



А.П. Олейник

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

ПРАКТИЧЕСКИЙ КУРС

Учебное пособие для естественнонаучных специальностей

МОСКВА 2014

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие (стр. 3)

Часть I. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ (5—27)

§ 1. Магнитное поле постоянного тока. Магнитная индукция. Сила Лоренца. Закон Ампера (5) § 2. Закон Био—Савара—Лапласа. Магнитные поля в вакууме. Магнитный поток. Теорема Остроградского—Гаусса для магнитного поля (8) § 3. Электромагнитная теория света (11) § 4. Характеристика электромагнитных излучений (14) § 5. Виды электромагнитных лучей и их влияние на организм человека (15) § 6. Воздействие электромагнитных лучей на организм человека и способы борьбы с ними (15) § 7. Воздействие электромагнитных полей на организм (17) § 8. Защита от электромагнитных излучений (20) § 9. Излучение бытовых приборов (25) § 10. Влияние электромагнитного излучения мобильных телефонов на организм человека (24)

Часть II. АТОМНАЯ ФИЗИКА (28—82)

§ 11. Микрообъекты. Основопологающие идеи квантовой механики (28) § 12. Характеристика радиации (46) § 13. Атомная отрасль и радиационный фон (48) § 14. Применение радиоактивных изотопов (50) § 15. Радиационное излучение (51) § 16. Влияние радиации на организмы (51) § 17. Источники радиационного излучения (56) § 18. Характеристика радиационного загрязнения (61) § 19. ПО «Маяк» (63) § 20. Чернобыль (64) § 21. Радиоактивные загрязнения сред жизни человека (65) § 22. Возможные последствия применения ядерного оружия массового поражения (69) § 23. Солнечная радиация (70) § 24. Источники радиоактивных излучений и их характеристика (75) § 25. Излучение от рассеянных радионуклидов (76) § 26. Техногенно-измененный радиационный фон (76) § 27. Искусственные радионуклиды (77) § 28. Принципы радиационной безопасности (78) § 29. Воздействие на окружающую среду предприятий ядерного топливно-энергетического цикла (81)

Часть III. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ К РАЗДЕЛАМ «СВЕТОВЫЕ КВАНТЫ. АТОМНАЯ ФИЗИКА. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ» (83—102)

Эпilog (103)

ПРЕДИСЛОВИЕ

С давних времен человек совершенствовал себя как физически, так и умственно, постоянно создавая и преобразовывая орудия труда. Постоянная нехватка энергии заставляла его искать и находить новые источники, внедряя их и при этом, не заботясь о будущем. Паровой двигатель побудил человека к созданию огромных фабрик, что повлекло за собой мгновенное ухудшение экологии в городах; он создал каскады гидроэлектростанций, затопившие огромные территории и изменившие до неузнаваемости экосистемы отдельных районов. В порыве за открытиями в конце XIX в. двумя учеными – Пьером Кюри и Марией Склодовской-Кюри было открыто явление радиоактивности. Именно это достижение поставило под угрозу существование всей планеты. За сто с лишним лет человек совершил столько ошибок, сколько не совершал за все свое существование. Давно уже минула Холодная война, мы пережили Чернобыль и многие засекреченные аварии на полигонах, однако проблема радиационной угрозы по сей день стоит перед нами.

Радиация играет огромную роль в развитии цивилизации на данном историческом этапе. Благодаря явлению радиоактивности был совершен существенный прорыв в области медицины, в различных отраслях промышленности, включая энергетику. Но одновременно с этим стали все отчетливее проявляться негативные стороны свойств радиоактивных элементов: выяснилось, что воздействие радиационного излучения на организм может иметь трагические последствия. Подобный факт не мог пройти мимо внимания общественности. И чем больше становилось известно о действии радиации на человеческий организм и окружающую среду, тем противоречивее становились мнения о том, насколько большую роль должна играть радиация в различных сферах человеческой деятельности.

К сожалению, отсутствие достоверной информации вызывает неадекватное восприятие данной проблемы. Газетные истории о шестиногих ягнятах и двухголовых младенцах сеют панику в широких кругах. Проблема радиационного загрязнения стала одной из наиболее актуальных. Поэтому необходимо прояснить обстановку и найти верный подход. Радиоактивность следует рассматривать как неотъемлемую часть нашей жизни, но без знания закономерностей процессов, связанных с радиационным излучением, невозможно реально оценить ситуацию.

Именно для этого создаются специальные международные организации, занимающиеся проблемами радиации, в их числе существующая с конца 1920-х годов *Международная комиссия по радиационной защите* (МКРЗ), а также созданный в 1955 году в рамках ООН *Научный Комитет по действию атомной радиации* (НКДАР).

Радиоактивное загрязнение биосферы – это превышение естественно-го уровня содержания в окружающей среде радиоактивных веществ. Оно может быть вызвано ядерными взрывами и утечкой радиоактивных компонентов в результате аварий на АЭС или других предприятиях, при разработке радиоактивных руд и т.п. При авариях на АЭС особенно рез-

ко увеличивается загрязнение среды радионуклидами (стронций-90, цезий-137, церий-141, йод-131, рутений-106 и др.). В настоящее время, по данным *Международного агентства по атомной энергетике* (МАГАТЭ), число действующих в мире реакторов достигло 426 при их суммарной электрической мощности около 320 ГВт (17% мирового производства электроэнергии).

Ядерная энергетика, при условии строжайшего выполнения необходимых требований, более или менее экологически чище по сравнению с теплоэнергетикой, поскольку исключает вредные выбросы в атмосферу (зола, диоксиды, углерода и серы, оксиды азота и др.). Так, во Франции быстрое наращивание мощностей АЭС позволило в последние годы значительно уменьшить выбросы диоксида серы и оксидов азота в секторе энергетики соответственно на 71 и 60%. В Японии для стабилизации энергообеспечения страны намечается в ближайшие два десятилетия построить около 40 новых АЭС, что удовлетворит 43% энергопотребностей. Однако в целом в мире отмечена тенденция сокращения строительства новых АЭС.

Использование атомной энергии в широких масштабах приводит к накоплению радиоактивных отходов. Возникает проблема их захоронения.

Таким образом, правильное использование атомной энергии, без которой невозможно обустройство дальнейшего прогресса – одна из первостепенных задач сегодняшнего мира.

Курс лекций, демонстрирующий весь теоретический и практический материал *электромагнитного* и *атомного* разделов физики, предназначен для учащихся колледжей, университетов, институтов, профессоров, учителей, а также рекомендуется изучающим физику самостоятельно.

Автор

vk.com/alexoleinik

I. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

§ 1. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА. МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ. СИЛА ЛОРЕНЦА. ЗАКОН АМПЕРА

■ *Магнитным полем* называется одна из форм проявления электромагнитного поля. Магнитное поле действует только на движущиеся электрические заряженные частицы и тела, проводники с током, а также частицы и тела, обладающие магнитными моментами.

Магнитное поле создается проводниками с током, движущимися электрически заряженными частицами и телами, обладающими магнитными моментами, а также изменяющимся во времени электрическим полем.

Свойства магнитного поля:

- Порождается электрическим током;
- Обнаруживается по его действию на ток;
- Существует реально, независимо от наших знаний о нем.

■ Силовой характеристикой магнитного поля служит *вектор магнитной индукции* \vec{B} (вектор индукции магнитного поля).

Вектор \vec{B} можно ввести одним из трех следующих способов:

1. Посредством силового действия магнитного поля на движущуюся в нем заряженную частицу – точечный электрический заряд;
2. Опираясь на силовое действие магнитного поля на малый элемент проводника с током;
3. Исходя из силового действия магнитного поля на небольшую рамку с током.

■ На электрически заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле со скоростью \vec{v} , действует *сила Лоренца* \vec{F}_L , которая всегда направлена перпендикулярно к вектору \vec{v} . Отношение $\frac{\vec{F}_L}{|q|\vec{v}}$, где q – заряд частицы, не зависит от \vec{v} . При изменении направления скорости частицы в рассматриваемой точке поля сила \vec{F}_L изменяется в промежутке от 0 до значения $\vec{F}_{L\max}$, связанного с магнитной индукцией \vec{B} в этой точке поля соотношением: $\vec{B} = \frac{\vec{F}_{L\max}}{|q|\vec{v}}$.

Таким образом, магнитная индукция \vec{B} в СИ численно равна отношению силы, действующей на заряженную частицу со стороны магнитного поля, к произведению абсолютной величины заряда и скорости ча-

стицы, если направление скорости частицы обладает максимальной силой. Вектор \vec{B} направлен перпендикулярно к вектору силы $\vec{F}_{\text{Л max}}$, действующей на положительно заряженную частицу ($q > 0$), и вектору \vec{v} скорости частицы так, что из конца вектора \vec{B} вращение по кратчайшему расстоянию от направления силы $\vec{F}_{\text{Л max}}$ к направлению скорости \vec{v} видно происходящим против часовой стрелки.

Для графического изображения стационарного, т. е. не изменяющегося со временем, магнитного поля, пользуются методом линий магнитной индукции. *Линиями магнитной индукции (силовыми линиями магнитного поля)* называются линии, проведенные в магнитном поле так, что в каждой точке поля касательная к линии магнитной индукции совпадает с направлением вектора \vec{B} магнитной индукции в этой точке поля. Линии магнитной индукции нигде не обрываются, т. е. не имеют начала и конца. Они могут быть замкнутыми, могут проходить из бесконечности в бесконечность, либо бесконечно взвизгиваться на некоторую поверхность, по всей поверхности плотно заполняя ее, но, никогда не возвращаясь вторично в любую точку поверхности. Последний случай может осуществляться в магнитном поле, создаваемом системой из кругового тока и бесконечно прямолинейного проводника с током, проходящего через центр кругового витка с током, перпендикулярно к его плоскости.

Магнитное поле называется *однородным*, если во всех его точках вектор магнитной индукции \vec{B} имеет одно и то же значение. Если этого не происходит, магнитное поле будет *неоднородным*.

На частицу с электрическим зарядом q , движущуюся в магнитном поле со скоростью \vec{v} , направленной произвольным образом по отношению к вектору магнитной индукции \vec{B} , действует *сила Лоренца*, равная $\vec{F}_{\text{Л}} = q[\vec{v}\vec{B}]$. Отсюда модуль силы Лоренца: $F_{\text{Л}} = qvB\sin\alpha$, где α – угол между векторами скорости \vec{v} и индукции \vec{B} . Сила Лоренца всегда направлена перпендикулярно к скорости заряженной частицы и сообщает ей нормальное ускорение. Не изменяя модуля скорости частицы, а лишь изменяя ее направление, сила Лоренца не совершает работы. Поэтому кинетическая энергия заряженной частицы при движении в магнитном поле не изменяется.

Если на движущийся электрический заряд (заряженную частицу) действует не только магнитное поле с индукцией \vec{B} , но также еще и электрическое поле с напряженностью \vec{E} , то результирующая сила \vec{F} равна: $\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v}\vec{B}]$.

Эту силу \vec{F} часто также называют *силой Лоренца*, а в редких случаях – *обобщенной силой Лоренца*.

Применение силы Лоренца:

- Кинескопы (отклонение электронных пучков магнитным полем);
- Масс-спектрографы – приборы, позволяющие определять заряженные частицы по отношению их заряда к массе.

■ На проводники с электрическим током, находящиеся в магнитном поле, действуют силы, именуемые силами Ампера. Сила Ампера \vec{F}_A , приложенная к малому элементу проводника с силой тока I , равна геометрической сумме сил Лоренца, действующих на движущиеся в проводнике носители тока. Пусть \vec{l} – длина элемента проводника, S – площадь поперечного сечения, тогда число носителей тока в нем $n = n_0 S \vec{l}$, где n_0 – концентрация носителей тока. Если \vec{v} – средняя скорость упорядоченного движения носителей тока, а q – заряд одного носителя, то: $\vec{F} = q[\vec{v}\vec{B}]n = [j\vec{B}]S\vec{l}$, где $j = qn_0\vec{v}$ – плотность тока. Так как $jS = I$, то введя вектор $\vec{l} = \vec{l} \frac{j}{I}$, получим закон Ампера: $\vec{F}_A = I[\vec{l}\vec{B}]$.

Сила Ампера \vec{F}_A направлена перпендикулярно к плоскости, образованной векторами \vec{l} и \vec{B} таким образом, что из конца вектора \vec{F} вращение по кратчайшему расстоянию от направления вектора \vec{l} к направлению вектора \vec{B} видно происходящим против часовой стрелки.

Сила Ампера, действующая в магнитном поле на проводник конечной длины с током I , равна: $\vec{F} = I \int_{(l)} [\vec{l}\vec{B}]$, интегрирование проводится по всей длине \vec{l} проводника.

В частности, если поле однородно, а проводник прямолинейный, наблюдается следующее равенство: $F = IlB \sin \alpha$, где α – угол между направлением вектора магнитной индукции \vec{B} и направлением тока. Направление силы \vec{F} можно найти по *правилу правого буравчика*: если буравчик расположить перпендикулярно проводу с током \vec{I} и направлению магнитного поля \vec{B} , а рукоятку буравчика вращать по кратчайшему направлению от \vec{I} к \vec{B} , то направление силы Ампера \vec{F}_A совпадает с направлением поступательного движения буравчика.

Из закона Ампера следует, что сила \vec{F} максимальна, если проводник с током расположен перпендикулярно к вектору магнитной индукции

$$\vec{B}: F_{A_{\max}} = IlB, \quad B = \frac{F_{A_{\max}}}{Il}.$$

Следовательно, в СИ магнитная индукция \vec{B} численно равна отношению силы, действующей со стороны магнитного поля за малый элемент проводника с электрическим током, к произведению силы тока на длину этого элемента, если он так расположен в поле, что указанное отношение имеет наибольшее значение.

§ 2. ЗАКОН БИО—САВАРА—ЛАПЛАСА. МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ В ВАКУУМЕ. МАГНИТНЫЙ ПОТОК. ТЕОРЕМА ОСТРОГРАДСКОГО—ГАУССА ДЛЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

■ Для магнитного поля, так же как и для электрического, справедлив *принцип суперпозиции*: для каждой точки пространства вектор магнитной индукции результирующего магнитного поля, создаваемого несколькими токами, равен векторной сумме магнитных индукций полей,

создаваемых каждым из токов в отдельности:
$$\vec{B} = \sum_{i=1}^N \vec{B}_i = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots$$

Магнитная индукция $d\vec{B}$ поля в вакууме малого элемента проводника длиной $d\vec{l}$, по которому идет постоянный электрический ток силой I , удовлетворяет закону *Био—Савара—Лапласа*:
$$dB = \frac{\mu_0 I dl \sin \alpha}{4\pi r^2},$$
 где r — расстояние от участка тока до рассматриваемой точки поля, α — угол между током и направлением в данную точку \vec{r} , $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2$ — магнитная постоянная.

Направление вектора $d\vec{B}$ связано с векторами $d\vec{l}$ и \vec{r} *правилом правого буравчика*: если вращать рукоятку буравчика от $d\vec{l}$ к вектору \vec{r} по кратчайшему направлению, то поступательное движение буравчика определит направление вектора индукции $d\vec{B}$.

Магнитная индукция прямолинейного бесконечно длинного проводника с током I на расстоянии r :
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}.$$

Магнитная индукция в центре витка с током радиуса R :
$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}.$$

Магнитная индукция на оси бесконечно длинного соленоида с током I : $B = \mu_0 n I$, где n – число витков, приходящихся на единицу длины соленоида.

Следовательно, при скоростях зарядов, малых по сравнению со скоростью света в вакууме, магнитное взаимодействие между движущимися зарядами значительно слабее их электростатического взаимодействия. Однако если заряды движутся в проводнике, который в целом электрически нейтрален, электрические силы оказываются скомпенсированными, так что остается только магнитное взаимодействие. Этим объясняется магнитное взаимодействие проводников с токами. Хотя сила магнитного взаимодействия каждой пары электронов в двух параллельных проводниках с токами мала, число этих пар настолько велико, что сила магнитного взаимодействия проводников оказывается заметной величиной.

■ Магнитное поле прямолинейного проводника MN с током I происходит следующим образом: магнитная индукция \vec{B} в произвольной точке A поля направлена перпендикулярно к плоскости и численно равна:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2).$$

Если проводник бесконечно длинный, то: $\varphi_1 = 0$, $\varphi_2 = \pi$, тогда:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 2I}{4\pi \vec{r}_0}.$$

Магнитное поле прямоугольного контура с током I представляет собой суперпозицию магнитных полей тока в каждой из четырех сторон этого контура. Во всех точках, лежащих в плоскости контура, вектор магнитной индукции \vec{B} направлен перпендикулярно к этой плоскости, причем если точка находится внутри области, ограниченной контуром, то из конца вектора \vec{B} ток в контуре виден идущим против часовой стрелки. В точках плоскости, лежащих за пределами вышеуказанной области, вектор \vec{B} направлен в противоположную сторону.

Магнитная индукция в центре контура равна: $\vec{B} = \frac{\mu_0 8I \sqrt{a^2 + b^2}}{4\pi ab}$, где a

и b – длины сторон контура.

Магнитным моментом контура с током I называется векторная величина p_m , равная: $p_m = I \int_{(S)} n dS$, где n – единичный вектор нормали к

элементу dS поверхности S , натянутой на контур с током (ограниченный этим контуром). Вектор n и вектор p_m направлены таким образом, что из их концов ток в контуре был виден идущим против часовой стрелки. В

случае плоского контура поверхность S также плоская и все нормали имеют одинаковое направление, поэтому: $p_m = IS$.

Индукция магнитного поля кругового витка радиуса R с током I в произвольной точке A на оси витка равна: $\vec{B} = \frac{\mu_0 2p_m}{4\pi(R^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}}$.

Модуль вектора \vec{B} равен: $\vec{B} = \frac{\mu_0 IR^2}{2(R^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{\mu_0 IS}{2\pi(R^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}}$.

Индукция магнитного поля в центре кругового витка с током: $B = \mu_0 \frac{I}{2R}$.

Соленоидом называется цилиндрическая катушка с током, состоящая из большого числа витков проволоки, которые образуют винтовую линию. Если витки расположены вплотную или очень близко друг к другу, то соленоид можно рассматривать как систему последовательно соединенных круговых токов одинакового радиуса с общей осью.

Вектор магнитной индукции \vec{B} в произвольной точке A , лежащей на оси соленоида O_1O_2 , направлен вдоль этой оси в ту сторону, куда перемещается буравчик с правой резьбой при вращении его рукоятки в направлении электрического тока в витках соленоида. Модуль вектора \vec{B} в точке A равен: $\vec{B} = \frac{\mu_0}{2} nI(\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1)$.

■ Сила Ампера, действующая на малый участок длиной dl прямолинейного проводника с током I_1 со стороны магнитного поля бесконечно длинного прямолинейного проводника с током I_2 , расположенного параллельно первому на расстоянии a от него, численно равна:

$$dF = \frac{\mu_0 2I_1 I_2}{4\pi a} dl.$$

Эта формула использована в СИ для установления силы тока – ампера. Сила F , действующая на проводник конечной длины $l \gg a$, приближенно равна: $F = \frac{\mu_0 2I_1 I_2}{4\pi a} l$. Проводники с одинаково направленными

токами I_1 и I_2 взаимно притягиваются, а проводники с противоположно направленными токами отталкиваются друг от друга.

Замкнутый проводящий контур с током произвольной геометрической формы, помещенный в однородное магнитное поле, испытывает действие вращающего момента сил M , равного $M = [p_m B]$.

Если небольшой замкнутый контур с током находится в неоднородном магнитном поле, то помимо вращающего момента M действует результирующая сила: $F = p_{mx} \frac{\partial B}{\partial x} + p_{my} \frac{\partial B}{\partial y} + p_{mz} \frac{\partial B}{\partial z}$.

В частности, если вектор p_m направлен по оси OX ($p_{mx} = p_m$, $p_{my} = p_{mz} = 0$), то:

$$F = p_m \frac{\partial B}{\partial x} = p_m \left(\frac{\partial B_x}{\partial x} i + \frac{\partial B_y}{\partial y} j + \frac{\partial B_z}{\partial z} k \right).$$

Когда контур находится в области поля, где нет токов, порождающих это поле, то для силы F справедливо выражение: $F = \text{grad}(p_m B)$. Под действием силы F незакрепленный контур с током втягивается в область более сильного магнитного поля, если угол α между векторами p_m и B острый ($\alpha < \pi/2$). Если же угол α тупой ($\alpha > \pi/2$), то контур с током выталкивается в область более слабого поля.

Циркуляцией магнитной индукции B вдоль замкнутого контура ζ , проведенного в магнитном поле, называется линейный интеграл:

$$\oint_{\zeta} B dl = \oint_{\zeta} B dl \cos(B, dl).$$

§ 3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ТЕОРИЯ СВЕТА

■ Рассматривая электромагнитное поле в начале своей «Динамической теории», Максвелл подчеркнул, что пространство, окружающее тела, находящиеся в электрическом или магнитном состоянии, «может быть наполнено любым родом материи» или из него может быть удалена «вся плотная материя», «как это имеет место в трубках Гейссlera или в других, так называемых вакуумных трубках». «Однако, — продолжает Максвелл, — всегда имеется достаточное количество материи для того, чтобы воспринимать и передавать волновые движения света материи для того, чтобы воспринимать и передавать волновые движения света и тепла. И так как передача излучений не слишком сильно изменяется, если так называемый вакуум заменить прозрачными телами с заметной плотностью, то мы вынуждены допустить, что эти волновые движения относятся к эфирной субстанции, а не к плотной материи, присутствие которой только в какой-то мере изменяет движение эфира».

Максвелл полагает так поэтому, что эфир обладает способностью «проникающей среды, обладающей малой, но реальной плотностью, обладающей способностью быть приводимой в движение и передавать движения от одной части к другой с большой, но не бесконечной скоростью», причем «движение одной части каким-то образом зависит от движения остальных частей и в то же самое время эти связи должны

быть способны к определенному роду упругого смещения, поскольку сообщение движения не является мгновенным, а требует времени». Таким образом, Максвелл настойчиво ищет в своих эфирах черты, сходные с обыкновенным веществом. В этом он видит «рациональное объяснение» его свойств. Но вместе с тем Максвелл далек от построений каких-либо конкретных моделей эфира, которые пытались измышлять его предшественники и современники. Максвелл, подобно Фарадею, нигде не настаивает на наглядности всех свойств эфира. Эфир, по представлениям Максвелла, хотя и имеет некоторое сходство с обыкновенным веществом, но в то же время это все же субстанция особого рода, которую нельзя описать в обычных терминах или наглядно представить.

■ Максвелл напоминает об открытом Фарадеем (1845) явлении магнитного вращения плоскости света в прозрачных диамагнитных средах и обнаруженном Верде (1856) вращении плоскости поляризации обратного направления и в парамагнитных средах. Он ссылается также на В. Томсона, указавшего, что для объяснения магнитного вращения плоскости поляризации необходимо допустить появление в самой среде вращательного движения под влиянием магнитного поля. «Вращение плоскости поляризации вследствие магнитного воздействия, — пишет Максвелл, — наблюдается только в средах, обладающих заметной плотностью», в вакууме вращение плоскости поляризации как известно, не наблюдается. «Но свойства магнитного поля, — продолжает Максвелл, — не так уже сильно изменяются при замене одной среды другою или вакуумом, чтобы позволить нам допустить, что плотная среда дает нечто большее, чем простое изменение движения эфира. Мы поэтому имеем законное основание поставить вопрос: не происходит ли движение эфирной среды везде, где бы ни наблюдались магнитные эффекты?».

Шаг за шагом приближается Максвелл в VI части своего доклада, называющей необычное заглавие «Электромагнитная теория света». Прошло уже четырнадцать лет с тех пор, как Фарадей отметил, что передачу магнитной силы можно считать функцией эфира, ибо вряд ли можно считать вероятным, что эфир, если он существует, нужен только для того, чтобы передавать излучение. Однако ни открытие магнитооптических явлений, ни эта глубокая мысль Фарадея не привлекали к себе внимание физиков. Фарадея почитали только как искусного экспериментатора, а теоретические воззрения этого «самоучки» молчаливо отрицались подавляющим большинством ученых, мысль которых продолжалась вращаться в привычном круге понятий. Максвелл был первым физиком, внимательно вчитывавшимся в труды Фарадея. И вот в «Динамической теории электромагнитного поля» (1864) он впервые развил его мысль.

«В начале этого доклада, — говорил Максвелл, — мы пользовались оптической гипотенузой упругой среды, через которую распространяются колебания света, чтобы показать, что мы имеем серьезные основания искать в этой же среде причину других явлений в той же мере, как и причину световых явлений. Мы рассмотрели электромагнитные явления, пытаясь их объяснить свойствами поля, окружающего наэлектри-

зованные или намагниченные тела. Таким путем мы пришли к определенным уравнениям, выражающим определенные свойства того, что составляет электромагнитное поле, которые выведены только из электромагнитных явлений, достаточными для объяснения распространения света через ту же самую субстанцию».

Максвелл рассматривает распространение плоской волны через поле со скоростью V , причем все электромагнитные величины принимаются функциями выражения $w = lx + my + nz - Vt$, где l, m, n – направляющие косинусы луча. Оказывается, что, во-первых, $la + mb + ng = 0$ где a, b, g – составляющие вектора магнитной силы. Таким образом, направление вектора колеблющейся магнитной силы является перпендикулярным к направлению распространения волны, т.е. волны оказываются поперечными, и такие волны могут обладать всеми свойствами поляризованного света.

«Согласно электромагнитным опытам Вебера и Кольрауша, – говорит он, – $v = 310\,700\,000$ метров в секунду является количеством электростатических единиц в одной электромагнитной единице электричества, и это согласно нашему результату должно быть равно скорости света в воздухе или вакууме». Сопоставив это значение скорости света с данными измерений Физо и Фуко, Максвелл продолжает: «Значение v было определено путем измерения электродвижущей силы, при помощи которой заряжается известной емкости, разряжая конденсатор через гальванометр, чтобы измерить количество электричества в нем в электромагнитных единицах. Единственным применением света в этих опытах было использование его для того, чтобы видеть инструменты. Значение V , найденное Фуко, было получено путем определения угла, на который поворачивается вращающееся зеркало, пока отраженный им свет прошел туда и обратно вдоль измеренного пути. При этом никак не пользовались электричеством и магнетизмом. Совпадение результатов, по видимому, показывает, что свет и магнетизм являются проявлением свойств одной и той же субстанции и что свет является электромагнитным возмущением, распространяющимся через посредством поля в соответствии с законами электромагнетизма».

■ Анализируя в своем «Трактате» экспериментальные данные Вебера и Кольрауша, Максвелл полагал, что полученное ими численное значение константы с несколько завышено, так как «свойство твердых диэлектриков, которое называли электрической абсорбацией, затрудняет точное определение емкости лейденской банки. Приблизительная емкость изменяется в зависимости от времени, которое проходит от момента заряжения и разряда банки до момента измерения потенциала, и, чем больше это время, тем больше величина, получаемая для емкости банки». Это вполне справедливое замечание Максвелла показывает, что он на основании изучения трудов Фарадея значительно глубже понимал эксперимент, чем Вебер и Кольрауш, оставившие без всякого внимания явление остаточной поляризации диэлектриков, которое неизбежно должно было исказить их численные данные. Впрочем, он не ограни-

чился критикой работы Вебера и Кольрауша, а в 1868 г. сам предпринял экспериментальную проверку числового значения константы c .

§ 4. ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

■ В настоящее время установлено влияние электромагнитных полей на все системы человеческого организма. Действие их на организм определяется напряженностью и продолжительностью воздействия. Наиболее чувствительными к электромагнитным полям являются центральная нервная, сердечно-сосудистая, гормональная и репродуктивная системы.

Опасность для организма кроется в приборах – помощниках по дому. Все, что включается в розетку, работает на батареях и аккумуляторах, излучает электромагнитное поле. Когда эти приборы работают одновременно, их электромагнитные поля наслаиваются друг на друга и излучение усиливается. Сила его воздействия тем больше, чем ближе эти приборы находятся друг от друга.

Вот почему очень важно расставлять их правильно. Так, например, не рекомендуется телевизор и компьютер располагать на расстоянии ближе, чем на 1 метр друг от друга. Что касается микроволновой печи, кухонного комбайна, тостера и другой аппаратуры, то их излучение распространяется на меньшую площадь. Оптимальное расстояние для них — 50 – 70 см. Нежелательно включать сразу несколько приборов, особенно если вы находитесь с ними в одном помещении. На кухне не должны одновременно трудиться кофемолка, микроволновая печь, тостер и холодильник. Со здоровьем совместима компания не более чем из двух таких агрегатов.

■ Неотъемлемая часть современной жизни в большом городе – сотовый телефон. Но немногие знают, что во время работы он окружен довольно мощным электромагнитным полем. Кроме того, его нельзя уменьшить, отойдя от аппарата подальше, как это можно сделать с другими приборами. Доказано, что это излучение плохо влияет на здоровье прекрасной половины человечества.

Женщинам не рекомендуется носить сотовый телефон в кармане на груди, на поясе или в кармане брюк. Лучше, если он будет находиться в сумочке. Электромагнитное излучение снижает иммунитет, приводя тем самым к обострению хронических воспалительных заболеваний органов малого таза. Невидимые лучи приводят к нарушениям в эндокринной системе, усиливая гормональный дисбаланс.

Постоянное использование бытовой техники во время беременности может привести к угрозе ее прерывания, выкидышам и преждевременным родам. Вот почему общение с такими «помощниками» во время беременности лучше свести к минимуму.

Пол с подогревом, несмотря на излучение все того же электромагнитного поля, не так опасен. Однако злоупотреблять «добрым теплом» тоже не стоит. Если у вас такой пол на кухне, на которой вы проводите большую часть времени стоя или сидя, ваше тело постепенно перегрева-

ется. Результатом таких тепловых процедур может стать обострение хронических инфекций.

§ 5. ВИДЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЛУЧЕЙ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА

■ Электромагнитные поля образуются в городах в результате действия передающих радиостанций, телецентров, радиолокационных станций и высоковольтных линий электропередач. Эти объекты создают электромагнитные поля, имеющие диапазон частот от 50 до 3000 Гц, который, в свою очередь, делят на низкочастотный или промышленный, длинноволновый (ДВ), средневолновый (СВ), коротковолновый (КВ), ультракоротковолновый (УКВ), сантиметровой или, так называемый, сверхвысокочастотный (СВЧ). Источниками излучения электромагнитной энергии служат антенные системы. Электромагнитное поле, распространяемое в пространстве, условно распределяют на две зоны: ближнюю, находящуюся вблизи антенн, и дальнюю, выходящую за пределы антенного поля.

Измерения электромагнитных полей в местах размещения передающих объектов показали, что напряженность поля достигает иногда величин, опасных для здоровья людей. Электромагнитные поля вызывают головную боль, головокружение, повышенную раздражительность, утомляемость, ослабление памяти, расстройство сна, общую слабость, понижение половой деятельности. Отмечаются тремор пальцев, повышенная потливость, лейкопения, гипотония, нарушение деятельности сердца. В опытах на животных установлены более тонкие изменения нервной системы (расстройство условно-рефлекторной деятельности), функциональные нарушения деятельности сердечнососудистой и эндокринной систем, дистрофические изменения в семенниках и др.

В результате проведенных исследований рекомендованы предельно допустимые уровни электромагнитной энергии в населенных пунктах, а также в местах прохождения высоковольтных линий электропередачи. Установлены также величины санитарно-защитных зон между передающими радиостанциями и другими объектами (источниками электромагнитного излучения) и жилыми кварталами.

§ 6. ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЛУЧЕЙ НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА И СПОСОБЫ БОРЬБЫ С НИМИ

■ Волновые процессы чрезвычайно широко распространены в природе. В природе существует два вида волн: *механические* и *электромагнитные*. Механические волны распространяются в веществе: газе, жидкости или твердом теле. Электромагнитные волны не нуждаются в каком-либо веществе для своего распространения, к которым, в частности, относятся радиоволны и свет. Электромагнитное поле может существовать в вакууме, т. е. в пространстве, не содержащем атомов. Несмотря на существенное отличие электромагнитных волн от механических,

электромагнитные волны при своем распространении ведут себя подобно механическим.

Среди различных физических факторов окружающей среды, которые могут оказывать неблагоприятное воздействие на человека и биологические объекты, большую сложность представляют электромагнитные поля неионизирующей природы, особенно относящиеся к радиочастотному излучению. Электромагнитные поля – это особая форма существования материи, характеризующаяся совокупностью электрических и магнитных свойств. Основными параметрами, характеризующими электромагнитное поле, являются: частота, длина волны и скорость распространения. Электромагнитные поля окружают нас повсюду, но мы не можем их почувствовать и вообще заметить, – поэтому мы не видим излучений милицейского радара, не видим лучей, поступающих от телевизионной башни или линий электропередач.

Природные источники электромагнитных полей делят на *две* группы. *Первая – поле Земли* – постоянное электрическое и постоянное магнитное поле. *Вторая группа – радиоволны*, генерируемые космическими источниками, атмосферные процессы – разряды молний и т.д. Естественное электрическое поле Земли создается избыточным отрицательным зарядом на поверхности; его напряженность обычно от 100 до 500 Вольт/м. Грозовые облака могут увеличивать напряженность поля до десятков, а то и сотен кВ/м. Вторая группа природных электромагнитных полей характеризуется широким диапазоном частот.

■ Антропогенные источники электромагнитных полей также делятся на 2 группы.

1. *Источники низкочастотных излучений (0 – 3 кГц)*. Эта группа включает в себя все системы производства, передачи и распределения электроэнергии (линии электропередачи, трансформаторные подстанции, электростанции, различные кабельные системы), домашнюю и офисную электронную технику, в том числе и мониторы ПК, транспорт на электроприводе, железнодорожный транспорт и его инфраструктуру, а также метро, троллейбусный и трамвайный транспорт.

Уже сегодня электромагнитное поле на 18 – 32% территории городов формируется в результате автомобильного движения. Электромагнитные волны, возникающие при движении транспорта, создают помехи теле- и радиоприему, а также могут оказывать вредное воздействие на организм человека. Транспорт на электроприводе является мощным источником магнитного поля в диапазоне от 0 до 1000 Гц. Железнодорожный транспорт использует *переменный ток*. Городской транспорт – *постоянный*. Максимальные значения индукции магнитного поля в пригородном электротранспорте достигают 75 мкТл, средние значения – около 20 мкТл. Средние значения на транспорте с приводом от постоянного тока зафиксированы на уровне 29 мкТл. У трамваев, где обратный провод – рельсы, магнитные поля компенсируют друг друга на гораздо большем расстоянии, чем у проводов троллейбуса, а внутри троллейбуса колебания магнитного поля невелики даже при разгоне. Но самые большие

колебания магнитного поля – в метро. При отправлении состава величина магнитного поля на платформе составляет 50 – 100 мкТл и больше, превышая геомагнитное поле. Даже когда поезд давно исчез в туннеле, магнитное поле не возвращается к прежнему значению. Лишь после того, как состав минует следующую точку подключения к контактному рельсу, магнитное поле вернется к старому значению. Правда, иногда не успевает: к платформе уже приближается следующий поезд и при его торможении магнитное поле снова меняется. В самом вагоне магнитное поле еще сильнее – 150 – 200 мкТл, то есть в десять раз больше, чем в обычной электричке.

2. *Источники высокочастотных излучений* (от 3 кГц до 300 ГГц). К этой группе относятся функциональные передатчики – источники электромагнитного поля в целях передачи или получения информации. Это коммерческие передатчики (радио, телевидение), радиотелефоны (автоматические телефоны, радио СВ, любительские радиопередатчики, производственные радиотелефоны), направленная радиосвязь (спутниковая радиосвязь, наземные релейные станции), навигация (воздушное сообщение, судоходство, радиоточка), лоаторы (воздушное сообщение, судоходство, транспортные лоаторы, контроль за воздушным транспортом). Сюда же относится различное технологическое оборудование, использующее СВЧ – излучение, переменные (50 Гц – 1 МГц) и импульсные поля, бытовое оборудование (СВЧ-печи), средства визуального отображения информации на электронно-лучевых трубках (мониторы ПК, телевизоры и т.д.). Для научных исследований в медицине применяют токи ультравысокой частоты. Возникающие при использовании таких токов электромагнитные поля представляют определенную профессиональную вредность, поэтому необходимо принимать меры защиты от их воздействия на организм.

§ 7. ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ОРГАНИЗМ

■ Степень биологического воздействия электромагнитных полей на организм человека зависит от частоты колебаний, напряженности и интенсивности поля, режима его генерации (импульсное, непрерывное), длительности воздействия. Биологическое воздействие полей разных диапазонов неодинаково. Чем короче длина волны, тем большей энергией она обладает. Высокочастотные излучения могут ионизировать атомы или молекулы в соматических клетках – и таким образом нарушать идущие в них процессы. А электромагнитные колебания длинноволнового спектра хоть и не выбивают электроны из внешних оболочек атомов и молекул, но способны нагревать органику, приводить молекулы в тепловое движение. Причем тепло это внутреннее – находящиеся на коже чувствительные датчики его не регистрируют. Чем меньше тело, тем лучше оно воспринимает коротковолновое излучение, чем больше – тем лучше воспринимает длинноволновое.

Таблица 1.

Классификация опасных и вредных излучений

Название частот	Диапазон
Мириаметровые	Очень низкие частоты (ОНЧ)
Километровые	Низкие частоты (НЧ)
Гектометровые	Средние частоты (СЧ)
Декаметровые	Высокие частоты (ВЧ)
Метровые	Очень высокие частоты (ОВЧ)
Дециметровые	Ультравысокие частоты (УВЧ)
Сантиметровые	Сверхвысокие частоты (СВЧ)
Миллиметровые	Крайне высокие частоты (КВЧ)
Децимиллиметровые	Сверхкрайне высокие частоты (СКВЧ)

Особенно чувствительны к неблагоприятному воздействию электромагнетизма эмбрионы и дети. Человек, создав такой вид излучения, не успел выработать к нему защиты. Первичным проявлением действия электромагнитной энергии является нагрев, который может привести к изменениям и даже к повреждениям тканей и органов. Механизм поглощения энергии достаточно сложен. Наиболее чувствительными к действию электромагнитных полей являются центральная нервная система (субъективные ощущения при этом – повышенная утомляемость, головные боли и т.п.) и нейроэндокринная система.

С нарушением нейроэндокринной регуляции связывают эффект со стороны сердечно-сосудистой системы, системы крови, иммунитета, обменных процессов, воспроизводительной функции и др. Влияние на иммунную систему выражается в снижении фагоцитарной активности нейтрофилов, изменениях комплиментарной активности сыворотки крови, нарушении белкового обмена, угнетении Т-лимфоцитов. Возможны также изменение частоты пульса, сосудистых реакций. Описаны изменения кроветворения, нарушения со стороны эндокринной системы, метаболических процессов, заболевания органов зрения. Было установлено, что клинические проявления воздействия радиоволн наиболее часто характеризуются астеническими, астеновегетативными и гипоталамическими синдромами.

1. *Астенический синдром.* Этот синдром, как правило, наблюдается в начальных стадиях заболевания и проявляется жалобами на головную боль, повышенную утомляемость, раздражительность, нарушение сна, периодически возникающие боли в области сердца.

2. *Астеновегетативный или синдром нейроциркулярной дистонии.* Этот синдром характеризуется ваготонической направленностью реакций (гипотония, брадикардия и др.).

3. *Гипоталамический синдром.* Больные повышено возбудимы, эмоционально лабильны, в отдельных случаях обнаруживаются признаки раннего атеросклероза, ишемической болезни сердца, гипертонической болезни.

■ Поля сверхвысоких частот могут оказывать воздействие на глаза, приводящее к возникновению катаракты (помутнению хрусталика), а умеренных — к изменению сетчатки глаза по типу ангиопатии. В результате длительного пребывания в зоне действия электромагнитных полей наступают преждевременная утомляемость, сонливость или нарушение сна, появляются частые головные боли, наступает расстройство нервной системы и др. Многократные повторные облучения малой интенсивности могут приводить к стойким функциональным расстройствам центральной нервной системы, стойким нервно-психическим заболеваниям, изменению кровяного давления, замедлению пульса, трофическим явлениям (выпадению волос, ломкости ногтей и т. п.).

Аналогичное воздействие на организм человека оказывает электромагнитное поле промышленной частоты в электроустановках сверхвысокого напряжения. Интенсивные электромагнитные поля вызывают у работающих нарушение функционального состояния центральной нервной, сердечно-сосудистой и эндокринной системы, страдает нейрогуморальная реакция, половая функция, ухудшается развитие эмбрионов (увеличивается вероятность развития врожденных уродств). Также наблюдаются повышенная утомляемость, вялость, снижение точности движений, изменение кровяного давления и пульса, возникновение болей в сердце (обычно сопровождается аритмией), головные боли. В условиях длительного профессионального облучения с периодическим превышением предельно допустимых уровней у части людей отмечали функциональные перемены в органах пищеварения, выражающиеся в изменениях секреции и кислотности желудочного сока, а также в явлениях дискинезии кишечника. Также выявлены функциональные сдвиги со стороны эндокринной системы: повышение функциональной активности щитовидной железы, изменение характера сахарной кривой и т.д. Предполагается, что нарушение регуляции физиологических функций организма обусловлено воздействием поля на различные отделы нервной системы. При этом повышение возбудимости центральной нервной системы происходит за счет рефлекторного действия поля, а тормозной эффект — за счет прямого воздействия поля на структуры головного и спинного мозга. Считается, что кора головного мозга, а также промежуточный мозг особенно чувствительны к воздействию поля. В последние годы появляются сообщения о возможности индукции ЭМИ злокачественных заболеваний. Еще немногочисленные данные все же говорят, что наибольшее число случаев приходится на опухоли кроветворных тканей и на лейкозы в частности. Это становится общей закономерностью канцерогенного эффекта при воздействии на организм человека и животных физических факторов различной природы и в ряде других случаев.

■ Исследователи США и Швеции установили факт возникновения опухолей у детей при воздействии на них магнитных полей частоты 60

Гц и напряженностью 2 – 3 мГс в течение нескольких дней или даже часов. Такие поля излучаются телевизором, персональным компьютером. Наблюдения за людьми, которые регулярно пользовались электродрелями, показали неблагоприятное для здоровья действие низкочастотных электромагнитных полей частотой 50 – 60 Гц: ночью у большинства испытуемых повышался в крови уровень мелатонина – гормона шишковидной железы, или эпифиза. Эпифиз играет роль основного «ритмоводителя» функций организма. Нарушение этого ритма может повлечь за собой серьезные заболевания, в частности, образование опухолей.

В конце 1995 года было опубликовано 14 работ по исследованию возможного развития рака молочной железы у лиц, имеющих контакт с электромагнитным полем в производственных условиях или в быту. В Варшаве проводилось исследование, которое показало, что у лиц, облучавшихся электромагнитным полем, вероятность развития рака лимфатической системы и кровеносных органов по сравнению со здоровыми людьми была больше в 6,7 раза, рака щитовидной железы – в 4,3 раза; наиболее обычен рак легкого при действии микроволнового излучения.

§ 8. ЗАЩИТА ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

■ Бурное развитие машиностроительных отраслей народного хозяйства привело к использованию в некоторых производствах электромагнитных волн. Причем в ряде случаев человек оказывается подвержен их воздействию. Электромагнитные волны, взаимодействуя с тканями тела человека, вызывают определенные функциональные изменения. При интенсивном облучении эти изменения могут оказать вредное воздействие на организм человека. Знание природы воздействия электромагнитных волн на организм человека, норм допустимых облучений, методов контроля интенсивности излучений и средств защиты от них является совершенно необходимым для специалистов машиностроения в их многогранной практической деятельности.

Действие электромагнитного излучения на организм человека в основном определяется поглощенной в нем энергией. Известно, что излучение, попадающее на тело человека, частично отражается и частично поглощается в нем. Поглощенная часть энергии электромагнитного поля превращается в тепловую энергию. Эта часть излучения проходит через кожу и распространяется в организме человека в зависимости от электрических свойств тканей (абсолютной диэлектрической проницаемости, абсолютной магнитной проницаемости, удельной проводимости) и частоты колебаний электромагнитного поля.

Существенные различия электрических свойств кожи, подкожного жирового слоя, мышечной и других тканей обуславливают сложную картину распределения энергии излучения в организме человека. Точный расчет распределения тепловой энергии, выделяемой в организме человека при облучении, практически невозможен. Тем не менее, можно сделать следующий вывод: волны миллиметрового диапазона поглоща-

ются поверхностными слоями кожи, сантиметровой кожей и подкожной клетчаткой, дециметрового внутренними органами.

Кроме теплового действия электромагнитные излучения вызывают поляризацию молекул тканей тела человека, перемещение ионов, резонанс макромолекул и биологических структур, нервные реакции и другие эффекты. Из сказанного следует, что при облучении человека электромагнитными волнами в тканях его организма происходят сложнейшие физико-биологические процессы, которые могут явиться причиной нарушения нормального функционирования как отдельных органов, так и организма в целом. Люди, работающие под чрезмерным электромагнитным излучением, обычно быстро утомляются, жалуются на головные боли, общую слабость, боли в области сердца. У них увеличивается потливость, повышается раздражительность, становится тревожным сон. У отдельных лиц при длительном облучении появляются судороги, наблюдается снижение памяти, отмечаются трофические явления (выпадение волос, ломкость ногтей и т. д.).

■ *Нормы допустимого облучения* устанавливаются для обеспечения безопасных условий труда обслуживающего персонала источников излучения и всех окружающих лиц.

Напряженность электромагнитных полей на рабочих местах не должна превышать:

1) *по электрической составляющей*: в диапазоне частот 60 кГц: 3 МГц – 50 В/м; 330 МГц – 20 В/м; 3050 МГц – 10 В/м;

2) *по магнитной составляющей*: в диапазоне частот 60 кГц: 1,5 МГц – 5 А/м; 30 МГц – 50 МГц – 0, 3 А/м.

Предельно допустимая плотность потока энергии электромагнитных полей в диапазоне частот 300 МГц, 300 ГГц и время пребывания на рабочих местах и в местах возможного нахождения персонала, связанного профессионально с воздействием полей (кроме случаев облучения от вращающихся и сканирующих антенн), взаимосвязаны следующим образом: пребывание в течение рабочего дня до 0,1 Вт/м²; пребывание не более 2 ч 0,11 Вт/м², в остальное рабочее время плотность потока энергии не должна превышать 0,1 Вт/м²; пребывание не более 20 мин 110 Вт/м² при условии пользования защитными очками. В остальное рабочее время плотность потока энергии не должна превышать 0,1 Вт/м².

■ Напряженность электрического поля промышленной частоты (50 Гц) в электроустановках напряжением 400 кВ и выше для персонала, систематически (в течение каждого рабочего дня) обслуживающего их, не должна превышать при пребывании человека в электрическом поле: без ограничения времени до 5 кВ/м; не более 180 мин в течение одних суток 510 кВ/м; не более 90 мин в течение одних суток 1015 кВ/м; не более 10 мин в течение одних суток 15 – 30 кВ/м; не более 5 мин в течение суток 20 – 25 кВ/м. Остальное время суток человек должен находиться в местах, где напряженность электрического поля не превышает 5 кВ/м.

Если облучение людей превышает указанные предельно допустимые уровни, то необходимо применять защитные средства. Защита человека от опасного воздействия электромагнитного облучения осуществляется рядом способов, основными из которых являются: уменьшение излучения непосредственно от самого источника, экранирование источника излучения, экранирование рабочего места, поглощение электромагнитной энергии, применение индивидуальных средств защиты, организационные меры защиты.

Для реализации этих способов применяются: экраны, поглощительные материалы, аттенюаторы, эквивалентные нагрузки и индивидуальные средства.

Экраны предназначены для ослабления электромагнитного поля в направлении распространения волн. Степень ослабления зависит от конструкции экрана и параметров излучения. Существенное влияние на эффективность защиты оказывает также материал, из которого изготовлен экран. Толщину экрана, обеспечивающую необходимое ослабление, можно рассчитать. Однако расчетная толщина экрана обычно мала, поэтому она выбирается из конструктивных соображений. При мощных источниках излучения, особенно при длинных волнах, толщина экрана может быть принята расчетной.

Толщина экрана в основном определяется частотой и мощностью излучения и мало зависит от применяемого металла.

§ 9. ИЗЛУЧЕНИЕ БЫТОВЫХ ПРИБОРОВ

■ Источником электромагнитного поля в жилых помещениях является разнообразная электротехника – холодильники, утюги, пылесосы, электропечи, телевизоры, компьютеры и др., а также электропроводка квартиры. На электромагнитную обстановку квартиры влияют электротехническое оборудование здания, трансформаторы, кабельные линии. Электрическое поле в жилых домах находится в пределах 1^{-10} Вольт/м. Однако могут встретиться точки повышенного уровня, например, незаземленный монитор компьютера.

Замеры напряженности магнитных полей от бытовых электроприборов показали, что их кратковременное воздействие может оказаться даже более сильным, чем долговременное пребывание человека рядом с линией электропередачи. Если отечественные нормы допустимых значений напряженности магнитного поля для населения от воздействия линии электропередачи составляют 1000 мГс, то бытовые электроприборы существенно превосходят эту величину.

Индукция магнитного поля от электроплит типа «Электра» на расстоянии 20 – 30 см от передней панели – там, где стоит хозяйка, – составляет 1 – 3 мкТл. У конфорок, оно, естественно, больше. А на расстоянии 50 см уже неотличимо от общего поля в кухне, которое составляет около 0,1 – 0,15 мкТл.

Невелики и магнитные поля от холодильников и морозильников. Так, по данным Центра электромагнитной безопасности, у обычного бы-

тового холодильника поле выше предельно допустимого уровня (0,2 мкТл) возникает в радиусе 10 см от компрессора и только во время его работы. Однако у холодильников, оснащенных системой «без снега», превышение предельно допустимого уровня можно зафиксировать на расстоянии метра от дверцы.

СВЧ – печи, в силу принципа своей работы, *служат мощнейшим источником излучения*. Но по той же причине их конструкция обеспечивает соответствующую экранировку, да и пища разогревается или готовится в них быстро. Но все же опираться локтем на включенную «микроволновку» не стоит. На расстоянии 30 см печь создает заметное переменное (50 Гц) магнитное поле (0,3 – 8 мкТл). Неожиданно малыми оказались поля от мощных электрических чайников. Так, на расстоянии 20 см от чайника поле составляет около 0,6 мкТл, а на расстоянии 50 см неотличимо от общего электромагнитного поля в кухне.

У большинства утюгов поле выше 0,2 мкТл обнаруживается на расстоянии 25 см от ручки и только в режиме нагрева.

Зато поля стиральных машин оказались достаточно большими. Например, у малогабаритных агрегатов поле на частоте 50 Гц у пульта управления составляет более 10 мкТл, на высоте 1 метра – 1 мкТл, сбоку на расстоянии 50 см – 0,7 мкТл. В утешение можно заметить, что большая стирка – не столь частое занятие, да и при работе автоматической или полуавтоматической стиральной машины хозяйка может отойти в сторонку или просто выйти из ванной. Еще больше поле у пылесосов. Оно порядка 100 мкТл. Впрочем, здесь тоже есть утешительное обстоятельство: пылесос обычно таскают за шланг и находятся от него достаточно далеко.

Рекорд держат *электробритвы*. Их поле измеряется сотнями мкТл. Таким образом, бреясь электробритвой, убивают сразу двух зайцев: приводят себя в порядок и попутно проводят магнитную обработку лица.

Западная промышленность уже реагирует на повышающийся спрос к бытовым приборам и персональным компьютерам, чье излучение не угрожает жизни и здоровью людей, рискнувших облегчить себе жизнь с их помощью. Так, в США многие фирмы выпускают безопасные приборы, начиная от утюгов с бифилярной намоткой и кончая неизлучающими компьютерами.

■ В нашей стране существует *Центр электромагнитной безопасности*, где разрабатываются всевозможные средства защиты от электромагнитных излучений: специальная защитная одежда, ткани и прочие защитные материалы, которые могут обезопасить любой прибор. Но до внедрения подобных разработок в широкое и повседневное их использование пока далеко. Так что каждый пользователь должен позаботиться о средствах своей индивидуальной защиты сам, и чем скорее, тем лучше. Сотрудники Центра электромагнитной безопасности провели независимое исследование ряда компьютеров, наиболее распространенных на нашем рынке, и установили, что «уровень электромагнитных полей в

зоне размещения пользователя превышает биологически опасный уровень».

В 1920 – 30 гг. в московских домах, расположенных вокруг радиостанции имени Коминтерна, которая вещала на длине волны 2 км, можно было провести такой опыт. Намотать на рамку около сотни витков, присоединить к концам лампочку от карманного фонарика – и она загоралась. Для этого напряженность магнитного поля должна была составлять никак не меньше нескольких Ампер/м. Сейчас во многих странах это предельно допустимый уровень для 8-часового рабочего дня. Радиоволны большой длины «накрывают» соответственно и большее пространство. Электрическую составляющую волны экранируют стены зданий, но магнитную они ослабляют мало. В свое время в штате Мэн (США) была развернута система радиосвязи с подводными лодками, находящимися на глубине в океане. Морская вода сильно поглощает радиоволны, но все-таки, чем больше длина волны, тем поглощение меньше. Поэтому связь вели на частоте 15 Гц, то есть на длине волны 20 тысяч километров. А так как излучаемая антенной мощность пропорциональна кубу отношения ее размеров к длине волны, то антенны протянулись почти через весь штат. Большую проблему составляют ведомственные и частные РПЦ, которые в последние годы растут как грибы после дождя. К примеру, телевизионные передатчики расположены почти во всех городах. Их антенны размещены на высоте 110 м на расстоянии 1 км, типичные значения напряженности электрического поля достигают 15 Вольт/м от передатчика мощностью 1 МВт.

Единственное, что радует, это то, что на фоне РПЦ антенны базовых станций сотовой телефонной связи вносят незначительный вклад в электромагнитное загрязнение городских улиц. Разумеется, если не влезать на крышу дома, где их обычно устанавливают, и не изучать конструкцию антенны.

§ 10. ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ ТЕЛЕФОНОВ НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА

■ Сотовая радиотелефония является сегодня одной из наиболее интенсивно развивающихся телекоммуникационных систем. В настоящее время во всем мире насчитывается более 600 миллионов абонентов, пользующихся услугами этого вида подвижной (мобильной) связи (в России – более 40 млн.). Предполагается, что к 2010 году их число увеличится до 800 миллионов (в России – до 65 миллионов).

На сегодняшний день ученые не пришли к единому мнению о влиянии электромагнитного излучения аппаратов сотовой связи на организм человека.

Многочисленные исследования, проведенные учеными разных стран, включая Российскую Федерацию, на биологических объектах (в том числе, на добровольцах), привели к неоднозначным, иногда противоречащим друг другу, результатам. Неоспоримым остается лишь тот факт,

что организм человека «откликается» на наличие излучения сотового телефона.

Диаграмма 1.

Электромагнитное излучение бытовых приборов



Продолжительность использования телефона в режиме ожидания обычно составляет весь световой день, а это более 10 часов ежедневно. Хотя в режиме ожидания и в комфортных для связи условиях излучение аппарата минимально, но условия эти постоянно меняются. Так в метро, лифте, зданиях с хорошими капитальными стенами качество приема резко падает или связь пропадает совсем. Мобильный телефон начинает увеличивать мощность излучения и доводит ее до максимальной. Продолжительность работы на этой мощности может составлять от пары часов до всего рабочего дня. Чаще всего телефон находится на теле человека, причем обычно на одном и том же месте. День за днем. Месяц за месяцем.

Электромагнитное излучение распространяется радиально, что не позволяет уменьшить эффект воздействия излучения, ведь любая используемая защита от излучения неизбежно приведет к потере связи.

В современных аппаратах мощность излучения может автоматически варьироваться в зависимости от удаленности от передающей станции и прочих условий приема в пределах от 0,2 Ватта до 2 Ватт, т.е. в десять раз.

Поскольку организм человека управляется электрическими импульсами слабой мощности, то источник электромагнитного излучения мощностью до 2 Ватт не может не оказывать патогенного воздействия, на нервную систему человека.

Мощность однократного воздействия не столь опасна, в данном случае, как его продолжительность, и если не разговаривать целый день, то здоровый человек не почувствует дискомфорта.

Наиболее часто и сильно воздействию электромагнитного излучения при разговоре по мобильному телефону человек подвергает клетки головного мозга.

Мозг – это центр организма, посылающий электрические сигналы всему организму и большинство процессов в нем происходят за счет образования временных электронных контуров (цепей). Поднося к голове источник излучения, человек начинает оказывать влияние как на организацию мыслительных процессов (высшую нервную деятельность), так и на передачу сигналов всем органам человека. Это может привести к изменениям в деятельности головного мозга: ухудшается память, ослабляется внимание, повышается раздражительность и утомляемость.

Последние достижения прогресса, призванные повысить комфортность общения при помощи аппаратов мобильной связи – беспроводные гарнитуры. Они используют для связи с аппаратом находящимся в помещении свой стандарт радиосвязи гораздо меньшей мощности, но часто аппарат все равно продолжает оставаться на теле человека в сумочке или кармане, и получается, что вместо одного источника электромагнитного излучения человек получает сразу два. Гарнитура крепится на ушной раковине максимально близко к мозгу, а ушной канал является свободным проходом для излучения внутрь черепной коробки.

Так же электромагнитные излучения оказывают пагубное воздействие на такие системы человеческого организма, как нервная, иммунная, эндокринно-регулятивная и половая системы.

Кроме того, в помещении часто находятся другие электроприборы создающие свое излучение: компьютеры, телевизоры, микроволновые печи, мобильные телефоны других людей. Сказать какое комплексное воздействие они оказывают на человека сложно, понятно только что оно не является положительным.

Как уменьшить дозу вредных излучений от мобильных телефонов:

- разговаривать по мобильному телефону желательно на открытых зонах (на улице), на небольшом расстоянии от базовых станций, и, не перемещаясь на высокой скорости в автомобиле;
- не носите телефон около сердца, так же рядом с репродуктивными органами, по возможности следует его располагать в сумке;
- категорически запрещается держать телефон около себя, когда едете в автомобиле или в других транспортных средствах;
- не следует приобретать телефон лицам моложе 16 лет;

- следует всегда помнить – чем меньше телефон, тем сильнее его электромагнитное излучение;
- после набора номера не приставляйте телефон сразу к уху, подождите 2 – 5 секунд;
- не держитесь за антенну во время разговора, если у вас телефон с внутренней антенной, то не обхватывайте верхнюю часть корпуса;
- если вы носите очки, то лучше снимайте их во время разговора, так как ободки от очков являются, своего рода, принимающей антенной, присоединенной к вашей голове, и через ободки электромагнитные импульсы попадают прямо вам в мозг.

II. АТОМНАЯ ФИЗИКА

§ 11. МИКРООБЪЕКТЫ. ОСНОВОПОЛАГАЮЩИЕ ИДЕИ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

■ К *микрообъектам* относятся молекулы, атомные ядра, элементарные частицы. Довольно богатый сегодня список элементарных частиц включает в себя кванты электромагнитного поля (фотоны) и две группы частиц: так называемые *адроны* и *лептоны*. Для адронов характерно сильное (ядерное) взаимодействие, тогда как лептоны никогда не участвуют в сильных взаимодействиях. К лептонам относятся электрон, мюон и два нейтрино – электронное и мюонное. Группа адронов существенно многочисленнее. К ним относятся нуклоны (протон и нейтрон), мезоны (группа частиц, масса которых меньше массы протона) и гипероны (группа частиц, масса которых больше массы нейтрона). Почти всем элементарным частицам соответствуют античастицы; исключение составляет фотон и некоторые нейтральные мезоны.

Говоря о характеристиках микрообъектов, прежде всего, говорят о массе покоя и электрическом заряде. К примеру, масса электрона $m = 9,1 \cdot 10^{-28}$ г, протон имеет массу, равную $1836,1m$, нейтрон – $1838,6m$, мюон – $207m$. Относящиеся к мезонам пионы (*p*-мезоны) имеют массу около $270m$, а каоны (*K*-мезоны) – от $970m$ до $1750m$. Массу покоя фотона и обоих нейтрино полагают равной нулю.

Масса молекулы, атома, ядра равна сумме масс составляющих данный микрообъект частиц за вычетом некоторой величины, называемой дефектом массы. Дефект массы равен деленной на квадрат скорости света энергии, которую надо затратить для того, чтобы «развалить» микрообъект на составляющие его частицы (эту энергию принято называть энергией связи). Чем сильнее связаны друг с другом частицы, тем больше дефект массы. Наиболее сильно связаны нуклоны в атомных ядрах – приходящийся на один нуклон дефект массы превышает $10m$.

Величина электрического заряда любого микрообъекта кратна величине заряда электрона; последняя равна $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Наряду с заряженными существуют нейтральные микрообъекты (например, фотон, нейтрино, нейтрон). Электрический заряд сложного микрообъекта равен алгебраической сумме зарядов составляющих его частиц.

■ **Строение атома. Опыт Резерфорда.** Сложное строение атома доказывают:

- электростатические явления;
- ток в электролитах;
- фотоэффект;
- явление радиоактивности;
- свет – электромагнитная волна;
- закономерности в спектрах;
- открытие электрона *Дж. Томсоном*.

В опытах по изучению строения атома Резерфорд располагал на пути α -частиц (ядер атома гелия), летящих в одном направлении, металлическую фольгу и изучал рассеяние α -частиц фольгой. Оказалось, что очень большое число α -частиц, пройдя сквозь фольгу, продолжает движение в прежнем направлении или отклоняется от него на очень малый угол. Лишь небольшое число α -частиц сильно изменяло свое направление или даже отбрасывалось назад. Это доказывает, что почти вся масса ядра находится в центре атома. В центре атома находится очень маленькая по размерам частица, но она имеет большую массу. Заряд этой частицы положительный. Именно поэтому она отталкивает пролетающие на достаточно близком расстоянии α -частицы. Эта положительная частица положила название *ядра атома гелия*.

Так как в целом заряд атома нейтрален, то должен присутствовать еще и отрицательный заряд. Резерфорд предложил модель атома, в которой в центре атома находится положительный заряд (ядро атома), вокруг которого по круговым орбитам обращаются электроны, подобно планетам вокруг Солнца. Такая модель получила название *планетарной*. Резерфорд доказал, что существующая к тому времени модель атома Томсона несостоятельна. Эта модель представляла собой положительно заряженный атом, в который вкраплены отдельные электроны («кекс с изюмом»).

Но электроны в модели атома Резерфорда обращаются по окружности, следовательно, атом все время должен излучать электромагнитные волны, теряя энергию и в результате через очень маленький промежуток времени упасть на ядро. Атом прекратит свое существование. Этого не происходит. Выход из положения был предложен *Н. Бором*.

■ **Лазеры.** *Вынужденное излучение* – излучение возбужденных атомов под действием падающего света.

Особенность – возникающая световая волна не отличается от падающей на атом ни частотой, ни фазой, ни поляризацией.

1960 год, США – первый лазер (квантовый генератор электромагнитных волн в видимом диапазоне спектра).

Принцип действия: при прохождении электромагнитной волны сквозь вещество ее энергия поглощается. За счет поглощенной энергии часть атомов среды возбуждается, то есть переходит в более высокое энергетическое состояние. Это состояние нестабильно, то есть атом не может долго находиться в этом состоянии. Они переходят в состояние с меньшей энергией, но не в основное. На этом уровне накапливается большое количество атомов. Затем из этого состояния атомы согласованно переходят в основное, излучая при этом энергию. Можно выделить три энергетических уровня, поэтому и система называется *трехуровневой*.

Свойства лазерного излучения: очень высокая монохроматичность (монохроматическое излучение – излучение одной определенной длины волны), мощные источники света, малый угол расхождения светового пучка.

Применение: техника, связь, медицина.

■ **Ядерные силы.** *Ядерные силы* – силы, связывающие протоны и нейтроны в ядре. Свойства:

- являются только силами притяжения;
- немного больше сил Кулона;
- не зависят от наличия заряда (взаимодействуют протон и нейтрон, протон и протон, нейтрон и нейтрон);
- взаимодействует ограниченное число нуклонов;
- короткодействующие, проявляются на расстоянии порядка 10^{-15} м.

Энергия связи ядер – энергия, необходимая для разделения ядра на свободные протоны и нейтроны. Эта энергия очень велика.

Удельная энергия связи – энергия связи, приходящаяся на 1 нуклон.

Наибольшую энергию связи имеют ядра с порядковыми номерами 50 – 60. У тяжелых ядер величина этой энергии уменьшается, за счет растущей с увеличением числа протонов кулоновской силы отталкивания протонов. Силы Кулона пытаются разорвать ядро. Существует два способа высвобождения внутренней энергии: деление тяжелых ядер (цепная ядерная реакция) и синтез легких ядер (термоядерная реакция).

■ **Спин микрообъекта.** Одной из важнейших специфических характеристик микрообъекта является спин. Спин можно интерпретировать как своеобразный момент импульса микрообъекта, не связанный с движением микрообъекта как целого, неуничтожимый, не зависящий от внешних условий (его часто называют внутренним моментом импульса микрообъекта). Квадрат этого момента импульса равен

$$\hbar^2 s(s + 1).$$

Здесь s – определенное для данного микрообъекта целое или полуцелое положительное число (именно это число и называют обычно спином), \hbar – универсальная физическая постоянная, играющая в квантовой механике исключительно важную роль. Ее называют *постоянной Планка*; она равна $1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж · с. Спин s фотона равен 1, спин электрона (как и спин любого лептона) равен $1/2$, спин нуклона тоже равен $1/2$; у пионов и каонов спина нет.

Спин микрообъекта – его специфическая характеристика. Он не имеет классического аналога и, безусловно, указывает на «внутреннюю сложность» микрообъекта. Правда, иногда с понятием спина пытаются сопоставить модель объекта, вращающегося вокруг своей оси (само слово «спин» переводится как «веретено»). Такая модель наглядна, но неверна. Во всяком случае, ее нельзя принимать буквально. Встречающийся в литературе термин «вращающийся микрообъект» означает отнюдь не вращение микрообъекта, а лишь наличие у него специфического внутреннего момента импульса. Для того чтобы этот момент «превратился» в классический момент импульса (и тем самым объект действительно начал бы вращаться), необходимо потребовать выполнение условия $s \gg 1$ (намного больше единицы). Однако такое условие никогда не выполняется.

Специфичность момента импульса микрообъекта проявляется, в частности в том, что его проекция на любое фиксированное направление принимает дискретные значения: $hs, h(s - 1), \dots, -hs$ — всего $2s + 1$ значений. Это означает, что микрообъект может находиться в $2s + 1$ спиновых состояниях. Следовательно, наличие у микрообъекта спина приводит к появлению у него добавочной (внутренней) степени свободы.

Пусть создаётся такое магнитное поле (рис. 1). Теперь мы сюда запускаем пучок частиц, обладающих магнитными моментами. Когда частица залетает в магнитное поле, на неё действует сила по вертикали.

Тогда, если влетает пучок частиц с хаотично ориентированными магнитными моментами, то на каждую из этих частиц будет действовать сила пропорциональная направлению магнитного момента на ось z . Каждая частица будет отклоняться пропорционально силе, т.е. μ пропорционально μ_x , и они размажутся в виде веера.

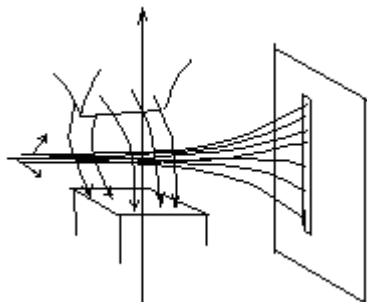


Рис. 1.

Это способ определить экспериментально проекцию магнитного момента, которая связана с орбитальным моментом: $\vec{\mu} = \frac{1}{2} \frac{e}{m} \vec{L}$.

А теперь мы запускаем туда не макроскопические элементы, а запускаем пучок атомов, а атом тоже может обладать магнитным моментом за счёт того, что там электрон вращается. А когда мы пропускаем пучок атомов, то обнаруживается, что мы не получаем такого размазывания в виде веера этих траекторий, а будет наблюдаться такое (скажем, пучок может разделиться на три пучка).

Пучок атомов не размаывается, он расщепляется, а именно три чётких отдельных пучка появится в итоге. Это будет означать, что проекция магнитного момента на ось z принимает всего три значения, а число проекций $2j + 1 = 3$ и $j = 1$, мы тогда говорим так: эти атомы обладают орбитальным моментом, а при этом число проекций 3. Вот это квантование момента наблюдается экспериментально, когда пучок атомов расщепляется на определённое число пучков. Вот, целым j отвечают такие орбитальные моменты. Но оказалось, что есть ситуации, в которых пу-

чок расщепляется на два пучка (рис. 2). Это означает, что $2j + 1 = 2$. Эта ситуация, как выяснилось в конце концов, связана с тем, что электрон обладает собственным магнитным моментом, т.е. полуцелым значениям j не отвечают орбитальные моменты, значению $j = 1/2$ отвечает собственный момент импульса электрона и он называется *спином*.

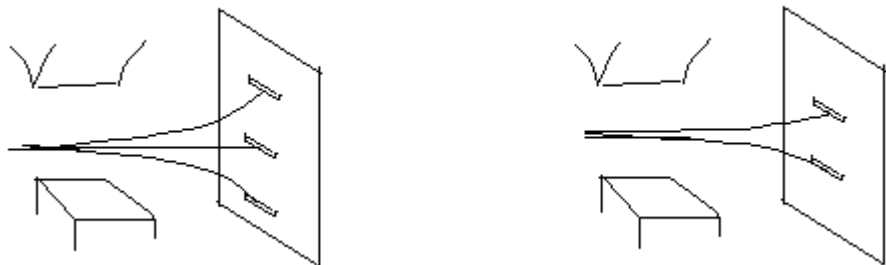


Рис. 2.

■ **Бозоны и фермионы.** Знание спина микрообъекта позволяет судить о характере его поведения в коллективе себе подобных (иначе говоря, позволяет судить о *статистических свойствах микрообъекта*). Оказывается, что по своим статистическим свойствам все микрообъекты в природе разделяются на две группы: группа микрообъектов с целочисленным спином и группа микрообъектов с полуцелым спином.

Микрообъекты первой группы способны «заселять» одно и то же состояние в неограниченном числе, причем тем выше, чем сильнее это состояние «заселено». О таких микрообъектах говорят, что они подчиняются статистике *Бозе – Эйнштейна*; для краткости их называют просто *бозонами*. Микрообъекты второй группы могут «заселять» состояния только поодиночке; если рассматриваемое состояние занято, то никакой микрообъект данного типа не может попасть в него. О таких микрообъектах говорят, что они подчиняются статистике *Ферми – Дирака*; для краткости их называют *фермионами*.

Из элементарных частиц к бозонам относятся фотоны и мезоны, а к фермионам – лептоны (в частности электроны), нуклоны, гипероны. Тот факт, что электроны относятся к фермионам, отражен в хорошо известном *принципе запрета Паули*.

■ **Нестабильность микрообъектов.** Все элементарные частицы, за исключением фотона, электрона, протона и обоих нейтрино, нестабильны. Это означает, что они самопроизвольно, без каких-либо внешних воздействий распадаются, превращаясь в другие частицы. Например, нейтрон самопроизвольно распадается на протон, электрон и электронное антинейтрино ($n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$). Невозможно предсказать, когда именно произойдет указанный распад того или иного конкретного нейтрона; каждый конкретный акт распада случаен. Однако если проследить за множеством актов, то обнаруживается закономерность распада.

Предположим, что в момент $t_1 = 0$ имеется N_0 нейтронов ($N_0 \gg 1$). Тогда к моменту t_2 останется $N(t) = N_0 = \exp(-t_1/t_2)$ нейтронов, где t есть некоторая постоянная характеристика для нейтрона. Ее называют «временем жизни» нейтрона; она равна 1000 с. Величина $\exp(-t_1/t_2)$ определяет вероятность для отдельного нейтрона не распасться по истечении времени t .

Каждая нестабильная элементарная частица характеризуется своим временем жизни. Чем меньше время жизни, тем больше вероятность распада частицы. Например, время жизни мюона составляет $2,2 \cdot 10^{-6}$ с, положительно заряженного p -мезона — $2,6 \cdot 10^{-8}$ с, нейтрального p -мезона — 10^{-16} с, гиперонов — около 10^{-10} с.

В 70-х годах прошлого столетия были обнаружены около 100 частиц с очень малым временем жизни — $10^{-22} - 10^{-23}$ с, получивших название *резонансов*. Примечательно, что гипероны и мезоны могут распадаться различными способами. Например, положительно заряженный p -мезон может распадаться на мюон и мюонное нейтрино ($p^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$), на позитрон (антиэлектрон) и электронное нейтрино ($p^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$), на нейтральный p -мезон, позитрон и электронное нейтрино ($p^+ \rightarrow \pi^0 + e^+ + \nu_e$). Для конкретного p -мезона нельзя предсказать не только время распада, но и тот способ распада, который данный мезон «выберет».

Нестабильность присуща не только элементарным частицам, но и другим микрообъектам. Явление радиоактивности (самопроизвольное превращение изотопов одного химического элемента в изотопы другого, сопровождающееся испусканием частиц) показывает, что нестабильными могут быть атомные ядра. Атомы и молекулы в возбужденных состояниях также оказываются нестабильными: они самопроизвольно переходят в основное или менее возбужденное состояние.

Определяемая вероятностными законами нестабильность есть, наряду с наличием спина, второе сугубо специфическое свойство, присущее микрообъектам. Его также можно рассматривать как указание на некую «внутреннюю сложность» микрообъекта.

Однако нестабильность — это специфическое, но отнюдь не обязательное свойство микрообъекта. Наряду с нестабильными существует много стабильных микрообъектов: фотон, электрон, протон, нейтрино, стабильные атомные ядра, а также атомы и молекулы в основном состоянии.

■ **Взаимопревращения микрообъектов.** Глядя на схему распада нейтрона ($n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$), можно предположить, что нейтрон состоит из связанных друг с другом протона, электрона и электронного антинейтрино. Такое представление ошибочно. Распад элементарной частицы отнюдь не является распадом в прямом смысле слова; это акт превращения исходной частицы в некую совокупность новых частиц: исходная частица уничтожается, новые частицы рождаются. Несостоятельность буквального толкования термина «распад частицы» становится очевидной, если учесть, что многие частицы имеют несколько способов распада.

Картина взаимопревращений элементарных частиц оказывается существенно богаче и сложнее, если рассматривать частицы не только в *свободном*, но также и в связанном состоянии. Свободный протон стабилен, а свободный нейтрон распадается по приведенной выше схеме. Если же протон и нейтрон не являются свободными, а связаны в атомном ядре, то ситуация изменяется. Теперь имеют место следующие схемы взаимопревращений: $n + p^-$, $p \text{ an } + p^+$ (здесь p^- – отрицательно заряженный p -мезон, являющийся античастицей по отношению к p^+ -мезону). Эти схемы хорошо иллюстрируют беспредметность выяснения того, входит ли протон в состав нейтрона или же, напротив, нейтрон в состав протона.

Повседневный опыт учит: разобрать предмет на части – значит выяснить, из чего он структурно состоит. Идея анализа (идея дробления) отражает характерную сторону классических представлений. При переходе к микрообъектам эта идея в определенной мере еще «работает»: молекула состоит из атомов, атом состоит из ядра и электронов, ядро состоит из протонов и нейтронов. Однако на этом указанная идея себя исчерпывает: дробление, например, нейтрона или протона не выявляет никакой структуры этих частиц. В отношении элементарных частиц нельзя утверждать: «распад объекта на какие-либо части означает, что объект состоит из этих частей». Именно это обстоятельство может служить определением самого термина «элементарная частица».

Полезно обратить внимание на то, что во всех приведенных выше схемах сумма масс покоя конечных частиц больше массы покоя исходных. Иначе говоря, энергия сталкивающихся частиц превращается здесь в массу (согласно формуле Эйнштейна $E = mc^2$). Эти схемы демонстрируют, в частности, бесплодность попыток расщепить элементарные частицы (в данном случае нуклоны), обстреливая их другими частицами (в данном случае фотонами): в действительности происходит не расщепление обстреливаемых частиц, а рождение новых, причем в определенной мере за счет энергии сталкивающихся частиц.

Исследование взаимопревращений элементарных частиц позволяет выяснить определенные закономерности. Эти закономерности выражают в виде законов сохранения неких величин, играющих роль определенных характеристик частиц. В качестве простого примера укажем электрический заряд частицы. При любом взаимопревращении частиц алгебраические суммы электрических зарядов исходных и конечных частиц равны. Закон сохранения электрического заряда отражает определенную закономерность взаимопревращений частиц: он позволяет заведомо исключить из рассмотрения те схемы, где суммарный электрический заряд частиц не сохраняется.

В качестве более сложного примера укажем так называемый барионный заряд частицы. Было замечено, что число нуклонов при превращениях частиц сохраняется. С открытием антинуклонов обнаружили, что рождение дополнительных нуклонов возможно, но обязательно в паре с антинуклонами.

Тогда была введена характеристика частицы – барионный заряд, равный нулю для фотонов, лептонов и мезонов, единице – для нуклонов, минус единице – для антинуклонов. Это позволило рассматривать замеченные закономерности как закон сохранения суммарного барионного заряда частиц. Закон подтвердился также последующими наблюдениями; при этом обнаруженным впоследствии гиперонам пришлось приписать барионный заряд, равный единице (как и нуклонам), а антигиперонам – минус единице (как и антинуклонам).

■ **Идея квантования (дискретности).** Сущность идеи квантования состоит в том, что некоторые физические величины, относящиеся к микрообъекту, могут в соответствующих условиях принимать только какие-то вполне определенные, дискретные значения. Об этих величинах говорят, что они квантуются.

Так, квантуется энергия любого микрообъекта, находящегося в связанном состоянии, например энергия электрона в атоме. Энергия же свободно движущегося микрообъекта не квантуется. Предположим, что рассматривается энергия электрона в атоме. Дискретному набору значений энергии электрона соответствует система так называемых энергетических уровней.

Квантомеханическая идея дискретности имеет довольно длинную предысторию. Еще в конце XIX в. было установлено, что спектры излучения свободных атомов являются *линейчатыми* (состоят из набора линий), содержат определенные для каждого элемента линии, которые образуют упорядоченные группы (*серии*). В 1885 г. было обнаружено, что атомарный водород дает излучение с частотами ν_n (речь идет о циклических частотах, связанных с обычными частотами соотношением $\nu = 2\pi\nu_n$), которые можно описать формулой $\nu_n = 2\pi cR(1/4 - 1/n^2)$, где n – целые числа 3, 4, 5, ...; c – скорость света, R – постоянная Ридберга ($R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$). Вышеприведенная формула установлена Бальмером; поэтому принято называть совокупность частот, описываемую этой формулой, серией Бальмера. Частоты серии Бальмера попадают в область видимого спектра. Позднее (в начале XX в.) были открыты дополнительные серии частот излучения атомарного водорода, попадающие в ультрафиолетовую и инфракрасную части спектра. Закономерности в структуре этих серий оказались тождественными с закономерностями в структуре серии Бальмера, что позволило обобщить формулу, записав ее в виде $\nu_n = 2\pi cR(1/k^2 - 1/n^2)$.

Число k фиксирует серию, причем в каждой серии $n > k$; $k = 2$ дает серию Бальмера, $k = 1$ – серию Лаймана (ультрафиолетовые частоты); $k = 3$ – серию Пашена (инфракрасные частоты) и т.д.

Закономерность в структуре серий была обнаружена не только в спектре атомарного водорода, но также и в спектрах других атомов. Она определенно указывала на возможность каких-то обобщений. В качестве такого обобщения Ритц выдвинул в 1908 г. свой *комбинационный принцип*: «Если даны формулы серий и известны входящие в них постоянные, то путем комбинации в виде сумм и разностей можно но

вую открытую линию в спектре вывести из ранее известных». В применении к водороду этот принцип следует понимать так. Составим для разных чисел n так называемые спектральные термы: $T(n) = 2\pi cR/n^2$. Тогда каждая наблюдаемая в спектре водорода частота может быть выражена в виде комбинации каких-то двух спектральных термов. Комбинируя спектральные термы, можно предсказывать различные частоты.

Примечательно, что в это же время идея дискретности прокладывала себе путь еще в одном направлении (не имеющим отношения к спектроскопии атомов). Речь идет об облучении внутри замкнутого объема, или, иными словами, об излучении абсолютно черного тела. Анализируя экспериментальные данные, Планк в 1900 г. выдвинул знаменательную гипотезу. Он предположил, что энергия электромагнитного излучения испускается стенками полости не непрерывно, а порциями (квантами), причем энергия одного кванта равна $E = h\nu$, где ν – частота излучения, а h – некоторая универсальная постоянная (так в физике появилась постоянная Планка). Как известно, гипотеза Планка обеспечила согласие теории с экспериментом и, в частности, устранила неприятности, возникшие в прежней теории при переходе к большим частотам и известные под названием «ультрафиолетовой катастрофы».

■ **Идея квантования и модель атома водорода по Бору.** В 1913 г. Бор предложил теорию атома водорода. Эта теория возникла как результат «слияния» планетарной модели атома Резерфорда, комбинационного принципа Ритца и идеи квантования энергии Планка.

Согласно теории Бора, существуют состояния, находясь в которых атом не излучает (стационарные состояния); энергия этих состояний образует дискретный спектр: E_1, E_2, \dots, E_n . Атом излучает (поглощает), переходя из одного стационарного состояния в другое; излучаемая (поглощаемая) энергия есть разность энергий соответствующих стационарных состояний. Так, при переходе из состояния с энергией E_n в состояние с меньшей энергией E_k испускается квант излучения с энергией $(E_n - E_k)$, при этом в спектре атома появляется линия с частотой $\nu = (E_n - E_k)/h$. Это формула отражает знаменитое правило частот Бора.

В теории Бора n -му стационарному состоянию атома водорода соответствует круговая орбита радиуса r_n , по которой электрон движется вокруг ядра. Для вычисления r_n Бор предложил воспользоваться, во-первых, вторым законом Ньютона для заряда, движущегося по окружности под действием кулоновской силы: $m\nu_n^2/r_n = e^2/rn^2$ (здесь m и e – масса и заряд электрона, ν_n – скорость электрона на n -й орбите), и, во-вторых, условием квантования момента импульса электрона $m\nu_n r_n = nh$.

Используя эти соотношения, легко найти r_n и ν_n : $r_n = h^2 n^2 / me^2$, $\nu_n = e^2 / hn$.

Энергия E_n стационарного состояния состоит из кинетического (T_n) и потенциального (U_n) слагаемых: $E_n = T_n + U_n$. Полагая, что $T_n = m\nu_n^2/2$, $U_n = -e^2/rn$ и используя последние формулы, находим $E_n = -me^4/2h^2 n^2$.

Отрицательность энергии означает, что электрон находится в связанном состоянии (за нуль принимается энергия свободного электрона).

Теория Бора (или, как теперь принято говорить, «старая квантовая теория») страдала внутренними противоречиями; так, для определения радиуса орбиты приходилось пользоваться соотношениями совершенно разной природы – «классической» и «квантовой». Тем не менее эта теория имела большое значение как первый шаг в создании последовательной квантовой теории. При этом впервые удалось объяснить природу спектральных термов (а следовательно, и комбинационного принципа Ритца) и получить расчетное значение постоянной Ридберга, которая соответствовала своему эмпирическому значению. Успехи теории говорили о плодотворности идеи квантования. Познакомившись с расчетами Бора, Зоммерфельд написал ему письмо, где в частности писал: *«Благодарю Вас за Вашу чрезвычайно интересную работу. Меня давно занимает проблема выражения постоянной Ридберга при помощи величины Планка. Хотя в данный момент я еще скептически отношусь к моделям атомов в целом, тем не менее, вычисление этой постоянной, бесспорно, является настоящим подвигом»*.

■ **О квантовании момента импульса.** Заметим, что в отличие от энергии момент импульса микрообъекта квантуется всегда. Так, наблюдаемые значения квадрата момента импульса микрообъекта выражаются формулой $M^2 = \hbar^2 l(l + 1)$, где l – целые числа. Если речь о моменте импульса электрона в атоме в n -м стационарном состоянии, то число l принимает значения от нуля до $n - 1$.

В литературе принято называть момент импульса микрообъекта для краткости просто моментом. Проекция момента микрообъекта на некоторое направление (обозначим его как z -направление) принимает значения $M_z = \hbar m$, где $m = -l, -l + 1, \dots, l - 1, l$. При данном значении числа l число m принимает значение $2l + 1$ дискретных значений. Подчеркнем, что различные проекции момента микрообъекта на одно и то же направление всегда отличаются друг от друга на величины, кратные постоянной Планка.

Выше уже отмечалось, что спин есть своеобразный, «внутренний» момент микрообъекта, имеющий для данного микрообъекта определенную величину. В отличие от спинового момента, обычный момент принято называть орбитальным. Кинематически спиновой момент аналогичен орбитальному; естественно, что для нахождения возможных проекций спинового момента надо пользоваться формулой типа $M_z = \hbar m$ (как и в случае орбитального момента, проекции спинового момента отличаются друг от друга на величины, кратные постоянной Планка). Если s – спин микрообъекта, то проекция спинового момента принимает значение $\hbar s$, где $s = -s, -s + 1, \dots, s - 1, s$. Так, проекция спина электрона принимает значения $-\hbar/2$ и $\hbar/2$.

Рассматриваемые здесь числа n, l, m, s , фиксирующие различные дискретные значения квантующихся динамических переменных (в данном случае энергии и момента), принято называть *квантовыми числами*. Конкретно: n – так называемое главное квантовое число, l – орби-

тальное квантовое число, m — магнитное квантовое число, s — спиновое квантовое число. Существуют и другие квантовые числа.

■ **Противоречия квантовых переходов.** Несмотря на большой успех теории Бора, идея квантования порождала первоначально серьезные сомнения; было подмечено, что эта идея внутренне противоречива. Так, в письме к Бору Резерфорд писал (в 1913 г.): *«Ваши мысли относительно причин возникновения спектра водорода очень остроумны и представляются хорошо продуманными. Однако сочетание идей Планка со старой механикой создает значительные трудности для понимания того, что же все-таки является основой такого рассмотрения. Я обнаружил серьезное затруднение в связи с Вашей гипотезой, в котором Вы, без сомнения, полностью отдаете себе отчет. Оно состоит в следующем: как может электрон знать, с какой частотой он должен колебаться, переходя из одного стационарного состояния в другое? Мне кажется, что Вы вынуждены предположить, что электрон знает заблаговременно, где он собирается остановиться».*

Поясним отмеченную Резерфордом трудность. Пусть электрон находится на уровне E_1 ; чтобы перейти на уровень E_2 , электрон должен поглотить квант излучения (т.е. фотон) с определенной энергией, равной $E_2 - E_1$. Поглощение фотона с любой другой энергией не может приводить к указанному переходу и по этой причине оказывается невозможным (для простоты рассматриваем только два уровня). Возникает вопрос: каким же образом электрон производит «выбор» нужного фотона из падающего потока фотона разной энергии? Ведь, чтобы выбрать нужный фотон, электрон должен уже знать о втором уровне, т.е. должен как бы уже побывать на нем. Однако, чтобы побывать на втором уровне, электрон должен сначала поглотить нужный фотон. Возникает замкнутый круг.

Дополнительные противоречия обнаруживаются при рассмотрении скачка электрона с одной орбиты в атоме на другую. Сколь бы ни был быстр переход электрона с орбиты одного радиуса на орбиту другого радиуса, в любом случае он должен происходить в течении конечного промежутка времени. Но тогда непонятно, чему должна равняться энергия электрона в течении этого промежутка времени — ведь электрон уже не находится на орбите, которая отвечает энергии E_1 , и в то же время еще не прибыл на орбиту, которая отвечает энергии E_2 .

Неудивительно, что в свое время предпринимались попытки получить объяснение экспериментальных результатов без привлечения идеи квантования. В этом смысле показательно известное замечание Шредингера, вырвавшееся у него, что называется, под горячую руку: *«Если мы собираемся сохранить эти проклятые квантовые скачки, то я жалею, что вообще имел дело с квантовой теорией!»*. Однако опыт свидетельствовал в пользу квантования, ни для какой альтернативы не оставалось места.

В подобной ситуации есть один выход: надо ввести какие-то новые идеи, которые вместе с идеей дискретности образовывали бы непротиво-

речивую схему. Такой новой физической идеей и явилась идея корпускулярно-волнового дуализма.

■ **Идея корпускулярно-волнового дуализма.** Классическая физика знакомит с двумя видами движения – *корпускулярным* и *волновым*. Для первого характерны локализация объекта в пространстве и существование определенной траектории его движения. Для второго характерно, напротив, делокализация в пространстве; с волновым движением не сопоставляет никакого локализованного объекта – это есть движение некоей среды. На уровне макроявлений корпускулярное и волновое движение четко разграничены; одно дело – движение брошенного камня, другое – движение волны, набегающей на прибрежный песок.

Эти привычные представления не могут быть перенесены в квантовую механику. На уровне микроявлений указанное выше четкое разграничение между двумя видами движения в существенной мере стирается – движение микрообъекта характеризуется одновременно и волновыми и корпускулярными свойствами. Если схематически рассматривать классические корпускулы и классические волны как два предельных случая описания движения материи, то микрообъекты должны занять в этой схеме место где-то посередине. Они не являются ни «чистыми» (в классическом понимании) корпускулами, ни «чистыми» волнами – они являются чем-то качественно иным. Можно сказать, что микрообъект в какой-то мере похож на корпускулу, в какой-то мере – на волну, причем эта мера зависит, в частности, от условий, в которых рассматривается микрообъект. Если в классической физике корпускула и волна – две взаимоисключающие друг друга противоположности (либо частица, либо волна), то теперь, на уровне микроявлений, эти противоположности объединяются в рамках единого микрообъекта. Это обстоятельство и принято называть *корпускулярно-волновым дуализмом* («дуализм» означает двойственность).

Первоначально идея дуализма была применена к электромагнитному излучению. Еще в 1917 г. Эйнштейн предложил рассматривать введенные Планком кванты излучения как своеобразные частицы, обладающие не только определенной энергией, но и определенным импульсом: $E = h\nu$, $p = h\nu/c$.

Позднее (с 1923 г.) эти частицы стали называть *фотонами*.

Весьма ярко корпускулярные свойства излучения проявились в эффекте Комптона (1923 г.). Пусть пучок рентгеновских лучей рассеивается на атомах вещества. По классическим представлениям рассеянные лучи должны иметь ту же длину волны, что и падающие. Однако опыт показал, что длина волны рассеянных лучей больше начальной длины волны, причем разница в длинах волн зависит от угла рассеяния. Эффект Комптона получил объяснение в предположении, что пучок рентгеновских лучей ведет себя как поток фотонов, которые испытывают упругие столкновения с электронами атомов, с выполнением закона сохранения энергии и импульса для сталкивающихся частиц. При этом

достигалось не только качественное, но и количественное согласие с экспериментом.

В 1924 г. де Бройль предложил распространить идею не только на излучение, но и вообще на все микрообъекты. Конкретно, он предложил с каждым микрообъектом связывать, с одной стороны, корпускулярные характеристики (энергию E и импульс p), а с другой стороны, волновые характеристики (частоту ν и длину волны λ). Взаимосвязь между характеристиками разного типа осуществляются, по де Бройлю, через постоянную Планка h следующим образом: $E = h\nu$, $p = \frac{2\pi h}{\lambda}$. Для фотонов эти соотношения выполняются автоматически, если в формуле $p = \frac{h\nu}{c}$ подставить $\nu = \frac{2\pi c}{\lambda}$. Смелость гипотезы де Бройля состояла в том, что приведенные соотношения предполагались выполняющимися для всех микрообъектов, в частности для таких, у которых есть масса покоя и которые до этого ассоциировались с корпускулами.

Гипотеза де Бройля получила в 1927 г. подтверждение: была обнаружена дифракция электронов. Исследуя прохождение электронов сквозь тонкие пластинки, Дэвисон и Джермер (а также Тартаковский) обнаружили на экране-детекторе характерные дифракционные кольца. Для «электронных» волн кристаллическая решетка мишени сыграла роль дифракционной решетки. Измерение расстояний между дифракционными кольцами для электронов заданной энергии подтвердили формулу де Бройля.

В 1949 г. фабрикант с сотрудниками поставили интересный опыт. Они пропускали через дифракционное устройство крайне слабый электрический пучок – промежуток времени между последовательными актами пропускания (между двумя электронами) более чем в 10000 раз превышал время, необходимое для прохождения электрона через устройство. Это давало уверенность, что на поведение электрона не влияют другие электроны пучка. Опыт показал, что при длительной экспозиции, позволяющей зарегистрировать на экране-детекторе достаточно большое число электронов, возникала такая же дифракционная картина, как и в случае обычных электронных пучков. Отсюда следовало, что волновые свойства электронов нельзя объяснить как некий эффект коллектива электронов; волновыми свойствами обладает каждый отдельно взятый электрон.

■ **Роль постоянной Планка.** Идея квантования вводит дискретность, а дискретность требует определения меры. Роль такой меры играет постоянная Планка. Можно сказать, что эта постоянная как бы определяет «границу» между микроявлениями и макроявлениями. Используя постоянную Планка, а также массу и заряд электрона, можно образовать следующую простейшую композицию, обладающую размерностью длины: $r_1 = \frac{h^2}{me^2} = 0,53 \cdot 10^{-8}$ см (заметим, что r_1 есть радиус первой орбиты в теории Бора). В соответствии с этим величина порядка 10^{-8} см может рассматриваться как пространственная граница микроявлений. Именно таковы линейные размеры атомов.

Если бы при прочих равных условиях постоянная h была бы, например, в 100 раз больше, то граница микроявлений оказалась бы порядка 10^{-4} см. Это означало бы, что микроявления были бы гораздо ближе к нам, к нашим масштабам, атомы стали заметно крупнее. Иными словами, материя оказалась бы более крупнозернистой и следовало бы при более крупных масштабах пересматривать классические представления.

Как указывалось ранее, проекции момента микрообъекта отличаются друг от друга на величины, кратные h . Следовательно, здесь постоянная Планка является попросту шагом квантования. Если орбитальный момент намного больше h , то квантованием можно пренебречь; в этом случае переходим к классическому моменту импульса. В отличие от орбитального спиновой момент не может быть достаточно большим. Ясно, что здесь квантованием пренебречь принципиально невозможно; именно поэтому спиновой момент и не имеет классического аналога.

Постоянная Планка органически связана не только с идеей квантования, но также и с идеей дуализма. Итак, постоянная Планка играет в квантовой механике две основные роли – служит мерой дискретности и связывает воедино корпускулярный и волновой аспекты движения материи. Тот факт, что обе роли играет одна и та же постоянная, косвенно указывает на внутреннее единство двух основополагающих идей квантовой механики. Наличие в том или ином выражении постоянной Планка является характерным признаком квантомеханической природы этого выражения.

■ **Смысл соотношений неопределенностей.** Иногда соотношение неопределенностей трактуют так: нельзя измерить координату и импульс микрообъекта с произвольно высокой точностью одновременно; чем точнее измерена координата, тем менее точно должен быть измерен импульс. Такая трактовка не очень удачна, так как из нее можно вывести ложное заключение, что смысл соотношения сводится к ограничениям, которые оно накладывает на процесс измерения. В этом случае можно предположить, что микрообъект сам по себе имеет и какой-то импульс и какую-то координату, но соотношение неопределенностей не позволяет нам измерить их одновременно.

В действительности же здесь ситуация иная – просто сам микрообъект не может иметь одновременно и определенную координату, и определенную соответствующую проекцию импульса; если, например, он находится в состоянии с определенным значением координаты, то в этом состоянии соответствующая проекция его импульса оказывается менее определенной. Естественно, что отсюда вытекает естественная невозможность совместного измерения координат и импульсов микрообъектов. Это есть следствие специфики микрообъектов, а отнюдь не какой-либо каприз природы, в силу которого будто бы не все существующее познаваемо. Следовательно, смысл соотношений не в том, что оно создает какие-то препятствия на пути познания микроявлений, а в том, что оно отражает некоторые особенности объективных свойств микрообъектов.

Соотношения неопределенностей показывают, каким образом следует пользоваться понятиями энергии, импульса и момента импульса при переходе к микрообъектам. Здесь обнаруживается весьма важная особенность физики микрообъектов: энергия, импульс и момент микрообъекта имеют смысл, но с ограничениями, налагаемыми соотношениями неопределенностей. Как писал Гейзенберг, *«мы не можем интерпретировать процессы в атомарной области так же, как процессы большого масштаба. Если же мы пользуемся обычными понятиями, то их применимость ограничивается так называемыми соотношениями неопределенностей»*.

Следует, однако, подчеркнуть, что соотношения неопределенностей отнюдь не сводятся к указанному ограничению применимости классических понятий координаты, импульса, энергии и т.д. было бы неправильно не замечать за «негативным» содержанием соотношений неопределенностей значительного «позитивного» содержания этих соотношений. Они являются рабочим инструментом квантовой теории. Отражая специфику физики микрообъектов, соотношения неопределенностей позволяют весьма простым путем получать важные оценки.

От явления дифракции микрообъектов к соотношениям неопределенностей. Рассмотренный путь получения соотношений неопределенностей может показаться слишком формальным и малоубедительным. Существует разные способы вывода соотношений неопределенностей. Один из таких способов основан на рассмотрении явления дифракции микрообъектов.

■ **Соотношения неопределенностей и состояния микрообъектов; понятие о полном наборе физических величин.** Для задания состояния классического объекта надо, как известно, задать определенную совокупность чисел – координаты и составляющие скорости. При этом, в частности, будут определены и другие величины: энергия, импульс, момент импульса объекта и др. Соотношения неопределенностей показывают, что для микрообъектов такой способ задания состояния неприемлем. Так, например, наличие у микрообъекта определенной проекции импульса на данное направление означает, что положение микрообъекта на указанном направлении не может быть предсказано однозначно – соответствующая пространственная координата характеризуется бесконечно большой неопределенностью. Электрон в атоме имеет определенную энергию; при этом его координаты характеризуются неопределенностью порядка линейных размеров атома, что, согласно той же формуле, приводит к неопределенности проекций импульса электрона, равной отношению постоянной Планка к линейному размеру атома.

Можно указать следующие принципиальные для квантовой механики положения, вытекающие из соотношений неопределенностей:

а) различные динамические переменные микрообъекта объединяются в наборы одновременно определенных (одновременно измеримых) величин, так называемые полные наборы величин;

б) различные состояния микрообъекта объединяются в группы состояний, отвечающим разным полным наборам величин; каждая такая группа определяет состояния микрообъекта, в которых объединены величины соответствующего полного набора (принято говорить, что каждому полному набору соответствует свой способ задания состояний).

■ **Микрообъект не является классической корпускулой.** К микрообъектам приводит процесс «раздробления» окружающих нас тел на все более и более мелкие «частички». Поэтому вполне естественно, что микрообъекты ассоциируются прежде всего с корпускулами. Этому способствует и тот факт, что большинству микрообъектов характерна определенная масса покоя и определенные заряды. Бессмысленно говорить, например, о половине электрона, обладающей половинной массой и половинным электрическим зарядом целого электрона. В самих терминах *микрочастица, элементарная частица* отражено представление о микрообъекте как о некоей частице (корпускуле).

Однако как это следует из предыдущего рассмотрения, микрообъект весьма существенно отличается от классической корпускулы. Прежде всего, он не имеет траектории, являющейся неизменным атрибутом классической корпускулы. Использование при рассмотрении микрообъекта таких корпускулярных характеристик, как координата, импульс, момент, энергия, ограничивается рамками соотношений неопределенностей. Взаимопревращения микрообъектов, самопроизвольные распады, наличие специфического неуничтожаемого собственного момента (спина), способность проходить сквозь потенциальные барьеры – все это свидетельствует о том, что микрообъекты совершенно не похожи на классические корпускулы.

Корпускулярным представлениям противостоят волновые представления. Это неудивительно поэтому, что разительное отличие микрообъектов от классических корпускул объясняют наличием у них волновых свойств, тем более что именно микрообъекты с волновыми свойствами связаны соотношения неопределенностей и все вытекающие отсюда следствия. Весьма показательно в этом отношении следующее замечание де Бройля: *«В оптике в течение столетия слишком пренебрегали корпускулярным способом рассмотрения по сравнению с волновым. Не делалась ли в теории материи обратная ошибка? Не думали ли мы слишком много о картине частиц и не пренебрегали ли чрезмерно картиной волн?»*. Вопрос, поднятый де Бройлем, совершенно уместен. Однако следует опасаться чрезмерного увеличения волнового аспекта при рассмотрении микрообъектов. Необходимо помнить, что, если, с одной стороны, микрообъект не является классической корпускулой, то точно так же, с другой стороны, он не является и классической волной.

■ **Попытки представить микрообъект как симбиоз корпускулы и волны.** Если микрообъект не является ни корпускулой, ни волной, то, может быть, он представляет собой некий симбиоз корпускулы и волны? Предпринимались различные попытки модельно изобразить такой симбиоз и тем самым наглядно смоделировать корпускулярно-волновой дуа-

лизм. Одна из таких попыток связана с представлением микрообъекта как волнового образования, ограниченного в пространстве и во времени. Это может быть волновой пакет, о котором мы уже говорили. Это может быть и просто «обрывок» волны, называемый обычно волновым цугом. Другая попытка связана с использованием модели волны-пилота, согласно которой микрообъект есть некое «соединение» корпускулярной «сердцевины» с некоторой волной, управляющей движением «сердцевины».

Один из вариантов модели волны-пилота рассмотрен в книге Д. Бома: «Сначала постулируем, что с частицей (например, электроном) связано «тело», занимающее малую область пространства; в большинстве применений на ядерном уровне его можно рассматривать как материальную точку. В качестве следующего шага предположим, что с «телом» связана волна, без которой тело не обнаруживается. Эта волна представляет собой колебания некоего нового поля (γ -поля), до некоторой степени похожего на гравитационное и электромагнитное, но имеющее свои собственные характерные черты. Далее предполагаем, что γ -поле и «тело» взаимодействуют. Это взаимодействие должно будет приводить к тому, что «тело» будет стремиться находиться в области, где интенсивность γ -поля имеет наибольшее значение. Осуществлению этой тенденции движения электрона мешают неупорядоченные движения, испытываемые телом, которые могли бы возникнуть, например, вследствие флуктуаций самого γ -поля. Флуктуации вызывают тенденцию блуждания «тела» по всему доступному ему пространству. Но осуществлению этой тенденции мешает наличие «квантовой силы», которая устремляет «тело» в области, где интенсивность γ -поля наиболее высока. В итоге получим какое-то распределение «тел», преобладающее в областях с наибольшей интенсивностью γ -поля».

Не исключено, что подобные модели могут показаться с первого взгляда привлекательными — хотя бы в силу своей наглядности. Однако необходимо сразу же подчеркнуть — все эти модели не состоятельны. Мы не будем выявлять, в чем именно заключается несостоятельность рассмотренной модели волны-пилота; отметим лишь громоздкость этой модели, использующей такие искусственные понятия, как « γ -поле», которое «до некоторой степени похоже на гравитационное и электромагнитное», или «квантовая сила», отражающая взаимодействие некоего «тела» с γ -полем. Однако несостоятельность подобных моделей объясняется не частными, а глубокими, принципиальными причинами. Следует заранее признать безуспешной всякую попытку буквального толкования корпускулярно-волнового дуализма, всякую попытку каким-то образом смоделировать симбиоз корпускулы и волны. Микрообъект не является симбиозом корпускулы и волны.

■ **Как следует понимать корпускулярно-волновой дуализм?** В настоящее время корпускулярно-волновой дуализм понимают как потенциальную способность микрообъекта проявлять различные свои свойства в зависимости от тех или иных внешних условий, в частности, условий

наблюдения. Как писал Фок, *«у атомных объектов в одних условиях выступают на передний план волновые свойства, а в других – корпускулярные; возможны и такие условия, когда и те, и другие свойства выступают одновременно. Можно показать, что для атомного объекта существует потенциальная возможность проявлять себя, в зависимости от внешних условий, либо как частица, либо как волна, либо промежуточным образом. Именно в этой потенциальной возможности различных проявлений свойств, присущих микрообъекту, и состоит дуализм волна-частица. Всякое иное, более буквальное понимание этого дуализма в виде какой-либо модели неправильно»*.

Приведем простейший пример. Пусть пучок электронов проходит сквозь экран с щелями и затем попадает на экран-детектор. При прохождении через щели электроны реализуют свои волновые свойства, что обуславливает характерное для интерференции распределение электронов за щелями. При попадании же на экран-детектор электроны реализуют свои корпускулярные свойства – каждый из них регистрируется в некоторой точке экрана. Можно сказать, что электрон проходит сквозь щель как волна, а регистрируется на экране как частица.

В связи с этим говорят при одних обстоятельствах, что «микрообъект есть волна», а при других – «микрообъект есть частица». Такая трактовка корпускулярно-волнового дуализма неправильна. Независимо ни от каких обстоятельств микрообъект не является ни волной, ни частицей, ни даже симбиозом волны и частицы. Это есть некий весьма специфический объект, способный в зависимости от обстоятельств проявлять в той или иной мере корпускулярные и волновые свойства. Понимание корпускулярно-волнового дуализма как потенциальной способности микрообъекта проявлять в различных внешних условиях различные свойства есть единственно правильное понимание. Отсюда, в частности, следует вывод: наглядная модель микрообъекта принципиально невозможна.

■ **Микрообъект и окружающий его мир.** Как уже отмечалось, одно из наиболее специфических свойств микрообъекта есть наличие в его поведении элементов случайности, вследствие чего квантовая механика оказывается принципиально статистической теорией, оперирующей с вероятностями. Однако в чем же заключается причина наличия элементов случайности в поведении микрообъекта?

Ответ на поставленный вопрос таков: случайность в микроявлениях объясняется, образно говоря, тем, что микрообъект взаимодействует со всем окружающим его миром. Специфика квантовой механики такова, что ни один объект в ней не может, строго говоря, считаться полностью изолированным, полностью независимым от окружения. Как отмечал Мякишев, *«причина статистического характера квантовой механики та же, что и в классической статистической механике, – наличие большого числа связей, влияющих на движение объекта. Частица, рассматриваемая в квантовой механике как свободная, в действительности свободна только от воздействий динамического характера. Но она*

находится под действием случайных сил, вызывающих квантовые флуктуации ее поведения, отражаемые соотношением неопределенностей». Какова природа случайных воздействий на микрообъект? В квантовой теории поля она проявляется в явном виде – как взаимодействие микрообъекта с вакуумом (вакуум не есть пустота, он «заполнен» виртуальными зарядами). Можно сказать, что микрообъект взаимодействует с окружающим его миром через виртуальные микрообъекты.

В этом свете представляется совершенно естественной отмечавшаяся выше интерпретация корпускулярно-волнового дуализма как потенциальной способности микрообъекта проявлять те или иные свои свойства в зависимости от внешних условий, т.е. в зависимости от окружающей микрообъект обстановки. Это подразумевает органическую связь микрообъекта с окружающим его миром – ведь сама сущность микрообъекта реализуется в том или ином виде в зависимости от конкретных условий, конкретной обстановки.

Обнаруживаемая квантовой механикой невозможность безграничной детализации объектов и явлений, в конечном счете, так же должна быть объяснена взаимодействием микрообъекта с окружающим миром. Это означает, что на определенной стадии исследования физические объекты уже нельзя рассматривать изолированно. Как уже говорилось ранее, «во время взаимодействия электрона с фотонами нет, строго говоря, ни электрона, ни фотонов, а есть нечто целое, которое и следует рассматривать как единое целое – без уточнения деталей».

Квантовая механика восстанавливает диктуемую жизненным опытом идею единства мира и всеобщей связи явлений, которая была в значительной мере ущерблена в классической физике. Стираются существовавшие ранее резкие различия между волнами и корпускулами, между частицами и полями, между объектами наблюдения и средой; на первый план выдвигаются взаимопревращения материи. Следует согласиться со следующим весьма точным замечанием Боба: *«По-видимому, необходимо отказаться от представления, что Вселенную можно фактически разбить на отдельные части, и заменить это представлением о всем мире как едином целом. Повсюду, где квантовые явления играют существенную роль, мы найдем, что отдельные «части» Вселенной могут существенно изменяться с течением времени вследствие неизбежных и неразделимых связей, существующих между ними. Таким образом, мы приходим к картине Вселенной как неделимого, но гибкого и постоянно изменяющегося целого».*

§ 12. ХАРАКТЕРИСТИКА РАДИАЦИИ

■ Радиация существовала всегда. Радиоактивные элементы входили в состав Земли с начала ее существования и продолжают присутствовать до настоящего времени. Однако само явление радиоактивности было открыто всего 110 лет назад.

В 1896 году французский ученый *Анри Беккерель* случайно обнаружил, что после продолжительного соприкосновения с куском минерала, содержащего уран, на фотографических пластинках после проявки появились следы излучения. Позже этим явлением заинтересовались *Мария Кюри* (автор термина «*радиоактивность*») и ее муж *Пьер Кюри*. В 1898 году они обнаружили, что в результате излучения уран превращается в другие элементы, которые молодые ученые назвали полонием и радием. К сожалению люди, профессионально занимающиеся радиацией, подвергали свое здоровье, и даже жизнь опасности из-за частого контакта с радиоактивными веществами. Несмотря на это исследования продолжались, и в результате человечество располагает весьма достоверными сведениями о процессе протекания реакций в радиоактивных массах, в значительной мере обусловленных особенностями строения и свойствами атома.

■ Известно, что в состав атома входят *три типа элементов*: отрицательно заряженные электроны движутся по орбитам вокруг ядра – плотно сцепленных положительно заряженных протонов и электрически нейтральных нейтронов. Химические элементы различают по количеству протонов. Одинаковое количество протонов и электронов обуславливает электрическую нейтральность атома. Количество нейтронов может варьироваться, и в зависимости от этого меняется стабильность изотопов.

Большинство нуклидов (ядра всех изотопов химических элементов) нестабильны и постоянно превращаются в другие нуклиды. Цепочка превращений сопровождается излучениями: в упрощенном виде, испускание ядром двух протонов и двух нейтронов – α -частицы называют альфа – излучением, испускание электрона – β -излучением, причем оба этих процесса происходят с выделением энергии. Иногда дополнительно происходит выброс чистой энергии, называемый γ -излучением.

■ **Основные термины и единицы измерения (терминология НКДАР).**

Коллективная эффективная эквивалентная доза – эффективная эквивалентная доза, полученная группой людей от какого-либо источника радиации.

Период полураспада изотопа – время, за которое распадается в среднем половина всех радионуклидов данного типа в любом радиоактивном источнике.

Поглощенная доза – энергия ионизирующего излучения, поглощенная облучаемым телом (тканями организма), в пересчете на единицу массы.

Полная коллективная эффективная эквивалентная доза – коллективная эффективная эквивалентная доза, которую получают поколения людей от какого-либо источника за все время его дальнейшего существования.

Радиационная активность образца – число распадов в секунду в данном радиоактивном образце; единица измерения – *беккерель* (Бк).

Радиоактивный распад – весь процесс самопроизвольного распада нестабильного нуклида.

Радионуклид – нестабильный нуклид, способный к самопроизвольному распаду.

Эквивалентная доза – поглощенная доза, умноженная на коэффициент, отражающий способность данного вида излучения повреждать ткани организма.

Эффективная эквивалентная доза – эквивалентная доза, умноженная на коэффициент, учитывающий разную чувствительность различных тканей к облучению.

■ **Радиология – наука о радиации.** У многих людей зачастую складывается неправильное представление по некоторым вопросам, связанным с радиацией, считая, что этот фактор всегда опасен и даже смертелен. Но это мнение ошибочно.

Радиация (или ионизирующее излучение) – это излучение энергии в виде частиц или волн. Ионизирующие излучения существовали на Земле задолго до зарождения на ней жизни и присутствовали в космосе до возникновения самой Земли. Радиоактивные материалы вошли в состав Земли с самого ее рождения. Воздействие на человека источников радиации поможет оценить следующая диаграмма.

Человек постоянно находится под воздействием радиации, но не чувствует ее влияния. Опасность для человека представляет большое количество (*доза*) и характер излучения.

Радиационная безопасность населения – состояние защищенности настоящего и будущего поколений людей от вредного для их здоровья воздействия ионизирующего излучения.

§ 13. АТОМНАЯ ОТРАСЛЬ И РАДИАЦИОННЫЙ ФОН

■ Самое опасное последствие деятельности атомной отрасли – воздействие радиации на организм человека. Даже безаварийно работающие *атомные электростанции* (АЭС) и предприятия *ядерно-топливного цикла* (ЯТЦ) опасны для здоровья населения, так как радиационное загрязнение окружающей среды происходит не только во время аварий.

Помимо самих АЭС радиационное загрязнение сопровождает все звенья атомного топливного цикла: добычу и переработку урана, производство топлива для АЭС, работу АЭС, а также хранение и переработку отработавшего ядерного топлива (ОЯТ).

Так, один из самых обычных в выбросах АЭС радионуклид «цезий-137», попадая в организм человека, вызывает саркому (одна из разновидностей раковых заболеваний). Другой радионуклид – «стронций-90» – может замещать кальций в твердых тканях и грудном молоке, что ведет к развитию рака крови (лейкемии), раку кости и раку груди. А малые дозы облучения «криптоном-85» повышают вероятность заболевания раком кожи.

Основные источники радиации



■ Наибольшему воздействию радиации подвергаются работники самих ядерных объектов, а также люди, проживающие в прилегающих к ним зонах, в так называемых «*закрытых административно-территориальных образованиях*» (ЗАТО). Даже при строгом соблюдении всех норм радиационной безопасности жителям таких городов свойственно раннее старение, ослабленные зрение и иммунная система, чрезмерная психологическая возбудимость. А распространенность врожденных аномалий среди детей в возрасте до 14 лет, проживающих в ЗАТО, вдвое превышает показатель по всей России.

По статистическим данным, заболеваемость нервной системы и органов чувств у работников атомной отрасли почти в 2 раза выше, чем у населения, проживающего рядом с АЭС. Распространенность гипертонической болезни среди персонала атомных предприятий в 3 раза выше, чем в среднем по стране, частота заболеваний костно-мышечной системы – вдвое выше, крови (по данным 2003 г.) – втрое.

В реальности же от радиационного заражения страдают, сами того не зная, гораздо большее число людей. Даже самые малые дозы облучения вызывают необратимые генетические изменения, которые затем передаются из поколения в поколение. По оценкам американского радиобиолога Р. Бертелл, от атомной индустрии к началу XXI века генетически пострадало не менее 223 млн. человек. Радиация тем и страшна, что

ставит под угрозу жизнь и здоровье сотен миллионов людей грядущих поколений, вызывая такие заболевания, как синдром Дауна, эпилепсию, дефекты умственного и физического развития...

Так называемое «*вторичное загрязнение*» – еще один путь распространения «ядерной заразы». Уже давно стали обычным явлением скандалы, связанные с изъятием зараженной сельскохозяйственной продукции, грибов и ягод на российских рынках.

К сожалению, за все время существования ядерной отрасли, исследований влияния мирного атома на природу и человека не проводилось. Это связано не только с атмосферой секретности, окружающей атомную энергетику, но, главным образом, с нежеланием самих атомщиков, опасавшихся проведения подобных исследований.

Однако даже те неполные данные, которыми мы располагаем, позволяют утверждать: мы с вами, как работающие, так и не работающие на предприятиях ядерного комплекса, являемся заложниками и его самого, и чиновников-коммерсантов.

§ 14. ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ

■ Радиационные излучения, испускаемые атомами изотопов, являются источниками информации об их движении и состоянии конкретной среды. Поэтому атомы радиоактивных изотопов называются *мечеными атомами*, т.к. их передвижение и концентрацию можно фиксировать специальными приборами.

Меченые атомы применяются для проверки качества ценных и дорогостоящих изделий, а также денежных банкнот. Путем внедрения меченых атомов в подшипники и другие трущиеся части механизмов можно судить об износе деталей по их отходам.

Если в различные жидкости, текущие по подземным трубам, добавить небольшую дозу меченых атомов, то специальные детекторы позволяют определить место разрыва трубопроводов.

Радиоактивные изотопы широко применяются в медицине для установления диагноза и лечения больных. Интенсивное гамма-излучение кобальта-60 («кобальтовая пушка») используется при лечении раковых заболеваний.

С помощью гамма-лучей можно обнаружить в различных изделиях изъяны и трещины. По сравнению с рентгеновскими аппаратами, потребляющими электрическую энергию, небольшой аппарат с изотопом кобальт-60 очень удобен и не нуждается в электроэнергии. Естественно, необходимо строго соблюдать правила безопасности при работе с гамма-излучением.

Радиоизотопы йод-131 и фосфор-32 применяются для определения внутренних дефектов, для наблюдения за движениями веществ в клетках растений, в кровеносных сосудах и внутренних органах животных и человека. Таким образом, изучается состояние организма и проводится диагностика различных ран и скрытых опухолей.

§ 15. РАДИАЦИОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

■ Радиация является одним из самых опасных для человека физических процессов, неконтролируемое воздействие которого может привести к фатальным последствиям.

Особенно опасным для нижних этажей является радиоактивный газ — *радон*. Поднимаясь по разломам земной коры, он попадает в подвалы и по вентиляционным шахтам и лестничным клеткам, водостокам, пустотам и трещинам с потоками воздуха перемещается на другие этажи. На открытом месте радон растворён в такой низкой концентрации, что не вызывает беспокойства. Однако внутри закрытых помещений (офисные площади часто устраиваются в непригодном для жилья месте) тяжёлый радон накапливается. Наиболее опасны продукты распада радона, накапливающиеся в лёгких и приводящие к возникновению рака. Время, прошедшее между началом воздействия радона и началом заболевания может составлять несколько лет.

Радон не обнаруживается без специального оборудования, поэтому при обычном исследовании уровня радиации в помещении вопрос влияния Rn-222 на его обитателей остается открытым.

§ 16. ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИИ НА ОРГАНИЗМЫ

■ Воздействие радиации на организм может быть различным, но почти всегда оно негативно. В малых дозах радиационное излучение может стать катализатором процессов, приводящих к раку или генетическим нарушениям, а в больших дозах часто приводит к полной или частичной гибели организма вследствие разрушения клеток тканей.

Сложность в отслеживании последовательности процессов, вызванных облучением, объясняется тем, что последствия облучения, особенно при небольших дозах, могут проявиться не сразу, и зачастую для развития болезни требуются годы или даже десятилетия. Кроме того, вследствие различной проникающей способности разных видов радиоактивных излучений они оказывают неодинаковое воздействие на организм: α -частицы наиболее опасны, однако для α -излучения даже лист бумаги является непреодолимой преградой; β -излучение способно проходить в ткани организма на глубину один – два сантиметра; наиболее безобидное γ -излучение характеризуется наибольшей проникающей способностью: его может задержать лишь толстая плита из материалов, имеющих высокий коэффициент поглощения, например, из бетона или свинца.

Также различается чувствительность отдельных органов к радиоактивному излучению. Поэтому, чтобы получить наиболее достоверную информацию о степени риска, необходимо учитывать соответствующие коэффициенты чувствительности тканей при расчете эквивалентной дозы облучения.

0,03 – костная ткань;
0,03 – щитовидная железа;
0,12 – красный костный мозг;
0,12 – легкие;
0,15 – молочная железа;
0,25 – яичники или семенники;
0,30 – другие ткани;
1,00 – организм в целом.

Вероятность повреждения тканей зависит от суммарной дозы и от величины дозировки, т.к. благодаря репарационным способностям большинство органов имеют возможность восстановиться после серии мелких доз.

В табл. 2 приведены крайние значения допустимых доз радиации.

Таблица 2.

Крайние значения допустимых доз радиации*

Орган	Допустимая доза
Красный костный мозг	0,5 – 1 Гр.
Хрусталик глаза	0,1 – 3 Гр.
Почки	23 Гр.
Печень	40 Гр.
Мочевой пузырь	55 Гр.
Зрелая хрящевая ткань	> 70 Гр.

* Допустимая доза – суммарная доза, получаемая человеком в течение 5 недель.

Тем не менее, существуют дозы, при которых летальный исход практически неизбежен. Так, например, дозы порядка 100 Гр приводят к смерти через несколько дней или даже часов вследствие повреждения центральной нервной системы, от кровоизлияния в результате дозы облучения в 10 – 50 Гр смерть наступает через одну – две недели, а доза в 3 – 5 Гр грозит обернуться летальным исходом примерно половине облученных.

■ Знания конкретной реакции организма на те или иные дозы необходимы для оценки последствий действия больших доз облучения при авариях ядерных установок и устройств или опасности облучения при длительном нахождении в районах повышенного радиационного излучения, как от естественных источников, так и в случае радиоактивного загрязнения. Однако даже малые дозы радиации не безвредны и их влияние на организм и здоровье будущих поколений до конца не изучено. Однако можно предположить, что радиация может вызвать, прежде всего, генные и хромосомные мутации, что в последствии может привести к проявлению рецессивных мутаций. Следует более подробно рассмотреть наиболее распространенные и серьезные повреждения, вызванные облучением, а именно рак и генетические нарушения.

В случае рака трудно оценить вероятность заболевания как следствия облучения. Любая, даже самая малая доза, может привести к необратимым последствиям, но это не предопределено. Тем не менее, установлено, что вероятность заболевания возрастает прямо пропорционально дозе облучения.

Среди наиболее распространенных раковых заболеваний, вызванных облучением, выделяются лейкозы. Оценка вероятности летального исхода при лейкозе более надежна, чем аналогичные оценки для других видов раковых заболеваний. Это можно объяснить тем, что лейкозы первыми проявляют себя, вызывая смерть в среднем через 10 лет после момента облучения. За лейкозами следуют: рак молочной железы, рак щитовидной железы и рак легких. Менее чувствительны желудок, печень, кишечник и другие органы и ткани.

Воздействие радиологического излучения резко усиливается другими неблагоприятными экологическими факторами (явление синергизма). Так, смертность от радиации у курильщиков заметно выше.

Что касается генетических последствий радиации, то они проявляются в виде хромосомных aberrаций (в том числе изменения числа или структуры хромосом) и генных мутаций. Генные мутации проявляются сразу в первом поколении (доминантные мутации) или только при условии, если у обоих родителей мутантным является один и тот же ген (рецессивные мутации), что является маловероятным.

Изучение генетических последствий облучения еще более затруднено, чем в случае рака. Неизвестно, каковы генетические повреждения при облучении, проявляться они могут на протяжении многих поколений, невозможно отличить их от тех, что вызваны другими причинами.

Приходится оценивать появление наследственных дефектов у человека по результатам экспериментов на животных.

При оценке риска НКДАР использует два подхода: при одном определяя непосредственный эффект данной дозы, при другом – дозу, при которой удваивается частота появления потомков с той или иной аномалией по сравнению с нормальными радиационными условиями.

Так, при первом подходе установлено, что доза в 1 Гр, полученная при низком радиационном фоне особями мужского пола (для женщин оценки менее определены), вызывает появление от 1000 до 2000 мутаций, приводящих к серьезным последствиям, и от 30 до 1000 хромосомных aberrаций на каждый миллион живых новорожденных.

При втором подходе получены следующие результаты: хроническое облучение при мощности дозы в 1 Гр на одно поколение приведет к появлению около 2000 серьезных генетических заболеваний на каждый миллион живых новорожденных среди детей тех, кто подвергся такому облучению.

Оценки эти ненадежны, но необходимы. Генетические последствия облучения выражаются такими количественными параметрами, как сокращение продолжительности жизни и периода нетрудоспособности, хотя при этом признается, что эти оценки не более чем первая грубая прикидка. Так, хроническое облучение населения с мощностью дозы в 1

Гр на поколение сокращает период трудоспособности на 50 000 лет, а продолжительность жизни – также на 50 000 лет на каждый миллион живых новорожденных среди детей первого облученного поколения; при постоянном облучении многих поколений выходят на следующие оценки: соответственно 340 000 и 286 000 лет.

■ Существует три пути поступления радиоактивных веществ в организм: при вдыхании воздуха, загрязненного радиоактивными веществами, через зараженную пищу или воду, через кожу, а также при заражении открытых ран. Наиболее опасен первый путь, поскольку:

- объем легочной вентиляции очень большой;
- значения коэффициента усвоения в легких более высоки.

Пылевые частицы, на которых сорбированы радиоактивные изотопы, при вдыхании воздуха через верхние дыхательные пути частично оседают в полости рта и носоглотке. Отсюда пыль поступает в пищеварительный тракт. Остальные частицы поступают в легкие. Степень задержки аэрозолей в легких зависит от дисперсионности. В легких задерживается около 20% всех частиц; при уменьшении размеров аэрозолей величина задержки увеличивается до 70%.

При всасывании радиоактивных веществ из желудочно-кишечного тракта имеет значение коэффициент резорбции, характеризующий долю вещества, попадающего из желудочно-кишечного тракта в кровь. В зависимости от природы изотопа коэффициент изменяется в широких пределах: от сотых долей процента (для циркония, ниобия), до нескольких десятков процентов (водород, щелочноземельные элементы). Резорбция через неповрежденную кожу в 200 – 300 раз меньше, чем через желудочно-кишечный тракт, и, как правило, не играет существенной роли.

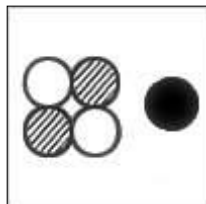
При попадании радиоактивных веществ в организм любым путем они уже через несколько минут обнаруживаются в крови. Если поступление радиоактивных веществ было однократным, то концентрация их в крови вначале возрастает до максимума, а затем в течение 15 – 20 суток снижается.

Концентрации в крови долгоживущих изотопов в дальнейшем могут удерживаться практически на одном уровне в течение длительного времени вследствие обратного вымывания отложившихся веществ.

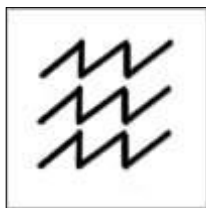
Основные этапы воздействия излучения на ткани показаны в *схеме 1*.

Схема 1.

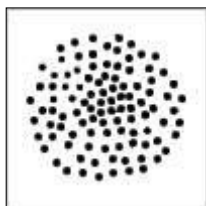
Основные этапы воздействия излучения на ткани



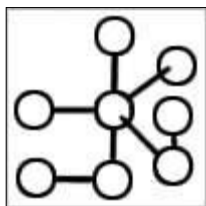
Заряженные частицы. Проникающие в ткани организма α - и β -частицы теряют энергию вследствие электрических взаимодействий с электронами тех атомов, близ которых они проходят (гамма-излучение и рентгеновские лучи передают свою энергию веществу несколькими способами, которые, в конечном счете, также приводят к электрическим взаимодействиям).



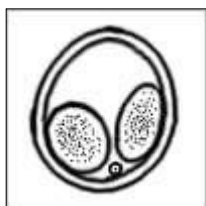
Электрические взаимодействия. За время порядка десяти триллионных секунды после того, как проникающее излучение достигнет соответствующего атома в ткани организма, от этого атома отрывается электрон. Электрон заряжен отрицательно, поэтому оставшая часть исходного нейтрального атома становится положительно заряженной. Этот процесс называется ионизацией. Оторвавшийся электрон далее может ионизировать другие атомы.



Физико-химические изменения. И свободный электрон, и ионизированный атом обычно не могут долго пребывать в таком состоянии и в течение следующих десяти миллиардных долей секунды участвуют в сложной цепи реакций, в результате которых образуются новые молекулы, включая и такие чрезвычайно реакционно-способные, как «свободные радикалы».



Химические изменения. В течение следующих миллионных долей секунды образовавшиеся свободные радикалы реагируют как друг с другом, так и с другими молекулами и через цепочку реакций, еще не изученных до конца, могут вызвать химическую модификацию важных в биологическом отношении молекул, необходимых для нормального функционирования клетки.



Биологические эффекты. Биохимические изменения могут произойти как через несколько секунд, так и через десятилетия после облучения и явиться причиной немедленной гибели клеток, или такие изменения в них могут привести к раку.

■ Конечный эффект облучения является результатом не только первичного повреждения клеток, но и последующих процессов восстановления. Предполагается, что значительная часть первичных повреждений в клетке возникает в виде так называемых потенциальных повреждений, которые могут реализовываться в случае отсутствия восстановительных процессов. Реализация этих процессов способствуют процессы биосинтеза белков и нуклеиновых кислот. Пока реализация потенциальных повреждений не произошла, клетка может в них «восстановиться». Это, как предполагается, связано с ферментативными реакциями и обусловлено энергетическим обменом. Считается, что в основе этого явления

лежит деятельность систем, которые в обычных условиях регулируют интенсивность естественного мутационного процесса.

Мутагенное воздействие ионизирующего излучения впервые установили русские ученые *Р.А. Надсон* и *Р.С. Филиппов* в 1925 году в опытах на дрожжах. В 1927 году это открытие было подтверждено *Р. Меллером* на классическом генетическом объекте – дрозофиле.

Ионизирующие излучения способны вызывать все виды наследственных перемен. Спектр мутаций, индуцированных облучением, не отличается от спектра спонтанных мутаций.

Последние исследования Киевского Института нейрохирургии показали, что радиация даже в малых количествах, при дозах в десятки бэр, сильнее всего воздействует на нервные клетки – нейроны. Но нейроны гибнут не от прямого воздействия радиации. Как выяснилось, в результате воздействия радиации у большинства ликвидаторов ЧАЭС наблюдается «послерadiационная энцефалопатия». Общие нарушения в организме под действием радиации приводят к изменению обмена веществ, которые влекут за собой патологические изменения структуры головного мозга.

§ 17. ИСТОЧНИКИ РАДИАЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

■ Теперь, имея представление о воздействии радиационного облучения на живые ткани, необходимо выяснить, в каких ситуациях мы наиболее подвержены этому воздействию.

Существует два способа облучения: если радиоактивные вещества находятся вне организма и облучают его снаружи, то речь идет о внешнем облучении. Другой способ облучения – при попадании радионуклидов внутрь организма с воздухом, пищей и водой – называют внутренним.

Источники радиоактивного излучения весьма разнообразны, но их можно объединить в две большие группы: естественные и искусственные (созданные человеком). Причем основная доля облучения (более 75% годовой эффективной эквивалентной дозы) приходится на естественный фон.

■ **Естественные источники радиации.** Естественные радионуклиды делятся на четыре группы: долгоживущие (уран-238, уран-235, торий-232); короткоживущие (радий, радон); долгоживущие одиночные, не образующие семейств (калий-40); радионуклиды, возникающие в результате взаимодействия космических частиц с атомными ядрами вещества Земли (углерод-14).

Разные виды излучения попадают на поверхность Земли либо из космоса, либо поступают от радиоактивных веществ, находящихся в земной коре, причем земные источники ответственны в среднем за 5/6 годовой эффективной эквивалентной доз, получаемой населением, в основном вследствие внутреннего облучения.

Уровни радиационного излучения неодинаковы для различных областей. Так, Северный и Южный полюсы более чем экваториальная зона,

подвержены воздействию космических лучей из-за наличия у Земли магнитного поля, отклоняющего заряженные радиоактивные частицы. Кроме того, чем больше удаление от земной поверхности, тем интенсивнее космическое излучение.

Иными словами, проживая в горных районах и постоянно пользуясь воздушным транспортом, мы подвергаемся дополнительному риску облучения. Люди, живущие выше 2000 м над уровнем моря, получают в среднем из-за космических лучей эффективную эквивалентную дозу в несколько раз большую, чем те, кто живет на уровне моря. При подъеме с высоты 4000 м (максимальная высота проживания людей) до 12000 м (максимальная высота полета пассажирского авиатранспорта) уровень облучения возрастает в 25 раз. Примерная доза за рейс Нью-Йорк – Париж по данным НКДАР ООН в 1985 году составляла 50 микрозивертов за 7,5 часов полета.

Всего за счет использования воздушного транспорта население Земли получало в год эффективную эквивалентную дозу около 2000 чел – Зв.

Уровни земной радиации также распределяются неравномерно по поверхности Земли и зависят от состава и концентрации радиоактивных веществ в земной коре. Так называемые аномальные радиационные поля природного происхождения образуются в случае обогащения некоторых типов горных пород ураном, торием, на месторождениях радиоактивных элементов в различных породах, при современном привносе урана, радия, радона в поверхностные и подземные воды, геологическую среду.

По данным исследований, проведенных во Франции, Германии, Италии, Японии и США, около 95% населения этих стран проживает в районах, где мощность дозы облучения колеблется в среднем от 0,3 до 0,6 миллизиверта в год. Эти данные можно принять за средние по миру, поскольку природные условия в вышеперечисленных странах различны.

Есть, однако, несколько «горячих точек», где уровень радиации намного выше. К ним относятся несколько районов в Бразилии: окрестности города Посус-ди-Калдас и пляжи близ Гуарапары, города с населением 12 000 человек, куда ежегодно приезжают отдыхать примерно 30 000 курортников, где уровень радиации достигает 250 и 175 миллизивертов в год соответственно. Это превышает средние показатели в 500 – 800 раз. Здесь, а также в другой части света, на юго-западном побережье Индии, подобное явление обусловлено повышенным содержанием тория в песках. Вышеперечисленные территории в Бразилии и Индии являются наиболее изученными в данном аспекте, но существует множество других мест с высоким уровнем радиации, например во Франции, Нигерии, на Мадагаскаре.

По территории Российской Федерации зоны повышенной радиоактивности также распределены неравномерно.

Среди естественных радионуклидов наибольший вклад (более 50%) в суммарную дозу облучения несет радон и его дочерние продукты распада (в том числе радий). Опасность радона заключается в его широком распространении, высокой проникающей способности и миграционной подвижности (активности), распаде с образованием радия и других высо-

коактивных радионуклидов. Период полураспада радона сравнительно невелик и составляет 3,823 суток. Радон трудно идентифицировать без использования специальных приборов, так как он не имеет цвета или запаха.

Одним из важнейших аспектов радоновой проблемы является внутреннее облучение радоном: образующиеся при его распаде продукты в виде мельчайших частиц проникают в органы дыхания, и их существование в организме сопровождается альфа-излучением. И в нашей стране, и на западе радоновой проблеме уделяется много внимания, т.к. в результате проведенных исследований выяснилось, что в большинстве случаев содержание радона в воздухе в помещениях и в водопроводной воде превышает ПДК. Так, наибольшая концентрация радона и продуктов его распада, зафиксированная в нашей стране, соответствует дозе облучения 3000 – 4000 бэр в год, что превышает ПДК на два – три порядка.

■ **Источники радиации, созданные человеком (техногенные).** Искусственные источники радиационного облучения существенно отличаются от естественных не только происхождением. Во-первых, сильно различаются индивидуальные дозы, полученные разными людьми от искусственных радионуклидов. В большинстве случаев эти дозы невелики, но иногда облучение за счет техногенных источников гораздо более интенсивно, чем за счет естественных. Во-вторых, для техногенных источников упомянутая вариабельность выражена гораздо сильнее, чем для естественных. Наконец, загрязнение от искусственных источников радиационного излучения (кроме радиоактивных осадков в результате ядерных взрывов) легче контролировать, чем природно-обусловленное загрязнение.

Энергия атома используется человеком в различных целях: в медицине, для производства энергии и обнаружения пожаров, для изготовления светящихся циферблатов часов, для поиска полезных ископаемых и, наконец, для создания атомного оружия.

Основной вклад в загрязнение от искусственных источников вносят различные медицинские процедуры и методы лечения, связанные с применением радиоактивности. Основной прибор, без которого не может обойтись ни одна крупная клиника – рентгеновский аппарат, но существует множество других методов диагностики и лечения, связанных с использованием радиоизотопов.

Неизвестно точное количество людей, подвергающихся подобным обследованиям и лечению, и дозы, получаемые ими, но можно утверждать, что для многих стран использование явления радиоактивности в медицине остается чуть ли не единственным техногенным источником облучения.

В принципе облучение в медицине не столь опасно, если им не злоупотреблять. Но, к сожалению, часто к пациенту применяются неоправданно большие дозы. Среди методов, способствующих снижению риска – уменьшение площади рентгеновского пучка, его фильтрация.

Из-за отсутствия более полных данных НКДАР ООН был вынужден принять за общую оценку годовой коллективной эффективной эквивалентной дозы, по крайней мере, от рентгенологических обследований в развитых странах на основе данных, представленных в комитет Польшей и Японией к 1985 году, значение 1000 чел-Зв на 1 млн. жителей. Скорее всего, для развивающихся стран эта величина окажется ниже, но индивидуальные дозы могут быть значительнее. Подсчитано также, что коллективная эффективная эквивалентная доза от облучения в медицинских целях в целом (включая использование лучевой терапии для лечения рака) для всего населения Земли равна примерно 1 600 000 чел-Зв в год.

Следующий источник облучения, созданный руками человека – радиоактивные осадки, выпавшие в результате испытания ядерного оружия в атмосфере, и, несмотря на то, что основная часть взрывов была произведена еще в 1950 – 60-е годы, их последствия мы испытываем на себе и сейчас.

В результате взрыва часть радиоактивных веществ выпадает неподалеку от полигона, часть задерживается в тропосфере и затем в течение месяца перемещается ветром на большие расстояния, постепенно оседая на землю, при этом оставаясь примерно на одной и той же широте. Однако большая доля радиоактивного материала выбрасывается в стратосферу и остается там более продолжительное время, также рассеиваясь по земной поверхности.

Радиоактивные осадки содержат большое количество различных радионуклидов, но из них наибольшую роль играют цирконий-95, цезий-137, стронций-90 и углерод-14, периоды полураспада которых составляют соответственно 64 суток, 30 лет (цезий и стронций) и 5730 лет.

По данным НКДАР, ожидаемая суммарная коллективная эффективная эквивалентная доза от всех ядерных взрывов, произведенных к 1985 году, составляла 30 000 000 чел-Зв. К 1980 году население Земли получило лишь 12% этой дозы, а остальную часть получает до сих пор, и будет получать еще миллионы лет.

Один из наиболее обсуждаемых сегодня источников радиационного излучения является атомная энергетика. На самом деле, при нормальной работе ядерных установок ущерб от них незначительный. Дело в том, что процесс производства энергии из ядерного топлива сложен и проходит в несколько стадий.

Ядерный топливный цикл начинается с добычи и обогащения урановой руды, затем производится само ядерное топливо, а после отработки топлива на АЭС иногда возможно вторичное его использование через извлечение из него урана и плутония. Завершающей стадией цикла является, как правило, захоронение радиоактивных отходов.

На каждом этапе происходит выделение в окружающую среду радиоактивных веществ, причем их объем может сильно варьироваться в зависимости от конструкции реактора и других условий. Кроме того, серьезной проблемой является захоронение радиоактивных отходов, которые

еще на протяжении тысяч и миллионов лет будут продолжать служить источником загрязнения.

Дозы облучения различаются в зависимости от времени и расстояния. Чем дальше от станции живет человек, тем меньшую дозу он получает.

Из продуктов деятельности АЭС наибольшую опасность представляет третий. Благодаря своей способности хорошо растворяться в воде и интенсивно испаряться, третий накапливается в использованной в процессе производства энергии воде, затем поступает в водоем-охладитель, а соответственно в близлежащие бессточные водоемы, подземные воды, приземной слой атмосферы. Период его полураспада равен 3,82 суток. Распад его сопровождается альфа – излучением. Повышенные концентрации этого радиоизотопа зафиксированы в природных средах многих АЭС.

До сих пор речь шла о нормальной работе атомных электростанций, но на примере Чернобыльской трагедии мы можем сделать вывод о чрезвычайно большой потенциальной опасности атомной энергетики: при любом минимальном сбое АЭС, особенно крупной, может быть оказано непоправимое воздействие на всю экосистему Земли.

Масштабы Чернобыльской аварии не могли не вызвать оживленного интереса со стороны общественности. Но мало кто догадывается о количестве мелких неполадок в работе АЭС в разных странах мира.

Так, в статье М. Пронина, подготовленной по материалам отечественной и зарубежной печати в 1992 году, содержатся следующие данные:

«...С 1971 по 1984 гг. на атомных станциях ФРГ произошла 151 авария. В Японии на 37 действующих АЭС с 1981 по 1985 гг. зарегистрировано 390 аварий, 69% которых сопровождались утечкой радиоактивных веществ... В 1985 г. в США зафиксировано 3 000 неисправностей в системах и 764 временные остановки АЭС...».

Кроме того, автор статьи указывает на актуальность, по крайней мере на 1992 год, проблемы намеренного разрушения предприятий ядерного топливного энергетического цикла, что связано с неблагоприятной политической обстановкой в ряде регионов. Остается надеяться на будущую сознательность тех, кто таким образом «копает под себя».

Осталось указать несколько искусственных источников радиационного загрязнения, с которыми каждый из нас сталкивается повседневно.

Это, прежде всего, строительные материалы, отличающиеся повышенной радиоактивностью. Среди таких материалов – некоторые разновидности гранитов, пемзы и бетона, при производстве которого использовались глинозем, фосфогипс и кальцево-силикатный шлак. Известны случаи, когда стройматериалы производились из отходов ядерной энергетики, что противоречит всем нормам. К излучению, исходящему от самой постройки, добавляется естественное излучение земного происхождения. Самый простой и доступный способ хотя бы частично защититься от облучения дома или на работе – чаще проветривать помещение.

Повышенная ураноносность некоторых углей может приводить к значительным выбросам в атмосферу урана и других радионуклидов в результате сжигания топлива на ТЭЦ, в котельных, при работе автотранспорта.

Существует огромное количество общеупотребительных предметов, являющихся источником облучения. Это, прежде всего, часы со светящимся циферблатом, дающие годовую ожидаемую эффективную эквивалентную дозу, в 4 раза превышающую обусловленную утечками на АЭС, а именно 2 000 чел-Зв. Равносильную дозу получают работники предприятий атомной промышленности и экипажи авиалайнеров.

При изготовлении таких часов используют радий. Наибольшему риску при этом подвергается, прежде всего, владелец часов.

Радиоактивные изотопы используются также в других светящихся устройствах: указателях входа – выхода, в компасах, телефонных дисках, прицелах, в дросселях флуоресцентных светильников и других электроприборах и т.д.

При производстве детекторов дыма принцип их действия часто основан на использовании α -излучения. При изготовлении особо тонких оптических линз применяется торий, а для придания искусственного блеска зубам используют уран. Очень незначительны дозы облучения от цветных телевизоров и рентгеновских аппаратов для проверки багажа пассажиров в аэропортах.

§ 18. ХАРАКТЕРИСТИКА РАДИАЦИОННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Научные открытия и развитие физико-химических технологий в XX в. привели к появлению *искусственных источников радиации*, представляющих большую потенциальную опасность для человечества и всей биосферы. Этот потенциал на много порядков больше естественного радиационного фона, к которому адаптирована вся живая природа.

Естественный радиационный фон обусловлен рассеянной радиоактивностью земной коры, проникающим космическим излучением, потреблением с пищей биогенных радионуклидов и составлял в недавнем прошлом 8 — 9 микрорентген в час (мкР/ч), что соответствует среднегодовой эффективной эквивалентной дозе ($ЭЭД = HD$) для жителя Земли в 2 миллизиверта (мЗв). Рассеянная радиоактивность обусловлена наличием в среде следовых количеств природных радиоизотопов с периодом полураспада ($T_{1/2}$) более 10^5 лет (в основном урана и тория), а также К-40, С-14, Ра-226 и Рn-222. Газ радон в среднем дает от 30 до 50% естественного фона облучения наземной биоты. Из-за неравномерности распределения источников излучения в земной коре существуют некоторые региональные различия фона и его локальные аномалии.

Указанный уровень фона был характерен для доиндустриальной эпохи и в настоящее время несколько повышен техногенными источниками радиоактивности – в среднем до 11 – 12 мкР/ч при среднегодовой ЭЭД в 2,5 мЗв. Эту прибавку обусловили:

- 1) технические источники проникающей радиации (медицинская диагностическая и терапевтическая рентгеновская аппаратура, радиационная дефектоскопия, источники сигнальной индикации и т.п.);
- 2) извлекаемые из недр минералы, топливо и вода;
- 3) ядерные реакции в энергетике и ядерно-топливном цикле;
- 4) испытания и применение ядерного оружия. Деятельность человека в несколько раз увеличила число присутствующих в среде радионуклидов и на несколько порядков – их массу на поверхности планеты.

Главную радиационную опасность представляют запасы ядерного оружия и топлива и радиоактивные осадки, которые образовались в результате ядерных взрывов или аварий и утечек в ядерно-топливном цикле – от добычи и обогащения урановой руды до захоронения отходов. В мире накоплены десятки тысяч тонн расщепляющихся материалов, обладающих колоссальной суммарной активностью.

С 1945 по 1996 г. США, СССР (Россия), Великобритания, Франция и Китай произвели в надземном пространстве более 400 ядерных взрывов. В атмосферу поступила большая масса сотен различных радионуклидов, которые постепенно выпали на всей поверхности планеты. Их глобальное количество почти удвоили ядерные катастрофы, произошедшие на территории СССР. Долгоживущие радиоизотопы (углерод-14, цезий-137, стронций-90 и др.) и сегодня продолжают излучать, создавая приблизительно 2%-ю добавку к фону радиации. Последствия атомных бомбардировок, ядерных испытаний и аварий еще долго будут сказываться на здоровье облученных людей и их потомков.

Пока еще трудно говорить о влиянии техногенного превышения естественного фона радиации на биоту биосферы. Мы еще не знаем, как может сказаться на биоте океана разгерметизация затопленных контейнеров с радионуклидами и реакторов затонувших подводных лодок. Во всяком случае, можно предполагать некоторое повышение уровня мутагенеза.

Радиационные загрязнения, связанные с технологически нормальным ядерным топливным циклом, имеют локальный характер и доступны для контроля, изоляции и предотвращения эмиссий. Эксплуатация объектов атомной энергетики сопровождается незначительным радиационным воздействием. Многолетние систематические измерения и контроль радиационной обстановки не обнаружили серьезного влияния на состояние объектов окружающей природной среды. Дозы облучения населения, проживающего в окрестностях АЭС, не превышают 10 мкЗв/год, что в 100 раз меньше установленного допустимого уровня. Вероятность радиационных аварий реакторов АЭС сейчас оценивается как $10^{-4} - 10^{-5}$ в год.

§ 19. ПО «МАЯК»

ПО «Маяк». Самое крупное из известных сейчас скоплений радионуклидов находится на Урале, в 70 км к северо-западу от Челябинска на территории производственного объединения «Маяк». ПО «Маяк» было создано на базе промышленного комплекса, построенного в 1945 – 1949 гг. Здесь в 1948 г. был пущен первый в стране промышленный атомный реактор, в 1949 г. – первый радиохимический завод, изготовлены первые образцы атомного оружия. В настоящее время в производственную структуру ПО «Маяк» входят ряд производств ядерного цикла, комплекс по захоронению высокоактивных материалов, хранилища и могильники РАО. Многолетняя деятельность ПО «Маяк» привела к накоплению огромного количества радионуклидов и сильному загрязнению районов Челябинской, Свердловской, Курганской и Тюменской областей. В результате сброса отходов радиохимического производства непосредственно в открытую речную систему Обского бассейна через реку Теча (1949 – 1951 гг.), а также вследствие аварий 1957 и 1967 гг. в окружающую среду было выброшено 23 млн. Ки активности. Радиоактивное загрязнение охватило территорию в 25 тыс. км² с населением более 500 000 человек. Официальные данные о десятках поселков и деревень, подвергшихся загрязнению в результате сбросов радиоактивных отходов в реку Теча, появились только в 1993 г.

В 1957 г. в результате теплового взрыва емкости с РАО произошел мощный выброс радионуклидов (церий-144, цирконий-95, стронций-90, цезий-137 и др.) с суммарной активностью 2 млн. Ки. Возник «Восточно-Уральский радиоактивный след» длиной до 110 км (в результате последующей миграции даже до 400 км) и шириной до 35 – 50 км. Общая площадь загрязненной территории, ограниченной изолинией 0,1 Ки/км² по стронцию-90, составила 23 тыс. км². Около 10 000 человек из 19 населенных пунктов в зоне наиболее сильного загрязнения с большой задержкой были эвакуированы и переселены.

Зона радиационного загрязнения на Южном Урале расширилась вследствие ветрового разноса радиоактивных аэрозолей с пересохшей части технологического водоема № 9 ПО «Маяк» (оз. Карачай) в 1967 г. В настоящее время в этом резервуаре находится около 120 млн. Ки активности, преимущественно за счет стронция-90 и цезия-137. Под озером сформировалась линза загрязненных подземных вод объемом около 4 млн. м³ и площадью 10 км². Существует опасность проникновения загрязненных вод в другие водоносные горизонты и выноса радионуклидов в речную сеть.

По данным радиационного мониторинга, выпадения цезия-137 из атмосферы в районах, расположенных в зоне влияния ПО «Маяк», в течение 1994 г. были в 50 – 100 раз больше, чем в среднем по стране. Высоким остается и уровень загрязнения местности цезием-137 в пойме реки Теча. Концентрации стронция-90 в речной воде и в донных отложениях в 100 – 1000 раз превышают фоновые значения. В каскаде промышлен-

ных водоемов в верховьях Течи содержится 350 млн. м³ загрязненной воды, являющейся по сути низкоактивными отходами. Суммарная активность твердых и жидких РАО, накопленных в ходе деятельности ПО «Маяк», достигает 1 млрд. Ки. Сосредоточение огромного количества РАО, загрязнение поверхностных водоемов, возможность проникновения загрязненных подземных вод в открытую гидрографическую систему Обского бассейна создают исключительно высокую степень радиационного риска на Южном Урале.

§ 20. ЧЕРНОБЫЛЬ

Не только нынешнее, но и последующие поколения будут помнить Чернобыль, и ощущать последствия этой катастрофы. В результате взрывов и пожара при аварии на четвертом энергоблоке ЧАЭС с 26 апреля по 10 мая 1986 г. из разрушенного реактора было выброшено примерно 7,5 т ядерного топлива и продуктов деления с суммарной активностью около 50 млн. Ки. По количеству долгоживущих радионуклидов (цезий-137, стронций-90 и др.) этот выброс соответствует 500 – 600 Хиросимам.

Из-за того, что выброс радионуклидов происходил более 10 суток при меняющихся метеоусловиях, зона основного загрязнения имеет веерный, пятнистый характер. Кроме 30-километровой зоны, на которую пришлось большая часть выброса, в разных местах в радиусе до 250 км были выявлены участки, где загрязнение достигло 200 Ки/км². Общая площадь «пятен» с активностью более 40 Ки/км² составила около 3,5 тыс. км², где в момент аварии проживало 190 тыс. человек. Всего радиоактивным выбросом ЧАЭС в разной степени было загрязнено 80% территории Белоруссии, вся северная часть Правобережной Украины и 19 областей России. В целом по РФ загрязнение, обусловленное аварией на ЧАЭС, с плотностью 1 Ки/км² и выше охватывает более 57 000 км², что составляет 1,6% площади ЕТР. Уточненные в 1994 г. границы площадей, загрязненных цезием-137, по сравнению с 1993 г. почти не изменились. Следы Чернобыля обнаружены в большинстве стран Европы, а также в Японии, на Филиппинах, в Канаде. Катастрофа приобрела глобальный характер.

И сегодня спустя полтора десятилетия после чернобыльской трагедии существуют противоречивые оценки ее поражающего действия и причиненного экономического ущерба. Согласно опубликованным в 2000 г. данным из 860 000 человек, участвовавших в ликвидации последствий аварии, более 55 000 ликвидаторов умерли, десятки тысяч стали инвалидами. Полмиллиона человек до сих пор проживает на загрязненных территориях.

Точных данных о количестве облученных и полученных дозах нет. Нет и однозначных прогнозов о возможных генетических последствиях. Подтверждается тезис об опасности длительного воздействия на организм малых доз радиации. В районах, подвергшихся радиоактивному заражению, неуклонно растет число онкологических заболеваний, осо-

бенно выражен рост заболеваемости раком щитовидной железы детей.

§ 21. РАДИОАКТИВНЫЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ СРЕД ЖИЗНИ ЧЕЛОВЕКА

■ **Радиоактивное загрязнение воздушной среды.** Радиоактивные вещества, попадающие в атмосферу при их добыче, и эксплуатации атомных установок и двигателей, могут представлять опасность. Однако при современном уровне защитной техники этот источник радиоактивности незначителен.

Наибольшее загрязнение атмосферы радиоактивными веществами происходит в результате взрывов атомных и водородных бомб. Каждый такой взрыв сопровождается образованием грандиозного облака радиоактивной пыли. Взрывная волна огромной силы распространяет ее частицы во всех направлениях, поднимая их более чем на 30 км. В первые часы после взрыва осаждаются наиболее крупные частицы, несколько меньшего размера – в течение 5 суток, а мелкодисперсная пыль потоками воздуха переносится на тысячи километров и оседает на поверхности земного шара в течение многих лет.

■ **Радиоактивное загрязнение водной среды.** Основными источниками радиоактивного загрязнения Мирового океана являются:

- загрязнения от испытаний ядерного оружия (в атмосфере до 1963 г.);
- загрязнения радиоактивными отходами, которые непосредственно сбрасываются в море;
- крупномасштабные аварии (ЧАЭС, аварии судов с атомными реакторами);
- захоронение радиоактивных отходов на дне.

Во время испытания ядерного оружия, особенно до 1963 г., когда проводились массовые ядерные взрывы, в атмосферу было выброшено огромное количество радионуклидов. Так, только на арктическом архипелаге Новая Земля было проведено более 130 ядерных взрывов (только в 1958 г. – 46 взрывов), из них 87 – в атмосфере.

Отходы от английских и французских атомных заводов загрязнили радиоактивными элементами практически всю Северную Атлантику, особенно Северное, Норвежское, Гренландское, Баренцево и Белое моря. Воды Мирового океана загрязнены наиболее опасными радионуклидами цезия-137, стронция-90, церия-144, иттрия-91, ниобия-95, которые, обладая высокой биоаккумулирующей способностью, переходят по пищевым цепям, и концентрируются в морских организмах высших трофических уровней, создавая опасность, как для гидробионтов, так и для человека. Различными источниками поступления радионуклидов загрязнены акватории арктических морей, так в 1982 г. максимальные загрязнения цезием-137 фиксировались в западной части Баренцева моря, которые в 6 раз превышали глобальное загрязнение вод Северной Атлантики. За 29-летний период наблюдений (1963-1992 гг.) концентрация стронция-90 в Белом и Баренцевом морях уменьшилась лишь в 3-5 раз.

Таблица 3.

**Площади областей и республик России,
загрязненных цезием-137 (январь 1995 г.)**

Области республики	Общая площадь области (республи- ки) (тыс. км)	Площадь загрязнения цезием-137, км ²
Белгородская	27 100	1 620
Брянская	34 900	6 750
Воронежская	52 400	1 320
Калужская	29 900	3 500
Курская	29 800	1 220
Липецкая	24 100	1 619
Ленинградская	85 900	850
Нижегородская	74 800	250
Орловская	24 700	8 840
Пензенская	43 200	4 130
Рязанская	39 600	5 320
Саратовская	100 200	150
Смоленская	49 800	100
Тамбовская	34 300	510
Тульская	25 700	1 320
Ульяновская	37 300	1 100
Мордовия	26 200	1 900
Татарстан	68 000	110
Чувашия	18 000	80
Итого	825 900	49 760 (6,024%)

Таблица 4.

**Средние эффективные эквивалентные дозы радиации
для ряда стран Европы в течение первого года
после Чернобыльской аварии (мкЗв)**

Страна	Эффективная эквивалентная доза за первый год	Ожидаемая эффективная эквивалентная доза
Австрия	670	3200
Финляндия	360	2000
Болгария	940	1800
Румыния	570	1700
Югославия	380	1700
Греция	590	1200
Чехия	390	890
Италия	300	810
Норвегия	230	790
Польша	240	740
Венгрия	250	400
СНГ (СССР)	260	820

Значительную опасность вызывают затопленные в Карском море (около архипелага Новая Земля) 11 тыс. контейнеров с радиоактивными отходами, а также 15 аварийных реакторов с атомных подводных лодок. Работами 3-й советско-американской экспедиции 1988 г. установлено, что в водах Берингова и Чукотского моря, концентрация цезия-137 близка к фоновой для районов океана и обусловлена глобальным поступлением данного радионуклида из атмосферы за длительный промежуток времени. Однако эти концентрации (0,1 Ки/л) были в 10 – 50 раз ниже, чем в Черном, Баренцевом, Балтийским и Гренландском, морях, подверженных воздействию локальных источников радиоактивного загрязнения.

Все вышеперечисленное показывает, что человек, вероятно, забыл: океан – это мощная кладовая минеральных и биологических ресурсов; в частности, он даёт 90% нефти и газа, 90% мировой добычи брома, 60% магния и огромное количество, морепродуктов, что важно при увеличивающемся населении нашей планеты. По этому поводу знаменитый исследователь Жак-Ив Кусто напоминает: *«...Море - продолжение нашего мира, часть нашей Вселенной, владения, которые мы обязаны, охра-*

нять, если хотим выжить».

■ **Радиоактивное загрязнение почвы.** В связи с широким использованием в народном хозяйстве радиоактивных веществ появилась опасность загрязнения почв радионуклидами. Источники радиации – ядерные установки, испытание ядерного оружия, отходы урановых шахт. Потенциальными источниками, радиоактивного загрязнения могут стать аварии на ядерных установках, АЭС (как в Чернобыле, Екатеринбурге, а также в США, Англии).

В верхнем слое почвы концентрируются радиоактивные стронций и цезий, откуда они попадают в организм животных и человека. Лишайники северных зон обладают повышенной способностью к аккумуляции радиоактивного цезия. Олени, питающиеся ими, накапливают изотопы, а у населения, использующего в пищу оленину, в организме в 10 раз больше цезия, чем у других северных народов.

■ **Радиоактивное загрязнение растительного и животного мира.** Биологическое накопление свойственно и зеленым растениям, которые, аккумулируя определенные химические элементы, изменяют окраску хвои, листьев, цветков и плодов. Это иногда служит, индикаторным, признаком, при поисках полезных ископаемых. Например, береза и осина в Восточной Сибири накапливает в своей древесине значительные, содержания стронция-90, что приводит к появлению необычной окраски – неестественно зелёного цвета. Сон-трава на южном Урале аккумулирует никель, поэтому ее околоцветник вместо фиолетового цвета становится белым, что указывает на высокие концентрации никеля в почве. В ареале рассеяния урановых месторождений лепестки иван-чая, вместо розовых становятся белыми и ярко-пурпуровыми, у голубики плоды вместо темно-синих становятся белыми.

Радионуклиды, попадая, в окружающую среду, часто рассеиваются и разбавляются в водах, но они могут различными способами накапливаться в живых организмах при движении по пищевым цепям (*«биологическое накопление»*).

Поскольку содержание радионуклида в виде принимается за 1, то его концентрация постепенно возрастает по пищевым цепям. В костях окуня и ондатры его содержание возрастает в 3000 – 4000 раз по сравнению с концентрацией в воде. Это имеет существенные негативные последствия для живых организмов, включая и человека, и биосферы в целом. Установлено, что коэффициент накопления стронция-90 в раковинах моллюсков днепровских водохранилищ относительно воды достигает 4800. Поэтому при оценке воздействия радионуклидов на среду необходимо учитывать эффект биологического накопления их живыми, организмами и последствия для естественных экосистем.

§ 22. ВОЗМОЖНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ЯДЕРНОГО ОРУЖИЯ МАССОВОГО ПОРАЖЕНИЯ

■ *Ядерная катастрофа* (военная биосферная катастрофа) – глобальные экологические последствия применения оружия массового уничтожения (ядерного, химического, биологического), что в конечном итоге приведет к разрушению основных природных экосистем Земли. В настоящее время мощность накопленных запасов ядерного оружия в мире составляет около $16 - 18 \cdot 10^9$ т, т.е. на каждого жителя планеты приходится более 3,5 т тротилового эквивалента. Поэтому в ряде стран (США, Канада, Англия, Германия и др.) проведены исследования по оценке последствий ядерной войны на биосферу в целом, в частности смоделировано более 20 различных сценариев. При ядерной катастрофе суммарная мощность взрывов может находиться в пределах от 6500 Мт. (базовый сценарий) до 10 – 12 тыс. Мт. (жесткий сценарий). Аналогичные работы проведены в Вычислительном центре Российской АН; опубликованы различные варианты сценариев ядерной катастрофы в работах М.И. Будыко, Ю.А. Израэля, Г.С. Голицына, К.Я. Кондратьева и др.

Результаты проведенных исследований по данной проблеме указывают на недопустимость ядерной войны, которая с неизбежностью приведет к глобальным изменениям климата и к деградации биосферы, в целом.

Таблица 5.

Экологические последствия основных крупномасштабных поражающих факторов ядерных взрывов

Основные крупномасштабные эффекты (поражающие факторы)	Возможные геофизические последствия
Загрязнение биосферы радиоактивными продуктами	Изменение электрических свойств атмосферы, изменение погоды, изменение свойств ионосферы
Загрязнение атмосферы аэрозольными продуктами	Изменение радиационных свойств атмосферы. Изменение погоды и климата
Загрязнение атмосферы различными газообразными веществами (метаном, этиленом и др.).	Изменение радиационных свойств атмосферы, изменение погоды и климата. Изменение радиационных свойств верхней атмосферы, нарушение озонового слоя. Изменение возможности прохождения УФ – излучения, изменение климата
Изменение альбедо земной поверхности	Изменение климата

Видно, что среди возможных геофизических (экологических) последствий применения ядерного оружия следует выделить: массовые радиационные и иные поражения изменение погоды и климата, разрушение озонового слоя, нарушение состояния ионосферы и т.п. К этому необходимо добавить сильное загрязнение атмосферы аэрозольными и газообразными частицами, возникшими в результате, как взрывов, так и многочисленных пожаров.

■ По данным *М.И. Будыко*, при ядерной войне даже при мощности, взрыва 5000 Мт , в атмосферу поступит $9,6 \cdot 10^3 \text{ т}$ аэрозолей из которых 80% проникнет в стратосферу. Наличие в атмосфере огромного количества аэрозолей, газообразных примесей и дыма ядерных пожаров – все это, приведет к уменьшению притока солнечной радиации к земной поверхности и, конечно, к понижению температуры воздуха на планете примерно на 15°C (*«ядерная зима»*). Ожидаемое среднее понижение температуры воздуха над континентами северного полушария будет составлять более 20°C , такой крупный ядерный конфликт коренным образом повлияет на климат в виде наступления темноты (*«ядерная ночь»*), изменит глобальную циркуляцию воздуха и т.д. Следствиями этого будут: прекращение процесса фотосинтеза, вымораживание и уничтожение растительности на огромных территориях, гибель посевов сельскохозяйственных культур и в конечном итоге гибель всего живого и человеческой цивилизации. Также, к последствиям ядерных взрывов следует добавить еще радиацию от разрушенных АЭС (более 420), при этом 85% их расположено именно в северном полушарии. По расчетам медиков, при реализации только базового сценария в северном полушарии около, 60% населения сразу погибнет от ударной волны, ожогов и летальной дозы радиации, 25% будут поражены ионизирующей радиацией и т.д., т.е. будет поставлена под сомнение возможность существования Человека как биологического вида.

Основным путем предотвращения глобальной экологической катастрофы является ликвидации всех видов оружия массового уничтожения, что сможет предотвратить малейшую возможность ядерной войны, в которой не будет ни победителей, ни побежденных, Также для уменьшения вероятности непреднамеренного самоуничтожения населения земли необходимо значительно расширить экологические исследования последствий применения ядерного и другого вида оружия. Как отмечает *Н.Н. Моисеев*, *«...по существу все собственно экологические проблемы сводятся к соизмерению своих действий с возможностями окружающей среды»*.

§ 23. СОЛНЕЧНАЯ РАДИАЦИЯ

■ Под солнечной радиацией мы понимаем весь испускаемый Солнцем поток радиации, который представляет собой электромагнитные колебания различной длины волны. В гигиеническом отношении особый интерес представляет оптическая часть солнечного света, которая зани-

мает диапазон от 280 – 2800 нм. Более длинные волны – радиоволны, более короткие – гамма-лучи, ионизирующее излучение не доходят до поверхности Земли, потому что задерживаются в верхних слоях атмосферы, в частности, в озоновом слое. Озон распространен во всей атмосфере, но на высоте около 35 км формирует озоновый слой.

Интенсивность солнечной радиации зависит в первую очередь, от высоты стояния солнца над горизонтом. Если солнце находится в зените, то путь, который проходят солнечные лучи, будет значительно короче, чем их путь, если солнце находится у горизонта. За счет увеличения пути интенсивность солнечной радиации меняется. Интенсивность солнечной радиации зависит также от того, под каким углом падают солнечные лучи, от этого зависит и освещаемая территория (при увеличении угла падения площадь освещения увеличивается). Таким образом, та же солнечная радиация приходится на большую поверхность, поэтому интенсивность уменьшается. Интенсивность солнечной радиации зависит от массы воздуха, через который проходят солнечные лучи. Интенсивность солнечной радиации в горах будет выше, чем над уровнем моря, потому что слой воздуха, через который проходят солнечные лучи, будет меньше чем над уровнем моря. Особое значение представляет влияние на интенсивность солнечной радиации состояние атмосферы, ее загрязнение. Если атмосфера загрязнена, то интенсивность солнечной радиации снижается (в городе интенсивность солнечной радиации в среднем на 12% меньше чем в сельской местности). Напряжение солнечной радиации имеет суточный и годовой фон, то есть напряжение солнечной радиации меняется в течение суток, и зависит также от времени года. Наибольшая интенсивность солнечной радиации отмечается летом, меньшая – зимой. По своему биологическому действию солнечная радиация неоднородна: оказываясь, каждая длина волны обладает различным действием на организм человека. В связи с этим солнечный спектр условно разделен на 3 участка:

1. *Ультрафиолетовые лучи* (от 280 до 400 нм);
2. *Видимый спектр* (от 400 до 760 нм);
3. *Инфракрасные лучи* (от 760 до 2800 нм).

При суточном и годовом ходе солнечной радиации состав и интенсивность отдельных спектров подвергается изменениям. Наибольшим изменениям подвергаются лучи УФ-спектра. Интенсивность солнечной радиации мы оцениваем исходя из так называемой солнечной постоянной. Солнечная постоянная – это количество солнечной энергии поступающей в единицу времени на единицу площади, расположенную на верхней границе атмосферы под прямым углом к солнечным лучам при среднем расстоянии Земли от Солнца. Эта солнечная постоянная измерена с помощью спутника и равна 1,94 калориям/см² в мин. Проходя через атмосферу солнечные лучи значительно ослабевают – рассеиваются, отражаются, поглощаются. В среднем, при чистой атмосфере на поверхности Земли интенсивность солнечной радиации составляет 1, 43 – 1,53 кало-

рии/см² в минуту. Напряжение солнечных лучей в полдень в мае в Ялте 1,33, в Москве 1,28, в Иркутске 1,30, В Ташкенте 1,34.

■ **Биологическое значение видимого участка спектра.** Видимый участок спектра – специфический раздражитель органа зрения. Свет – необходимое условие работы глаза, самого тонкого и чуткого органа чувств. Свет дает примерно 80% информации о внешнем мире. В этом состоит специфическое действие видимого света, но еще общебиологическое действие видимого света: он стимулирует жизнедеятельность организма, усиливает обмен веществ, улучшает общее самочувствие, влияет на психоэмоциональную сферу, повышает работоспособность.

При недостатке естественного освещения возникают изменения со стороны органа зрения. Быстро наступает утомляемость, снижается работоспособность, увеличивается производственный травматизм. На организм влияет не только освещенность, но и различная цветовая гамма оказывает различное влияние на психоэмоциональное состояние. Наилучшие показатели выполнения работы были получены при желтом и белом освещении. В психофизиологическом отношении цвета действуют противоположно друг другу. Было сформировано 2 группы цветов в связи с этим:

- 1) *теплые тона* – желтый, оранжевый, красный;
- 2) *холодные тона* – голубой, синий, фиолетовый.

Холодные и теплые тона оказывают разное физиологическое действие на организм. Теплые тона увеличивают мускульное напряжение, повышают кровяное давление, учащают ритм дыхания. Холодные тона наоборот, понижают кровяное давление, замедляют ритм сердца и дыхания. Это часто используют на практике: для пациентов с высокой температурой больше всего подходят палаты окрашенные в лиловый цвет, темная охра улучшает самочувствие больных с пониженным давлением. Красный цвет повышает аппетит. Более того, эффективность лекарств можно повысить, изменив цвет таблетки. Больным, страдающим депрессивными расстройствами, давали одно и то же лекарство в таблетках разного цвета: красного, желтого, зеленого. Самые лучшие результаты принесло лечение таблетками желтого цвета. Цвет используется как носитель закодированной информации, например, на производстве для обозначения опасности. Существует общепринятый стандарт на сигнально-опознавательную окраску: зеленый – вода, красный – пар, желтый – газ, оранжевый – кислоты, фиолетовый – щелочи, коричневый – горючие жидкости и масла, синий – воздух, серый – прочее. С гигиенических позиций оценка видимого участка спектра проводится по следующим показателям: отдельно оценивается естественное и отдельно искусственно освещение. Естественное освещение оценивается по 2 группам показателей: физические и светотехнические. К первой группе относится:

1. Световой коэффициент – характеризует собой отношение площади застекленной поверхности окон к площади пола;

2. Угол падения – характеризует собой под каким углом падают лучи. По норме минимальный угол падения должен быть не менее 270;
3. Угол отверстия – характеризует освещенность небесным светом (должен быть не менее 50);
4. Глубина заложения помещения – это отношение расстояния от верхнего края окна до пола к глубине помещения (расстояние от наружной до внутренней стены).

Светотехнические показатели – это показатели определяемые с помощью прибора – люксметра. Измеряется абсолютная и относительная освещаемость. Абсолютная освещаемость – это освещаемость на улице. Коэффициент освещаемости (КЕО) определяется как отношение относительной освещаемости, измеряемой как отношение относительной освещенности (измеренной в помещении) к абсолютной, выраженное в %. Освещенность в помещении измеряется на рабочем месте. Принцип работы люксметра состоит в том что прибор имеет чувствительный фотоэлемент (селеновый – так как селен приближен по чувствительности к глазу человека). Ориентировочную освещаемость на улице можно узнать с помощью светового климата.

Для оценки искусственного освещения помещений имеет значение яркость, отсутствие пульсаций, цветность и другие инфракрасные лучи. Основное биологическое действие этих лучей – тепловое, причем это действие также зависит от длины волны. Короткие лучи несут больше энергии, поэтому они проникают в глубь, оказывают сильный тепловой эффект. Длинноволновый участок оказывает свое тепловое действие на поверхности. Это используется в физиотерапии для прогрева участков лежащих на разной глубине. Для того чтобы оценить измерить инфракрасные лучи существует прибор – актинометр. Измеряется инфракрасная радиация в калориях на см²/мин. Неблагоприятное действие инфракрасных лучей наблюдается в горячих цехах, где они могут приводить к профессиональным заболеваниям – катаракте (помутнение хрусталика). Причиной катаракты является короткие инфракрасные лучи. Мерой профилактики является использование защитных очков, спецодежды.

Особенности воздействия инфракрасных лучей на кожу: возникает ожог – эритема. Она возникает за счет теплового расширения сосудов. Особенность ее состоит в том, что она имеет различные границы, возникает сразу. В связи с действием инфракрасных лучей могут возникать 2 состояния организма: тепловой удар и солнечный удар. Солнечный удар – результат прямого воздействия солнечных лучей на тело человека в основном с поражением ЦНС. Солнечный удар поражает тех, кто проводит много часов подряд под пальцами лучами солнца с непокрытой головой. Происходит разогревание мозговых оболочек. Тепловой удар возникает из-за перегревания организма. Он может случиться с тем, кто выполняет тяжелую физическую работу в жарком помещении или при жаркой погоде. Особенно характерны были тепловые удары у наших военнослужащих в Афганистане. Помимо актинометров для измерения инфракрасной радиации существуют параметры различных видов. В ос-

нове ох действия – поглощение черным телом лучистой энергии. Воспринимающий слой состоит из зачерненных и белых пластинок, которые в зависимости от инфракрасной радиации нагреваются по-разному. Возникает ток на термобатарее и регистрируется интенсивность инфракрасной радиации. Поскольку интенсивность инфракрасной радиации имеет значение в условиях производства, то существуют нормы инфракрасной радиации для горячих цехов, для того чтобы избежать неблагоприятного воздействия на организм человека, например, в трубопрокатном цехе норма 1,26 – 7,56, выплавка чугуна 12,25. Уровни излучения, превышающие, 3,7 считаются значительными и требуют проведения профилактических мероприятий – применение защитных экранов, водные завесы, спецодежда.

■ **Ультрафиолетовые лучи.** Это наиболее активная в биологическом плане часть солнечного спектра. Она неоднородна. В связи с этим различают длинноволновые и коротковолновые УФ-лучи, способствующие загару. При поступлении УФ на кожу в ней образуются 2 группы веществ:

1) *специфические вещества* (к ним относятся витамин Д);

2) *неспецифические вещества* – гистамин, ацетилхолин, аденозин, т.е. это продукты расщепления белков. Загарное или эритемное действие сводится к фотохимическому эффекту – гистамин и другие биологически активные вещества способствуют расширению сосудов. Особенность этой эритемы – она возникает не сразу. Эритема имеет четко ограниченные границы. Ультрафиолетовая эритема всегда приводит к загару более или менее выраженному, в зависимости от количества пигмента в коже. Механизм загарного действия еще недостаточно изучен. Считается, что сначала возникает эритема, выделяются неспецифические вещества типа гистамина, продукты тканевого распада организм переводит в меланин, в результате чего кожа приобретает своеобразный оттенок. Загар, таким образом, является проверкой защитных свойств организма (больной человек не загорает или загорает медленно).

Самый благоприятный загар возникает под воздействием УФ-лучей с длиной волны примерно 320 нм, то есть при воздействии длинноволновой части УФ-спектра. На юге в основном преобладают коротковолновые, а на севере – длинноволновые УФ-лучи. Коротковолновые лучи наиболее подвержены рассеянию. А рассеивание лучше всего происходит в чистой атмосфере и в северном регионе. Таким образом, наиболее полезный загар на севере – он более длительный, более темный. УФ-лучи являются очень мощным фактором профилактики рахита. При недостатке УФ-лучей у детей развивается рахит, у взрослых – остеопороз или остеомалация. Обычно с этим сталкиваются на Крайнем Севере или у групп рабочих работающих под землей. В Ленинградской области с середины ноября до середины февраля практически отсутствует УФ часть спектра, что способствует развитию солнечного голодания. Для профилактики солнечного голодания используется искусственный загар. Световое голодание – это длительное отсутствие УФ спектра. При действии УФ в воздухе происходит образование озона, за концентрацией которого необходим контроль.

УФ-лучи оказывают бактерицидное действие. Оно используется для обеззараживания больших палат, пищевых продуктов, воды. Определяется интенсивность УФ-радиации фотохимическим методом по количеству разложившейся под действием УФ щавелевой кислоты в кварцевых пробирках (обыкновенное стекло УФ-лучи не пропускает). Интенсивность УФ-радиации определяется и прибором ультрафиолетметром. В медицинских целях ультрафиолет измеряется в биодозах.

■ **Космическое излучение.** Первичные космические частицы, представленные в основном высокоэнергетичными протонами и более тяжелыми ядрами, проникают до высоты около 20 км над уровнем моря и образуют при взаимодействии с атмосферой вторичное высокоэнергетическое излучение из мезонов, нейтронов, протонов, электронов, фотонов и т.п. Частицы вторичного космического излучения вызывают ряд взаимодействий с ядрами атомов азота и кислорода, при этом образуются космогенные радионуклиды, воздействию которых подвергается население Земли. К этой категории относится 14 радионуклидов, из них основное значение с точки зрения внутреннего облучения населения имеют ^3H и ^{14}C , внешнего – ^7Be , ^{23}Na , ^{22}Na . Интенсивность космического излучения зависит от активности Солнца, географического расположения объекта и возрастает с высотой. Для средних широт на уровне моря эффективная эквивалентная доза составит примерно 300 мкЗв/год.

§ 24. ИСТОЧНИКИ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКА

В окружающей нас природной среде насчитывается около 300 радионуклидов, как естественных, так и получаемых человеком искусственных. В биосфере Земли содержится более 60 естественных радионуклидов. При работе реакторов образуется около 80, при ядерных взрывах – около 200 радионуклидов.

Радиоактивный фон нашей планеты складывается из четырех основных компонентов:

- Излучения, обусловленного космическими источниками;
- Излучения от рассеянных в окружающей среде первичных радионуклидов;
- Излучения от естественных радионуклидов, поступающих в окружающую среду от производств, не предназначенных непосредственно для их получения;
- Излучения от искусственных радионуклидов, образованных при ядерных взрывах и вследствие поступления отходов от ядерного топливного цикла и других предприятий, использующих искусственные радионуклиды.

Первые два компонента определяют естественный радиационный фон. Третий компонент определяется как техногенно-измененный радиационный фон и формируется, главным образом, за счет выбросов естественных радионуклидов при сжигании органического топлива, поступления

их при внесении минеральных (в первую очередь, фосфорных) удобрений и их содержания в строительных конструкциях и материалах.

§ 25. ИЗЛУЧЕНИЕ ОТ РАССЕЯННЫХ ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ

■ Большинство встречающихся в природе первичных радионуклидов относится к продуктам распада урана, тория и актиния (актиноурана), являющихся родоначальниками 3 радиоактивных семейств.

Семейство урана начинается ^{238}U , завершается стабильным изотопом ^{206}Pb и содержит 17 элементов.

Семейство тория начинается ^{232}Th , завершается ^{208}Pb , содержит 12 элементов.

Семейство актиноурана начинается ^{235}U , завершается ^{207}Pb , содержит 17 элементов.

Кроме того 12 долгоживущих радионуклидов не входит в состав семейств: ^{40}K , ^{50}V , ^{87}Rb , ^{115}In , ^{123}Te , ^{138}La , ^{144}Nd , ^{147}Sm , ^{176}Lu , ^{180}W , ^{187}Re , ^{190}Pt .

Внешнее γ -облучение человека от указанных естественных радионуклидов вне помещений обусловлено их присутствием в компонентах окружающей среды. Основной вклад в дозу внешнего облучения дают γ -радионуклиды рядов ^{228}Ac , ^{214}Pb , ^{214}Bi , а также ^{40}K .

Внутреннее облучение человека обуславливается радионуклидами, поступающими внутрь организма через легкие, желудочно-кишечный тракт. Наиболее значимыми с точки зрения внутреннего облучения являются ^{40}K , ^{14}C , ^{210}Po , ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{220}Rn .

Расчетные значения годовой эффективной эквивалентной дозы от природных источников для районов с нормальным фоном колеблется от 1 до 2,2 мЗв.

§ 26. ТЕХНОГЕННО-ИЗМЕНЕННЫЙ РАДИАЦИОННЫЙ ФОН

■ Техногенный радиационный фон формируется естественными радионуклидами, поступающими в окружающую среду в результате использования в производстве природных материалов, содержащих радионуклиды. Это сжигание органического топлива, внесение минеральных удобрений, применение светосоставов постоянного действия, использование авиации и т.д. Некоторые технологические процессы могут снижать воздействие природного радиационного фона, например, очистка питьевой воды.

Вклад в облучение населения за счет техногенного радиационного фона вносят содержащиеся в стройматериалах радионуклиды.

В помещениях доза внешнего облучения изменяется в зависимости от соотношения двух конкурирующих факторов: экранирования внешнего излучения зданием и интенсивности излучения содержащихся в стройматериалах радионуклидов. При этом основное значение в формировании

ние дозы вносят ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th с продуктами распада, содержащимися в стройматериалах.

Сжигание органического топлива, в первую очередь, каменного угля является источником выбросов в окружающую среду ряда естественных радионуклидов, таких как ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{232}Th , ^{210}Po , ^{210}Pb . Отечественные электростанции, работающие на угле с большой зольностью при степенях очистки 90-99%, дают значительное количество выбросов этих радионуклидов, формирующее эффективную эквивалентную дозу в 5 – 40 раз большую, чем атомные станции аналогичной мощности. Индивидуальная эффективная эквивалентная доза в СССР в 80-х годах от этого источника облучения оценивалась около 2 мкЗв/год.

Уровни облучения от использования фосфорных удобрений формируются за счет содержащихся в них ^{238}U , ^{232}Th , ^{210}Po , ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{40}K и оцениваются эффективной эквивалентной дозой 136 Зв/год.

Еще меньший вклад в формирование суммарной эффективной эквивалентной дозы вносят полеты на самолетах и применение содержащих радионуклиды предметов широкого потребления.

§ 27. ИСКУССТВЕННЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ

Искусственные радионуклиды попадают в окружающую среду при испытаниях ядерного оружия и работе предприятий ядерного топливного цикла.

■ **Взрывы ядерных устройств.** С 1945 по 1980 г. в атмосфере было испытано 423 ядерных устройства. При этом образовалось и было выброшено в окружающую среду огромное количество радионуклидов. Большая доля глобального радиоактивного загрязнения окружающей среды обусловлена выпадениями из стратосферы. Средняя продолжительность тропосферных осадков составляет около 30 суток, а территория загрязнения от них – от нескольких сот до тысяч километров.

Научный комитет ООН по действию атомной радиации (НКДАР) выделяет 21 радионуклид, которые вносят тот или иной вклад в дозу облучения населения. Среди них особо опасными являются 8 радионуклидов. Это (в порядке уменьшения вклада в дозу): ^{14}C , ^{137}Cs , ^{95}Zr , ^{106}Ru , ^{90}Sr , ^{144}Ce , ^3H , ^{131}I .

При этом внутреннее облучение организма формируется за счет ^{14}C , ^{90}Sr , ^{106}Ru , ^{131}I , ^{137}Cs , кроме того, выделяются ^{85}Kr , ^{81}Sr , плутоний и трансплутониевые элементы, поступающие в организм человека с водой, продуктами питания, воздухом.

Внешнее облучение формируется главным образом такими радионуклидами, как ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{106}Ru , ^{103}Ru , ^{140}Ba и ^{137}Cs .

■ **Работа предприятий ядерного топливного цикла.** В ядерный топливный цикл входят предприятия по добыче урановой и ториевой руд, их переработке, получению топлива для атомных станций и оружейного урана и плутония, регенерации отработанного топлива.

В конце 1995 г. в 26 странах эксплуатировалось более 430 ядерных энергетических установок, а доля АЭС в производстве электроэнергии

составляет до 72% во Франции. Всего в мире на АЭС получают сейчас около 17% производимой в мире энергии.

Выбросы естественных радионуклидов при добыче и переработке урановых и ториевых руд представлены в основном газообразным ^{222}Rn из урановых шахт; твердыми отходами руды из хвостохранилищ, где основная активность формируется долгоживущим ^{232}Th с продуктами распада, и урановыми отходами с обогатительных фабрик, содержащих незначительное количество урана, тория и продуктов их распада.

Считается, что в урановый концентрат переходит 14% суммарной активности исходной руды, в которой содержится 90% урана.

Обогащение природного урана ^{235}U и изготовление тепловыделяющих элементов сопровождается незначительными выбросами в окружающую среду. Твердые и жидкие отходы при этом изолируются.

Работа ядерного реактора сопровождается большим числом радионуклидов – продуктов деления и активации.

Количество и качественный состав радионуклидов, поступающих в окружающую среду, зависит от типа реактора и систем очистки воздуха и сточных вод. В окружающую среду удаляются газообразные отходы после очистки, а также частично аэрозольные и жидкие. Твердые отходы хранятся на площадке с последующим захоронением.

§ 28. ПРИНЦИПЫ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

■ Необходимость разработки и внедрения стандартов радиационной защиты была понята еще в начале века.

В 1925 г. в качестве допустимой была предложена 1/10 часть дозы, вызывающей эритему (покраснение) почки за 30 суток. В 1928 г. создана Международная комиссия по радиационной защите (МКРЗ) и опубликованы ее рекомендации. В 1934 г. – первые официальные рекомендации МКРЗ для национальных комитетов, где в качестве толерантной (переносимой) была указана доза внешнего облучения 200 мР (~ 2 мГр) в сутки. По мере накопления данных и расширения масштабов использования ионизирующего излучения термин «толерантная доза» был заменен на «предельно-допустимая доза» (ПДД), а норматив снижен до 50 мР (~ 0,5 мГр)/сутки.

В публикациях МКРЗ № 9 (1966 г.) и № 26 (1977 г.) определены принципы установления ПДД, обоснованы нормативы и обобщен мировой опыт работы с ионизирующим излучением.

В СССР основным документом, определяющим принципы радиационной защиты и устанавливающим нормы облучения были «Нормы радиационной безопасности», принятые национальной комиссией по радиационной защите (НКРЗ) в 1976 г. (НРБ 76/87).

■ Цель радиационной защиты по определению МКРЗ – обеспечить защиту от ионизирующего облучения отдельных лиц, их потомства и человечества в целом и создать условия для необходимой практической деятельности человека.

При этом МКРЗ полагает, что необходимый для защиты человека уровень безопасности будет достаточен для защиты других компонентов биосферы, в частности, флоры и фауны. К этому положению следует относиться с известной долей осторожности, т.к. сведений по радиоэкологии еще сравнительно немного, а дозы облучения многих биообъектов много больше доз, которые получает человек.

В настоящее время НКРЗ сформулированы следующие принципы радиационной безопасности:

1. *Не превышать установленного основного дозового предела.* В качестве основного дозового предела устанавливается:

Предельно-допустимая доза – наибольшее значение индивидуальной эквивалентной дозы за календарный год, при котором равномерное облучение в течение 50 лет не может вызвать в состоянии здоровья работающих изменений, обнаруживаемых современными методами.

Этот предел устанавливается для лиц – профессионально связанных с работой в условиях возможного облучения – лиц категории «А»;

Предел дозы – наибольшее среднее значение индивидуальной эквивалентной дозы за календарный год у критической группы лиц, при котором равномерное облучение в течение 70 лет не может вызвать в состоянии здоровья неблагоприятных изменений, обнаруживаемых современными методами.

Этот предел устанавливается для ограниченной части населения (категория «Б»), т.е. для лиц, которые не работают непосредственно с источниками ионизирующих излучений, но по условиям работы и проживания могут быть подвержены облучению.

Критическая группа, по которой определяется уровень облучения лиц категории «Б», определяется из условия максимально возможного радиационного воздействия.

2. *Исключить всякое необоснованное облучение.*

3. *Снижать дозы облучения до возможно низкого уровня.*

Эти принципы исходят из принятой беспороговой концепции действия ионизирующих излучений. Поэтому любое дополнительное облучение, даже самое небольшое, увеличивает риск образования стохастических эффектов.

Полностью исключить облучение, хотя бы из-за наличия естественного фона, невозможно. Сам же естественный фон неравномерен (0,8 – 3 мЗв). Кроме того, нельзя избежать облучения от диагностических процедур, строительных материалов и т.п.

В связи с тем, что различные органы тела имеют различную чувствительность к ионизирующему излучению, их разбивают на 3 группы критических органов, облучение которых в условиях неравномерного облучения может причинить максимальный ущерб.

С учетом этого можно дать табл. 6 основных дозовых пределов внешнего и внутреннего облучения.

Таблица 6.

Основные дозовые пределы (мЗв/год)

Группа критических органов	ПДД для категории «А» (персонал)	ПДД для категории «Б»
Все тело, гонады, красный костный мозг	5	0,5
Щитовидная железа, молочная железа, мышцы, печень, почки, селезенка, ЖКТ, легкие, хрусталик	15	1,5
Кожный покров, костная ткань, кисти, предплечья, лодыжки, стопы	30	3

МКРЗ для предотвращения нестохастических эффектов установлен предел эквивалентной дозы 0,15 Зв для хрусталика глаза и 0,5 Зв для всех остальных органов. В национальных нормативах для всех этих органов установлена ПДД 150 мЗв.

Для ограничения стохастических эффектов установлена ПДД = 50 мЗв в год исходя из представления о допустимом риске для профессиональных работников 10^{-4} , а для ограниченной части населения $10^{-5} - 10^{-6}$.

Приведенные дозовые пределы не включают доз, получаемых человеком при медицинских процедурах и от естественного фона.

Облучение всего населения (категория «В») не нормируется. По отношению к ней основным принципом радиационной защиты является максимальное ограничение возможного облучения.

■ При нормировании дозовых нагрузок учитываются следующие факторы:

1. *Одновременное действие внешнего и внутреннего облучения.* При этом устанавливаются возможные пути попадания радионуклидов в организм через органы дыхания, желудочно-кишечный тракт и через кожу. Поэтому реальные допустимые нормативы содержания радионуклидов в природных средах всегда ниже нормируемых НРБ, установленных в предположении формирования основных дозовых пределов одним радионуклидом по одному пути поступления.

2. *Физико-химическая форма радионуклидов:* растворимость в воде, размер аэрозольных частиц.

3. *Параметры метаболизма конкретных радионуклидов:* всасывание в кровь, выведение, отложения в критических органах. Например, биологические периоды полувыведения нуклидов из критических тканей и органов колеблется от десятков суток (H, C, Na) до полного усвоения (Sr, P).

По характеру распределения нуклидов в организме можно выделить 3 группы радионуклидов:

- концентрирующихся в костях – остеотропные (Sr, Ra, Pu, Am и др.);
- в печени (Ce, Po, Am и др.);
- и во всем теле (H, Co, Ru, Cr и др.).

§ 29. ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ПРЕДПРИЯТИЙ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЦИКЛА

■ Если исключить взрывы атомных устройств и аварийные ситуации, то основным источником радиационного воздействия на биосферу являются предприятия ядерного топливно-энергетического цикла (ЯТЦ) в штатном режиме.

Известны следующие виды воздействия ЯТЦ на окружающую среду:

1. Расход природных ресурсов (земельные угодья, вода, сырье для основных фондов ЯТЦ).

При добыче и переработке урановой руды отчуждаются значительные земельные площади для размещения пустой породы. На каждый ГВт электроэнергии, получаемой на атомной станции, образуется несколько миллионов тонн пустой породы.

Большая часть земельных угодий, расходуемых при переработке руды, приходится на пруды, куда поступает около 10 тонн на 1 ГВт в год хвостовых растворов.

Расход воды предприятий ЯТЦ обусловлен необходимостью охлаждения технологического оборудования и применения в технологиях. Максимальное водопотребление на единицу электроэнергии приходится на охлаждение оборудования АЭС и предприятия по обогащению изотопов урана.

2. Тепловое загрязнение окружающей среды.

Тепловые сбросы имеют место на всех стадиях ЯТЦ, достигая максимальных значений на АЭС, где мощность тепловых сбросов достигает 2 ГВт на каждый ГВт электрической мощности при 33% КПД. Тепловые сбросы АЭС вносят вклад в антропогенное поступление тепла в биосферу и в приближение к предельно допустимому уровню антропогенных сбросов тепловой энергии, равному в среднем 2 Вт/м². Этот предел рассчитан из принципа недопущения изменения среднегодовой температуры на 1°C.

3. Выброс загрязняющих веществ химической природы в окружающую среду.

Он имеет место на всех стадиях цикла, достигая максимальных размеров на предприятиях по переработке руды со сбросами хвостовых растворов и при сжигании органического топлива на предприятиях цикла и ТЭЦ, обеспечивающих его энергией.

4. Радиоактивное загрязнение окружающей среды.

Важнейшей особенностью ЯТЦ является то, что в процессах производства энергии на АЭС и переработки отработанного топлива образуется большое количество опасных искусственных радионуклидов. Основная часть радиоактивных отходов ЯТЦ имеет высокую удельную активность. Некоторые из радионуклидов имеют значительные (от сотен до миллионов и более лет) периоды полураспада. Это предопределяет необходимость надежной изоляции высокоактивных отходов ЯТЦ от биосферы.

Наиболее значимый вклад в загрязнение биосферы дают долгоживущие радионуклиды С-14, Кг-85, I-129. Это обусловлено высокой миграционной способностью, приводящей к их рассеиванию на большие расстояния за время, меньше периодов полураспада. Из всего количества четырех радионуклидов, поступающих в биосферу с отходами ЯТЦ до 70 – 80% С-14 приходится на стадию переработки облученного топлива на радиохимическом заводе, остальная часть – на АЭС. 99% Кг-85, I-129 выбрасывается при переработке топлива и около 1% – с АЭС.

■ К основным проблемам радиационной безопасности для окружающей среды при работе ЯТЦ в штатном режиме можно отнести следующее:

1. Возможное увеличение отрицательных последствий за счет стохастических эффектов, особенно в зонах влияния действующих АЭС.

2. Влияние инертных газов на биоту. Известно, что радиоактивный йод концентрируется в щитовидной железе, другие изотопы, еще недавно считавшиеся безвредными, накапливаются в клеточных структурах – хлоропластах, митохондриях, клеточных мембранах. Их влияние на метаболизм еще не до конца изучено.

3. Нерегулируемый выброс радионуклида криптона-85 в атмосферу от АЭС и предприятий по переработке отработанных ТВЭЛ. Уже сейчас ясна его роль в изменении электропроводности атмосферы и формировании парникового эффекта. Уже сейчас его содержание в миллионы раз превышает содержание в доядерную эпоху и прибывает 5% ежегодно.

4. Накопление в пищевых цепях радиоактивность – излучения Н. Он связывается протоплазмой клеток и тысячекратно накапливается в пищевых цепях. При распаде он превращается в гелий и испускает сильное β -излучение, вызывая генетические нарушения. Содержание трития в хвое деревьев в районе дислокации АЭС (США) в десятки раз выше, чем в удалении от них.

5. Накопление углерода-14 в биосфере. Предполагается, что оно ведет к резкому замедлению роста деревьев. Такое замедление роста фиксируется на Земле повсеместно и может быть связано с 25% увеличением содержания С в атмосфере по сравнению с доядерной эпохой.

6. Образование трансурановых элементов. Особенно опасным является Pu-239.

III. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ К РАЗДЕЛАМ «СВЕТОВЫЕ КВАНТЫ. АТОМНАЯ ФИЗИКА. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ»

Уровни сложности: • базовый ▲ достаточный ■ высокий

- 1. Гелий-неоновый лазер непрерывно излучает свет с длиной волны $\lambda = 630$ нм. Сколько фотонов излучает лазер за одну секунду, если его мощность $P = 2,0$ мВт.

Решение.

$$N = \frac{P \tau}{hc} = 6,3 \cdot 10^{15}, \text{ где } \tau = 1 \text{ с.}$$

- 2. Энергия каждого фотона в пучке монохроматического излучения $W_0 = 4,4 \cdot 10^{-19}$ Дж. Какова длина волны λ этого излучения в воде?

Решение.

$$\lambda = \frac{hc}{nW_0} = 0,34 \text{ мкм}, \text{ где } n - \text{показатель преломления воды.}$$

- ▲ 3. Под каким напряжением U работает рентгеновская трубка, если самое «жесткое» излучение в ее спектре имеет длину волны $\lambda_{\min} = 3,0 \cdot 10^{-11}$ м?

Решение.

Энергия излучаемого фотона $h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ не может превышать полученной электроном при разгоне кинетической энергии $W_k = eU$. Поэтому $\frac{hc}{\lambda_{\min}} = eU$, откуда $U = \frac{hc}{e\lambda_{\min}} = 41$ кВ.

- ▲ 4. Для калия красная граница фотоэффекта $\lambda_{\max} = 0,62$ мкм. Какую максимальную скорость v могут иметь фотоэлектроны, вылетающие при облучении калия фиолетовым светом с длиной волны $\lambda = 0,42$ мкм?

Решение.

Работа выхода совпадает с минимальной энергией фотона, вызывающей фотоэффект: $A = \frac{hc}{\lambda_{\max}}$. Тогда из уравнения Эйнштейна для фотоэффекта

$$\text{следует: } v = \sqrt{\frac{2hc(\lambda_{\max} - \lambda)}{m\lambda\lambda_{\max}}} = 5,8 \cdot 10^5 \text{ м/с.}$$

- ▲ 5. Минимальная частота ν_0 света, вырывающего электроны с поверхности металлического катода, равна $6,0 \cdot$

10^{14} Гц. При каких частотах падающего света вылетевшие электроны полностью задерживаются напряжением $U = 3,0$ В?

Решение.

$$\nu \leq \nu_0 + \frac{eU}{h} = 1,3 \cdot 10^{15} \text{ Гц.}$$

- ▲ 6. При освещении поверхности некоторого металла фиолетовым светом с длиной волны $\lambda_1 = 0,40$ мкм выбитые светом электроны задерживаются запирающим напряжением $U_1 = 2,0$ В. Чему равно запирающее напряжение U_2 при освещении того же металла красным светом с длиной волны $\lambda_2 = 0,77$ мкм?

Решение.

Запирающее напряжение связано с максимальной кинетической энергией фотоэлектронов соотношением $W_k = eU$. Согласно уравнению Эйнштейна для фотоэффекта

$$\frac{hc}{\lambda_1} = A + eU_1, \quad \frac{hc}{\lambda_2} = A + eU_2.$$

$$\text{Отсюда } U_2 = U_1 + \frac{hc}{e} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) = 0,51 \text{ В.}$$

- 7. На поверхность нормально падает свет. Интенсивность излучения равна I . Найдите давление p света на поверхность в двух случаях: когда поверхность черная и когда она зеркальная.

Решение.

При падении на черную поверхность фотон с энергией W_0 поглощается, передавая поверхности импульс $\frac{W_0}{c}$. За время Δt поверхность площадью

S поглотит излучение с энергией $W = IS\Delta t$, содержащее $\frac{W}{W_0}$ фотонов.

Переданный поверхности импульс $\frac{W}{W_0} \cdot \frac{W_0}{c} = \frac{IS\Delta t}{c}$; с другой стороны, он

равен $F\Delta t = p_{\text{ч}}S\Delta t$. Отсюда $p_{\text{ч}} = I/c$. При отражении от зеркальной поверхности фотоны изменяют свой импульс на противоположный. При этом каждый фотон передает поверхности импульс $2W_0/c$; таким образом, давление света на зеркальную поверхность вдвое больше, чем на черную. Заметим, что классическая теория электромагнитного поля предсказывает ту же величину светового давления, что и квантовая теория.

- 8. Свет падает на зеркальную поверхность. Найдите давление p света на эту поверхность, если интенсивность излучения равна I , а угол падения α .

Решение.

Переданный поверхности каждым фотоном импульс $\Delta P = \frac{2W_0 \cos \alpha}{c}$,

поэтому: $p = \frac{2I \cos^2 \alpha}{c}$.

▲ 9. Может ли один гамма-квант превратиться в вакууме в пару электрон-позитрон?

Решение.

Рассмотрим описанный в задаче процесс в системе отсчета центра масс электрона и позитрона, воспользовавшись законами сохранения энергии и импульса, следовательно, не может.

▲ 10. Какова должна быть частота ν излучения, чтобы в процессе взаимодействия с веществом это излучение могло вызвать рождение электрон-позитронных пар?

Решение.

В отличие от процесса, описанного в предыдущей задаче, данный процесс возможен благодаря передаче импульса веществу. Энергия каждого кванта должна при этом превышать энергию покоя пары электрон-позитрон. $\nu > 2,5 \cdot 10^{20}$ Гц.

▲ 11. Может ли свободный электрон поглотить фотон, ничего при этом не излучив?

Решение.

В системе отсчета, в которой электрон после взаимодействия покоится, процесс выглядел бы так: движущийся электрон поглощает фотон и останавливается. Это противоречит закону сохранения энергии. Однако возможен процесс, при котором электрон, поглотив фотон, испускает другой фотон.

■ 12. *Эффект Комптона.* При взаимодействии с веществом рентгеновское излучение с длиной волны λ рассеивается. При этом длина волны излучения, отклонившегося от первоначального направления распространения на угол θ , увеличивается на $\Delta\lambda$. Выразите величину $\Delta\lambda$ через угол θ , рассматривая рассеяние как результат столкновений рентгеновских фотонов с неподвижными свободными электронами. Учтите, что вследствие таких столкновений электроны приобретают скорости, сравнимые со скоростью света.

Решение.

Воспользуемся законами сохранения энергии и импульса: $mc^2 + W_0 = W + W_e$, $p_0 = p + p_e$. Здесь p_0 и p – начальный и конечный импульсы фотона,

p_e – импульс, переданный электрону; $W_0 = \frac{hc}{\lambda}$ и $W = \frac{hc}{\lambda + \Delta\lambda}$ –

энергии фотона до и после рассеяния; $W_e = c\sqrt{m^2c^2 + p_e^2}$ – конечная энергия электрона, mc^2 – его энергия покоя. Применяя теорему косину-

сов, получаем $p_e^2 = p_0^2 + p^2 - 2p_0 p \cos \theta$. Подставляя это выражение в формулу закона сохранения энергии и учитывая, что $p_0 = \frac{h}{\lambda}$,

$p = \frac{h}{\lambda + \Delta\lambda}$, находим $\Delta\lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos \theta) = \frac{2h}{mc} \sin^2 \frac{\theta}{2}$. Заметим, что значение $\Delta\lambda$ не зависит от длины волны падающего рентгеновского излучения.

- **13.** Длина волны рентгеновского излучения после комптоновского рассеяния (см. задачу 12) увеличилась с $\lambda_1 = 2,0$ пм до $\lambda_2 = 2,4$ пм. Какова кинетическая энергия W_k вылетающих электронов (выразите ее в МэВ) и их скорость v ? Найдите также угол рассеяния θ рентгеновского излучения и угол α между направлением вылета электронов и направлением падающего излучения.

Решение.

Из полученного в задаче 12 результата следует:

$$\theta = \arccos \left(1 - \frac{mc(\lambda_2 - \lambda_1)}{h} \right) = 33^\circ.$$

Кинетическая энергия электрона равна энергии, потерянной фотоном:

$$W_k = \frac{hc}{\lambda_1} - \frac{hc}{\lambda_2} = 1,66 \cdot 10^{-14} \text{ Дж} = 0,1 \text{ МэВ. Полная энергия электрона } W =$$

$$W_k + mc^2 = 0,61 \text{ МэВ. Из соотношения } W = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \text{ находим}$$

$$v = c \sqrt{1 - \left(\frac{mc^2}{W} \right)^2} = 0,55c = 1,6 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

Применяя теорему синусов к треугольнику импульсов, получаем

$$\sin \alpha = \frac{p \sin \theta}{p_e} = \frac{hc^2 \sin \theta}{\lambda_2 v W} = 0,85 \text{ и } \alpha = 58^\circ.$$

- **14.** Размещенная в вакууме биметаллическая пластина изготовлена из двух отполированных пластин: серебряной и литиевой. На поверхность серебра падает нормально пучок света с длиной волны $\lambda = 0,40$ мкм. Во сколько раз изменится действующая на пластину сила, если развернуть пластину на 180° , литиевой поверхностью к свету? Считайте, что при фотоэффекте электрон выбивается в среднем одним из 100 падающих фото-

нов и вылетает нормально к поверхности с максимальной возможной скоростью.

Решение.

Пусть за время t на поверхность пластины попадает N фотонов; импульс каждого из них $p_0 = \frac{h}{\lambda}$. От поверхности серебра все фотоны зеркально

отражаются, не вызывая фотоэффекта. При этом на пластину действует сила $F_1 = \frac{2N}{t} \cdot \frac{h}{\lambda}$. После разворота пластины возникает фотоэффект, фотоэлектроны вылетают со скоростью $v = \sqrt{\frac{2}{m} \left(\frac{hc}{\lambda} - A \right)}$, где A — работа

выхода для лития. Действующая на пластину сила увеличивается за счет передачи импульса от фотоэлектронов к пластине: $F_2 = F_1 +$

$0,01Nmv/t$. Отсюда $\frac{F_2}{F_1} = 1 + \frac{\lambda}{200h} \sqrt{2m \left(\frac{hc}{\lambda} - A \right)} = 2,4$. Мы пренебрегаем

уменьшением силы светового давления (на 1/200 часть) из-за поглощения части фотонов литием.

- ▲ 15. Движущийся мезон распадается на два фотона, которые летят в противоположных направлениях. Какова скорость v распавшегося мезона, если энергии фотонов W_1 и W_2 ?

Решение.

Импульсы всех трех частиц направлены вдоль одной прямой. Импульсы фотонов W_1/c и W_2/c ; следовательно, импульс мезона $p = |W_1 - W_2|/c$. Энергия мезона $W = W_1 + W_2$. Из формул для энергии и импульса реля-

тивистской частицы находим $v = \frac{pc^2}{W} = c \frac{|W_1 - W_2|}{W_1 + W_2}$.

- 16. Движущаяся нейтральная частица распалась на два фотона. Какова была скорость v этой частицы, если фотоны летят под углами θ_1 и θ_2 к направлению движения частицы?

Решение.

Обозначим частицы фотонов v_1 и v_2 , тогда их импульсы $p_1 = \frac{hv_1}{c}$ и

$p_2 = \frac{hv_2}{c}$. Энергия распавшейся частицы $W = hv_1 + hv_2 = c(p_1 + p_2)$, ее

импульс $p = p_1 + p_2$. Воспользовавшись теоремой синусов, получаем

$p = p_1 \frac{\sin(\theta_1 + \theta_2)}{\sin \theta_2}$, $p_2 = p_1 \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}$. Отсюда $v = \frac{pc^2}{W} = c \frac{\sin(\theta_1 + \theta_2)}{\sin \theta_1 + \sin \theta_2}$.

Если $\sin \theta_1 = \sin \theta_2 = 0$, ответить на поставленный в задаче вопрос нельзя.

- 17. Нейтральная частица, движущаяся со скоростью v , распадается на два фотона. Каков минимальный угол θ_{\min} разлета этих фотонов?

Решение.

Полученный в задаче 16 результат можно записать в виде

$$v = \frac{c \cos\left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\theta_1 - \theta_2}{2}\right)}. \text{ Отсюда } \cos \frac{\theta}{2} = \frac{v}{c} \cos\left(\frac{\theta_1 - \theta_2}{2}\right). \text{ Здесь } \theta = \theta_1 + \theta_2 -$$

угол разлета фотонов. Минимальное значение θ достигается при $\theta_1 = \theta_2$, т. е. при симметричном разлете двух фотонов (в этом случае фотоны имеют одинаковую частоту).

- ▲ 18. Покоящийся π -мезон распадается на мюон и нейтрино. Какова скорость v образовавшегося мюона? Масса покоя π -мезона $m_1 = 273 m_e$, а масса покоя мюона $m_2 = 207 m_e$, где m_e — масса покоя электрона. Считайте, что нейтрино имеет нулевую массу покоя.

Решение.

$$v = \frac{m_1^2 - m_2^2}{m_1^2 + m_2^2} c = 0,27c.$$

- ▲ 19. Найдите: а) де-бройлевскую длину волны λ_1 протона, ускоренного разностью потенциалов $U = 3,0$ МВ; б) де-бройлевскую длину волны λ_2 электрона, ускоренного той же разностью потенциалов.

Решение.

А) Следует учесть, что скорость электрона сравнима со скоростью света, поэтому: $\lambda_1 = 1,7 \cdot 10^{-14}$ м; б) $\lambda_2 = 3,6 \cdot 10^{-13}$ м.

- 20. Пучок электронов, пройдя через узкую щель, дал на фотопластинке такую же дифракционную картину, как монокроматическое излучение с длиной волны $\lambda = 55$ нм. Чему равна скорость v электронов?

Решение.

$$v = \frac{h}{m\lambda} = 13 \text{ км/с}.$$

- 21. Рассматривая электрон как классическую частицу, движущуюся в атоме водорода по круговой орбите вокруг неподвижного протона, выразите скорость v электрона и его механическую энергию W через радиус r орбиты.

Решение.

Сила Кулона $F_K = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$ сообщает электрону центростремительное

ускорение $\frac{v^2}{r}$. Из второго закона Ньютона следует: $v = \frac{e}{\sqrt{4\pi\epsilon_0 m r}}$. От-

сюда находим энергию движущегося вокруг ядра электрона:

$$W = \frac{mv^2}{2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r}. \text{ Она отрицательна, как и должно быть для}$$

связанной частицы, которая не может уйти на бесконечность (напомним, что нулевой уровень потенциальной энергии здесь, как обычно, соответствует бесконечно большому расстоянию между частицами).

- **22.** Когда атом водорода находится в основном состоянии, де-бройлевская длина волны электрона как раз совпадает с длиной его «траектории». Пользуясь полученными в задаче 21 результатами, найдите радиус r «орбиты» электрона, вычислите также энергию ионизации W_i , т. е. энергию, которую необходимо сообщить электрону, чтобы он покинул атом. Величину W_i выразите в электрон-вольтах.

Решение.

Де-бройлевская длина волны электрона $\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{e} \sqrt{\frac{4\pi\epsilon_0 r}{m}}$. Из условия

$$\lambda = 2\pi r \text{ следует, что } r = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi e^2 m} = 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ м. Для ионизации атома необ-}$$

$$\text{ходима энергия: } W_i = |W| = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r} = 13,6 \text{ Эв.}$$

- **23.** Каков период T полураспада изотопа, если сутки распадается в среднем 900 атомов из 1000? 750 атомов из 1000? 1 атом из 1000?

Решение.

Из закона радиоактивного распада следует, что $T = \frac{t}{\log_2 \left(\frac{N_0}{N_0 - \Delta N} \right)}$, где

$t = 1$ сут, а ΔN – число распавшихся атомов.

- **24.** В образцах урановой руды всегда содержится некоторое количество атомов тория-234, образовавшихся в результате α -распада урана-238 (период полураспада $T_U = 4,5 \cdot 10^9$ лет). Торий также радиоактивен (период полураспада $T_{Th} = 24$ сут). Сколько атомов тория содержится в образце урановой ру-

ды, в котором находится $m = 0,5$ г урана-238?

Решение.

Число распадающихся за время $\tau \ll T$ радиоактивных атомов

$$\Delta N = N_0 - N_0 \cdot 2^{-\frac{\tau}{T}} = \frac{N_0 \tau \ln 2}{T}. \text{ В образце руды одновременно идут два}$$

процесса: распад урана, увеличивающий число атомов тория, и распад образовавшихся атомов тория. В результате число атомов тория: остается практически неизменным. Приравняв количества распадов урана и

тория, происшедших за одно и то же время, получаем $\frac{N_{\text{Th}}}{T_{\text{Th}}} = \frac{N_{\text{U}}}{T_{\text{U}}}$. По-

скольку $N_{\text{U}} = \frac{m N_{\text{A}}}{M_{\text{U}}}$, находим $N_{\text{Th}} = \frac{N_{\text{A}} m T_{\text{Th}}}{M T_{\text{U}}} = 1,8 \cdot 10^{10}$.

- 25. Вычислите энергию связи $E_{\text{св}}$ и удельную энергию связи $E_{\text{св}}/A$ для ядер ${}^7_3\text{Li}$ и ${}^{27}_{13}\text{Al}$.

Решение.

Для атомного ядра массой $m_{\text{я}}$ дефект масс $\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_{\text{я}}$, где Z – атомный номер элемента, $N = A - Z$ – число нейтронов в ядре, A – массовое число. Считая $m_{\text{я}} = m_{\text{ат}} - Zm_e$, находим $\Delta m = Z(m_p + m_e) + Nm_n - m_{\text{ат}} = Zm_{\text{H}} + Nm_n - m_{\text{ат}}$. Здесь $m_{\text{ат}}$ – масса нейтрального атома данного типа, $m_{\text{H}} = m_p + m_e$ – масса атома водорода ${}^1_1\text{H}$. Энергия связи $E_{\text{св}} = \Delta m \cdot$

c^2 . Для ядра ${}^7_3\text{Li}$ получаем $\Delta m = 3m_{\text{H}} + 4m_n - m_{\text{Li}} = 0,0421$ а.е.м.; $E_{\text{св}} = 0,0421$ а.е.м. $\cdot 931,5$ МэВ/а.е.м. = 39,2 МэВ; $E_{\text{св}}/A = 5,6$ МэВ/нуклон. Для ядра ${}^{27}_{13}\text{Al}$ дефект масс 0,242 а.е.м., $E_{\text{св}} = 225$ МэВ, $E_{\text{св}}/A = 8,3$ МэВ/нуклон.

- 26. В результате нескольких α - и β -распадов радиоактивный атом ${}^{232}_{90}\text{Th}$ превратился в атом ${}^{212}_{83}\text{Bi}$. Сколько произошло α -распадов? β -распадов?

Решение.

При β -распаде массовое число ядра не изменяется, а при α -распаде оно уменьшается на 4. Следовательно, в данном случае произошло пять α -распадов. При каждом из них атомный номер ядра уменьшался на 2, т. е. в результате одних только α -распадов получилось бы ядро с атомным номером 80, а не 83. Значит, произошло и три β -распада (при каждом из них атомный номер увеличивается на 1).

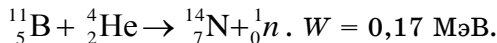
- ▲ 27. Какая энергия выделяется при синтезе одного ядра ${}^4_2\text{He}$ из дейтерия и трития?

Решение.

В ядерной реакции ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0n$ масса покоя образовавшихся частиц меньше массы покоя частиц, вступивших в реакцию на $\Delta m = 0,0189$ а.е.м. Следовательно, при реакции выделяется энергия $W_0 = \Delta m \cdot c^2 = 0,0189$ а.е.м. $\cdot 931,5$ МэВ/а.е.м. = 17,6 МэВ.

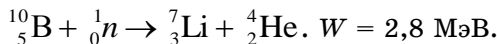
- **28.** При бомбардировке с помощью α -частиц бора ${}^{11}_5\text{B}$ наблюдается вылет нейтронов. Напишите уравнение ядерной реакции, приводящей к вылету одного нейтрона. Каков энергетический выход W этой реакции?

Решение.



- **29.** При бомбардировке нейтронами изотопа бора ${}^{10}_5\text{B}$ образуются α -частицы. Напишите уравнение этой ядерной реакции и найдите ее энергетический выход W .

Решение.



- ▲ **30.** Найдите минимальную энергию W и частоту ν гамма-кванта, способного «разбить» ядро дейтерия на протон и нейтрон.

Решение.

$W = \Delta m \cdot c^2$, где $\Delta m = 2,4 \cdot 10^{-3}$ а.е.м. – дефект масс ядра дейтерия. Мы не учитываем малой по сравнению с W кинетической энергии освободившихся нуклонов.

- **31.** Найдите минимальную кинетическую энергию W_k протона, способного «разбить» ядро дейтерия на протон и нейтрон.

Решение.

Поскольку масса налетающей на ядро частицы сравнима с массой самого ядра, следует учитывать кинетическую энергию всех продуктов данной реакции (в отличие от реакции, рассмотренной в задаче 30). Минималь-

ное значение $W_k = \frac{m_p v_0^2}{2}$ (v_0 – скорость налетающего протона) соответ-

ствует случаю, когда после «разрушения» ядра все три нуклона движутся с одинаковой скоростью v . Считая $m_p = m_n$ получаем из закона сохранения импульса $v = v_0/3$. Тогда

$$W_k = \Delta m \cdot c^2 + \frac{3m_p (v_0/3)^2}{2} = \Delta m \cdot c^2 + \frac{W_k}{3}.$$

Отсюда $W_k = \frac{3\Delta m \cdot c^2}{2} = 3,3 \text{ МэВ}$. Как видно, энергия протона должна существенно превышать энергию гамма-кванта. Заметим, что W_k намно-

го меньше энергии покоя частиц; следовательно, $v_0 \ll c$ и можно пользоваться формулами классической механики.

■ **32.** Какую минимальную кинетическую энергию W_0 должна иметь α -частица для осуществления ядерной реакции ${}^7_3\text{Li} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + {}^1_0n$?

Решение.

В результате реакции масса покоя частиц увеличивается на $\Delta m = 0,003$ а.е.м. При этом поглощается энергия $W_1 = \Delta m \cdot c^2 = 2,8$ МэВ. Однако α -частица должна иметь энергию $W_0 > W_1$, чтобы сообщить кинетическую энергию W_2 ядру бора и нейтрону. Минимальное значение W_2 соответствует случаю, когда эти частицы движутся с одинаковой скоростью $v = 4v_0/11$. Тогда $W_2 = 4W_0/11$, согласно закону сохранения энергии $W_0 = W_1 + 4W_0/11$, откуда $W_0 = 11W_1/7 = 4,4$ МэВ.

■ **33.** Мишень из ${}^6_3\text{Li}$ подвергают бомбардировке нейтронами. Какова кинетическая энергия W_n этих нейтронов, если в направлении движения нейтронов вылетают α -частицы с кинетической энергией $W_\alpha = 3,0$ МэВ? Энергией испускаемых γ -квантов можно пренебречь.

Решение.

В реакции ${}^6_3\text{Li} + {}^1_0n \rightarrow {}^3_1\text{H} + {}^4_2\text{He}$ масса покоя частиц уменьшается на $\Delta m = 5,14 \cdot 10^{-3}$ а.е.м., т. е. выделяется энергия $W = \Delta m \cdot c^2 = 4,8$ МэВ. Движение частиц нерелятивистское; если не учитывать энергию, уносимую γ -излучением, закон сохранения энергии принимает вид $W_n + W = W_T + W_\alpha$, где W_T — кинетическая энергия ядра трития. Используя также закон сохранения импульса, приходим к системе уравнений:

$$\begin{cases} \frac{m_n v_n^2}{2} - \frac{m_T v_T^2}{2} = W_\alpha - W, \\ m_n v_n = m_T v_T + m_\alpha v_\alpha \end{cases}.$$

Обозначив $v_n/v_\alpha = x$ и принимая $m_T = 3m_n > m_\alpha = 4m_n$, получаем уравнение $x^2 + 4x - 14 + 6W/W_\alpha = 0$. Подставив численные значения W и W_α , находим положительный корень этого уравнения $x = 0,90$. Следовательно, $W_n = 0,61$ МэВ.

▲ **34.** Атомная электростанция мощностью $P = 1000$ МВт имеет КПД 20%. Какова масса m расходуемого за сутки урана-235? Считайте, что при каждом делении ядра урана выделяется энергия $W_0 = 200$ МэВ.

Решение.

Пусть за время $\tau = 1$ сут произошло N актов деления. Полезная (электрическая) мощность составляет $P = \eta N W_0 / \tau$, (здесь $\eta = 0,2$). Отсюда

$$N = \frac{P\tau}{\eta W_0}; \text{ масса израсходованного урана } m = \frac{MN}{N_A} = \frac{MP\tau}{\eta N_A W_0} = 5,3 \text{ кг}.$$

- **35.** Радиус орбиты электрона в атоме водорода равен $0,5 \cdot 10^{-10}$ м. Найти частоту обращения электрона вокруг ядра.

Решение.

Между ядром и электроном действует сила Кулона:

$$F_K = k \frac{q_{\text{я}} q_{\text{е}}}{r^2}.$$

По второму закону Ньютона, эта сила является центростремительной:

$$F = ma = \frac{mV^2}{r}, \quad k \frac{q_{\text{я}} q_{\text{е}}}{r^2} = \frac{mV^2}{r}.$$

У водорода $q_{\text{я}} = q_{\text{е}}$, следовательно:

$$k \frac{q_{\text{е}}^2}{r^2} = \frac{mV^2}{r},$$

$$V = 2\pi v r, \quad V^2 = 4\pi^2 v^2 r^2,$$

$$k \frac{q_{\text{е}}^2}{r^2} = \frac{4m\pi^2 v^2 r^2}{r}.$$

$$\text{Отсюда, } v^2 = \frac{k \cdot q_{\text{е}}^2}{4m \cdot \pi^2 \cdot r^3}, \quad v = \sqrt{\frac{k \cdot q_{\text{е}}^2}{4m \cdot \pi^2 \cdot r^3}} = 7,14 \cdot 10^{15} \text{ Гц}.$$

- **36.** Атом водорода излучает фотон с длиной волны 486 нм. Насколько изменяется при этом энергия атома?

Решение.

Согласно постулату Бора $h\nu_{nm} = E_n - E_m = \Delta E$. Отсюда $v = \frac{c}{\lambda}$; $\Delta E = \frac{hc}{\lambda}$,

где h – постоянная Планка, c – скорость света.

$$\Delta E = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \frac{\text{Дж}}{\text{с}} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{486 \cdot 10^{-9} \text{ м}} \approx 4,1 \cdot 10^{-19} \text{ Дж},$$

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж},$$

$$\Delta E = \frac{4,1 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}} = 2,6 \text{ эВ}.$$

- **37.** Электрон в невозбужденном атоме водорода получил энергию 12 эВ. На какой уровень он перешел? Сколько линий можно обнаружить в спектре излучения при переходе электрона на более низкие энергетические уровни? Энергия основного состояния – 13,5 эВ.

Решение.

В некотором состоянии k электрон будет иметь энергию: $E_k = \frac{E_1}{k^2}$, $E_k = E_1 + E$. Тогда, $\frac{E_1}{k^2} = E_1 + E$; $k^2 = \frac{E_1}{E_1 + E}$. Отсюда нахо-

дим: $k = \sqrt{\frac{E_1}{E_1 + E}} = \sqrt{\frac{-13,5 \text{ эВ}}{-13,5 \text{ эВ} + 12 \text{ эВ}}} = 3$. Электрон перешел с первого уровня на третий. При этом возможно три обратных перехода: $3 \rightarrow 2$; $3 \rightarrow 1$; $2 \rightarrow 1$. Поэтому в спектре излучения можно обнаружить три линии.

▲

38. Цинковую пластинку с работой выхода $6,4 \cdot 10^{-19}$ Дж освещают монохроматическим светом с длиной волны, соответствующей переходу электрона в атоме водорода между уровнями с энергией $W_1 = -13,55$ эВ и $W_k = -0,33$ эВ. Определить, на какое максимальное расстояние от пластинки может удалиться фотоэлектрон, если вне ее имеется задерживающееся однородное электрическое поле напряженностью 10 В/см.

Решение.

Согласно уравнению Эйнштейна для фотоэффекта: $h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mV^2}{2}$; где

$\frac{mV^2}{2} = eU$. С другой стороны, $h\nu = W_k - W_1$, $U = Ed$. Объединяя эти

уравнения, получим: $W_k - W_1 = A_{\text{вых}} + eEd$, $d = \frac{W_k - W_1 - A_{\text{вых}}}{eE}$. Переве-

дя все величины в систему СИ, подставив числовые значения, получим: $d \approx 9,22 \cdot 10^{-3} \text{ м} \approx 9,22 \text{ мм}$.

■

39. Протон, летящий горизонтально со скоростью $4,6 \cdot 10^4$ м/с, сталкивается с неподвижным свободным ядром гелия и после удара отскакивает назад со скоростью в два раза меньшей. Атом гелия переходит в возбужденное состояние. Найти длину волны, которую излучает атом гелия, возвращаясь в первоначальное состояние.

Решение.

При взаимодействии протона с атомом гелия происходит возбуждение атома гелия и кроме этого гелий получает импульс и начинает двигаться со скоростью U . Запишем для этих тел законы сохранения энергии и импульса, $m_p \vec{V}_1 = m_p \vec{V}_2 + M\vec{U}$ – закон сохранения импульса в векторном

виде. Перейдем к записи в проекции: $m_p V_1 = MU - m_p V_2 = MU - \frac{mV_1}{2}$,

$$\frac{mV_1^2}{2} = \frac{mV_2^2}{2} + \frac{MU^2}{2} + E.$$

Отсюда следует,

$$\begin{cases} mV_1 = MU - \frac{mV_1}{2} \\ \frac{mV_1^2}{2} = \frac{m}{2} \left(\frac{V}{2} \right)^2 + \frac{MU^2}{2} + E \end{cases}; \quad V_1 = V. \quad \begin{cases} \frac{3mV}{2} = MU \\ \frac{mV^2}{2} = \frac{mV^2}{8} + \frac{MU^2}{2} + E \end{cases};$$

$$\begin{cases} \frac{3mV}{2} = MU \\ \frac{3mV^2}{8} = \frac{MU^2}{2} + E \end{cases}; \quad \begin{cases} U = \frac{3mV}{2M} \\ E = \frac{3mV^2}{8} - \frac{MU^2}{2} \end{cases}; \quad E = \frac{3mV^2}{8} \cdot \frac{M-3m}{M}. \text{ Воз-}$$

вращаясь в основное состояние, атом гелия излучает квант света:

$$h\nu = E = \frac{hc}{\lambda}, \quad \frac{hc}{\lambda} = \frac{3mV^2}{8} \cdot \frac{M-3m}{M}. \quad \text{Найдем длину волны:}$$

$$\lambda = \frac{8hcM}{3mV^2(M-3m)} = 6 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

- **40.** Активность некоторого химического элемента уменьшилась в 4 раза в течении 8 суток. Чему равен период полураспада этого элемента (в сутках)?

Решение.

Запишем закон радиоактивного распада:

$$N = N_0 \cdot 2^{\frac{-t}{T}}; \quad N = 4N_0 \cdot 2^{\frac{-t}{T}}; \quad 2^{\frac{-t}{T}} = \frac{1}{4} = 2^{-2}; \quad \frac{t}{T} = 2; \quad \text{Таким образом, } T = 4 \text{ суток.}$$

- **41.** Радиоактивный натрий $^{24}_{11}\text{Na}$ распадается с периодом полураспада 14,8 ч. Найти количество атомов, распавшихся в 1 мг данного вещества за 10 ч.

Решение.

$$\Delta N = N_0 - N; \quad N = N_0 \cdot 2^{\frac{-t}{T}}; \quad \Delta N = N_0 - N_0 \cdot 2^{\frac{-t}{T}}; \quad \Delta N = N_0 \cdot \left(1 - 2^{\frac{-t}{T}} \right), \quad N_0$$

– начальное число атомов.

$$\text{Тогда, } N_0 = N_A \frac{m}{\mu}; \quad \Delta N = N_A \frac{m}{\mu} \left(1 - 2^{\frac{-t}{T}} \right) = 9,3 \cdot 10^{18}.$$

- ▲ **42.** На атомной электростанции используется уран с атомной массой 238 г/моль. Тепловая мощность станции 1

МВт, а КПД 20%. Сколько граммов урана расщепляется на станции за сутки, если дефект массы при делении одного ядра урана $4 \cdot 10^{-28}$ кг?

Решение.

За сутки на станции выделяется энергия W : $W_{\text{затр}} = NE_1 = \frac{m}{\mu} N_A \Delta mc^2$.

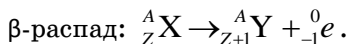
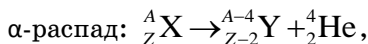
$$\eta = \frac{W_{\text{полезн}}}{W_{\text{затр}}}, \quad W_{\text{полезн}} = Pt, \quad \eta = \frac{\mu Pt}{m N_A \Delta mc^2};$$

$$m = \frac{\mu Pt}{m N_A \Delta mc^2} \approx 4,76 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \approx 4,76 \text{ г}.$$

▲ 43. В результате серии последовательных радиоактивных распадов изотопа урана ${}_{92}^{238}\text{U}$ превращается в стабильный изотоп свинца ${}_{82}^{206}\text{Pb}$. Сколько α и β распадов при этом происходило?

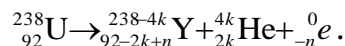
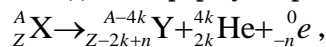
Решение.

Запишем правила α и β распадов:



Пусть с ураном происходит « k » α -распадов и « n » β -распадов.

Объединим формулы распадов в одну.



Составим уравнения для масс и для зарядов.

$$\begin{cases} 238 - 4k = 206 \\ 92 - 2k + n = 82 \end{cases}; \quad \begin{cases} k = 8 \\ n = 6 \end{cases}.$$

Тогда, из системы уравнений получим: α -распадов – 8; β -распадов – 6.

● 44. Найти в мегаэлектронвольтах энергию связи ядра изотопа лития ${}_3^7\text{Li}$.

Решение.

Энергия связи ядра $\Delta E = \Delta mc^2$. $\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{я}}$,

тогда: ${}_3^7\text{Li} = {}_Z^AX$, $Z = 3$, $A = 7$, $N = A - Z = 4$.

$$\Delta E = (3m_p + 4m_n - M_{\text{я}})c^2 = 6,2 \cdot 10^{-12} \text{ Дж} = \frac{6,2 \cdot 10^{-12} \text{ Дж}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 39 \text{ МэВ}.$$

■ 45. Во сколько раз линейная скорость движения электрона по правой бортовой орбите атома водорода ($r = 0,53 \text{ \AA}$)

больше скорости движения самолета (1000 км/ч)?

Решение.

Сила взаимодействия электрона с ядром атома определяется по закону Кулона. Эта сила должна быть равна центростремительной силе, которая удерживает электрон на круговой орбите.

$$\left. \begin{aligned} F_k &= k \frac{e^2}{r^2} \\ F_{\text{ц}} &= \frac{mV_3^2}{r} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} k \frac{e^2}{r^2} &= \frac{mV_3^2}{r} \\ V_3 &= \sqrt{\frac{ke^2}{mr}} \approx 2,2 \cdot 10^6 \text{ м/с} \end{aligned} .$$

Таким образом, $\frac{V_3}{V_c} = \frac{2,2 \cdot 10^6}{227,8} \approx 7920$ раз.

- ▲ 46. Во сколько раз напряженность электрического поля на первой боровской орбите атома водорода ($r = 0,53\text{А}^\circ$) больше напряженности поля в атмосфере перед сильным грозовым разрядом (100 кВ/м)?

Решение.

Напряженность электрического поля на первой боровской орбите определяется по формуле:

$$E_3 = k \frac{e}{r^2} \cdot \frac{E_3}{E_r} = \frac{ke}{r^2 E_r} = \frac{5,1 \cdot 10^{11} \text{ В/м}}{10^5 \text{ В/м}} = 5,1 \cdot 10^6 \text{ раз}.$$

- 47. При переходе электрона атома водорода с одной орбиты на другую, более близкую к ядру, энергия атома уменьшается на 1,892 эВ. При этом атом водорода излучает квант света. Определить длину волны излучения.

Решение.

Энергия испускаемого атомом водорода кванта, с одной стороны, равна уменьшению энергии излучаемого атома, а с другой стороны, определяется по формуле Планка.

$$W = \Delta W, \quad W = h\nu, \quad \nu = \frac{c}{\lambda}, \quad \frac{hc}{\lambda} = \Delta W,$$

следовательно, $\lambda = \frac{hc}{\Delta W} = 6,6 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 660 \text{ нм}.$

- 48. Какая энергия выделяется при реакции синтеза между дейтерием и тритием (реакция сопровождается вылетом одного нейтрона)? Какую массу воды, взятой при температуре в 0°C , можно вскипятить, используя этот термоядерный синтез, если КПД преобразования энергии 10 %? Масса гелия 1 г.

Решение.

Запишем уравнение ядерной реакции: $\text{H}_1^2 + \text{H}_1^3 \rightarrow \text{He}_2^4 + n_0^1$. Масса покоя образовавшихся частиц меньше, чем масса покоя частиц, вступивших в реакцию. Найдем дефект масс Δm и энергию W_0 .

$$\Delta m = m_2 - m_1 = 1,89 \cdot 10^{-2} \text{ а.е.м.},$$

$$W_0 = \Delta m c^2 = 17,6 \text{ МэВ} = 17,6 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

Такое количество энергии выделится, если расходуется топливо массой $m_0 = 5$ а.е.м. А если израсходовать топливо массой m , можно получить энергию:

$$W = W_0 \frac{m}{m_0}.$$

Для кипения воде потребуется количество теплоты с учетом КПД.

$$Q = \eta W,$$

$$Q = c m_{\text{в}} \Delta t, \text{ откуда: } c m_{\text{в}} \Delta t = \eta W.$$

$$m_{\text{в}} = \frac{\eta W}{c \Delta t} = 50 \cdot 10^3 \text{ кг} = 50 \text{ т}.$$

- **49.** При взаимодействии α -частиц с ядрами алюминия ${}_{13}^{27}\text{Al}$ образуются ядра кремния ${}_{14}^{30}\text{Si}$. Определить, какая частица образуется в этой реакции и какая энергия при этом выделяется, если масса алюминия 1 г.

Решение.

Запишем ядерную реакцию: ${}_{13}^{27}\text{Al} + {}_2^4\alpha \rightarrow {}_{14}^{30}\text{Si} + {}_Z^AX$. Для определения образовавшейся частицы используем законы зарядового и массового чисел.

$$1) 13 + 2 = 14 + 2; \quad Z = 1;$$

$$2) 27 + 4 = 30 + A; \quad A = 1.$$

$${}_1^1X = {}_1^1p - \text{протон},$$

$\Delta E = N E_1$, где E_1 – энергия, выделяющаяся в реакции с одним ядром, N – число ядер.

$$N = N_A \cdot \frac{m}{\mu}, \quad \mu - \text{молярная масса алюминия; } N_A - \text{число Авогадро}.$$

$$E_1 = \Delta m c^2, \quad \Delta E = N_A \cdot \frac{m}{\mu} \Delta m c^2.$$

Рассчитаем дефект масс.

$$\Delta m = [m({}_{13}^{27}\text{Al}) + m({}_2^4\text{He})] - [m({}_1^1p) + m({}_{14}^{30}\text{Si})].$$

По таблице находим:

$$m({}_{13}^{27}\text{Al}) = 26,98146 \text{ а.е.м.};$$

$$m({}_2^4\text{He}) = 4,00260 \text{ а.е.м.};$$

$$m({}_1^1\text{p}) = 1,00783 \text{ а.е.м.};$$

$$m({}_{14}^{30}\text{Si}) = 29,97377 \text{ а.е.м.}$$

$\Delta m = -0,00246 \text{ а.е.м.}$ (энергия выделяется).

Подставляем значения и получаем:

$$\Delta E = 931 \frac{\text{МэВ}}{\text{а.е.м.}} \Delta m, \quad \Delta E = 0,5 \cdot 10^{23} \text{ МэВ} = 3 \cdot 10^5 \text{ Дж.}$$

- **50.** Найдите длину волны λ электромагнитного излучения, если энергия одного кванта этого излучения равна энергии покоя электрона. С какой скоростью v должен двигаться электрон, чтобы его импульс был равен импульсу такого фотона? Чему равно отношение энергии W движущегося с этой скоростью электрона к энергии W_γ фотона?

Решение.

$$\lambda = \frac{h}{mc} = 2,4 \cdot 10^{-12} \text{ м}, \quad v = \frac{c}{\sqrt{2}} = 2,1 \cdot 10^8 \text{ м/с}, \quad \frac{W}{W_\gamma} = \sqrt{2}.$$

- ▲ **51.** Ионы дейтерия (дейтроны), ускоренные до энергии $W_1 = 2,0 \text{ МэВ}$, направляют на тритиевую мишень. В результате реакции синтеза (см. задачу 27) из мишени вылетают нейтроны. Какова кинетическая энергия W_2 тех нейтронов, которые вылетают перпендикулярно пучку дейтронов?

Решение.

В реакции выделяется энергия $W = 17,6 \text{ МэВ}$ (см. задачу 27). Эта энергия, как и W_1 , намного меньше энергии покоя частиц. Следовательно, движение частиц нерелятивистское. Согласно закону сохранения энергии $W_1 + W = W_2 + W_3$, где W_3 – кинетическая энергия образовавшейся α -частицы. Согласно закону сохранения импульса $p_1 = p_2 + p_3$, откуда

$$p_3 = \sqrt{p_1^2 + p_2^2}. \quad \text{Тогда,} \quad W_3 = \frac{p_3^2}{2m_3} = \frac{(m_1 v_1)^2 + (m_2 v_2)^2}{2m_3} = \frac{W_1}{2} + \frac{W_2}{4} \quad (\text{мы}$$

учли соотношения $m_1 = 2m_2$, $m_3 = 4m_2$). С учетом закона сохранения энергии находим $W_2 = 0,4(2W + W_1) = 14,9 \text{ МэВ}$.

- **52.** Образец, содержащий $m = 1,0 \text{ мг}$ ${}_{84}^{210}\text{Po}$, помещен в калориметр с теплоемкостью $C = 8,0 \text{ Дж/К}$. В результате α -распада полоний превращается в свинец ${}_{82}^{206}\text{Pb}$. На сколько поднимется температура в калориметре за время $\tau = 1 \text{ ч}$? Масса атома ${}_{84}^{210}\text{Po}$ равна $209,98287 \text{ а.е.м.}$, масса атома ${}_{82}^{206}\text{Pb}$ равна $205,97887 \text{ а.е.м.}$ Период полураспада полония $T = 138 \text{ сут}$. Считайте, что α -частицы не вылетают за пределы калориметра.

Решение.

Число распавшихся ядер полония $\Delta N = \frac{N_0 \tau \ln 2}{T}$. При каждом распаде

суммарная масса покоя вещества уменьшается на $\Delta m = 5,8 \cdot 10^{-3}$ а.е.м., при этом выделяется энергия $W_0 = \Delta m c^2 = 5,4$ МэВ. Температура калориметра поднимется на $\Delta t = \frac{\Delta N W_0}{C} = \frac{\tau m N_A \ln 2}{T M} \cdot \frac{W_0}{C} = 65$ К.

- **53.** Вычислить энергию фотона, если в среде с показателем преломления 1,4 его длина волны 589 нм.

Решение.

Энергия фотона $E = \frac{hc}{\lambda_0}$, λ_0 – энергия волны фотона в вакууме.

В среде $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$, значит $\lambda_0 = \lambda n$.

$$E = \frac{hc}{\lambda n} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{589 \cdot 10^{-9} \text{ м} \cdot 1,4} = 2,4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

- **54.** Каким импульсом обладают 10^{27} фотонов с частотой излучения $5 \cdot 10^{14}$ Гц?

Решение.

Общий импульс $p = N p_i = N m c$. $m = \frac{h\nu}{c^2}$;

$$p = \frac{N h \nu}{c^2} c = \frac{N h \nu}{c} = \frac{10^{24}}{3 \cdot 10^8} \cdot 6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 5 \cdot 10^{14} = 1,1 \text{ кг} \cdot \text{м/с} = 1,1 \text{ Н} \cdot \text{с}.$$

- **55.** Работа выхода электронов из кадмия равна 4,08 эВ. Определить длину света, падающего на кадмий, если максимальная скорость электронов равна $7,2 \cdot 10^5$ м/с.

Решение.

Используем уравнение Эйнштейна для фотоэффекта:

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

$$\nu = \frac{c}{\lambda}; \quad \frac{hc}{\lambda} = A_{\text{вых}} + \frac{m V_{\text{max}}^2}{2},$$

$$\lambda = \frac{2hc}{2A_{\text{вых}} + m V_{\text{max}}^2} = 3,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

- ▲ **56.** Максимальная длина волны света, при которой наблюдается фотоэффект на калии, равна 450 нм. Какой

будет максимальная скорость фотоэлектронов, выбиваемых из калия светом с длиной волны, равной 300 нм.

Решение.

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mV_{\text{max}}^2}{2}, \quad 2h\nu = 2A_{\text{вых}} + mV_{\text{max}}^2, \quad 2(h\nu - A_{\text{вых}}) = mV_{\text{max}}^2,$$

$$V_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2(h\nu - A_{\text{вых}})}{m}}. \quad A_{\text{вых}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{кр}}}; \quad \nu = \frac{c}{\lambda}.$$

Подставим в формулу V_{max} : $V_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2hc(\lambda_{\text{кр}} - \lambda)}{m\lambda_{\text{кр}}\lambda}} = 7 \cdot 10^5 \text{ м/с}.$

- ▲ **57.** Определить импульс фотонов, вырывающих с поверхности металла электроны, которые полностью задерживаются разностью потенциалов 3 В, если красная граница фотоэффекта равна $6 \cdot 10^{14}$ Гц.

Решение.

Импульс фотона $p = \frac{h\nu}{c}$. $h\nu$ найдем из уравнения для фотоэффекта.

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mV_{\text{max}}^2}{2}, \quad A_{\text{вых}} = h\nu_{\text{кр}}, \quad \text{а} \quad \frac{mV_{\text{max}}^2}{2} = eU.$$

Таким образом, $p = \frac{1}{c}(h\nu_{\text{кр}} + eU) = 29,2 \cdot 10^{-28} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$

- **58.** Рентгеновская трубка, работающая под напряжением 66 кВ при токе 15 мА, излучает каждую секунду 10^{16} фотонов. Считая, что длина волны равна 10^{-10} м, определите КПД установки.

Решение.

КПД установки определяется по формуле: $\eta = \frac{P_{\text{У}}}{P_{\text{П}}} \cdot 100\%$, где $P_{\text{У}}$ –

энергия фотонов; $P_{\text{П}}$ – потребляемая мощность. $P_{\text{У}} = NE = N h \nu = \frac{N h c}{\lambda},$

$$P_{\text{П}} = IU, \quad \eta = \frac{N h c}{\lambda I U} \cdot 100\% = 2\%.$$

- ▲ **59.** Человеческий глаз может воспринимать световой поток мощностью $2 \cdot 10^{-17} \text{ Вт}$. Какому числу фотонов света с длиной волны 0,5 мкм, попадающих в глаз человека за 1 секунду, это соответствует?

Решение.

$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ – энергия одного фотона света, $W = Pt$, где P – мощность светового потока, W – энергия за время « t ». $W = NE$,
 $N = \frac{W}{E} = \frac{Pt\lambda}{hc} = 50$ фотонов.

■ **60.** Металлический шар из цинка радиусом 10 см облучают ультрафиолетовым светом с длиной волны $\lambda = 3 \cdot 10^{-7}$ м. Установить заряд шара, если работа выхода электронов с поверхности цинка равна $5,38 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Решение.

Вследствие фотоэффекта происходит выбивание электронов с поверхности шара, который будет заряжаться положительно, а его потенциал

$\varphi = \frac{kq}{R}$. φ – разность потенциалов, играет роль задерживающего напряжения, при котором самые быстрые электроны вернутся на шар под действием электростатического поля.

$\frac{mV_m^2}{2} = \varphi e = \frac{keq}{R}$, $\varphi = \frac{mV_m^2}{2e}$, $\frac{mV_m^2}{2}$ найдем из уравнения Эйнштейна для фотоэффекта.

$$\frac{mV_m^2}{2} = h\nu - A_{\text{вых}} = \frac{hc}{\lambda} - A_{\text{вых}}, \quad \frac{keq}{R} = \frac{hc}{\lambda} - A_{\text{вых}},$$

$$q = \frac{R}{ke} \left(\frac{hc}{\lambda} - A_{\text{вых}} \right) = 8,68 \cdot 10^{-12} \text{ Кл.}$$

ЭПИЛОГ

Таким образом, радиоактивные вещества занимают особое место среди загрязняющих окружающую среду агентов. Радиоактивность – самопроизвольное превращение (распад) ядер элементов, приводящее к изменению их атомного номера или массового числа. Радиоактивные вещества испускают α и β -частицы, γ и тормозное излучение и нейтроны.

Радиоактивный фон нашей планеты складывается из четырех основных компонентов:

- Излучения от космических источников;
- Излучения от рассеянных в окружающей среде первичных радионуклидов;
- Излучения от естественных радионуклидов, поступающих в окружающую среду от производств, не предназначенных непосредственно для их получения;
- Излучения от искусственных радионуклидов, образованных при ядерных взрывах и вследствие поступления отходов от ядерного топливного цикла и других предприятий, использующих искусственные радионуклиды.

Все живые организмы на Земле являются объектами воздействия ионизирующих излучений. Воздействие ионизирующего излучения на живой организм называется облучением. Результатом облучения являются физико-химические и биологические изменения в организмах.

Принципы радиационной безопасности:

1. Не превышать установленного основного дозового предела;
2. Исключить всякое необоснованное облучение;
3. Снижать дозы облучения до возможно низкого уровня.

Во введении указывался тот факт, что одним из серьезнейших упущений сегодня является отсутствие объективной информации. Тем не менее, уже проделана огромная работа по оценке радиационного загрязнения, и результаты исследований время от времени публикуются как в специальной литературе, так и в прессе. Но для понимания проблемы необходимо располагать не обрывочными данными, а ясно представлять целостную картину.

Мы не имеем права и возможности уничтожить основной источник радиационного излучения, а именно природу, а также не можем и не должны отказываться от тех преимуществ, которые нам дает наше знание законов природы и умение ими воспользоваться.