивления в цепи соединены последовательно.

Обобщенный закон Ома для цепи переменного тока может быть записан в виде $I = \frac{U}{Z}$, где Z – полное сопротивление цепи:

$$Z = \sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}, \text{ а так как } \omega = 2\pi\nu, \text{ то } I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{4\pi^2\nu^2 C^2}}}.$$

Проведем вычисления

$$I = \frac{4}{\sqrt{10^6 + 1/8,9 \cdot 10^{-7}}} = \frac{4}{1,46 \cdot 10^3} = 2,74 \cdot 10^{-3} \text{ А.}$$

Сила тока в цепи $I = 2,74$ мА.

Пример 9. Оценить количество теплоты, выделяющееся в мышечном слое с относительной диэлектрической проницаемостью 47,4 при УВЧ-терапии, если угол диэлектрических потерь 17° , амплитуда напряженности электрической компоненты УВЧ электромагнитного поля равна 2,5 кВ/м. Использовать принятую в России частоту для УВЧ-аппаратов.

Решение. В России в аппаратах УВЧ используют частоту $\nu = 40,58$ МГц. В случае токов такой частоты диэлектрические ткани организма нагреваются интенсивнее проводящих.

Расчетная формула объемной плотности тепловыделения

$$q = \frac{P}{Sl} = \omega E^2 \varepsilon_r \varepsilon_0 \operatorname{tg} \delta = 2\pi\nu E^2 \varepsilon_r \varepsilon_0 \operatorname{tg} \delta = 2 \cdot 3,14 \cdot 40,58 \cdot 10^6 (2,5 \cdot 10^3)^2 \times \\ \times 47,4 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,3057 = 20,7 \cdot 10^4 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}).$$

Пример 10. Определить количество теплоты, выделяющееся при индуктотермии через 15 мин в жировой ткани и мышцах. Частота прибора, используемого в стационаре, 13,56 МГц, амплитудное значе-

ние магнитной индукции равно 0,01 Тл, коэффициент k взять равным $2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$. Полученные результаты сравнить друг с другом и сделать вывод. Расчет проводить по формуле $q = (1/2\rho)tk\omega^2 B_{\text{max}}^2$.

Решение. Количество теплоты, выделяющееся при индуктотермии в 1 м³ объема электропроводной ткани рекомендовано рассчитывать по формуле $q = (1/2\rho)tk\omega^2 B_{\text{max}}^2$.

В жировой ткани с принятым удельным сопротивлением $\rho_1 = 33,3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (см. прил. 4, табл. П4.3):

$$q_1 = \frac{1}{2\rho_1} tk (2\pi\nu)^2 B_{\text{max}}^2 = \frac{1}{2 \cdot 33,3} 15 \cdot 60 \cdot 2 \cdot 10^{-7} \times \\ \times 4(3,14)^2 \cdot (13,56)^2 \cdot (10^6)^2 \cdot (10^{-2})^2 = 1,96 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3.$$

В мышцах (мягких сосудистых тканях) с принятым удельным сопротивлением $\rho_2 = 2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (см. прил. 4, табл. П4.3):

$$q_2 = \frac{1}{2\rho_2} t \cdot k (2\pi\nu)^2 B_{\text{max}}^2 = \frac{1}{2 \cdot 2} 15 \cdot 60 \cdot 2 \cdot 10^{-7} \times \\ \times 4 \cdot (3,14)^2 \cdot (13,56)^2 \cdot (10^6)^2 \cdot (10^{-2})^2 = 3,24 \cdot 10^7 \text{ Дж/м}^3.$$

При одинаковых условиях и режимах на порядок сильнее нагреваются ткани, богатые сосудами – мышцы по сравнению с жировыми тканями.

Пример 11. Медицинский аппарат подключен к сети с напряжением $U = 220 \text{ В}$. Стоящий на полу (на земле) человек касается корпуса аппарата. Сопротивление тела человека

$R_1 = 1 \text{ кОм}$. Сопротивление между изолированным проводником и телом человека (через землю) $R_2 = 5 \text{ кОм}$ (рис. 12). При повреждении изоляции проводника с контактом на корпус произошел «пробой на корпус». Определить напряжение на теле человека и протекающий через тело ток для двух случаев: 1. Аппарат не заземлен.

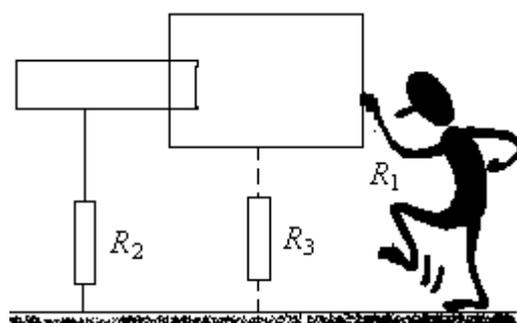


Рис. 12

2. Аппарат заземлен с сопротивлением заземления $R_3 = 4 \text{ Ом}$. Сопоставить полученные значения тока с принятыми значениями порогов ощутимого (1 мА) и неотпускающего (15 мА) токов при сетевой частоте 50 Гц.

Решение. На рис. 12 представлена общая схема заземления с заземленным (или незаземленным) корпусом аппарата. На рис. 13 представлены принципиальные схемы: без заземления (рис. 13, а) и с заземлением (рис. 13, б).

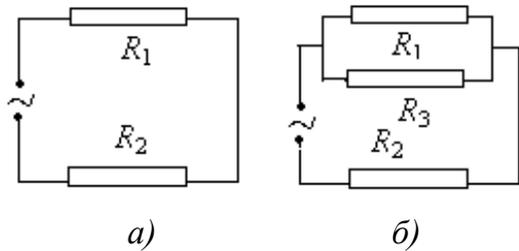


Рис. 13

1. Аппарат не заземлен (см. рис. 13, а). Ток, протекающий через тело человека: $I = U / (R_1 + R_2) = 220 / 6 \cdot 10^3 = 36,7$ мА, что почти в 2,5 раза превышает порог неотпускающего тока.

Напряжение на теле человека

$$U_1 = IR_1 = 36,7 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3 = 36,7 \text{ В.}$$

2. Аппарат заземлен (см. рис. 13, б).

С одной стороны, суммарная сила тока в цепи

$$I = U / [R_1 R_3 / (R_1 + R_3) + R_2] = 220 / [10^3 \cdot 4 / (10^3 + 4) + 5 \cdot 10^3] = 44 \text{ мА.}$$

С другой стороны, $I = I_2 = I_1 + I_3$.

Падение напряжения на участке параллельного соединения сопротивлений задано $U_{13} = I_1 R_1 = I_3 R_3$.

Решаем совместно и получаем уравнение для решения

$$I_1 R_1 = (I - I_1) R_3.$$

Откуда сила тока I_1 , протекающего через тело человека:

$I_1 = IR_3 / (R_1 + R_3) = 44 \cdot 10^{-3} \cdot 4 / (10^3 + 4) = 0,175$ мА, что значительно меньше даже порога ощутимого тока (1 мА).

Падение напряжения при этом на теле человека пренебрежимо мало:

$$U_1 = IR_1 = 0,175 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3 = 0,175 \text{ В.}$$

3.5. Задачи для практических занятий

Электрические характеристики биообъектов. Переменный ток

1. Средняя мощность разряда электрического сома 8 Вт при напряжении 360 В. Время разряда 0,13 мс. Определить емкость электрических органов сома. [16 нФ].

2. Термопара из Pb – Ag создает термоэлектродвижущую силу 3 мкВ при разности температур спаев в 1 К. Можно ли такой термопарой установить повышение температуры тела человека от 36,5 до 37,0 °С, если потенциометр позволяет измерить напряжение с точностью до 1 мкВ? [Можно].

3. При какой частоте переменного тока полное сопротивление мышечной ткани электроемкостью 0,02 мкФ будет в 2 раза больше величины ее активного сопротивления, равного 1 кОм? [4,6 кГц].

4. В качестве регистраторов использовали конденсаторные датчики с переменным расстоянием между пластинами. Определить отношение изменения частоты к частоте собственных колебаний в контуре, если расстояние между пластинами уменьшилось от 1 см до 9 мм. [0,051].

5. Угол сдвига фаз между током и напряжением для ламинарии равен 78° при частоте переменного тока 1 кГц. Активное сопротивление 850 Ом и электроемкость соединены последовательно (см. прил. 4, табл. П4.5). Рассчитать электроемкость ламинарии. [40 нФ].

6. Определить импеданс и сдвиг фаз, происходящий в здоровой ткани десны, если суммарная емкость $C = 9,7$ нФ, электрическое сопротивление $R = 50,8$ кОм, а частота $\nu = 2000$ Гц. Активное сопротивление и емкость соединены параллельно (см. прил. 4, табл. П4.5). [8,1 кОм, $-80^\circ 50'$].

7. Оценить количество теплоты, выделяющееся за 1 с в 1 дм³ костной ткани. Амплитуда напряженности электрической составляющей при УВЧ-терапии равна 2000 В/м. Электроемкость и индуктивность терапевтического контура $C = 2$ мкФ, $L = 3,125$ пГн. Относительная диэлектрическая проницаемость костных тканей $\epsilon = 7,6$, угол диэлектрических потерь $\delta = 30^\circ$. [62 Дж/с · дм³].

8. Сопротивление между ладонями рук с сухой кожей достигает $R_1 = 0,1$ МОм, а с влажной – $R_2 = 1$ кОм. Определить силу тока через тело человека при его контакте с электросетью напряжением $U = 220$ В и частотой 50 Гц. Сравнить значения тока со стандартными значениями порогов ощутимого (1 мА) и неотпускающего (15 мА) токов. [2,2 мА, 220 мА].

4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕРДЦА, НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ И ГОЛОВНОГО МОЗГА

4.1. Физические основы электрокардиографии

Биоэлектрические явления в сердечной мышце. В покое наружная поверхность мембран сократительных клеток миокарда заряжена положительно. Пейсмекерные клетки проводящей системы сердца наделены способностью автоматии – самогенерации электрических импульсов возбуждения. Они активируют электрическим импульсом сократительные клетки миокарда, приводя к перезарядке их мембран – деполяризации. Наружная поверхность мембран обретает отрицательный заряд. Соседние клетки оказываются в электрическом поле и также активируются с последующей деполяризацией. Распространение активаций имеет векторный характер («минус гонит перед собой плюс»), определяя электродвижущую силу (ЭДС) и ток деполяризации. Так, стартовав в СА-узле, импульс возбуждения последовательно активирует правое и левое предсердия и далее, после небольшой задержки в АВ-соединении, распространяется по системе Гиса, деполяризуя межжелудочковую перегородку. Возбуждение охватывает перегородку *слева направо* – первыми получают отрицательный заряд ее отделы, обращенные к левому желудочку. Далее электрический импульс достигает стенок желудочков. Их деполяризация начинается с внутренней субэндокардиальной области с волокнами Пуркинье и распространяется к эпикарду, т. е. возбуждение происходит в направлении *изнутри к наружи* (см. далее). По завершении деполяризации вся поверхность миокарда становится электроотрицательной. Происходит сокращение желудочков с запуском процесса реполяризации.

Реполяризация – реставрация положительного заряда внешней стороны клеточных мембран с восстановлением готовности к возбуждению. Текущее замещение отрицательного заряда («плюс гонит перед собой минус») создает ЭДС и ток реполяризации. Первыми восстанавливают положительный заряд отделы миокарда, которые возбуждались последними.

Согласованная синхронная реакция больших групп клеток электрического синцития миокарда с результирующим и направленным возникновением элементарных клеточных биопотенциалов ука-

зывает, что сердце работает как генератор электрического поля в проводящей среде.

Токовый диполь. В непроводящей среде электрический диполь может сохраняться сколь угодно долго. Но в проводящей среде диполь экранируется свободными зарядами. Для его сохранения как генератора поля необходима ЭДС. Это легко представить, поместив в электролит обычный элемент питания. Двухполюсную систему, состоящую из истока (положительный полюс) и стока (отрицательный полюс) тока, называют дипольным электрическим генератором, или токовым диполем.

Вектор, направленный от стока (–) к истоку (+) и численно равный произведению силы тока I на плечо l диполя, называют дипольным моментом токового диполя $\vec{p}_T = I \cdot \vec{l}$. Плечом токового диполя называют кратчайшее расстояние между истоком и стоком.

На рис. 14, а изображено поле дипольного электрического генератора: сплошными линиями со стрелками показаны линии тока, а пунктирными – эквипотенциальные поверхности. На рис. 14, б показана эквивалентная электрическая схема: R – сопротивление проводящей среды, в которой находятся полюса; r – внутреннее сопротивление источника; \mathcal{E} – ЭДС; положительный электрод (1) – исток тока; отрицательный электрод (2) – сток тока.

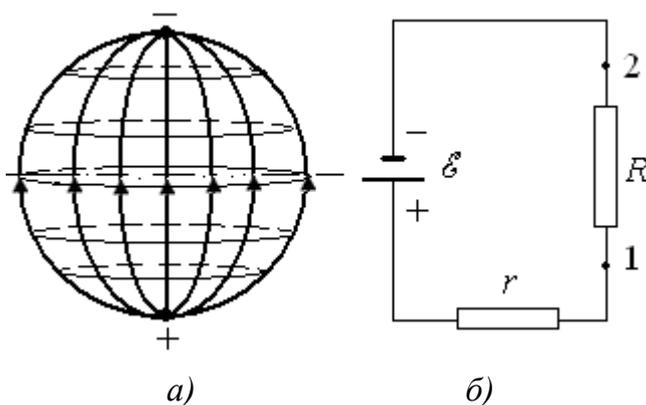


Рис. 14

Распространение процесса деполяризации – реполяризации образует единый токовый диполь сердца. Он начинается на отрицательном полюсе диполя, ориентируясь от возбужденных (–) к покоящимся (+) отделам миокарда. На фронтальной поверхности тела регистрируется *результатирующий вектор деполяризации* – вектор ЭДС.

Принципы отведения биотоков сердца с учетом полярностей тела. На рис. 15 результирующий вектор деполяризации желудочков, или *электрическая ось сердца* (ЭОС), показан стрелкой и располагается под углом около 60° к горизонтальной линии, проходящей через условный электрический центр сердца, как правило, совпадая с на-

правлением анатомической оси и следуя за ее изменениями. Перпендикулярно к ЭОС проходит линия нулевого потенциала, делящая

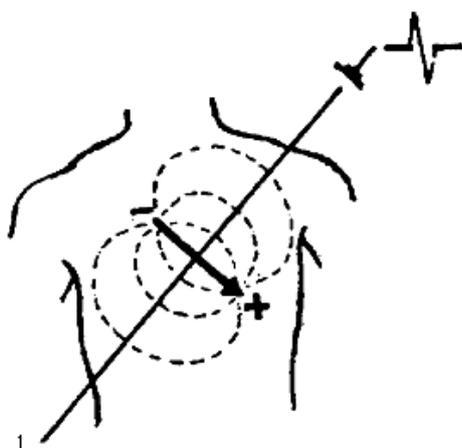


Рис. 15

электрическое поле сердца (и тело) на отрицательно (вправо) и положительно (влево) заряженные области. Правая рука находится в отрицательно заряженной области, левая рука и ноги – в положительной.

В 1908 г. Эйнтховен предложил систему наложения электродов на поверхность тела для регистрации и записи ЭДС сердца, названную электрокардиографическими отведениями. Эйнтховен уподобил

тело равностороннему треугольнику с вершинами: правая рука, левая рука и левая нога (точнее лонное сочленение), и со сторонами – осями отведений, т. е. условными линиями, соединяющими электроды (рис. 16). В центре треугольника помещается сердце – токовый диполь как точечный источник ЭДС с направлением вдоль ЭОС.

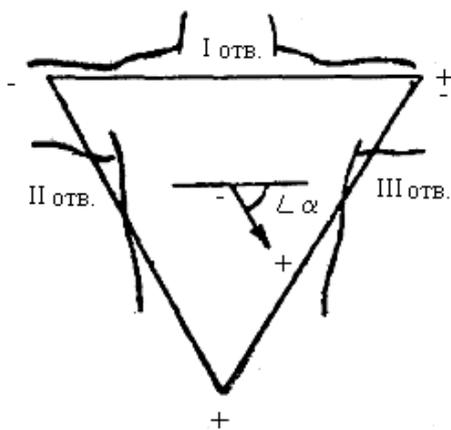


Рис. 16

Направление вектора ЭДС (ЭОС) фиксируется по углу α с горизонтальной линией, проведенной через условный электрический центр сердца (см. рис. 16). Направление ЭОС приблизительно или полностью совпадает с осью того отведения, в котором алгебраическая сумма зубцов *QRS* является наибольшей. Наибольший зубец *R* регистрируется во II отведении. Следовательно, ЭОС пролегает под

углом, близким к $+60^\circ$, т. е. имеет нормальное положение: от правого плеча к левому бедру.

Для записи ЭКГ с регистратором соединяют ту пару разнозаряженных точек тела, которые дают наибольшую разность потенциалов: I отведение – правая рука (-) и левая рука (+), II отведение – правая рука (-) и левая нога (+), III отведение – левая рука (-) и левая нога (+).

Модифицируем треугольник Эйнтховена (рис. 17, а): сместим оси отведений, проведя их через электрический центр сердца и «материализуем» электрическую ось, изобразив вместо нее фронтальный

разрез сердца. Получим трехосевую систему координат Бейли, где оси отведений разделены углами по 60° . Каждая ось состоит из положительной и отрицательной половин, соответственно полярности электродов, к которым они примыкают. Наиболее чутко и полно активный электрод улавливает биопотенциалы отделов миокарда, обращенных к нему.

Отведение I регистрирует изменение потенциала боковой стенки левого желудочка за исключением ее высоких отделов. Отведение II зондирует весь миокард вдоль продольной оси и не имеет самостоятельной диагностической ценности. Как «отведение-свидетель» оно лишь подтверждает отклонения ЭКГ, которые обнаруживаются в отведениях I или III. Отведение III характеризует состояние биоэлектрической активности правого желудочка и нижних отделов левого.

Большая площадь миокарда остается вне досягаемости двухполюсных отведений. «Неподконтрольными» отведениям от конечностей остались *передняя стенка*, ее *переднебоковые* отделы и *верхушка* сердца. Этот пробел восполняют 6 грудных отведений, обозначаемых символом потенциала V, которые предложил F. Wilson в 1946 г. Они регистрируют ЭДС сердца в *горизонтальной* плоскости.

Три усиленные однополюсные отведения от конечностей, обозначаемые аббревиатурой *aV*, в практику ввел Goldberger в 40-х гг.: *aVR* – отведение от правой руки, *aVL* – отведение от левой руки, *aVF* – отведение от левой ноги (*a* – от англ. *augmented* – усиленный; *V* – от англ. *voltage*; *R*, *L* и *F* – от англ. *right* – правый, *left* – левый и *foot* – нога).

Положительный электрод крепится на соответствующей конечности; функцию отрицательного выполняет объединенный неактивный электрод Гольдбергера от соединенных двух других конеч-

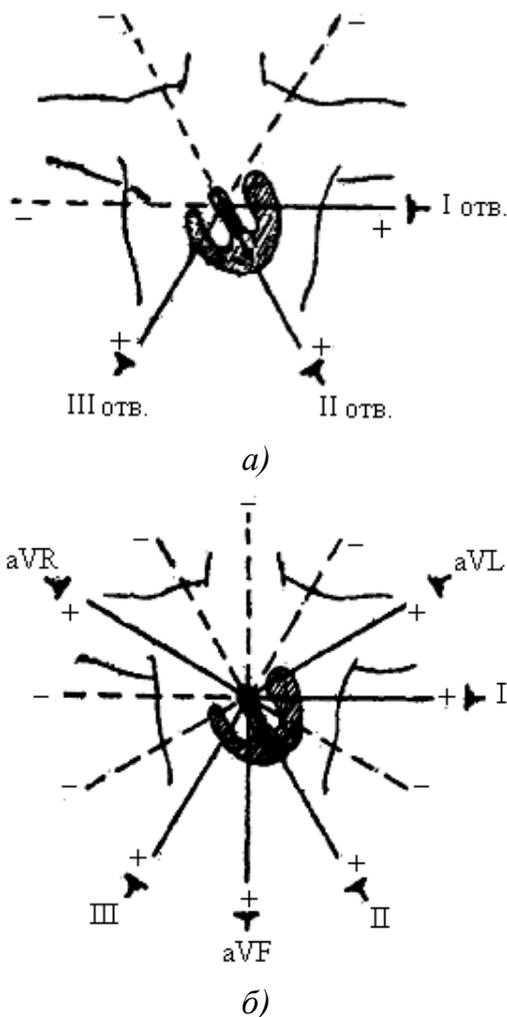


Рис. 17

ностей. Оси однополюсных отведений связывают места наложения электродов с электрическим центром сердца и вписываются в трехосевую систему. В *шестиосевой* системе координат Бейли оси смежных отведений разделены углами 30° . Каждая состоит из положительного и отрицательного отрезков: первый обращен к активному электроду, второй – его мысленное продолжение в обратную сторону (рис. 17, б). Если вектор ЭДС проецируется на положительную половину оси отведения, то регистрируется положительный зубец, если на отрицательную – отрицательный.

В клинической практике для оценки биоэлектрической активности миокарда достаточно 12 отведений ЭКГ: 6 отведений от конечностей (3 двухполюсных и 3 однополюсных) и 6 грудных отведений (прил. 6).

Графическое отображение электрофизических процессов в сердце. Электрический цикл отражается на ЭКГ серией зубцов *P*, *Q*, *R*, *S*, *T* и *U* (рис. 18). Зубец *P* по восходящей части отражает деполяризацию правого предсердия, по нисходящей – левого (рис. 18, 1). Наличие положительного и одинакового по форме зубца *P* перед каж-

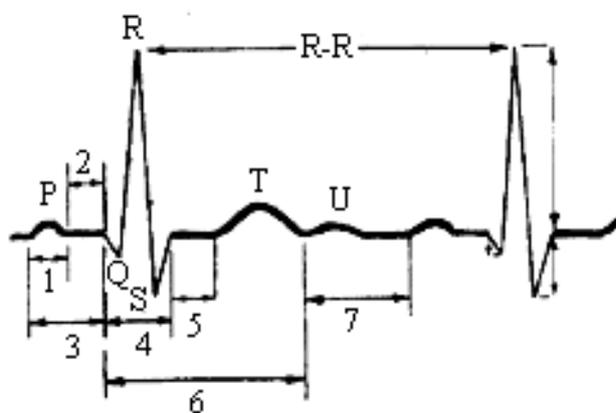


Рис. 18

дым комплексом QRS во II отведении – главный критерий нормального синусового ритма.

Интервал *P-Q* (рис. 18, 3) захватывает интервал от начала зубца *P* до начала зубца *Q*, характеризуя состояние АВ-проводимости. Сегмент *P-Q* (рис. 18, 2) совпадает с изоэлектрической линией.

Далее рассмотрим фрагмент стенки желудочка (рис. 19). Во время диастолы вся поверхность мышцы сердца несет положительный заряд, поэтому электрод, расположенный на кожных покровах (над эпикардом), тока не регистрирует. Записывается изоэлектрическая (нулевая) линия (рис. 19, а).

В ходе деполяризации электроотрицательность обретают сначала субэндокардиальные слои стенки желудочка (рис. 19, б). Между ними и остальными отделами миокарда (сохраняющими положитель-

ный заряд) возникает ЭДС. Волна возбуждения распространяется (пунктирная стрелка) к эпикарду (от минуса к плюсу). Электрод регистрирует восходящее колено зубца *R*. Когда возбуждение пронизывает всю толщу стенки желудочка, разность потенциалов (ЭДС) исчезает: нисходящее колено зубца *R* опускается до уровня «нулевой» линии (рис. 19, в).

Некоторое время тотальная электроотрицательность сохраняется, после чего начинается реполяризация. Так как вначале положительный заряд восстанавливают внешние отделы миокарда, то фронт реполяризации движется к эндокарду (пунктирная стрелка) (рис. 19, г), но направление вектора ЭДС остается прежним – в сторону активного электрода (сплошная стрелка). Поэтому записывается колебание вверх – зубец *T*.

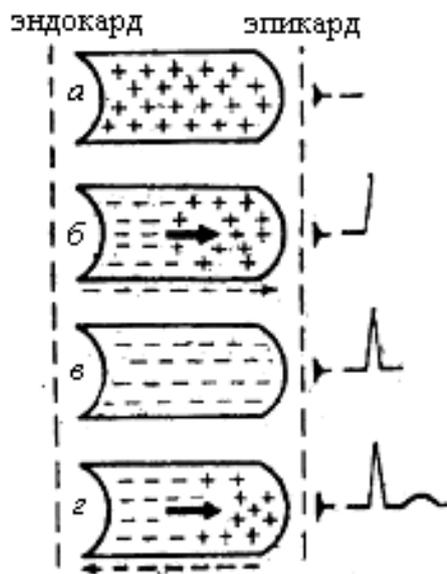


Рис. 19

Полярность зубцов ЭКГ подчиняется основному закону электрокардиографии: *если вектор тока положительным полюсом направлен в сторону активного электрода, то электрод улавливает «наступающий» (+), регистрируется колебание вверх – положительный зубец; при противоположном направлении вектора электрод улавливает «отступающий» (-) вектор ЭДС, регистрируется колебание вниз – отрицательный зубец.*

Зубец *Q* отражает деполяризацию межжелудочковой перегородки; зубцы *R* и *S* – деполяризацию стенок желудочков. В интервал времени сегмента *S-T* деполяризация желудочков завершилась, а реполяризация не началась (см. рис. 18, 5), поэтому сегмент имеет уровень изоэлектрической линии.

Реполяризация протекает медленней деполяризации, поэтому зубец *T* растянут. Он характеризует качество реполяризации миокарда желудочков: более высокому зубцу *R* сопутствует более высокий *T*, и наоборот.

Происхождение редко выявляемого зубца *U* на диастолическом интервале общей паузы (см. рис. 18, 7) и его назначение не выяснены.

4.2. Основные термины, определения и формулы

Токовый диполь. Дипольный момент токового диполя $\vec{p}_T = I\vec{l}$, где I – сила тока, протекающего между истоком и стоком, \vec{l} – вектор плеча диполя.

Электрический потенциал токового диполя для однородной проводящей среды неограниченных размеров $\varphi = \frac{p_T \cos \alpha}{4\pi\gamma r^2}$, где $\gamma = 1/\rho$ – удельная электрическая проводимость, p_T – дипольный момент токового диполя (прил. 7), α – угол между направлением вектора \vec{p} и направлением регистрации потенциала φ .

Электрокардиограмма. Треугольник Эйнтховена. В равно-стороннем треугольнике Эйнтховена сердце как токовый диполь располагается в центре, а обозначения A , B , C соответствуют местам подключения электродов: правая рука (Rh), левая рука (Lh), левая нога (Lf). Организуемые при этом направления с выделенными полярностями называют отведениями: AB – I отведение, BC – II отведение, AC – III отведение (рис. 20). Каждый зубец электрокардиограммы (ЭКГ) является проекцией результирующего моментного вектора на

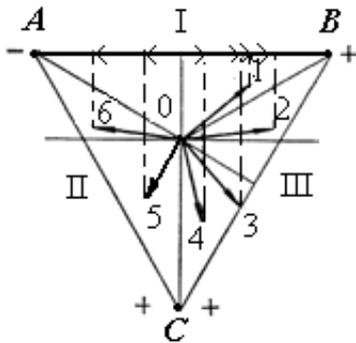


Рис. 20

ось отведения, поэтому амплитуда зубца будет максимальной в том отведении, которое проходит параллельно результирующему моментному вектору, и, наоборот, минимальной (до нуля), если результирующий вектор перпендикулярен оси отведения. Направление зубца зависит от направления вектора. Если вектор обращен в сторону положительного полюса электрического поля, то зубец направлен кверху (+) и, наоборот, при направлении вектора в сторону отрицательного полюса зубец направлен книзу (-). В то же время электрод, помещенный на противоположном участке электрического поля и испытывающий влияние противоположного компонента диполя, регистрирует зеркальное отображение зубца. На рис. 20 цифрами отмечены 6 позиций одного и того же результирующего

щего моментного вектора во фронтальной плоскости. Из шести соответствующих проекций этого вектора максимальной в I отведении является проекция вектора 2, направленного почти параллельно оси отведения I. Вектор 4 направлен почти перпендикулярно оси отведения I, образуя минимальную проекцию. Таким образом, наличие максимального зубца в соответствующем отведении во фронтальной плоскости указывает на то, что в этом случае вектор направлен параллельно оси отведения. Если стрелка вектора обращена к положительному электроду, то на электрокардиограмме выявляется положительный зубец (вектор 2); если вектор обращен к отрицательному электроду, то зубец направлен вниз (вектор 6).

Электрическая ось сердца в декартовой системе выражается в градусах. Направление по горизонтали 0 – III соответствует 0° , направление вниз (0С) – значению $+90^\circ$ и т. д. Как показано (см. рис. 20), электрическая ось, расположенная в левом нижнем квадранте (со стороны левой руки – точки *B*), считается нормальной и положения анатомической и электрической осей сердца совпадают.

Отклонение оси влево происходит, когда электрическая ось попадает в верхний левый квадрант и может отражать физическое смещение сердца влево, гипертрофию левого желудочка или утрату электрической активности правого желудочка. Отклонение оси вправо происходит, когда электрическая ось приходится на нижний правый квадрант, и это может указывать на физическое смещение сердца вправо, гипертрофию правого желудочка или потерю электрической активности левого желудочка.

Для оценки ориентации электрической оси сердца необходимо записи ЭКГ по трем отведениям сопоставить по величине зубца *R*. Электрическая ось должна располагаться практически параллельно отведению с максимальной величиной зубца *R*. Например, на рис. 20 самый большой зубец 4 регистрируется во II отведении. Отведение II имеет ориентацию $+60^\circ$, что очень близко соответствует реальному расположению электрической и анатомической осей в этом примере.

Определяют электрическую ось по ЭКГ в двух отведениях в следующей последовательности: 1. Измерение величин зубца *R* в двух

отведениях. 2. Отложение векторов этих величин на соответствующие стороны равностороннего треугольника Эйнтховена с учетом полярности. 3. Построение перпендикуляров от начала и конца этих векторов внутрь треугольника с определением положения начала и конца вектора сердечного диполя. 4. Определение угла ориентации диполя.

Электрические характеристики нервной системы и головного мозга. Потенциал действия φ в аксоне на расстоянии x от места

возбуждения $\varphi = \varphi_0 e^{-\frac{x}{\lambda}}$, где $\lambda = \sqrt{\frac{r\rho_m l_m}{2\rho_a}} = \sqrt{\frac{dR_m}{4\rho_a}}$ – константа затухания

потенциала действия; ρ_a – удельное сопротивление аксоплазмы; $R_m = \rho_m l$ – поверхностное сопротивление мембраны аксона; ρ_m – удельное сопротивление мембранного комплекса; l – толщина мембраны; r, d – радиус и диаметр аксона.

Стандартное отклонение амплитуд зубцов ЭЭГ, отводимой от твердой мозговой оболочки: $\sigma = kh\sigma_n \rho \sqrt{R_n}$, где k – коэффициент, численно равный средней плотности пирамидных нейронов в коре; h – толщина коры; σ_n – среднее стандартное отклонение изменения во времени дипольного момента нейронов; ρ – удельное сопротивление коры; R_n – средний парный коэффициент корреляции электрической активности нейронов.

4.3. Примеры решения задач

Пример 1. Определить: число сердечных сокращений в 1 мин, если средний RR интервал равен 1,2 с; сердечный (систолический) индекс, если интервал QRST кардиограммы одного из трёх стандартных отведений равен 0,4 с.

Решение. По условию задачи $\langle RR \rangle = 1,2$ с и равен интервалу времени одного кардицикла. Поэтому число сердечных сокращений в минуту (60 с) составит $N = 60/1,2 = 50$ уд/мин.

Сердечный систолический индекс, определяющий комплекс QRST по отношению к величине $\langle RR \rangle$ интервала, равен ССИ = $= QRST/\langle RR \rangle = 0,4/1,2 = 0,33(3)$, или 33,(3) %.

Пример 2. В одном из отведений наибольшая разность биопотенциала на электрокардиограмме равна 2 мВ (рис. 21). Полагая, что электрический момент сердца параллелен стороне треугольника Эйнтховена, оценить величину электрического момента сердца. Известны $\epsilon_r = 80$, $r = 1$ м.

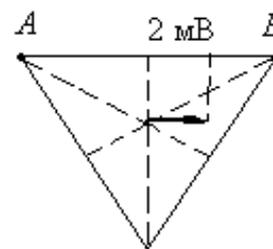


Рис. 21

По условию задачи точки A и B видны от начала вектора дипольного момента под углом $\gamma = 120^\circ$. Между \vec{p} и прямой AB угол $\beta = 0$.

$$p = \frac{\Delta\phi 2\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}{\sin(120/2)\cos 0} = \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 80 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1^2}{0,866 \cdot 1} = 10^{-11} \text{ Кл} \cdot \text{ м}.$$

Пример 3. Нарисовать треугольник Эйнтховена и электрокардиограммы II и III отведений. Согласно теории Эйнтховена восстановить форму векторэлектрокардиограммы и электрокардиограмму третьего отведения. Определить электрическую ось сердца.

Решение. Векторэлектрокардиография – метод анализа, основанный на постоянном определении величины и ориентации диполя сердца на протяжении всего сердечного цикла. Представляя электрический диполь сердца в виде радиуса вектора с началом (0) в центре треугольника Эйнтховена (см. рис. 20, 21), получаем запись последовательных положений конца этого вектора (рис. 22) аналогично бескоординатному способу записи. Непрерывная линия, очерчиваемая концом вектора диполя на протяжении одного сердечного цикла, является векторкардиограммой (ВКГ).

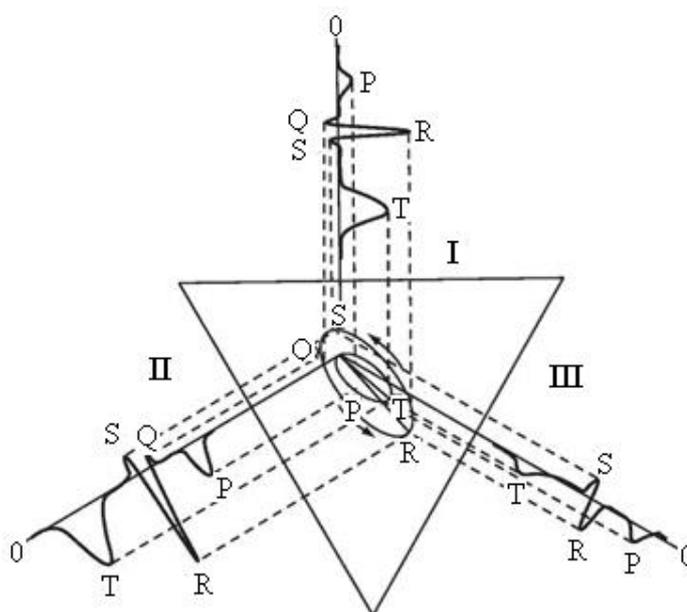


Рис. 22

Проекции изоэлектрических линий обоих отведений (II, III) пересекутся в центральной точке треугольника. В этой диастолической изоэлектрической точке начинается ВКГ, состоящая из трех замкнутых петель, определяющих сердечный цикл.

Из точки O проводим линии, перпендикулярные и пересекающие стороны треугольника, соответствующие отведениям II и III. Эти линии становятся изоэлектрическими для графиков кардиоциклов. В принятом и одинаковом для обоих отведений масштабе откладываем на них участки ЭКГ по отведениям II и III с учетом знака деполяризации – R зубцы должны быть направлены к «плюсу», т. е. к нижней вершине треугольника (см. рис. 20). Проецируем вершины R зубцов на соответствующие стороны треугольника и продлеваем линии проекций до пересечения. Точка пересечения определяет местоположение в принятых координатах конца вектора ЭДС сердца, а линия, проведенная через эту точку и исходную точку O , является электрической осью сердца (ЭОС). В данном случае ЭОС определена 60° . В едином времени последовательные проекции других зубцов дают последовательное формирование непрерывной линии ВКГ. Комплекс QRS, зубцы P и T дадут три петли (см. рис. 22). Из полученных точек построения строятся перпендикуляры к линии отведения I. В системе единого времени выстраивается ЭКГ отведения I (см. рис. 22).

Пример 4. Известна модель, рассматривающая поверхность некоторого живого организма как поверхность простого геометрического тела, например шара, в центре которого расположен эквивалентный токовый диполь сердца. При этом потенциал φ на поверхности такого шара будет задан известной формулой. Найти этот потенциал, считая радиус шара равным 20 см и дипольный момент максимальным. Угол α между направлением дипольного момента p_T и направлением регистрации потенциала равен 45° . Удельное сопротивление ρ взять равным 2 Ом · м. Необходимые данные взять из таблицы прил. 7 для человека.

Решение. Электрический потенциал токового диполя для однородной проводящей среды неограниченных размеров $\varphi = \frac{p_T \cos \alpha}{4\pi\gamma r^2}$, где $\gamma = 1/\rho$ – удельная электрическая проводимость; p_T – дипольный момент токового диполя (см. прил. 7); α – угол между направлением вектора \vec{p} и направлением регистрации φ .

$$\varphi = \frac{3\rho}{4\pi} \frac{p_T \cos \alpha}{r_{\text{ш}}^2} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 2,32 \cdot 10^{-5} \cdot 0,707}{4 \cdot 3,14 \cdot 4 \cdot 10^{-2}} = 0,196 \text{ мВ.}$$

Пример 5. Удельное сопротивление аксоплазмы немиелинизированного аксона кальмара составляет 95 Ом · см. На каком расстоянии от места раздражения потенциал действия уменьшится в e раз, если диаметр аксона 0,8 мм и поверхностное сопротивление мембраны $R_s = \rho l = 0,095$ Ом/м²?

Решение. В соответствии с определением поверхностного сопротивления мембраны $R_s = \rho l$ и константы длины нервного волокна

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho l r}{2\rho_a}} = \sqrt{\frac{R_s d}{4\rho_a}} = \sqrt{\frac{0,095 \cdot 8 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 0,95}} = 1,58 \text{ мм.}$$

Решение стационарного телеграфного уравнения: $\frac{\varphi_0}{\varphi} = e^{x/\lambda}$,

или с учетом условия задачи: $e = e^{x/\lambda}$ и $x = \lambda = 1,58$ мм.

Пример 6. Вычислить стандартное отклонение ЭЭГ у крысы, принимая толщину коры больших полушарий головного мозга $h = 1$ мм; среднюю плотность пирамидных нейронов в коре $k = 15 \cdot 10^{13}$ м⁻³; среднее стандартное отклонение изменения во времени дипольного момента нейронов $\sigma_n = 4,0 \cdot 10^{-15}$ А · м; удельное сопротивление коры $\rho = 3,0$ Ом · м, а средний парный коэффициент корреляции активности нейронов $R_n = 0,002$.

Решение. Стандартное отклонение σ амплитуд зубцов ЭЭГ, отводимое от твердой мозговой оболочки, вычисляется по формуле $\sigma = kh\sigma_n\rho\sqrt{R_n}$ с последующей подстановкой данных условия задачи:

$$\sigma = kh\sigma_n\rho\sqrt{R_n} = 15 \cdot 10^{13} \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 10^{-15} \cdot 3\sqrt{0,2 \cdot 10^{-2}} = 80,5 \text{ мкВ.}$$

4.4. Задачи для практических занятий

Частота сердечных сокращений. Электрическое поле сердца. Проведение сигнала по нервному волокну. Треугольник Эйнтховена. Электрические характеристики нервной системы и головного мозга.

1. Определить число сердечных сокращений в 1 мин, если средний RR интервал равен 0,6 с, и сердечный (систолический) индекс, если интервал QRST кардиограммы одного из трёх стандартных отведений равен 0,49 с. [100 уд/мин, 81,(6) %].

2. Определить число сердечных сокращений в минуту, если средний RR интервал равен 1,5 с, а также и сердечный (систолический) индекс (ССИ), если интервал QRST кардиограммы одного из трёх стандартных отведений равен 0,3 с. [40 уд/мин, 20 %].

3. Рассмотрев в качестве электрической модели тела токовый диполь, определить дипольный момент, считая расстояние между правым плечом (истоком) и лонным сочленением (стоком), равным 80 см, а силу тока взять равной 2 мкА [1,6 мкА · м].

4. Определить потенциал электрического поля сердца на расстоянии $r = 10$ см от сердца. Считать, что сердце представлено моделью эквивалентного токового диполя с дипольным моментом p_T . Направление регистрации потенциала имеет угол 30° по отношению к направлению дипольного момента. Удельная электрическая проводимость среды $\gamma = 0,3$ См, а модуль дипольного момента эквивалентного токового диполя $p_T = 2,32$ мА · см. [0,533 мВ].

5. Нарисовать треугольник Эйнтховена и показать направление электрической оси сердца, предварительно определив угол, образованный диполем с линией отведения I, если амплитуда R зубца во втором отведении 1,4 мВ, а в третьем отведении 0,4 мВ. [46°].

6. В аксоне кальмара генерируется потенциал действия 75 мВ. Оценить величину потенциала после прохождения его по немиелинизированному аксону диаметром 0,12 мм на расстояние 10 мм. Удельное сопротивление аксоплазмы 0,85 Ом · м, поверхностное сопротивление мембраны 0,09 Ом/м². [42,9 мВ].

7. На треугольнике Эйнтховена с электрокардиограммами II и III отведений восстановить формы векторэлектрокардиограммы и электрокардиограммы отведения I. Электрическую ось сердца задать под углом 45°.

5. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В МЕДИЦИНЕ

5.1. Электромагнитные излучения в оптическом и околооптическом диапазоне

Излучение Солнца. В зависимости от высоты Солнца над горизонтом путь солнечных лучей в атмосфере сильно меняется. Даже при самых благоприятных условиях на 1 м^2 поверхности Земли падает поток солнечной радиации 1120 Вт . В июле в Москве при наивысшем стоянии Солнца это значение достигает только 930 Вт/м^2 . Поток солнечной радиации на 1 м^2 площади границы земной атмосферы составляет 1350 Вт . Эту величину называют *солнечной постоянной*.

Молекулы и атомы атмосферных газов (азота, кислорода и др.) земной атмосферы на высотах от 50 до 1000 км интенсивно и избирательно поглощают и рассеивают излучение в частотном спектре. Ослабление радиации атмосферой сопровождается изменением ее спектрального состава. На рис. 23 показан спектр солнечного излучения на границе земной атмосферы (кривая 1) и на поверхности Земли (кривая 2) при наивысшем стоянии Солнца. Кривая 1 близка к спектру черного тела, ее максимум соответствует длине волны 470 нм , что позволяет оценить температуру поверхности Солнца около 6100 К . Кривая 2 имеет несколько линий поглощений с максимумом 555 нм .

Особая роль в фильтрации солнечного излучения принадлежит слою атмосферного озона на высоте около 20 км от поверхности Земли. Он определяет коротковолновую границу около 285 нм спектра солнечного света у поверхности Земли на уровне моря (на экваторе в безоблачный полдень). В северных и южных широтах коротковолновая граница сдвинута в область больших длин волн.

Шкала электромагнитных волн. Частотная шкала электромагнитных волн условно разделена на шесть диапазонов по механизму образования и по возможности зрительного восприятия их человеком: *радиоволны* (длинные, средние, короткие), *инфракрасные*, *видимые*, *ультрафиолетовые*, *рентгеновские* и *гамма-излучение*. Радио-

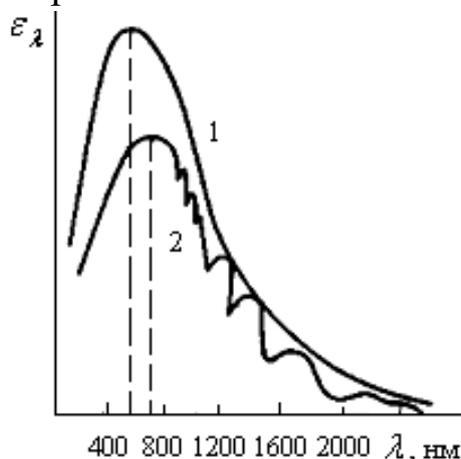


Рис. 23

волны обусловлены переменными токами в проводниках и электронными потоками (макроизлучатели). Инфракрасное, видимое и ультрафиолетовое излучения исходят из атомов, молекул и быстрых заряженных частиц (микроизлучатели).

В медицине и биологии принята иная классификация, основанная на взаимодействии ЭМ волн с биообъектами.

Шкала электромагнитных волн (в медицине)

Низкие (НЧ)	До 20 Гц
Звуковые (ЗЧ)	20 Гц – 20 кГц
Ультразвуковые или надтональные (УЗЧ)	20 кГц – 200 кГц
Высокие (ВЧ)	200 кГц – 30 МГц
Ультравысокие (УВЧ)	30 МГц – 300 МГц
Сверхвысокие (СВЧ)	300 МГц – 300 ГГц
Крайне высокие (КВЧ)	Выше 300 ГГц

Физиотерапевтическую электронную аппаратуру низкой и звуковой частоты называют *низкочастотной*. Электронную аппаратуру всех иных частот называют *высокочастотной*.

Доступный для изучения диапазон электромагнитных явлений подразделяется по специфическим особенностям взаимодействия электромагнитных полей с биологическими системами на 4 участка: 1. Постоянные и низкочастотные поля (примерно метрового диапазона длин волн); 2. СВЧ-диапазон (метровые, дециметровые и сантиметровые волны); 3. КВЧ-диапазон (миллиметровые волны); 4. Диапазон субмиллиметровых волн.

Спектр оптического диапазона ультрафиолетового (200 – 400 нм) и видимого (400 – 760 нм) света биологически активен – имеет ярко выраженную зависимость биологического эффекта от длины волны излучения. Длины волн избирательно запускают фотобиологические процессы.

Инфракрасное излучение. Инфракрасное (ИК) излучение занимает спектральную область между красной границей оптического диапазона ($\lambda = 0,76$ мкм) и коротковолновым радиоизлучением $\lambda = (1 - 2)$ мм. Около 50 % излучения Солнца лежит в ИК области спектра.

Нагретые твердые и жидкие тела имеют непрерывный инфракрасный спектр. Если в законе Вина вместо λ_{\max} подставить пределы ИК-излучения, то получим соответственные пределы темпера-

тур (3800 – 1,5) К. Это означает, что все жидкие и твердые тела в обычных условиях не только являются источниками ИК-излучения, но имеют максимальное излучение в ИК области спектра даже с учетом отклонения реальных тел от серых.

Инфракрасное излучение проникает в тело на глубину около 2 см, прогревая поверхностные слои. Терапевтический эффект обусловлен возникающим температурным градиентом, активизирующим деятельность терморегулирующей системы. Наибольший эффект достигается коротковолновым ИК-излучением, близким к видимому свету.

Теплоотдача организма. Теплообмен организма с окружающей средой происходит посредством теплопроводности, конвекции, испарения и излучения (или поглощения). Распределение количества теплоты между этими процессами зависит от состояния организма и внешней среды. Теплопроводность воздуха мала, поэтому этот вид теплоотдачи незначителен. Конвекция может быть не только естественной, но и вынужденной. В условиях умеренного климата 15 – 20 % теплоотдачи человека осуществляется конвекцией даже с учетом ее уменьшения одеждой. Испарение происходит при помощи легких и с поверхности кожи, обеспечивая без учета физической нагрузки около 30 % теплопотерь. Около 50 % теплопотерь приходится на излучение во внешнюю среду от открытых частей тела и одежды и по большей части в инфракрасном диапазоне 4 – 50 мкм.

Для оценки этих потерь сделаем два основных допущения.

1. Пусть излучаемые тела (кожа человека, ткань одежды) – серые. Это позволяет использовать формулу энергетической светимости R_e серого тела $R_e = \alpha\sigma T^4$. Назовем произведение коэффициента поглощения α на постоянную Стефана – Больцмана σ *приведенным коэффициентом излучения*: $\delta = \alpha\sigma$. Тогда исходная формула переписывается в виде

$$R_e = \delta T^4. \quad (21)$$

2. Применим закон Стефана – Больцмана к неравновесному излучению, к которому, в частности, относится излучение тела человека.

Если раздетый человек с температурой поверхности тела T_1 находится в комнате с температурой T_0 , то его потери излучением могут быть вычислены в соответствии с формулой (21). Человек излучает со всей открытой поверхности площади S тела мощность $P_1 = S\delta T_1^4$. Одновременно человек поглощает часть излучения, попадающего

от предметов комнаты. Мощность, теряемая человеком при взаимодействии с окружающей средой посредством излучения:

$$P = P_1 - P_2 = S\delta(T_1^4 - T_0^4).$$

Для одетого человека под T_1 следует понимать температуру поверхности одежды. С учетом данных табл. 2 поясним роль одежды. При температуре окружающей среды 18°C (291 К) раздетый человек, температура поверхности кожи которого 33°C (306 К), теряет каждую секунду излучением с площади $S = 1,5\text{ м}^2$ энергию $1,5 \cdot 5,1 \cdot 10^{-8}(306^4 - 291^4) = 122\text{ Дж/с}$. При той же температуре окружающей среды в хлопчатобумажной одежде, температура поверхности которой 24°C (297 К), каждую секунду теряется посредством излучения энергия $1,5 \cdot 4,2 \cdot 10^{-8}(297^4 - 291^4) = 37\text{ Дж/с}$.

Табл. 2. Коэффициенты α и δ для разных объектов

Объект	Коэффициент	α	$\delta, 10^{-8}\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$
Хлопчатобумажная ткань		0,73	4,2
Шерсть, шелк		0,76	4,3
Кожа человека		0,90	5,1

При температуре поверхности кожи 33°C максимум спектральной плотности энергетической светимости тела человека в соответствии с законом Вина попадает на длину волны $9,5\text{ мкм}$.

При сильной температурной зависимости энергетической светимости даже малое повышение температуры поверхности вызовет фиксируемое изменение излучаемой мощности. Поясним это, продифференцировав уравнение (21): $dR_e = 4\delta T^3 dT$. Разделив это выражение на уравнение (21), получим $dR_e/R_e = 4dT/T$. Относительное изменение энергетической светимости больше относительного изменения температуры излучающей поверхности в четыре раза. Если температура поверхности тела человека изменится на 1% (3°C), то энергетическая светимость изменится на 4% .

Понятие о термографии. Воспалительные процессы, опухоли меняют характер распределения температуры по поверхности тела, поэтому регистрация излучения разных участков поверхности тела человека и определение температуры становится диагностическим методом – *термографией*. Перепад температуры на поверхности тела определяется жидкокристаллическими индикаторами с чувствительными оптическими свойствами к изменениям температуры.

Ультрафиолетовое излучение. *Ультрафиолетовое (УФ) излучение* занимает спектральную область между фиолетовой границей видимого света ($\lambda = 400$ нм) и длинноволновой частью рентгеновского излучения ($\lambda = 10$ нм). На границе земной атмосферы 9 % спектра Солнца приходится на ультрафиолетовое излучение. УФ-спектр условно делят на три области: *A* (400 – 315 нм), *B* (315 – 280 нм) и *C* (280 – 200 нм). В области ниже 200 нм УФ-излучение сильно поглощается всеми телами, в том числе и тонкими слоями воздуха, и интереса для медицины не представляет.

Основные биологические эффекты УФ-излучения: эритемное и бактерицидное. В естественных условиях солнечное УФ-излучение оказывает влияние на кожу. Так фотохимическое образование витамина D из кожного провитамина определяет влияния на различные виды обмена веществ, особенно на нормализацию фосфорно-кальциевого обмена.

Для количественной оценки действия света используется степень покраснения кожи (эритема). Стандартный биологический эффект как минимальное, обнаруживаемое глазом покраснение кожи соответствует *минимальной эритемной дозе (МЭД)*. Механизм развития эритемной реакции находится в зависимости от двух связанных процессов местного и общего действия: образования физиологически активных веществ в месте облучения и воздействия на рецепторные аппараты кожи. Соотношение нервнорефлекторного и гуморального механизмов действия определяется длиной волны УФ: коротковолновая часть оказывает раздражающее влияние через нервную систему, а длинноволновая (мягкая) компонента способствует образованию физиологически активных веществ.

Помимо эритемы ультрафиолетовое излучение вызывает гиперпигментацию кожи – загар, запуская цепь реакций биосинтеза меланина в специализированных клетках меланоцитах. Загар начинает развиваться в коже через 2 – 3 сут после облучения, достигая максимума на 13 – 21 день и затем угасая за несколько месяцев. Установлено три механизма защитного действия меланина: служит оптическим экраном, поглощающим ультрафиолетовый свет; перехватывает образующиеся при УФ-облучении свободные радикалы, за счет чего цепные реакции окисления обрываются; связывает ионы двухвалентного железа, принимающие активное участие в образовании свободных радикалов.

5.2. Основные термины, определения и формулы

Фотометрия. *Сила света* J – характеристика источника света. Единица силы света, кандела (кд) – сила света, испускаемого нормально с поверхности площадью $1/600000$ м² излучателя при температуре, равной температуре затвердевания платины при давлении 101 325 Па.

Световой поток Φ – средняя мощность энергии излучения, оцениваемая по световому ощущению, которое она производит. Единица светового потока *люмен* (лм) – световой поток, излучаемый точечным источником силой света 1 кд в телесном угле 4π , ср.

Светимость R – величина, равная отношению светового потока, испускаемого светящейся поверхностью, к площади этой поверхности:

$$R = \frac{\Phi_{\text{изл}}}{S}.$$

Единица светимости *люкс* (лк) – освещенность поверхности площадью 1 м² при световом потоке падающего на нее излучения, равном 1 лм.

Яркость L – световая величина, предназначенная для оценки излучения или отражения света в заданном направлении. Яркость определяют отношением силы света dJ элементарной поверхности dS в заданном направлении к проекции светящейся поверхности на плоскость, перпендикулярную этому направлению:

$$L = \frac{dJ}{dS_0} = \frac{dJ}{dS \cdot \cos\alpha},$$

где α – угол между перпендикуляром к светящейся поверхности и заданным направлением. Единица яркости $[L] = \text{кд}/\text{м}^2$. Световой эталон соответствует яркости $6 \cdot 10^5 \text{ кд}/\text{м}^2$.

Источники, для которых условия позволяют принять яркость, одинаковую по всем направлениям, называют *ламбертовскими*. (Строго говоря, таким источником является только черное тело). Такие источники удовлетворяют закону Ламберта $R = \pi L$.

Освещенность E – величина, равная отношению потока, падающего на данную поверхность, к площади $S_{\text{обл}}$ облучаемой поверхности: $E = \Phi/S_{\text{обл}}$.

Освещенность E , создаваемая точечным источником света на расстоянии R от него и при угле падения световых лучей i : $E = I \cos i / R^2$.

Фотометрические величины для ультрафиолетовой части спектра:

- поток излучения $\Phi = 4\pi J$, эр или бакт;
- сила излучения $J = \Phi/4\pi$, эр/ср или бакт/ср;
- облученность $E = \Phi/S_{\text{обл}}$, эр/м² или бакт/м²;
- облученность от точечного источника $E = J \cos i / R^2$.

Линейное увеличение микроскопа $N = n_1 n_2$, где n_1 – линейное увеличение объектива; n_2 – линейное увеличение окуляра.

Линейное увеличение микроскопа по теории Аббе $N = \frac{L\delta}{F_1 F_2}$,

где $L = 25$ см – расстояние наилучшего зрения, δ – оптическая длина тубуса (расстояние между задним фокусом объектива и передним фокусом окуляра), F_1 и F_2 – фокусные расстояния объектива и окуляра.

Разрешающая способность микроскопа $z = \frac{A}{0,5\lambda} = \frac{n \sin\left(\frac{u}{2}\right)}{0,5\lambda}$,

где A – числовая апертура: $A = n \sin(u/2)$, $u/2$ – апертурный угол объектива, u – угол раскрытия объектива, λ – длина волны света, n – показатель преломления.

Предел разрешения микроскопа $D = \frac{1}{z} = \frac{0,5\lambda}{n \sin\left(\frac{u}{2}\right)}$.

Импульс электрона в электрическом поле $p = \sqrt{2meU}$, где m – масса электрона, e – величина заряда электрона, U – ускоряющее напряжение электрического поля, в котором движется электрон.

Длина волны электрона в электрическом поле $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meU}}$, где

h – постоянная Планка, m – масса электрона, e – заряд электрона, U – ускоряющее напряжение электрического поля, в котором движется электрон.

Взаимодействие света с биологическим веществом. Фотобиология. Интенсивность света, вышедшего из слоя вещества толщиной l после поглощения (закон Бугера): $I_l = I_0 e^{-\chi l}$, где I_0 – интенсивность света, падающего на слой прозрачной, оптически однородной поглощающей среды, χ – натуральный показатель поглощения. Для

монохроматического света χ – монохроматический натуральный показатель поглощения.

Закон Бугера можно записать через показательную функцию с основанием 10: $I_l = I_0 \cdot 10^{-\chi' l}$, где показатель поглощения $\chi' \approx 0,43 \chi$.

Для поглощения света в растворах выполняется закон Бугера – Ламберта – Бэра: $I_l = I_0 e^{-\chi_1 c l}$, или $I_l = I_0 \cdot 10^{-\chi_1' c l}$, где χ_1 и χ_1' – натуральный (или монохроматический натуральный) показатель поглощения и показатель поглощения света на единицу концентрации вещества, c – концентрация растворенного вещества. Коэффициент пропускания τ равен отношению интенсивностей света, прошедшего сквозь данную среду и падающего на эту среду: $\tau = I_l / I_0$.

Оптическая плотность раствора $D = \lg\left(\frac{1}{\tau}\right) = \lg\left(\frac{I_0}{I_l}\right) = \chi_1' c l$, где

c – концентрация растворенного вещества, χ_1' – монохроматический натуральный показатель поглощения света на единицу концентрации вещества, l – толщина слоя.

Уменьшение интенсивности света вследствие рассеяния $I_l = I_0 \cdot 10^{-k' l}$, где k' – показатель рассеяния, l – толщина слоя, I_l – интенсивность света, прошедшего через слой данной рассеивающей среды, I_0 – интенсивность света, падающего на рассеивающую среду.

Совместное действие поглощения и рассеяния света приводит к изменению интенсивности света по закону $I_l = I_0 \cdot 10^{-\mu' l}$, где показатель ослабления $\mu' = \chi' + k'$.

Закон Малюса: $I = I_0 \cos^2 \varphi$, где I_0 – интенсивность плоско поляризованного света, падающего на анализатор и вышедшего из анализатора, φ – угол между плоскостью поляризации поляризованного света и главной плоскостью анализатора.

Закон Брюстера: $\operatorname{tg} \theta_B = n$, где n – относительный показатель преломления двух сред; θ_B – угол полной поляризации, т. е. угол падения, при котором отраженный от границы двух диэлектриков свет полностью поляризован.

Угол поворота плоскости поляризации:

- в оптически активном веществе $\alpha = \alpha_0 l$,
- в растворе (закон Био) $\alpha = [\alpha_0] c l$,

где α_0 – постоянная вращения (вращательная способность), $[\alpha_0]$ – удельное вращение, c – концентрация раствора оптически активного вещества, l – толщина слоя оптически активного вещества.

Тепловое излучение тел. Термография. Метод термографии основан на регистрации различия теплового излучения здоровых и больных органов из-за малой разницы температур.

Закон Стефана – Больцмана: $R_e = \sigma T^4$, где R_e – энергетическая светимость абсолютно черного тела, T – абсолютная температура этого тела, постоянная Стефана – Больцмана $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · К⁴). Для серого тела $R_e = \delta T^4$, где $\delta = \alpha\sigma$ – приведенный коэффициент излучения.

Закон смещения Вина: $\lambda_m = b/T$, где λ_m – длина волны, соответствующая максимуму спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного (серого) тела, постоянная Вина $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$ м · К.

Энергия фотона $\varepsilon = h\nu$, или $\varepsilon = \hbar\omega$, где постоянная Планка $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с, $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж · с.

5.3. Примеры решения задач

Пример 1. Ультрафиолетовая лампа ЛЭ-30 создает световой поток 110 лм, эритемный поток 750 эр и бактерицидный поток 125 бакт. Определить световую, эритемную и бактерицидную отдачу лампы, если ее мощность 30 Вт. Вычислить силу света и силу эритемного и бактерицидного излучений лампы. Какую облученность и освещенность создает эта лампа на расстоянии 3 м от нее при нормальном падении света? Считать лампу точечным источником.

Решение. Все отдачи определяются одинаково – как отношение соответствующего потока к мощности источника света:

$$K = \frac{\Phi}{N} = \frac{110}{30} = 3,67 \text{ лм/Вт. } K_э = \frac{0,75}{30} = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ эр/Вт.}$$

$$K_б = \frac{0,125}{30} = 4,17 \cdot 10^{-3} \text{ бакт/Вт.}$$

Аналогично определяются соответствующие силы излучения:

$$I = \frac{\Phi}{4\pi} = \frac{110}{4\pi} = 8,76 \text{ кд. } I_э = \frac{0,75}{4\pi} = 5,97 \cdot 10^{-2} \text{ эр/ср.}$$

$$I_б = \frac{0,125}{4\pi} = 9,95 \cdot 10^{-3} \text{ бакт/ср.}$$

Освещенность, создаваемая точечным источником света:

$$E = \frac{I}{R^2} = \frac{8,76}{9} = 0,973 \text{ лк.}$$

Аналогично $E_3 = \frac{5,97 \cdot 10^{-2}}{9} = 6,63 \cdot 10^{-3} \text{ эр/м}^2 = 6,63 \text{ мэр/м}^2$.

$$E_6 = \frac{9,95 \cdot 10^{-3}}{9} = 1,10 \cdot 10^{-3} \text{ бакт/м}^2 = 1,10 \text{ мбакт/м}^2.$$

Пример 2. Окно в виварии имеет площадь $S = 2,5 \times 3,5 \text{ м}^2$, и на него в полдень падает световой поток 0,11 Млм. Считая коэффициент отражения света от каждой поверхности оконного стекла по 4 %, определить освещенность окна с наружной его стороны, а также яркость и светимость окна внутри вивария. Поглощением света внутри стекла пренебречь.

Решение. Вычислим освещенность окна:

$$E = \frac{\Phi}{S} = \frac{0,11 \cdot 10^6}{8,75} = 1,26 \cdot 10^4 \text{ лк.}$$

Часть светового потока, отраженная от внешней поверхности стекла, равна $\rho\Phi$. Поэтому световой поток Φ_1 , прошедший в стекло $\Phi_1 = \Phi - \rho\Phi = (1 - \rho)\Phi$.

Точно так же можно написать, что световой поток Φ_2 , вышедший из стекла после отражения на внутренней поверхности:

$$\Phi_2 = (1 - \rho)\Phi, \quad \Phi_1 = (1 - \rho)^2 E.$$

Таким образом, светимость R стекла внутри вивария создается тем световым потоком, который прошел через стекло:

$$R = \frac{\Phi_2}{S} = \frac{(1 - \rho)^2 \Phi}{S} = (1 - \rho)^2 E.$$

Яркость и светимость связаны соотношением $R = \pi L$, или $L = R / \pi$.

Произведем вычисления: $R = (1 - 0,04)^2 1,26 \cdot 10^4 = 1,16 \cdot 10^4 \text{ лк.}$

$$L = 1,16 \cdot 10^4 / 3,14 = 3,68 \cdot 10^3 \text{ кд/м}^2.$$

Пример 3. В микроскопе фокусное расстояние объектива равно $F_{об} = 5,4 \text{ мм}$, окуляра $F_{ок} = 20 \text{ мм}$. Определить увеличение микроскопа при оптической длине тубуса $\delta = 17 \text{ см}$.

Решение. По теории Аббе и при расстоянии наилучшего зрения $L = 25 \text{ см}$ линейное увеличение N микроскопа

$$N = \frac{(L\delta)}{F_{об}F_{ок}} = \frac{25 \cdot 10^{-2} \cdot 17 \cdot 10^{-2}}{5,4 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \cdot 10^{-3}} = 394.$$

Пример 4. Определить изменение разрешающей способности микроскопа в обычном биологическом микроскопе с сухим объективом по сравнению с иммерсионным микроскопом. В качестве иммерсионной среды используется бромнафталин с $n = 1,65$.

Решение. Изменение разрешающей способности z микроскопа определим в форме отношения

$$z_2/z_1 = \frac{0,5\lambda_1 n_2 \sin(u/2)}{n_1 \sin(u/2) 0,5\lambda_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1,65}{1} = 1,65.$$

Пример 5. Объект наблюдают в микроскоп с красным светофильтром, пропускающим длину волны 645 нм, а затем с зеленым светофильтром при длине волны 490 нм. Во втором случае была использована иммерсионная жидкость – монобромнафталин с показателем преломления 1,66. Апертурный угол объектива микроскопа 65° . Вычислить в обоих случаях предел разрешения микроскопа.

Решение. Предел разрешения микроскопа $D = \frac{1}{z} = \frac{0,5\lambda}{n \sin(u/2)}$.

Рассчитаем для обоих случаев:

$$D_1 = \frac{0,5\lambda}{n_1 \sin(u/2)} = \frac{0,5 \cdot 6,45 \cdot 10^{-7}}{1 \cdot \sin 65} = 0,356 \text{ мкм},$$

$$D_2 = \frac{0,5\lambda}{n_2 \sin(u/2)} = \frac{0,5 \cdot 4,9 \cdot 10^{-7}}{1,66 \cdot \sin 65} = 0,164 \text{ мкм}.$$

Пример 6. Определить предел разрешения электронного микроскопа D и длину волны электрона λ , если скорость движения электронов $v = 10^6$ м/с, апертурный угол $u/2 = 70^\circ$.

Решение. Для расчета длины волны воспользуемся формулой де Бройля $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 10^6} = 0,73 \text{ нм}$.

С учетом определенного значения λ предел разрешения микроскопа

$$D = \frac{0,5\lambda}{n \sin(u/2)} = \frac{0,5 \cdot 0,73 \cdot 10^{-9}}{1 \cdot \sin 70} = 0,39 \text{ нм}.$$

Пример 7. Коротковолновое УФ-излучение длиной волны 200 нм оказывает наиболее выраженное бактерицидное действие, обусловленное изменением структуры белков, входящих в состав бактерий. Вычислить энергию, необходимую для изменения структуры этих белков. Ответ выразить в эВ. Культура бактерий находится в чашке Петри диаметром 100 мм. Какое количество фотонов УФ-излучения попадает на поверхность культуры бактерий за 10 мин, если интенсивность облучения 0,3 мВт/см²?

Решение. Энергия кванта $\varepsilon = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{2 \cdot 10^{-7}} = 9,95 \cdot 10^{-19}$ Дж,

и при 1 эВ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж $\varepsilon = \frac{9,95 \cdot 10^{-19}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 6,22$ эВ.

Интенсивность потока излучения равна энергии, падающей на единицу площади поверхности за единицу времени. Энергия потока равна произведению энергии одного фотона на число фотонов, т. е. $W = n\varepsilon$.

Таким образом, $I = \frac{n\varepsilon}{St}$, и $n = \frac{ISt}{\varepsilon}$, а с учетом площади круглой

чашки Петри $S = \frac{\pi d^2}{4}$ получаем $n = \frac{I\pi d^2 t}{4\varepsilon}$.

Подставим числовые значения:

$$n = \frac{3 \cdot 3,14 \cdot 0,01 \cdot 600}{4 \cdot 9,95 \cdot 10^{-19}} = 1,42 \cdot 10^{19}.$$

Энергия одного фотона 6,22 эВ. На поверхность чашки Петри попадает $1,42 \cdot 10^{19}$ фотонов.

Энергия, необходимая для изменения структуры белков, равна $8,83 \cdot 10^{19}$ эВ, или 14 Дж.

Пример 8. При прохождении толщины слоя $d = 8$ см окрашенного раствора лекарственного вещества в кювете интенсивность света уменьшилась на 18 %. Определить показатель поглощения χ раствора. Во сколько раз уменьшится интенсивность света по сравнению с первым раствором, если концентрацию раствора увеличить в 5 раз?

Решение. В соответствии с законом Бугера интенсивность света, прошедшего через слой вещества толщиной d , уменьшается по экспоненциальному закону $I_1 = I_0 e^{-\chi d}$, где χ – показатель поглощения вещества.

$$\text{Логарифмируя, получим } \lg \frac{I_0}{I} = \chi d \lg e = 0,43 \chi d .$$

$$\text{Отсюда } \chi = \frac{\lg \frac{I_0}{I}}{0,43d} . \text{ По условию задачи } \frac{I_0 - I_1}{I_0} = 0,18 .$$

$$\text{Преобразуя, получим } \frac{I_1}{I_0} = 1 - 0,18 = 0,82, \text{ или } \frac{I_0}{I_1} = \frac{1}{0,82} = 1,22 .$$

$$\chi = \frac{\lg 1,22}{0,43 \cdot 0,08} = \frac{\lg 1,22}{0,0344} = 2,51 \text{ м}^{-1} .$$

Поглощение монохроматического света окрашенными растворами подчиняется закону Бэра, согласно которому показатель поглощения прямо пропорционален концентрации вещества в растворе, т. е. $\chi = \alpha c$, где α – показатель поглощения для раствора единичной концентрации.

Для растворов двух концентраций можно написать закон Бугера – Бэра $I_1 = I_0 e^{-\alpha c_1 d}$; $I_2 = I_0 e^{-\alpha c_2 d}$.

$$\text{Логарифмируя, получим } \lg \frac{I_0}{I_1} = \alpha c_1 d \lg e ; \lg \frac{I_0}{I_2} = \alpha c_2 d \lg e .$$

$$\text{Отсюда } \frac{c_1}{c_2} = \frac{\lg \frac{I_0}{I_1}}{\lg \frac{I_0}{I_2}} \text{ и } \lg \frac{I_0}{I_2} = \frac{c_2}{c_1} \lg \frac{I_0}{I_1} = 5 \lg \frac{1}{0,82} = 5 \lg 1,22 = 0,431 .$$

$$\text{Находим } \frac{I_0}{I_2} = 2,698 .$$

$$\text{Таким образом, } I_2 = \frac{I_0}{2,698}, \text{ а по условию задачи } I_1 = 0,82 I_0 .$$

$$\text{Поэтому } \frac{I_2}{I_1} = \frac{1}{2,698 \cdot 0,82} = 0,452 .$$

Интенсивность света во втором растворе уменьшится и будет равна $I_2 = 0,452 I_1$.

Пример 9. При освещении ультрамалой частицы объемом $21,5 \text{ мкм}^3$ светом неизвестной длины волны интенсивность его была в 2 раза выше, чем при освещении оранжевым светом с длиной волны $\lambda = 620 \text{ нм}$ частицы объемом 40 мкм^3 . Определить длину волны неизвестного света и определить ее место в цветовом спектре.

Решение. При определении объема частицы предложенным методом характерный размер частицы должен превышать величину длины волны света. Принимаем частицу кубиком с характерным размером грани l . Для второго случая характерный размер $l = (40)^{2/3} = 11,7 \text{ мкм}$, что почти в двадцать раз больше длины волны $\lambda_2 = 620 \text{ нм}$.

Интенсивность света по определению обратно пропорциональна длине волны и площади нормальной площадки, поэтому отношение

$$\text{интенсивностей } \frac{I_1}{I_2} = \frac{\lambda_2 l_2^2}{\lambda_1 l_1^2}.$$

Подставляем данные условия задачи:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\lambda_2 l_2^2}{\lambda_1 l_1^2} = 2, \quad \lambda_1 = \frac{\lambda_2 l_2^2}{2 l_1^2} = \frac{620 \cdot 10^{-9} \cdot 11,7}{7,73} = 469 \text{ нм}.$$

Пример 10. Какое количество теплоты затрачивает человек на парообразование, если за сутки он выделяет $0,5 \text{ кг}$ пота? Каково полное количество теплоты Q_Σ , выделяемое человеком за сутки, если его масса 70 кг и теплопродукция взрослого человека $1,6 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{с})$? Удельная теплота парообразования пота $2,45 \text{ МДж}/\text{кг}$.

Решение. Скрытая теплота парообразования:

$$\Delta Q = rm = 2,45 \cdot 10^6 \cdot 0,5 = 1,23 \text{ МДж},$$

$$Q_\Sigma = mq' \Delta t = 70 \cdot 1,6 \cdot 24 \cdot 3,6 \cdot 10^3 = 9,7 \text{ МДж}.$$

Пример 11. Определить теплоотдачу (количество теплоты, излучаемое 1 м^2 поверхности тела лошади за единицу времени) за час, если температура воздуха $15 \text{ }^\circ\text{C}$, а температура кожи лошади $37 \text{ }^\circ\text{C}$. Приведенный коэффициент излучения кожи $\delta = 4,9 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}^4$.

Решение. Согласно закону Стефана – Больцмана тепловой поток, излучаемый нагретым телом: $\Phi_{\text{и}} = R_e S t$. Теплообмен между двумя телами с разными температурами заключается в том, что тело 1 с более высокой температурой излучает сильнее и передает телу 2 с более низкой температурой больше энергии в единицу времени, чем само оно получает от тела 2. Таким образом, от тела 1 к телу 2 передается

тепловой поток $\Phi_{\text{и}} = \Phi_1 - \Phi_2 = \delta St(T_1^4 - T_2^4)$, где δ – приведенный коэффициент излучения, зависящий от природы тела, его температуры и в значительной степени от состояния его поверхности.

Подставим в это выражение числовые значения заданных величин

$$\Phi_{\text{и}} = 4,9 \cdot 10^{-8} \cdot 1 \cdot 3,6 \cdot 10^3 (310^4 - 288^4) = 4,15 \cdot 10^5 \text{ Дж.}$$

Пример 12. Считая Солнце абсолютно черным телом с температурой поверхности $T = 5800 \text{ К}$, определить солнечную постоянную. Радиус Солнца $R = 6,95 \cdot 10^8 \text{ м}$, расстояние от Земли до Солнца $l = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ м}$. Определить расход энергии и массы Солнцем при излучении.

Решение. Солнечная постоянная a равна потоку солнечной радиации, приходящейся на 1 м^2 площади границы земной атмосферы:

$$a = \left(\frac{R}{l}\right)^2 \sigma T^4 = \left(\frac{6,95 \cdot 10^8}{1,5 \cdot 10^{11}}\right)^2 5,67 \cdot 10^{-8} (5800)^4 \approx 1369 \text{ Вт/м}^2.$$

Расход энергии Солнцем при излучении $\frac{dE}{dt} = \pi R^2 \sigma T^4 \approx 9,73 \times 10^{25} \text{ Дж/с.}$

Расход массы Солнцем при излучении $\frac{dm}{dt} \approx 1,08 \cdot 10^9 \text{ кг/с.}$

Пример 13. Найти связь между относительным изменением температуры излучающего серого тела (dT/T) и соответствующим относительным изменением его энергетической светимости (dR/R). Считать $dT \ll T$.

Решение. Условие $dT \ll T$ позволяет продифференцировать уравнение Стефана – Больцмана с приведенным коэффициентом излучения $dR_e = 4\delta T^3 dT$. Разделив это выражение на указанное исходное уравнение, получим $dR_e/R_e = 4dT/T$. Это означает, что относительное изменение энергетической светимости больше относительного изменения температуры излучающей поверхности в четыре раза.

Пример 14. Оценить температуру пламени ночного костра (цвет пламени оранжевый).

Решение. Из цветового интервала $\lambda_{\text{max}} = 590 - 620 \text{ нм}$ принимаем $\lambda_{\text{max}} = 600 \text{ нм}$. По наиболее вероятной длине волны оцениваем значение температуры пламени $T = \frac{b}{\lambda_{\text{max}}} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 10^{-7}} = 0,483 \cdot 10^4 = 483 \text{ К.}$

5.4. Задачи для практических занятий

Фотометрия. Фотобиология

1. Оценить мощность излучения Солнца и расход солнечной массы, если энергетическая освещенность, создаваемая Солнцем на границе земной атмосферы, равна $1,37 \text{ кВт/м}^2$ (солнечная постоянная), а среднее расстояние от поверхности Солнца до границы земной атмосферы принять равным 150 млн км. [$38,4 \cdot 10^{25} \text{ Вт}$, $0,63 \cdot 10^{10} \text{ кг}$].

2. Над центром круглой клетки диаметром 2,5 м на высоте 3 м от пола подвешена лампа, создающая силу эритемного облучения 19,9 мэр/ср. Определить эритемную облученность в центре и на краю пола клетки. [$2,21 \text{ мэр/м}^2$, $1,9 \text{ мэр/м}^2$].

3. В ультрафиолетовом микроскопе используют лучи с длиной волны 0,2 мкм. Можно ли обнаружить этим микроскопом внутри клетки рибосомы диаметром 30 нм? Апертурный угол объектива микроскопа 65° . [Нельзя, так как $d_p < D = 111 \text{ нм}$].

4. В реакции фотосинтеза на образование одной молекулы кислорода расходуется 8 фотонов. Определить количество световой энергии, необходимой при фотосинтезе для образования 1 моля кислорода. Длину световой волны принять равной граничной между зеленым и желтым цветовыми диапазонами. Коэффициент использования световой энергии 0,34. [$87,4 \text{ кДж}$].

5. Лазерное излучение мощностью 2 мВт может вызвать ожог сетчатки глаза за время 2 с при площади пятна $1,2 \text{ мм}^2$. Вычислить интенсивность потока лазерного излучения. Определить количество фотонов, падающих за это время на сетчатку, если длина волны излучения 632,8 нм. [$1,28 \cdot 10^{16}$, $1,7 \text{ кВт/м}^2$].

6. Фотометрия крови в кювете показала, что интенсивность света, прошедшего через столбик сыворотки крови, уменьшается на 14 %. При сравнении – прохождение через такую же толщину воды уменьшает интенсивность света на 3 %. Вычислить показатель поглощения сыворотки, если известно, что показатель поглощения воды равен $0,2 \text{ м}^{-1}$. [$0,992 \text{ м}^{-1}$].

7. Определить угол поворота плоскости колебания светового луча для мочи больного диабетом при концентрации сахара $c = 0,05 \text{ г/см}^3$. Длина трубки $l = 20 \text{ см}$, удельное вращение сахара для используемого света $[\alpha_0] = 66,7 \text{ град} \cdot \text{см}^3/(\text{г} \cdot \text{дм})$. [$6,7 \text{ град}$].

Тепловое излучение тел. Термография

1. Вычислить энергию, теряемую человеком каждую секунду при теплообмене лучеиспусканием (и поглощением) с окружающей средой. Рассмотреть два случая: а) раздетый человек; б) человек, одетый в костюм из шерстяной ткани. Принять коэффициент поглощения кожи человека $\alpha_1 = 0,9$, шерстяной ткани $\alpha_2 = 0,76$; температуры поверхности кожи $t_1 = 30^\circ\text{C}$, поверхности ткани $t_2 = 20^\circ\text{C}$ и окружающего воздуха $t_3 = 18^\circ\text{C}$. Площадь поверхности, через которую осуществляется теплообмен лучистой энергией с окружающей средой, принять равной $S = 1,2\text{ м}^2$. [74 Дж/с, 8,8 Дж/с].

2. Определить длину волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости следующих источников теплового излучения: а) тело человека с температурой поверхности кожи $t = 30^\circ\text{C}$; б) спираль электрической лампочки ($T = 2000\text{ К}$); в) поверхность Солнца ($T = 5800\text{ К}$); г) атомная бомба, имеющая в момент взрыва температуру $T = 10^7\text{ К}$. Излучающие тела считать абсолютно черными или серыми. [9,57 мкм, 1,45 мкм, 0,5 мкм, 0,29 нм].

3. На сколько сместится максимум спектральной плотности энергетической светимости при изменении температуры поверхности тела человека от $t_1 = 36,6^\circ\text{C}$ до $t_2 = 38,6^\circ\text{C}$. Тело человека считать серым. Вывести расчетную формулу. [Максимум сместится на 0,06 мкм в сторону более коротких волн].

6. РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА

Таблица вариантов РГР

Вариант	Номер задачи												
	01	11	21	31	41	51	61	71	81	91	101	111	121
1	01	11	21	31	41	51	61	71	81	91	101	111	121
2	02	12	22	32	42	52	62	72	82	92	102	112	122
3	03	13	23	33	43	53	63	73	83	93	103	113	123
4	04	14	24	34	44	54	64	74	84	94	104	114	124
5	05	15	25	35	45	55	65	75	85	95	105	115	125
6	06	16	26	36	46	56	66	76	86	96	106	116	126
7	07	17	27	37	47	57	67	77	87	97	107	117	127
8	08	18	28	38	48	58	68	78	88	98	108	118	128
9	09	19	29	39	49	59	69	79	89	99	109	119	129
10	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130

Задачи РГР

Рабочие параметры рентгеновской трубки. Тормозное излучение

01. Определить скорость v падающих на антикатод рентгеновской трубки электронов, если в сплошном спектре рентгеновского излучения минимальная длина волны $\lambda_{\min} = 1$ нм.

02. Определить коротковолновую границу λ_{\min} сплошного спектра рентгеновского излучения, если рентгеновская трубка работает под напряжением $U = 30$ кВ.

03. Рентгеновская трубка работает под напряжением $U = 1$ МВ. Определить наименьшую длину волны λ_{\min} рентгеновского излучения.

04. Определить КПД рентгеновской трубки с анодным зеркалом из вольфрама. Напряжение между анодом и катодом 60 кВ, ($k = 1,5 \cdot 10^{-10} \text{ В}^{-1}$).

05. Определить материал анодного зеркала рентгеновской трубки, если при напряжении между анодом и катодом 91,32 кВ КПД трубки равен 0,1 % ($k = 1,5 \cdot 10^{-10} \text{ В}^{-1}$).

06. Найти граничную длину волны тормозного рентгеновского излучения для напряжений $U_1 = 2$ кВ и $U_2 = 20$ кВ. Во сколько раз энергия фотонов этих излучений больше энергии фотона с длиной волны $\lambda = 760$ нм, соответствующей красному цвету?

07. В каком случае поток рентгеновского излучения будет больше: при увеличении вдвое силы тока и сохранении напряжения или при увеличении вдвое напряжения и сохранении величины тока?

08. Определить поток рентгеновского излучения при $U = 10$ кВ, $I = 1$ мА. Анод изготовлен из вольфрама. Скольким фотонам в секунду соответствует этот поток при допущении излучения электромагнитной волны длиной $3/2$ от длины волны, соответствующей границе спектра тормозного рентгеновского излучения ($k = 10^{-9} \text{ В}^{-1}$)?

09. Определить коротковолновую границу непрерывного рентгеновского спектра, если уменьшение приложенного к рентгеновской трубке напряжения на 23 кВ увеличивает искомую длину волны в 2 раза.

10. Определить напряжение U , приложенное к рентгеновской трубке, чтобы получить рентгеновские лучи длиной волны $0,016 \text{ \AA}$.

Характеристическое излучение

11. Вычислить наибольшую длину волны λ_{\max} в K -серии характеристического рентгеновского спектра скандия.

12. При исследовании линейчатого рентгеновского спектра некоего элемента было найдено, что длина волны λ линии K_{α} равна 76 пм. Определить элемент анодного зеркала.

13. На рентгеновской трубке антикатод покрыт ванадием. Определить наименьшее напряжение U_{\min} , обеспечивающее в спектре излучения все линии K -серии. Граница K -серии ванадия $\lambda = 2,26 \text{ \AA}$.

14. Определить энергию ε фотона, соответствующего линии K_{α} в характеристическом спектре марганца ($Z = 25$).

15. В атоме вольфрама электрон перешел с M -слоя на L -слой. Определить длину волны испущенного фотона. Постоянная экранирования $\sigma = 5,5$.

16. Вычислить длину волны λ и энергию ε фотона K_{α} -линии в спектре характеристического рентгеновского излучения платины.

17. При каком наименьшем напряжении U_{\min} на рентгеновской трубке начинают появляться линии серии K_{α} меди?

18. Найти наибольшую длину волны K -серии рентгеновских лучей в трубке с антикатодом из железа, меди и серебра (см. прил. 1, табл. П1.2).

19. При переходе электрона в атоме вольфрама с M -слоя на L -слой испускаются рентгеновские лучи с длиной волны $\lambda = 1,4 \text{ \AA}$. Определить постоянную экранирования σ для L -серии рентгеновских лучей.

20. При переходе электрона в атоме с L -слоя на K -слой испускаются рентгеновские лучи с длиной волны $0,788 \text{ \AA}$. Определить элемент.

Ионизационные счетчики

21. Установленный вблизи препарата радиоактивного изотопа серебра счетчик Гейгера регистрирует поток β -частиц. При первом измерении поток частиц $\Phi_1 = 87 \text{ с}^{-1}$, а по истечении суток поток $\Phi_2 = 22 \text{ с}^{-1}$. Определить период T полураспада изотопа.

22. Счетчик детектора альфа-, бета- и гамма-излучения, размещенного на расстоянии 15 см от радиоактивного источника, фиксирует скорость счета выше фонового. При вставке листа бумаги и листа алюминия между источником и детектором скорость счета практически не меняется. Определить с объяснением вид излучения.

23. Счетчик детектора альфа-, бета- и гамма-излучения, расположенного на расстоянии $d = 1$ см от радиоактивного источника, фиксирует скорость счета значительно выше фонового. При удалении источника от детектора скорость счета монотонно падает обратно пропорционально d^2 . Определить с объяснением вид излучения.

24. Счетчик детектора альфа-, бета- и гамма-излучения, расположенного в непосредственной близости от радиоактивного источника, фиксирует большую скорость счета. При вставке листа бумаги между источником и детектором скорость счета практически не меняется. При вставке листа алюминия толщиной 1 мм скорость счета заметно снижается. При увеличении толщины алюминия до пяти листов скорость счета упала до фонового. Определить с объяснением вид излучения.

25. Счетчик детектора альфа-, бета- и гамма-излучения, расположенного в непосредственной близости от радиоактивного источника, фиксирует большую скорость счета. При вставке листа бумаги между источником и детектором скорость счета практически не меняется. При вставке листа алюминия толщиной 5 мм скорость счета заметно снижается. Увеличение толщины вставки за счет листа свинца толщиной 5 см привело к снижению скорости счета до фонового. Объяснить вид излучения.

26. Определяющий альфа-, бета- и гамма-излучения детектор и радиоактивный источник помещены в герметичную камеру на расстоянии 5 см друг от друга и при атмосферном давлении. На счетчике детектора наблюдается скорость счета на уровне фонового. По мере выкачивания воздуха из камеры скорость счета растет и достигает максимального значения 2000 с^{-1} . Определить с объяснением вид излучения.

27. Эксперимент предыдущей задачи (№ 26) был повторен через шесть часов. Максимальная скорость счета составила 250 с^{-1} . Определить период T полураспада радиоактивного изотопа источника.

28. Счетчик, соединенный с трубкой Гейгера – Мюллера, последовательно каждую минуту показывает 10, 8, 15, 13, 19, 12, 10, 13, 8, 17 импульсов в минуту. После экспериментов с радиоактивным источником при измерении фоновой радиации счетчик последовательно каждую минуту показывает 20, 15, 13, 8, 12, 6, 9, 11, 12, 9 импульсов в минуту. Определить средний фоновый счет.

29. Ионизационные счетчики Гейгера – Мюллера регистрируют в отсутствие радиоактивного препарата радиационный фон. Какое количество радона создает фон, дающий один импульс счетчика за 5 с?

30. При помощи ионизационного счетчика исследуется скорость распада радиоактивного препарата с периодом полураспада $T \gg 10$ с. В начальный момент времени счетчик дает 75 импульсов за 10 с. Определить, какое число импульсов за 10 с даст счетчик по истечении половины полупериода распада.

Радиоактивные изотопы элементов

31. Определить активности 1 мг фосфора $^{32}_{15}\text{P}$ и радия $^{228}_{88}\text{Ra}$.

32. Определить удельную активность изотопов урана $^{235}_{92}\text{U}$ и $^{238}_{92}\text{U}$.

33. Вычислить удельную активность радона $^{222}_{86}\text{Rn}$ и кобальта $^{60}_{27}\text{Co}$.

34. Определить отношение массовой активности a_1 стронция $^{90}_{38}\text{Sr}$ к массовой активности a_2 радия $^{226}_{88}\text{Ra}$.

35. За сутки из $2 \cdot 10^6$ атомов изотопа радона распадается десятая часть. Определить период полураспада T .

36. Число атомов радона уменьшается за сутки на 16,6 %. Определить постоянную распада λ радона.

37. Определить промежуток времени τ , в течение которого активность A изотопа стронция $^{90}_{38}\text{Sr}$ уменьшится в 10 раз; в 100 раз.

38. Определить активность и число частиц радиоактивных газов в атмосфере, если за 1 мин произошло $3,2 \cdot 10^4$ распадов. Постоянную распада λ принять равной $1,28 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$.

39. Период полураспада одного из радиоактивных изотопов радона равен 3,825 дня. Чему равна активность 1 мкг этого изотопа?

40. В ампулу помещен радон активностью 400 мКи. Через какой интервал времени радон обретет активность $2,22 \cdot 10^9$ расп/с?

Поглощенная, экспозиционная и эквивалентная дозы излучения

41. Определить в единицах СИ и внесистемных единицах поглощенную дозу и ее мощность в мягких тканях человека, если мощность экспозиционной дозы при рентгеновской томографии составила $5,8 \text{ пКл}/(\text{кг} \cdot \text{с})$. Обследование длится 2 мин. Переходный коэффициент $f = 0,9$.

42. Какая доля молекул воздуха при нормальных условиях ионизируется рентгеновским излучением с экспозиционной дозой $X = 258 \text{ мкКл}/\text{кг}$?

43. Определить энергию W , поглощаемую воздухом массой $m = 5$ г при нормальных условиях с экспозиционной дозой γ -излучения $X = 258$ мкКл/кг.

44. Создаваемая удаленным источником γ -излучения с энергией фотонов $\varepsilon = 2$ МэВ мощность \dot{X} экспозиционной дозы равна $0,86$ мкА/кг. Определить толщину x свинцового экрана, снижающего мощность экспозиционной дозы до предельно допустимого уровня $X = 0,86$ нА/кг.

45. На расстоянии $l = 10$ см от точечного источника γ -излучения мощность экспозиционной дозы $P_{\text{экс}} = 0,86$ мкА/кг. Определить наименьшее расстояние l_{min} от этого источника, на котором экспозиционная доза не превысит предельно допустимую $X_{\text{пд}} = 5,16$ мкКл/кг за 6 ч. Поглощением γ -излучения в воздухе пренебречь.

46. Определить поглощенную и эквивалентную дозы, если тканью массой 2 кг поглощается α -частица с энергией 0,5 МэВ.

47. Определить поглощенную и эквивалентную дозы, если мягкой тканью массой 0,5 кг поглощается рентгеновское излучение с энергией 0,1 МэВ.

48. Определить поглощенную и эквивалентную дозы, их мощности и мощность экспозиционной дозы, полученные костной тканью человека ($f = 2$), если при четырехчасовом облучении величина экспозиционной дозы γ -излучения составила 46 нКл/кг.

49. Определить поглощенную и эквивалентную дозы, их мощности и мощность экспозиционной дозы в мягких тканях человека ($f = 0,9$), если известно, что при трехчасовом облучении экспозиционная доза γ -излучения составила 39 нКл/кг.

50. Определить в СИ и внесистемных единицах эквивалентную дозу в мягких тканях человека ($f = 1$), если они поглощают α -излучение. При этом экспозиционная доза составила 0,04 пКл/кг.

Акустика. Эффект Доплера. Характеристики звуковых волн

51. Два наблюдателя движутся навстречу друг другу со скоростями 7,2 и 5,4 км/ч соответственно. Первый держит динамик, который испускает звук с частотой 120 Гц. Определить зарегистрированные вторым наблюдателем частоты колебаний: а) перед встречей; б) после нее.

52. Ультразвуковая волна с частотой колебаний 1,1 МГц отражается от поверхности клапана сердца, движущегося навстречу распространению волны со скоростью 6,2 см/с. Определить изменение частоты колебаний в отраженной волне, вызванное эффектом Доплера.

53. Определить скорость движения стенки артерии, если частота ультразвука 1 МГц, а сдвиг частоты за счет Доплер-эффекта составил 2,7 Гц. (Скорость распространения ультразвука 1500 м/с).

54. Ультразвуковая волна с частотой колебаний 1 МГц отражается от поверхности клапана сердца, движущегося навстречу распространению волны со скоростью 6 см/с. Определить изменение частоты колебаний в отраженной волне, вызванное эффектом Доплера.

55. Скорость движения клапана сердца составляет 1,3 мм/с. Определить частоту ультразвуковой волны, распространяющейся со скоростью 1520 м/с, если сдвиг частоты за счет Доплер-эффекта составил 5 Гц.

56. Ультразвуковая волна с частотой колебаний 1,2 МГц отражается от поверхности клапана сердца, движущегося навстречу распространению волны со скоростью 5,8 см/с. Определить изменение частоты колебаний в отраженной волне, вызванное эффектом Доплера.

57. Определить доплеровский сдвиг частоты движения стенки артерии, движущейся со скоростью 1,5 мм/с, если частота ультразвука 0,88 МГц, а скорость его распространения 1500 м/с.

58. Интенсивность звука, создаваемого криком, равна 100 мкВт/м². Вычислить величину акустического давления, создаваемого в воздухе.

59. Согласно санитарным нормам, нахождение человека в помещении с уровнем интенсивности шума 100 дБ не должно превышать 30 мин. Какая энергия проходит за это время через барабанную перепонку человека, площадь которой 66 мм²?

60. Вычислить коэффициент отражения ультразвука на границе между костью черепа и мозгом. Плотности мозга и кости черепа соответственно равны $1,05 \cdot 10^3$ и $1,7 \cdot 10^3$ кг/м³. Скорости ультразвука в этих тканях соответственно 1,52 и 3,66 км/с.

Акустика. Характеристики восприятия звуковых волн

61. Оценить скорость распространения звука в костной ткани.

62. Рассчитать длину стальной струны радиусом 0,3 мм, если при натяжении силой 6 Н она издает тон частотой 350 Гц.

63. Определить силу натяжения стальной струны длиной 0,5 м и диаметром 0,4 мм, необходимую для генерации звука с частотой 130,5 Гц.

64. Шум в поезде метро составляет 95 дБ, а на улице – 70 дБ. Во сколько раз различаются интенсивности шума в этих местах?

65. Два звука одинаковой частоты отличаются по интенсивности на $\Delta L = 30$ дБ. Найти отношение амплитуд звукового давления.

66. На производстве определен допустимый предел уровня шума $E = 70$ фон. Принимая соответствие шума звуку с частотой $\nu = 1$ кГц, определить максимально допустимую интенсивность звука.

67. Два звука одинаковой частоты $\nu = 1$ кГц отличаются по громкости на $\Delta E = 20$ фон. Во сколько раз отличаются их интенсивности?

68. Определить величину громкости, амплитуду звукового давления и амплитуду смещения частиц в волне, если интенсивность гармонической звуковой волны частотой 1 кГц в воздухе составила $0,1$ мВт/м².

69. Нормальный разговор человека оценивается уровнем громкости звука в $E = 50$ фон (для частоты $\nu = 1$ кГц). Определить уровень громкости звука, соответствующего трем одновременно говорящим людям.

70. Уличный шум интенсивностью 1 мкВт/м² и громкостью 80 фон слышен в помещении как шум громкостью 40 фон. Найти интенсивность звука в помещении и оценить изменение коэффициента k в формуле психофизического закона Вебера – Фехнера.

Гальванизация. Диатермия. Дарсонвализация. Индуктотермия

71. Оценить эквивалентную емкость тела человека, считая ее равной емкости электропроводящего шара того же объема. Среднюю плотность тела принять равной $\rho = 1$ г/см³; масса человека $m = 60$ кг.

72. При гальванизации через участок тела лошади за время лечебной процедуры (20 мин) проходит электрический заряд 90 Кл. Определить среднюю плотность тока, если площадь электродов 350 см².

73. При лечении невралгии на плечевой сустав накладывают электроды и используют аппарат для гальванизации. Эффективная

плотность тока должна быть 0,4 мА на 1 см² площади активного электрода, а суммарный ток не должен превышать 200 мА. Определить:

1. Необходимую к использованию площадь активного электрода;
2. Величину полного заряда, прошедшего через тело, при времени процедуры 25 мин.

74. Чему равна мощность тока, расходуемая на нагревание мягких тканей площадью 10 см², находящихся на глубине 5 см, если удельное сопротивление тканей равно 2 Ом · м, а плотность тока 10 мА/мм²?

75. Определить плотность тока, необходимую для электрохирургического воздействия с рассечением жировых тканей с удельным сопротивлением 33,3 Ом · м, площадью 2 мм². Глубина разреза 5 мм. Мощность тока, расходуемая на тепловом действии высокочастотных электрических токов на проводящие ткани и их нагревание, равна 436 Вт.

76. При диатермии печени крупного рогатого скота один электрод площадью 12 · 20 см² накладывают спереди на область печени, а второй – сзади напротив первого электрода. Процедуру проводят 15 мин при силе тока между электродами 1,1 А. Какое количество теплоты выделится в объеме печени толщиной 5 см? Удельное сопротивление печени 10 Ом · м.

77. Определить количество теплоты, выделяющееся при индуктотермии через 15 мин в сухой коже с удельным сопротивлением 0,1 МОм · м и в крови с удельным сопротивлением 1,66 Ом · м. Частота прибора, используемого в стационаре, 13,56 МГц, амплитудное значение магнитной индукции равно 0,01 Тл, коэффициент k взять равным 0,332 мм². Полученные результаты сравнить друг с другом и проанализировать.

78. Аппарат для индуктотермии генерирует переменное напряжение частотой 13,56 МГц. Во сколько раз снизится тепловой эффект, если индуктотермическую катушку подсоединить к аппарату для диатермии, работающему на частоте 1,625 МГц?

79. Чему равна мощность тока, расходуемая на нагревание жировых тканей площадью 20 см², находящихся на глубине 3 см, если их удельное сопротивление равно 33,3 Ом · м, а плотность тока 2 мА/мм²?

80. Определить плотность тока, необходимую для сваривания кожных тканей с удельным сопротивлением 1 МОм · м, площадью 10 мм², глубиной 1 мм. Мощность тока, расходуемая на нагревание, равна 250 Вт.

Переменный ток. УВЧ-терапия

81. Сопротивление образца мышечной ткани животного изменяется при пропускании через него сначала постоянного, а затем переменного тока. При какой частоте переменного тока полное сопротивление ткани будет в 3 раза больше величины ее активного, омического сопротивления, равного 850 Ом? Емкость ткани равна 0,01 мкФ.

82. Отношение индуктивного сопротивления к емкостному сопротивлению тела равно 0,4. При какой частоте переменного тока проводились измерения, если индуктивность тела 4 мГн, а его емкость 30 мкФ?

83. При воспалительных процессах в тканях структура клеточных мембран изменяется и соответственно меняется их емкость. Измерения емкостного сопротивления ткани в норме проводились при частоте переменного тока 1,3 кГц. Измерения емкостного сопротивления той же ткани при воспалении проводились при тех же условиях, но частота переменного тока была 6,2 кГц. Величина емкостного сопротивления во втором случае оказалась в 3,5 раза меньше, чем в первом. Во сколько раз уменьшилась емкость ткани при воспалении?

84. Во сколько раз изменится полное сопротивление образца мышечной ткани при измерении его в цепях переменного тока с частотами 10 и 100 кГц? Активное сопротивление ткани $R = 80$ Ом, ее емкость $C = 0,5$ мкФ.

85. Оценить количество теплоты, выделяющееся в жировом слое с относительной диэлектрической проницаемостью 5,55 при УВЧ-терапии, если угол диэлектрических потерь 20° , амплитуда напряженности электрической компоненты УВЧ электромагнитного поля равна 3000 В/м. Использовать принятую в России стандартную частоту для УВЧ-аппаратов.

86. Определить импеданс и сдвиг фаз, происходящий в здоровой ткани десны, если суммарная емкость $C = 9,7$ нФ, электрическое сопротивление $R = 50,8$ кОм, а циклическая частота $\omega = 2000$ с⁻¹. Активное сопротивление и емкость включены последовательно.

87. Вычислить импеданс и сдвиг фаз в ткани десны при воспалительном процессе, если суммарная емкость $C = 11,1$ нФ, электрическое сопротивление $R = 110$ кОм, а частота $\nu = 3000$ Гц. Активное сопротивление и емкость включены последовательно.

88. Определить, какое количество теплоты выделится за 10 мин в $0,5 \text{ дм}^3$ при УВЧ-терапии ткани с удельным сопротивлением $8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, если эффективная напряженность электрического поля между электродами 350 В/м ?

89. Объем жировой ткани, подвергающейся УВЧ-терапии, имеет площадь 8 см^2 и толщину 3 см . Каково её активное сопротивление? Вычислить полное сопротивление участка ткани, если его электроемкость 85 пФ и частота электрического поля, генерируемого аппаратом УВЧ-терапии, равна $40,58 \text{ МГц}$. Удельное сопротивление жировой ткани $35 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

90. Вычислить угол сдвига фаз между током и напряжением для кожи лягушки при частоте переменного тока 2 кГц , если ее активное сопротивление $2,5 \text{ кОм}$ и электроемкость $0,022 \text{ мкФ}$. Считать активное сопротивление и электроемкость соединенными последовательно.

Эквивалентный токовый диполь сердца

91. Определить потенциал электрического диполя в точке (A), если угол между направлением дипольного момента и радиус-вектором от диполя до точки A равен 30° . Длина радиус-вектора, проведенного от середины плеча диполя до точки (A), равна $0,10 \text{ м}$. Модуль радиус-вектора много больше величины плеча диполя. Электрический момент диполя $p = 0,2 \text{ пКл} \cdot \text{м}$, относительная диэлектрическая проницаемость среды $\epsilon_r = 85$.

92. Определить потенциал электрического поля сердца, если он измерялся на расстоянии $r = 14 \text{ см}$ от сердца. Считать, что сердце представлено моделью эквивалентного токового диполя с дипольным моментом p_T . Направление регистрации потенциала имеет угол 60° по отношению к направлению дипольного момента. Удельная электрическая проводимость среды $\gamma = 0,3 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, а модуль дипольного момента эквивалентного токового диполя равен $2,32 \text{ мА} \cdot \text{см}$.

93. Известна модель, рассматривающая поверхность некоторого живого организма как поверхность простого геометрического тела, например шара, в центре которого расположен эквивалентный токовый диполь сердца. При этом потенциал ϕ на поверхности такого шара будет задан известной формулой. Найти этот потенциал, считая радиус шара $r_{\text{ш}} = 11 \text{ см}$ и дипольный момент максимальным. Угол α между направлением модуля-вектора p_T и направлением регистрации потенциала равен 30° . Удельное сопротивление $\rho = 2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Необходимые данные взять из таблицы прил. 7 для человека.

94. Известна модель, рассматривающая поверхность некоторого живого организма как поверхность простого геометрического тела, например шара, в центре которого расположен эквивалентный токовый диполь сердца. При этом потенциал φ на поверхности такого шара будет задан известной формулой. Найти этот потенциал, считая радиус шара $r_{ш} = 3$ см и дипольный момент максимальным. Угол α между направлением модуля-вектора r_T и направлением регистрации потенциала равен 30° . Удельное сопротивление $\rho = 2$ Ом \cdot м. Необходимые данные взять из таблицы прил. 7 для крысы.

95. Известна модель, рассматривающая поверхность некоторого живого организма как поверхность простого геометрического тела, например шара, в центре которого расположен эквивалентный токовый диполь сердца. При этом потенциал φ на поверхности такого шара будет задан известной формулой. Найти этот потенциал, считая радиус шара $r_{ш} = 0,5$ см и дипольный момент максимальным. Угол α между направлением модуля-вектора r_T и направлением регистрации потенциала равен 45° . Удельное сопротивление $\rho = 2$ Ом \cdot м. Необходимые данные взять из таблицы прил. 7 для лягушки.

96. Известна модель, рассматривающая поверхность некоторого живого организма как поверхность простого геометрического тела, например шара, в центре которого расположен эквивалентный токовый диполь сердца. При этом потенциал φ на поверхности такого шара будет задан известной формулой. Найти этот потенциал, считая радиус шара $r_{ш} = 15$ см и дипольный момент максимальным. Угол α между направлением модуля-вектора r_T и направлением регистрации потенциала равен 60° . Удельное сопротивление $\rho = 2$ Ом \cdot м. Необходимые данные взять из таблицы прил. 7 для собаки.

97. Известна модель, рассматривающая поверхность некоторого живого организма как поверхность простого геометрического тела, например шара, в центре которого расположен эквивалентный токовый диполь сердца. При этом потенциал φ на поверхности такого шара будет задан известной формулой. Найти этот потенциал, считая радиус шара $r_{ш} = 70$ см и дипольный момент максимальным. Угол между направлением дипольного момента и направлением регистрации потенциала равен 30° . Удельное сопротивление ρ взять равным 2 Ом \cdot м. Данные взять из таблицы прил. 7 для лошади.

98. Известна модель, рассматривающая поверхность некоторого живого организма как поверхность простого геометрического тела, например шара, в центре которого расположен эквивалентный токочный диполь сердца. При этом потенциал φ на поверхности такого шара будет задан известной формулой. Найти этот потенциал, считая радиус шара равным 90 см, равным расстоянию r до точки измерения потенциала. Угол между направлением дипольного момента p_T и направлением регистрации потенциала равен 60° . Удельное сопротивление ρ взять равным $2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Данные взять из таблицы прил. 7 для лошади.

99. Определить потенциал поля токового диполя в точке A , находящейся в безграничной проводящей среде на расстоянии 10 см от диполя, если удельная электрическая проводимость этой среды равна $0,5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Диполь считать точечным. Угол между направлением от диполя на точку A и направлением дипольного момента равен 60° , а дипольный момент $5 \text{ мкА} \cdot \text{м}$.

100. Рассмотрев в качестве электрической модели сердца токочный диполь, определить дипольный момент сердца, принимая расстояние между истоком и стоком равным 5 см, а силу тока – равной 0,1 мА.

Модельные характеристики ЭКГ, ЭЭГ и проведения ПД

101. Согласно представлениям Эйнтховена сердце подобно электрическому диполю. Электрический момент сердца – диполя – периодически изменяется как по величине, так и по направлению. Биопотенциалы (электрокардиограммы) регистрируются между вершинами равностороннего треугольника, который образуется двумя руками и одной ногой. Какой вид имели бы электрокардиограммы, снятые в трех возможных отведениях, если бы электрический момент сердца равномерно вращался во фронтальной плоскости? Указать общие формулы и построить три «электрокардиограммы», откладывая по оси абсцисс время, а по оси ординат – разность биопотенциалов.

102. Какой вид имели бы электрокардиограммы, снятые в трех возможных отведениях, если бы электрический момент сердца – диполя – изменялся по закону $p = p_0 \cos \omega t$ во фронтальной плоскости, сохраняя ориентацию в пространстве параллельно одной из сторон треугольника Эйнтховена? Указать общие формулы и построить графики.

103. Используя треугольник Эйнтховена, вычислить угол, образованный токовым диполем с линией I отведения, если амплитуда R зубца во II отведении равна 1,5 мВ, а в III отведении 0,8 мВ.

104. Используя треугольник Эйнтховена, определить угол, образованный диполем с линией I отведения, если амплитуда R зубца во втором отведении 1,2 мВ, в третьем отведении 0,3 мВ. Нарисовать треугольник и показать направление электрической оси сердца.

105. Определить угол, образованный диполем с линией отведения I в треугольнике Эйнтховена, если амплитуда зубца R во втором отведении равна 1,0 мВ, а в третьем отведении равна 0,3 мВ. Нарисовать треугольник Эйнтховена и показать направление электрической оси сердца.

106. Определить потенциал электрического поля сердца, если он измерялся на расстоянии $r = 30$ см от сердца. Считать, что сердце представлено моделью эквивалентного токового диполя с дипольным моментом p_T , а направление регистрации потенциала имеет угол 30° по отношению к направлению дипольного момента. Удельное сопротивление среды ρ взять равным $2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, а модуль эквивалентного дипольного момента считать равным $1,63 \text{ мА} \cdot \text{см}$.

107. На каком расстоянии от места раздражения немиелинизированного аксона кальмара потенциал действия уменьшится в 1000 раз, если константа затухания сигнала в аксоне 1,68 мм? Вычислить удельное сопротивление аксоплазмы, если диаметр аксона 0,1 мм и поверхностное сопротивление мембраны $0,1 \text{ Ом}/\text{м}^2$.

108. Чему равно стандартное отклонение ЭЭГ у кошки, имеющей толщину коры больших полушарий головного мозга $h = 2$ мм? Для расчета использовать следующие значения: средняя плотность пирамидных нейронов в коре k равна $5 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}$, среднее стандартное отклонение изменения во времени дипольного момента нейронов $\sigma_n = 5,8 \cdot 10^{-15} \text{ А} \cdot \text{м}$, удельное сопротивление коры ρ равно $3,1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, а средний парный коэффициент корреляции активности нейронов $R_n = 0,001$.

109. Нарисовать треугольник Эйнтховена и электрокардиограммы I и II отведений. Восстановить формы векторэлектрокардиограммы и электрокардиограммы отведения III. Электрическую ось сердца задать под углом 30° . Использовать все поле тетрадной страницы.

110. На треугольнике Эйнтховена с электрокардиограммами II и III отведений восстановить векторэлектрокардиограмму и электрокардиограмму I отведения. Электрическую ось сердца задать под углом 45° . Использовать все поле тетрадной страницы.

Фотометрия. Фотобиология

111. Ультрафиолетовая лампа создает на расстоянии 3,5 м эритемную облученность в 30 мэр/м^2 при нормальном падении лучей. Принимая лампу точечным источником, вычислить величину созданного ею эритемного потока и ее эритемную отдачу, если она потребляет мощность 400 Вт.

112. Для обезвреживания бактериального токсина необходимо создать бактериальную облученность 156 мбакт/м^2 . Токсин в чашке Петри помещают под УФ-источником, создающим поток 4,5 бакт. На каком расстоянии следует поместить чашки от облучателя – точечного источника?

113. Можно ли рассмотреть эритроцит диаметром 5 мкм в микроскопе с апертурным углом 70° с красным светофильтром, пропускающим свет с длиной волны 655 нм?

114. Определить линейное увеличение микроскопа N , если диаметр рассматриваемого эритроцита 7,5 мкм, а размер полученного изображения этого эритроцита 4,1 мм.

115. Порог зрительного ощущения глаза человека в области максимальной чувствительности при длине световой волны 555 нм составляет $3 \cdot 10^{-17} \text{ Вт}$. Какое количество фотонов попадает при этом в глаз за минуту?

116. Определить концентрацию раствора, если одинаковая освещенность фотометрических полей была получена при толщине $l = 8 \text{ мм}$ у эталонного 3 %-го раствора и $l_2 = 24 \text{ мм}$ – у исследуемого раствора.

117. Предельный угол полного внутреннего отражения для роговицы глаза равен 46° . Вычислить для роговицы угол полной поляризации.

118. Определить концентрацию сахара в моче больного диабетом, если в трубке сахариметра длиной 20 см плоскость поляризации света повернулась на 40° . Удельное вращение сахара $[\alpha_0] = 66,5 \text{ град} \cdot \text{см}^3/(\text{г} \cdot \text{дм})$.

119. Определить объем ультрамалой частицы, освещенной голубым светом с длиной волны $\lambda = 500 \text{ нм}$, если при облучении частицы с объемом $2 \cdot 10^3 \text{ мкм}^3$ красным светом с длиной волны $\lambda = 700 \text{ нм}$ интенсивность была в два раза меньше.

120. Определить коэффициент пропускания и оптическую плотность вещества, которое освещается светом с интенсивностью $I_0 = 85 \text{ Вт/м}^2$. Вещество толщиной 2 см имеет концентрацию 0,1 М, а молярный показатель поглощения $\chi' = 450 \text{ М}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

Тепловое излучение тел. Термография

121. Какое количество эфира при температуре кипения должно испариться, чтобы энтропия увеличилась на 200 Дж/кг? Температура кипения эфира 34,8 °С, удельная теплота парообразования эфира $r = 0,355$ МДж/кг.

122. Лечение хронического воспаления сустава проводили раздельно: наложением озокеритовой аппликации массой 5 кг и аппликации из горячей глины массой 6,5 кг. Температура озокерита и глины соответственно 68 и 60 °С. Удельные теплоемкости озокерита и глины соответственно 3,35 и 2,09 кДж/(кг · К). Температура тела 38 °С. Во сколько раз теплота, переданная телу озокеритом, больше, чем глиной?

123. Определить энергетическую светимость тела человека при температуре $t = 36$ °С, принимая для тела коэффициент поглощения $\alpha = 0,9$.

124. Определить температуру поверхности Солнца как абсолютно черного тела. Радиус Солнца $6,95 \cdot 10^8$ м, расстояние от Земли до Солнца 150 млн км. Солнечная постоянная равна 1,37 кВт/м².

125. Вычислить, во сколько раз отличаются абсолютные температуры и энергетические светимости участков поверхности тела человека, имеющих температуры 30,5 и 30,0 °С соответственно.

126. Оценить изменение максимума спектральной плотности энергетической светимости при изменении температуры поверхности тела человека от $t_1 = 30$ °С до $t_2 = 31$ °С. Тело человека считать серым.

127. Как изменится максимум спектральной плотности энергетической светимости при изменении температуры тела человека на 1 %?

128. Из закона Вина получить зависимости: а) между изменением температуры dT тела и изменением длины волны $d\lambda_{\max}$, соответствующей максимуму спектральной плотности энергетической светимости; б) между относительным изменением температур тела (dT/T) и относительным изменением длины волны, соответствующей максимуму спектральной плотности энергетической светимости ($d\lambda_{\max}/\lambda_{\max}$). Считать $dT \ll T$.

129. При температуре воздуха 20 °С сравнить теплоотдачу тел лошади и птицы. Средние температуры кожи лошади и птицы соответственно равны 25 и 33 °С при одинаковом коэффициенте поглощения. Определить длины волн максимума излучения их тел.

130. Сравнить теплоотдачу тела человека с постоянной температурой 37 °С при температурах воздуха 27 и 7 °С. Определить длину волны максимума излучения тела.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Материал учебного пособия по содержанию удовлетворяет полному курсу в теоретической (лекционной) и практической частях, а также и в части самостоятельной работы студентов. Для этого потребовался большой объем необходимого справочного материала, который вынесен в приложения, большей частью представленные в форматах цифровых таблиц. Разный масштаб табличных параметров приводит к необходимости использования степенных множителей, а малый формат издания сборника заставляет использовать вместо цифровых степеней множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц (прил. 8).

Физические основы биомедицинских технологий трактуются автором в общепринятых формах научных направлений: радиобиологии, электрофизиологии, магнитобиологии и биомагнетизма, фотобиологии и т. п. Каждому из таких научных направлений посвящены многочисленные монографии и учебники известных и современных авторов, поэтому сложность заключалась не в том, где взять материал, а в том – как разместить весь материал в объеме 9 лекций и 9 практик. Так или иначе чем-то пришлось пожертвовать. Каждый из разделов при сокращении потерял очень многое. Структура по содержанию и принятая логика учебного пособия являются авторскими, т. е. субъективными. Часть цифрового табличного материала вынесена за пределы основного объема в приложения. В последнем (прил. 9) приведен дидактический материал в форме теоретических вопросов для контрольных текущих проверок знаний.

В части медицинских терминов и подходов использована обширная библиография в ранее опубликованных учебных пособиях автора, позволяющая найти и необходимые первоисточники, и обширный словарь используемых физических, биологических и медицинских терминов и определений с переводными и толковыми значениями.

Автор благодарит методические комиссии кафедр «Общая и прикладная физика» и «Биотехнические и электронные системы и технологии» за ценные замечания и рекомендации в процессе работы над учебным пособием.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Справочный материал

Приложение 1

Табл. П1.1. Линии K-серии рентгеновского характеристического спектра элементов

Элемент	Длина волны, Å			Элемент	Длина волны, Å		
	α_2	α_1	β		α_2	α_1	β
Алюминий	9,89		9,56	Цинк	1,439	1,435	1,295
Кремний	7,128	7,125	6,768	Германий	1,258	1,254	1,129
Хром	2,294	2,290	2,085	Селен	1,109	1,105	0,992
Марганец	2,106	2,102	1,910	Вольфрам	0,214	0,209	0,184
Железо	1,940	1,936	1,757	Золото	0,185	0,180	0,159
Кобальт	1,793	1,789	1,621	Свинец	0,170	0,165	0,146
Никель	1,662	1,658	1,500	Уран	0,131	0,126	0,111
Медь	1,544	1,541	1,392				

Табл. П1.2. Граница K-серии рентгеновских лучей для разных материалов антикатода

Элемент	Длина волны, Å	Элемент	Длина волны, Å
Вольфрам	0,178	Платина	0,158
Золото	0,153	Серебро	0,484
Медь	1,38		

Решение интеграла уравнения (5) на стр. 12.

$$\begin{aligned} \tau &= \lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt = \lambda \int_0^{\infty} \frac{x}{\lambda} e^{-x} d\left(\frac{x}{\lambda}\right) = \frac{1}{\lambda} \int_0^{\infty} x e^{-x} dx = * \left[\begin{array}{l} d(xe^{-x}) = e^{-x} dx - xe^{-x} dx; \\ xe^{-x} dx = e^{-x} dx - d(xe^{-x}) \end{array} \right] * = \\ &= \frac{1}{\lambda} \left[\int_0^{\infty} e^{-x} dx - \int_0^{\infty} d(xe^{-x}) \right] = \frac{1}{\lambda} \left(-\frac{1}{e^x} \Big|_0^{\infty} - \frac{x}{e^x} \Big|_0^{\infty} \right) = \frac{1}{\lambda} (0 + 1 - 0 + 0) = \frac{1}{\lambda}. \end{aligned}$$

Примечание. Принятое обозначение $=*|..|*$ = использовано для проведения промежуточных подготовительных процедур применения интегрирования по частям.

Табл. П2.1. Некоторые радиоактивные изотопы и их характеристики

Элемент	Нуклид	Период полураспада	Энергия излучения, МэВ	
			α -, β -частицы	γ -лучи
Тритий	^3_1H	12,33 года	β^- 0,0186	–
Гелий	^6_2He	0,808 с	β^- 3,508	–
Литий	^8_3Li	0,842 с	β^- 13	–
Углерод	$^{14}_6\text{C}$	5730 лет	β^- 0,156	–
Натрий	$^{22}_{11}\text{Na}$	2,6 лет	β^+ 0,545	1,275
	$^{24}_{11}\text{Na}$	15,02 ч	β^- 1,39	1,37; 2,75
Магний	$^{27}_{12}\text{Mg}$	9,46 мин	β^- 1,75	0,18; 0,84; 1,013
Фосфор	$^{32}_{15}\text{P}$	14,36 сут	β^- 1,71	–
Кальций	$^{45}_{20}\text{Ca}$	163,8 сут	β^- 0,252	–
Скандий	$^{46}_{21}\text{Sc}$	83,83 сут	β^- 0,36	0,89; 1,12
Кобальт	$^{60}_{27}\text{Co}$	5,27 года	β^- 0,314	1,17; 1,33
Стронций	$^{89}_{38}\text{Sr}$	50,55 сут	β^- 1,46	–
	$^{90}_{38}\text{Sr}$	28,6 лет	β^- 0,546	–
Йод	$^{130}_{53}\text{I}$	12,36 ч	β^- 1,7; 1,04	0,419; 0,538
	$^{131}_{53}\text{I}$	8,04 сут	β^- 0,806; 0,606	0,284; 0,364; 0,637
Цезий	$^{137}_{55}\text{Cs}$	30 лет	β^- 0,514; 1,176	0,66
Висмут	$^{210}_{83}\text{Bi}$	5 сут	β^- 1,16	–
Полоний	$^{214}_{84}\text{Po}$	0,164 мс	α 7,69	–
Радон	$^{222}_{86}\text{Rn}$	3,82 сут	α 5,49	–
Радий	$^{226}_{88}\text{Ra}$	1600 лет	α 4,78	0,186
	$^{228}_{88}\text{Ra}$	5,75 года	β^- 0,04	–
Уран	$^{234}_{92}\text{U}$	$2,45 \cdot 10^5$ лет	α 4,77	–
	$^{235}_{92}\text{U}$	$7,04 \cdot 10^8$ лет	α 4,22 – 4,58	0,185
	$^{238}_{92}\text{U}$	$4,5 \cdot 10^9$ лет	α 4,15 – 4,22	–

Табл. П2.2. Пробег α -частиц в воздухе, биологической ткани и алюминии

Энергия, МэВ	Воздух, см	Био-ткань, мкм	Алюминий, мкм	Энергия, МэВ	Воздух, см	Био-ткань, мкм	Алюминий, мкм
4,0	2,5	31	16	8,0	7,4	91	48
5,0	3,5	43	23	9,0	8,9	110	58
6,0	4,6	56	30	10,0	10,6	130	69
7,0	5,9	72	38				

Табл. П2.3. Массовые коэффициенты поглощения рентгеновских лучей, см²/г

Длина волны, нм	Элементы							
	C	N	O	Al	Fe	Cu	Ag	Pb
0,02	0,167	0,177	0,183	0,27	1,06	1,45	5,4	4,6
0,04	0,243	0,34	0,336	1,05	7,1	10	37	33
0,06	0,40	0,73	0,730	3,3	23,5	32	17	77
0,08	0,80	1,51	1,53	7,3	50,7	71	39	147
0,10	1,40	2,6	–	14,0	95	134	71	77
0,12	2,5	–	–	24	170	218	120	128
0,14	3,9	–	–	36	270	42	174	180
0,16	5,8	–	–	55	390	60	250	258
0,18	7,9	–	–	79	61	85	354	360
0,20	10,0	–	–	106	78	119	436	–

Приложение 3

Табл. П3.1. Основные дозиметрические единицы и их соотношение

Физическая величина, обозначение	Единицы измерения		Соотношение единиц
	СИ	Внесистемные	
Активность радиоактивного источника, A	Бк	Ки	1 Бк = $2,7 \cdot 10^{-11}$ Ки
Экспозиционная доза излучения, $D_{\text{экс}}$	Кл/кг	Р	1 Кл/кг = 3876 Р
Мощность экспозиционной дозы, $P_{\text{экс}}$	А/кг	Р/с	1 А/кг = 3876 Р/с
Поглощенная доза, $D_{\text{п}}$	Гр	рад	1 Гр = 100 рад
Мощность поглощенной дозы, $P_{\text{п}}$	Гр/с	рад/с	1 Гр/с = 100 рад/с
Эквивалентная доза, $D_{\text{эква}}$	Зв	бэр	1 Зв = 100 бэр
Мощность эквивалентной дозы, $P_{\text{эква}}$	Зв/с	бэр/с	1 Зв/с = 100 бэр/с

Табл. ПЗ.2. Коэффициент качества K для некоторых излучений

Ионизирующее излучение	K
Рентгеновское, γ - и β -излучения	1
Тепловые нейтроны (0,01 эВ)	2
Нейтроны (5 эВ)	7
Нейтроны (0,5 МэВ), протоны	10
α -излучение	20

Приложение 4Табл. П4.1. Волновые сопротивления ρv некоторых веществ при 20 °С

Вещество	ρv , кг · м ⁻² · с ⁻¹	Вещество	ρv , кг · м ⁻² · с ⁻¹
Железо	40 000 000	Резина	60 000
Бетон	4 800 000	Воздух	440
Вода	1 440 000	Масло	1 350 000

Табл. П4.2. Физические характеристики звуковых волн

Характер звука	Интенсивность, Вт/м ²	Звуковое давление, Па	Уровень интенсивности относительно порога слышимости, дБ
Порог слышимости	10 ⁻¹²	2 · 10 ⁻⁵	0
Сердечные тоны через стетоскоп	10 ⁻¹¹	6,4 · 10 ⁻⁵	10
Шепот	10 ⁻¹⁰	2 · 10 ⁻⁴	20
Шелест бумаги	10 ⁻⁹	6,4 · 10 ⁻⁴	30
Разговор:			
тихий	10 ⁻⁸	2 · 10 ⁻³	40
нормальный	10 ⁻⁷	6,4 · 10 ⁻³	50
громкий	10 ⁻⁶	2 · 10 ⁻²	60
Шум на оживленной улице	10 ⁻⁵	6,4 · 10 ⁻²	80
Крик	10 ⁻⁴	0,2	80
Шум:			
в поезде метро	10 ⁻³	0,64	90
мотоцикла (максимальный)	10 ⁻²	2	100
двигателя самолета	10 ⁻¹	6,4	110
То же вблизи	1	20	120
Порог болевого ощущения	10	64	130

Табл. П4.3. Экспериментальные величины скорости звука (v), модуля продольной упругости (E), относительной диэлектрической проницаемости (ϵ) и удельного электрического сопротивления (ρ) при нормальных условиях

Вещество	v , м/с	E , 10^{11} ГПа	ϵ	ρ , Ом · м
Алюминий	–	0,69	–	–
Вода при 20 °С	1482	–	81	$10^3 - 10^4$
Воздух	331	–	1	–
Кровь	1500	–	85	1,66
Жидкость спинномозговая	–	–	–	0,55
Глицерин	–	–	43	–
Масло касторовое	–	–	4,5 – 4,8	–
Спирт	–	–	26	–
Парафин	–	–	2	–
Слюда	–	–	7,5	–
Серебро	–	0,74	–	–
Сталь	–	2,20	–	–
Кожа сухая	–	–	–	10^6
Ткани:				
костная (без надкостницы)	3660	0,10	–	–
жировая	–	–	–	33,3
мозговая и нервная	1520	–	–	14,3
мышечная (мягкие ткани)	1500	–	–	2
сердце	1520	–	–	2

Табл. П4.4. Плотность твердых тел, жидкостей и газов, ρ , кг/дм³ (при нормальных условиях: $p_0 = 1,01 \cdot 10^5$ Па и $T = 273$ К)

Твердое тело		Жидкость		Газ	
Алюминий	2,70	Вода:		Водород	$0,09 \cdot 10^{-6}$
Ванадий	6,02	дистиллированная (4 °С)	1,00	Воздух	$1,29 \cdot 10^{-6}$
Висмут	9,80	морская	1,03	Гелий	$0,18 \cdot 10^{-6}$
Железо	7,88	Глицерин	1,26	Кислород	$1,43 \cdot 10^{-6}$
Литий	0,53	Керосин	0,80		
Медь	8,93	Кровь	1,05		
Никель	8,90	Мозг	1,05		
Свинец	11,3	Масло (касторовое)	0,90		
Серебро	10,5	Масло			
Сталь	7,80	(трансформаторное)	1,5		
Цезий	1,90	Ртуть	13,6		
Цинк	7,15	Сероуглерод	1,26		
Кожа сухая	0,86	Спирт	0,79		
Ткань костная	1,7 – 2,4				

Табл. П4.5. Формулы для полного сопротивления цепи Z и сдвига фаз $\text{tg}\varphi$ между напряжением и током при разных способах включения активного сопротивления R , емкости C и индуктивности L

Способ включения	Z	$\text{tg}\varphi$
R и C включены последовательно	$\sqrt{R^2 + \frac{1}{(\omega C)^2}}$	$\frac{1}{R\omega C}$
R и C включены параллельно	$\frac{R}{\sqrt{R^2\omega^2C^2 + 1}}$	$-R\omega C$
R и L включены последовательно	$\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$	$\frac{\omega L}{R}$
R и L включены параллельно	$\frac{R\omega L}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$	$\frac{R}{\omega L}$
R, L и C включены последовательно	$\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$	$\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$

Приложение 5

Применение постоянных электрических полей в физиотерапии

Франклинизацией (электростатический душ) называют метод лечебного воздействия на организм постоянным электрическим полем высокой напряженности. Под действием электрического поля в тканях-диэлектриках происходит поляризация, в проводящих тканях возникают микротоки. А на поверхности тела образуются статические заряды. Все эти явления лежат в основе первичного действия постоянного электрического поля высокой напряженности на организм.

Воздействие аэроионами преимущественно при их вдыхании называется аэроионотерапией. Так как образование аэроионов (люстри Чижевского) связано с электрическим полем высокого потенциала, обычно указанные воздействия объединяются в единой процедуре.

Аппарат для электростатического душа и аэроионотерапии представляет источник постоянного тока высокого напряжения порядка 40 – 50 кВ для общего воздействия и 10 – 30 кВ для локального.

При общей франклинизации влиянию подвергается все тело пациента. Для этого один электрод, имеющий острия, располагают с зазором 12 – 25 см над головой пациента, сидящего на деревянном стуле, а второй электрод в форме пластины кладут под ноги. При мест-

ной франклинизации влиянию электрического поля подвергается какой-либо участок тела пациента. Один электрод (с остриями кисточкообразной или иной формы) располагают с зазором 3 – 7 см над обнаженным участком тела, второй электрод (пластинчатый) помещают с противоположной стороны под зоной воздействия.

Аппараты франклинизации (АФ-3, АФ-3-1) состоят из источника тока, высоковольтного трансформатора и выпрямителя, создают постоянное, высокой напряженности поле между поверхностью тела и дистанционно расположенным отрицательно заряжающимся электродом. По остриям электрода, направленным в сторону больного, стекают электрические заряды, что обуславливает появление между электродом и поверхностью тела «тихих» электрических разрядов.

Приложение 6

Виды электрографии биопотенциалов тканей и органов в медицинской практике:

- электрокардиография (ЭКГ) – регистрация биопотенциалов, возникающих в сердечной мышце при ее возбуждении;
- электроретинография (ЭРГ) – регистрация биопотенциалов сетчатки глаза, возникающих в результате воздействия на глаз;
- электроэнцефалография (ЭЭГ) – регистрация биоэлектрической активности головного мозга;
- электромиография (ЭМГ) – регистрация биоэлектрической активности мышц.

Примерная характеристика регистрируемых при этом биопотенциалов указана в табл. Пб.1.

Табл. Пб.1. Характеристики биопотенциалов

Биопотенциал	Интервал частот, Гц	Амплитуда, мкВ	
		максимальная	минимальная
ЭКГ	0,2 – 120	1500 – 2000	100 – 300
ЭМГ	3 – 600	1000 – 1500	30 – 40
ЭЭГ	1 – 300	200 – 300	5 – 10

Табл. Пб.2. Характеристики компонентов нормальной ЭКГ человека, полученной биполярным отведением от поверхности тела в направлении длинной оси сердца на частоте 70 ударов в минуту

Состав ЭКГ	Зубцы			Сегменты		Интервалы			
	P	Q	T	PQ	ST	PQ	QRS	QT	Пауза
Амплитуда, мВ	0,025 – 0,25	< 0,25R	(0,17 – 0,67)R	0	0	–	> 0,6	(0,17 – 0,92)R	0
Длительность, мс	< 100	< 40	–	< 100	–	120 – 200	60 – 120	320 – 390	< 500

Приложение 7

Максимальные значения токового дипольного момента

Объект	Масса сердца, г	Масса тела, кг	p_T , мА · см
Лягушка	0,16	0,036	0,005
Крыса	1,1	0,28	0,107
Собака	100	14	1,63
Человек	300	70	2,32
Лошадь	3000	400	13,0

Приложение 8

Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц

Приставка			Приставка		
Наименование	Обозначение	Множитель	Наименование	Обозначение	Множитель
экса	Э	10^{18}	деци	д	10^{-1}
пэта	П	10^{15}	санци	с	10^{-2}
тера	Т	10^{12}	милли	м	10^{-3}
гига	Г	10^9	микро	мк	10^{-6}
мега	М	10^6	нано	н	10^{-9}
кило	к	10^3	пико	п	10^{-12}
гекто	г	10^2	фемто	ф	10^{-15}
дека	да	10^1	атто	а	10^{-18}

Дидактический материал

Вопросы к рейтингу 1 (контрольная работа)

Практические задачи занятий 1, 2 по темам: рентгеновское излучение, радиоактивность (см. стр. 34, 35)

Вопросы к рейтингу 2 (коллоквиум)

1. Тормозное рентгеновское излучение. Коротковолновая граница спектра.
2. Характеристическое излучение. Закон Мозли.
3. Рентгенодиагностика. Томография.
4. Альфа-, бета- и гамма-излучение. Законы радиоактивного распада.
5. Активность нуклида. Среднее время жизни. Равновесие активности.
6. Взаимодействие рентгеновского и γ -излучения с веществом: классическое рассеивание, фотоэффект.
7. Взаимодействие рентгеновского и γ -излучения с веществом: некогерентное рассеивание, эффект образования пар.
8. Поглощение рентгеновских лучей и γ -излучений. Коэффициент ослабления.
9. Излучение и поглощение α -частиц.
10. Излучение и поглощение электронов.
11. Излучение заряженных частиц больших энергий.
12. Излучение и облучение. Дозы ионизирующих излучений и единицы измерения.
13. Источники ионизирующего излучения. Опасные и неопасные дозы облучения. Принцип Зиверта.
14. Радиоизотопная диагностика. Радиационная генетика. Правило Бергонье – Трибондо.

Вопросы к рейтингу 3 (коллоквиум)

1. Природа и физические характеристики звука.
2. Характеристики слуховых ощущений. Эффект Доплера.
3. Волновое сопротивление. Отражение звуковых волн. Ультразвук. Инфразвук. Звуковые методы исследований в медицине.
4. Биоэлектрогенез. Электрические свойства биологических тканей и жидкостей. Первичное действие постоянного тока на ткани организма.
5. Воздействие на ткани переменным электрическим полем.
6. Воздействие на ткани переменными импульсными токами.
7. Магнитобиология. Биомagnetизм.
8. Воздействие на организм переменным магнитным полем. Индуктотермия.
9. Понятия о гальванизации, диатермии, дарсонвализации и УВЧ-терапии. Биоэлектрические явления в сердечной мышце. Точковый диполь.
10. Принципы отведения биотоков сердца с учетом полярностей тела.
11. Графическое отображение электрофизических процессов в сердце.
12. Излучение Солнца. Шкала электромагнитных волн. Инфракрасное излучение.
13. Теплоотдача организма. Закон Стефана – Больцмана. Закон смещения Вина. Понятие о термографии.
14. Ультрафиолетовое излучение.
15. Фотометрические величины: силы света, светового потока, светимости, яркости, освещенности. Фотометрические величины для ультрафиолетовой части спектра.
16. Фотобиология. Законы: Бугера, Бугера – Ламберта – Бэра, Малюса, Брюстера, Био.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Волькенштейн, В. С.* Сборник задач по общему курсу физики : учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений / В. С. Волькенштейн. – Изд. восьмое, стер. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1973. – 464 с.
2. Биофизика : учебник / под общ. ред. акад. АН СССР П. Г. Костюка. – Киев : Выща шк., 1988. – 504 с.
3. *Кошкин, Н. И.* Справочник по элементарной физике / Н. И. Кошкин, М. Г. Ширкевич. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1982. – 208 с.
4. *Кузнецов, А. А.* Биофизические основы живых систем : учеб. пособие / А. А. Кузнецов. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2015. – 112 с. – ISBN 978-5-9984-0621-8.
5. *Кузнецов, А. А.* Биофизика ионизирующих и неионизирующих излучений : учеб. пособие / А. А. Кузнецов. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2016. – 143 с. – ISBN 978-5-9984-0668-3.
6. *Монич, В. А.* Задачник по медицинской физике и биофизике : метод. пособие / В. А. Монич, С. Л. Малиновская. – Н. Новгород : Изд-во Нижегород. гос. мед. акад., 2004. – 76 с.
7. *Ремизов, А. Н.* Сборник задач по медицинской и биологической физике : учеб. пособие для мед. вузов / А. Н. Ремизов, Н. Х. Исакова, А. Г. Максина. – М. : Высш. шк., 1987. – 159 с.
8. *Ремизов, А. Н.* Медицинская и биологическая физика : учеб. для мед. спец. вузов. – 2-е изд., испр. / А. Н. Ремизов. – М. : Высш. шк., 1996. – 608 с.
9. *Ремизов, А. Н.* Сборник задач по медицинской и биологической физике : учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. / А. Н. Ремизов, А. Г. Максина. – М. : Дрофа, 2001. – 192 с.
10. *Роуэл, Г.* Физика / Г. Роуэл, С. Герберт ; под ред. В. Г. Разумовского ; пер. с англ. И. Е. Каткова. – М. : Просвещение, 1994. – 576 с.
11. Физические величины : справочник / А. П. Бабичев [и др.] ; под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М. : Энергоиздат, 1991. – 1232 с.
12. Физический энциклопедический словарь / под ред. А. М. Прохорова. – М. : Сов. энцикл., 1983. – 928 с.
13. *Чертов, А. Г.* Задачник по физике : учеб. пособие для студентов вузов / А. Г. Чертов, А. А. Воробьев. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1988. – 527 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	4
1. Физические основы радиационных технологий в медицине	5
1.1. Рентгеновское излучение. Дозиметрия	5
Тормозное рентгеновское излучение. Характеристическое излучение. Рентгенодиагностика.	
1.2. Радиоактивность	9
Альфа-, бета- и гамма-излучения. Законы радиоактивного распада.	
1.3. Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом	13
Типы взаимодействия. Поглощение рентгеновских лучей и γ -лучей. Излучение и поглощение α -частиц. Излучение и поглощение электронов. Излучение заряженных частиц больших энергий.	
1.4. Дозиметрия ионизирующих излучений	18
Дозы ионизирующих излучений и единицы измерения. Источники ионизирующего излучения. Опасные и неопасные дозы облучения. Радиоизотопная диагностика. Радиационная генетика.	
1.5. Основные термины, определения и формулы	23
Тормозное и характеристическое излучение. Радиоактивность. Счетчик Гейгера – Мюллера. Поглощение рентгеновских лучей и γ -лучей. Дозиметрия ионизирующих излучений.	
1.6. Примеры решения задач	28
1.7. Задачи для практических занятий	34
2. Физические основы акустических технологий в медицине	37
2.1. Акустические излучения	37
Природа и физические характеристики звука. Характеристики слуховых ощущений. Волновое сопротивление. Отражение звуковых волн. Ультразвук. Инфразвук. Звуковые методы исследований в медицине.	
2.2. Основные термины, определения и формулы	42
Эффект Доплера. Характеристики излучения и восприятия звуковых волн.	

2.3. Примеры решения задач.....	45
2.4. Задачи для практических занятий.....	49
3. Физические основы биоэлектрических и магнитобиологических технологий.....	50
3.1. Физические основы электрофизиологии.....	50
Биоэлектрогенез. Электрические свойства биологических тканей и жидкостей. Первичное действие постоянного тока на ткани организма. Воздействие на ткани переменным электрическим полем. Воздействие на ткани переменными импульсными токами.	
3.2. Физические основы магнитобиологии и биомагнетизма	55
Магнитобиология. Биомагнетизм. Воздействие на организм переменным магнитным полем.	
3.3. Основные термины, определения и формулы	58
Электрические характеристики биообъектов. Постоянный ток. Гальванизация. Переменный ток. Диатермия. Дарсонвализация. Переменное магнитное поле. Индуктотермия. Переменный ток высокой частоты. УВЧ-терапия.	
3.4. Примеры решения задач.....	61
3.5. Задачи для практических занятий.....	66
4. Электрические характеристики сердца, нервной системы и головного мозга.....	68
4.1. Физические основы электрокардиографии	68
Биоэлектрические явления в сердечной мышце. Принципы отведения биотоков сердца с учетом полярностей тела. Графическое отображение электрофизических процессов в сердце.	
4.2. Основные термины, определения и формулы	74
Токовый диполь. Электрокардиограмма. Треугольник Эйнтховена. Электрические характеристики нервной системы и головного мозга.	
4.3. Примеры решения задач.....	76
4.4. Задачи для практических занятий.....	80

5. Физические основы оптических технологий в медицине	81
5.1. Электромагнитные излучения в оптическом и околооптическом диапазоне.....	81
Излучение Солнца. Шкала электромагнитных волн. Инфракрасное излучение. Теплоотдача организма. Понятие о термографии. Ультрафиолетовое излучение.	
5.2. Основные термины, определения и формулы	86
Фотометрия. Взаимодействие света с биологическим веществом. Фотобиология. Тепловое излучение тел. Термография.	
5.3. Примеры решения задач.....	89
5.4. Задачи для практических занятий.....	96
6. Расчетно-графическая работа.....	97
Таблица вариантов РГР. Задачи РГР.	
Заключение	113
Приложения	114
Справочный материал. Дидактический материал.	
Библиографический список	124

Учебное издание

КУЗНЕЦОВ Артемий Артемьевич

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ БИМЕДИЦИНСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Учебное пособие

Редактор Е. В. Невская

Технический редактор С. Ш. Абдуллаева

Корректор Н. В. Пустовойтова

Компьютерная верстка Л. В. Макаровой

Выпускающий редактор А. А. Амирсейидова

Подписано в печать 25.07.19.

Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 7,44. Тираж 50 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета.

имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.

600000, Владимир, ул. Горького, 87.