



**КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**ИНСТИТУТ ФИЗИКИ**

*Кафедра физики твердого тела*

**ОСНОВЫ ДОЗИМЕТРИИ  
РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**



**Казань – 2019**

УДК 539.164  
ББК 22.38

*Опубликовано по решению*  
*Учебно-методической комиссии Института физики*  
*ФГАУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»*  
*Протокол № 9 от 21 июня 2018 г.*  
*Заседания кафедры физики твердого тела*  
*Протокол № 3 от 7 февраля 2018 г.*

Авторы:  
Дулов Е.Н., Воронина Е.В., Иванова А.Г., Бикчантаев М.М.

Рецензент:  
К.ф.-м.н., м.н.с. лаборатории «Радиохимия» ФГБОУ ВО «Казанского национального исследовательского технологического университета» Назипов Р.А.

Основы дозиметрии. Радиационная безопасность. Учебное пособие к общему физическому практикуму, раздел ядерной физики, для обучающихся по направлениям естественнонаучного профиля / Дулов Е.Н., Воронина Е.В., Иванова А.Г., Бикчантаев М.М.– Казань: Казан. ун-т, 2019. – 43 с.

Аннотация:

Методическое пособие предназначено для обучающихся по направлениям естественнонаучного профиля.

© Дулов Е.Н.,  
Воронина Е.В.,  
Иванова А.Г.,  
Бикчантаев М.М.

©Казанский федеральный университет, 2019

## **Содержание**

Введение	4
1. Введение в ядерную физику	6
2. Радиометрические величины	15
3. Базовые дозиметрические величины	19
4. Эквидозиметрические величины	24
Нормы радиационной безопасности	29
Вопросы для самоконтроля	34
Примеры решения задач	37
Задачи для самостоятельной работы	41
Литература	43

## Введение

Радиационная защита и безопасность опираются на систему величин, которые условно можно разделить на две части:

1. *Радиометрические величины*, служащие для характеристики источников и полей ионизирующего излучения.

2. *Дозиметрические величины*, используемые для целей радиационной защиты и безопасности и служащие для характеристики воздействия излучения на человека. Они разделяются на две большие группы, которые включают *базовые дозиметрические величины* и *эквидозиметрические величины*.

Дозиметрия - раздел прикладной ядерной физики, изучающий радиационно-индуцированные эффекты, т.е. изменения в структуре и свойствах веществ, составляющих объекты живой и неживой природы. Дозиметрия является основой для выработки мер радиационной безопасности при работе с ионизирующими излучениями или в аварийных ситуациях. Именно эти проблемы и послужили стимулом зарождения и развития дозиметрии. В дальнейшем дозиметрия приобрела важное значение в физических, химических и радиобиологических исследованиях, а также в радиационной терапии и диагностике, радиационных технологиях и охране природной среды.

Количественное описание радиационно-индуцированных эффектов осуществляется при помощи физических величин, называемых дозиметрическими: поглощенной дозы ( $D$ ), экспозиционной дозы ( $X$ ), кермы ( $K$ ), флюенса ( $\Phi$ ) и т.д. Медико-биологические исследования потребовали введения специфических характеристик: эквивалентной дозы ( $H$ ), эффективной дозы ( $H_E$ ), относительной биологической эффективности ( $ОБЭ$ ) и др., которые позволяют дать количественную оценку ожидаемого радиационного воздействия на отдельные органы, ткани, организмы в целом и сообщества различных масштабов.

В направлениях дозиметрии, связанных с радиационной безопасностью, определяются максимально возможные уровни радиационного воздействия, обеспечивающие сохранение здоровья подвергающихся облучению отдельных

лиц и сообществ (коллективов, населения региона, человечества в целом). Эти уровни задаются предельно допустимыми (ПД) значениями дозиметрических величин.

Расчеты тех или иных дозиметрических величин возможны, и зачастую очень сложны, поэтому большое значение имеют дозиметрические измерения, для осуществления которых разработаны и используются на практике разнообразные дозиметрические измерительные приборы и методики.

## 1. ВВЕДЕНИЕ В ЯДЕРНУЮ ФИЗИКУ

Все атомные ядра разделяются на стабильные и радиоактивные ядра. Стабильные ядра остаются неизменными неограниченно долгое время, радиоактивные испытывают самопроизвольные превращения.

Основными характеристиками ядра являются: массовое число  $A$ , электрический заряд  $Z$ , масса  $M$  (и энергия связи  $E_{\text{св}}$ ). Радиоактивные ядра дополнительно характеризуются типом радиоактивного превращения ( $\alpha$ - или  $\beta$ -распад, спонтанное деление и др.), периодом полураспада  $T_{1/2}$ , энергией испускаемых частиц и т. п.

Атомное ядро может находиться в различных энергетических состояниях. Состояние с наименьшей энергией называется *основным*, остальные состояния – *возбужденными*.

*Массовое число  $A$*  определяется количеством нуклонов (протонов и нейтронов) в ядре.

*Зарядовое число* атомного ядра  $Z$  равно количеству протонов в ядре и, следовательно, количеству электронов в атомных оболочках нейтрального атома, которое совпадает с порядковым номером химического элемента в периодической таблице Менделеева. Зарядовое число также называют *атомным номером* ядра.

Ядра с одинаковым массовым числом  $A$  называются *изобарами*, с одинаковым зарядом  $Z$  – *изотопами*.  $N = A - Z$  – число нейтронов в ядре. Конкретное ядро (атом), характеризующийся определенным массовым числом  $A$  и атомным номером  $Z$ , иногда называют *нуклидом*. Ядро, содержащее  $A$  нуклонов и  $Z$  протонов, обычно обозначают  $(A, Z)$ , его массу –  $M(A, Z)$ , а массу соответствующего атома –  $M_{\text{ат}}(A, Z)$ . Для случая, когда надо указать химический символ элемента, для массы ядра и атома используют обозначение  $M({}_Z^A\text{Эл})$  и  $M_{\text{ат}}({}_Z^A\text{Эл})$ . Например, для массы ядра и атома азота –  $M({}_7^{14}\text{N})$  и  $M_{\text{ат}}({}_7^{14}\text{N})$ .

Масса атомного ядра  $M$  является одной из самых важных характеристик. Масса ядра (и атома) измеряется в атомных единицах массы (а. е. м). За одну

атомную единицу массы принимается 1/12 часть массы нейтрального атома углерода  $^{12}\text{C}$ .

$$1 \text{ а. е. м.} = (1/12)(12/N_A) = 1/6.022 \cdot 10^{23} = 1.66 \cdot 10^{-24} \text{ г.}$$

Использование системы единиц СИ зачастую оказывается неудобным при записи масс частиц. По этой причине в ядерной физике принято использовать энергетическую шкалу масс и внесистемные единицы измерения энергии – электронвольты (эВ, энергия, которую приобретает элементарный заряд, проходя разность потенциалов в 1 В) и их производные: кэВ, МэВ, ГэВ. Сопоставление массы и энергии оказывается возможным благодаря принципу эквивалентности массы и энергии в специальной теории относительности, выраженному известным соотношением  $E=mc^2$ . Так, во внесистемных единицах  $1 \text{ а. е. м.} = 931.494 \text{ МэВ}$ . Масса нейтрона, протона и электрона –  $939.565 \text{ МэВ}$ ,  $938.272 \text{ МэВ}$ ,  $0.511 \text{ МэВ}$ , соответственно. Для полуколичественных оценок достаточно запомнить, что масса нуклона – это величина порядка 1 ГэВ, а масса электрона приблизительно равна 0.5 МэВ.

Энергия покоя (масса) атомного ядра определяется не только суммой масс нуклонов, но и энергией их внутреннего движения и энергией связи. Ядро, находящееся в основном энергетическом состоянии, имеет минимальное значение энергии покоя (массы). С переходом ядра в возбужденное состояние его энергия покоя (масса) растет, всегда оставаясь, однако, меньше суммы масс нуклонов.

Величина

$$E_{\text{св}}(A, Z) = Zm_p + (A-Z)m_n - M(A, Z) \quad (1.1)$$

называется *энергией связи ядра*  $E_{\text{св}}(A, Z)$  относительно всех составляющих его нуклонов. Энергия связи представляет собой меру энергии, которую надо затратить, чтобы разделить данное ядро на все составляющие нуклоны. Выражение (1.1) записано в энергетической шкале масс.

*Дефектом массы ядра* называется разность между массой рассматриваемого ядра, выраженной в атомных единицах массы (а. е. м.), и соответствующим массовым числом  $A$ :

$$\Delta(A, Z) = M(A, Z) - A. \quad (1.2)$$

Откуда следует:

$$M(A, Z) = \Delta(A, Z) + A. \quad (1.3)$$

В частности, для нейтрона  $m_n = \Delta_n + 1$ , а для протона  $m_p = \Delta_p + 1$ .

Нестабильные ядра испытывают самопроизвольные, спонтанные превращения, которые приводят к изменению состава или/и внутренней энергии и квантовых чисел ядра. Такие самопроизвольные ядерные процессы называют радиоактивными, они протекают по законам радиоактивного распада. К радиоактивным процессам относят  $\alpha$ -распад,  $\beta$ -распад,  $\gamma$ -излучение, спонтанное деление тяжелых ядер (Рис. 1.).

1)  $\alpha$ -излучение – это излучение, состоящее из тяжелых, положительно заряженных альфа-частиц, которыми являются ядра атомов гелия ( ${}^4_2\text{He}$ ), движущихся с начальной скоростью около  $10^9$  см/с. Это излучение поглощается слоем алюминия, толщиной в несколько микрон. Из всех видов радиационного излучения альфа-излучение обладает наименьшей проникающей способностью, но последствия облучения живых тканей данным видом радиации наиболее тяжелые и значительные по сравнению с другими видами излучения. Альфа-излучение может оказывать воздействие на организм при попадании в него радиоактивных элементов, например, с воздухом, водой или пищей, а также через порезы или раны;

2) при  $\beta$ -излучении происходит превращение нейтрона в протон или протона в нейтрон. При этом превращении происходит (в зависимости от вида превращения) испускание электрона или позитрона (античастица электрона), движущихся со скоростью, близкой к скорости света. Бета-излучение проникает сквозь одежду и частично сквозь живые ткани, но при прохождении через более плотные вещества, например, через металл, взаимодействует с ним более интенсивно и теряет большую часть своей энергии. Металлический лист толщиной в несколько миллиметров может полностью остановить бета-излучение. Некоторые бета-активные изотопы имеют длительный период распада. Попадая в организм, они могут подвергаться его радиационному воздействию в течение



многих лет, пока не приведут к перерождению тканей и связанным с этим заболеваниями;

3)  $\gamma$ -излучение – проникающее излучение, состоящее из фотонов, которое не отклоняется ни в электрическом, ни в магнитном полях. Гамма-излучение обладает высокой проникающей способностью, способно проходить сквозь одежду, живые ткани и даже более плотные вещества (например, металлы). Чтобы остановить распространение гамма-излучения, требуется материалы из свинца, стали или бетона значительной толщины.

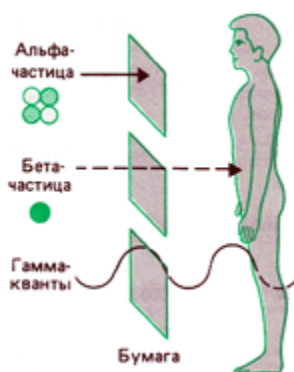


Рис. 1. Виды радиоактивных излучений

### Немного истории...

28 декабря 1895 г. профессор Вюрцбургского университета Вильгельм Конрад Рентген (Röntgen) (27 марта 1845 г. – 10 февраля 1923 г.) (Рис. 2.) направил свою статью «О новом роде лучей» с первым рентгеновским снимком кисти своей жены председателю Физико-медицинского общества университета. Статья была быстро опубликована и разослана ведущим физикам Европы. Менее чем через месяц американские врачи применили открытие Рентгена.



Рис. 2. Вильгельм Конрад Рентген (Röntgen)

Радиоактивность была открыта французским физиком А. Беккерелем (15 декабря 1852 г.–25 августа 1908 г.) (Рис. 3.). Он занимался исследованием связи люминесценции и недавно открытых рентгеновских лучей. Весной 1896 г. А. Беккерель сделал ряд сообщений об обнаружении им нового вида излучения (впоследствии названном радиоактивным), которое испускается солями урана. Подобно открытым за несколько месяцев до этого рентгеновским лучам, оно обладало проникающей способностью, засвечивало экранированную черной бумагой фотопластинку и ионизировало окружающий воздух. Гипотеза, которая привела к открытию радиоактивности, возникла у Беккереля под влиянием исследований В.К. Рентгена. Поскольку при генерации X-лучей наблюдалась фосфоресценция стеклянных стенок рентгеновской трубки, Беккерель проверял предположение, что любое фосфоресцентное свечение сопровождается испусканием рентгеновского излучения. Для этого он поместил различные фосфоресцирующие вещества на завернутые в черную бумагу фотопластинки и получил неожиданный результат: засвеченной оказалась единственная пластинка, с которой соприкасался кристалл соли урана. Многочисленные контрольные опыты показали, что причиной засвечивания явилась не фосфоресценция, а именно уран. Впоследствии Беккерель испытал и другие соединения и минералы урана (в том числе не проявляющие фосфоресценции), а также металлический уран. Пластинка неизменно засвечивалась. Тогда стало ясно, что открыты

новые лучи, проходящие сквозь непрозрачные предметы, но не являющиеся рентгеновскими.

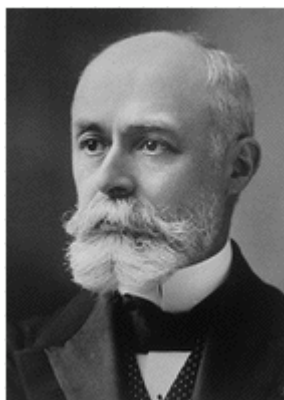


Рис. 3. Антуан Анри Беккерель (Becquerel)

Беккерель установил, что интенсивность излучения определяется только количеством урана в препарате и совершенно не зависит от того, в какие соединения он входит. Таким образом, это свойство было присуще не соединениям, а химическому элементу — урану. Свойство радиоактивного излучения вызывать ионизацию воздуха позволило наряду с фотографическим методом регистрации применять более удобный электрический метод, что значительно ускорило процесс исследований.

Своим открытием Беккерель поделился с учёными, с которыми он сотрудничал. В 1898 г. Мария Кюри (Рис. 4.) и Пьер Кюри (Рис. 5.) обнаружили радиоактивность тория, позднее ими были открыты радиоактивные элементы полоний и радий.

Кроме того ими было сделано ещё одно крупное открытие, относящееся к радиоактивности. Однажды Пьер Кюри поставил на себе опыт: в течение десяти часов носил привязанную к предплечью пробирку с радием. Через несколько дней у него появилось покраснение, перешедшее затем в тяжелейшую язву, от которой он страдал в течение двух месяцев. Так впервые было открыто биологическое действие радиоактивности.

В 1896 г. открытие Генри Беккереля о способности урановых солей к излучению вдохновляет Марию Кюри (7 ноября 1867 года - 4 июля 1934 года) на новые, более глубокие исследования этого вопроса. Применяв электрометр, она обнаружила, что испускаемые лучи остаются неизменными, независимо от состояния или вида урана.

В 1898 г., работая с уранинитом (урановая смолка), Мария и Пьер Кюри обнаружили новый радиоактивный элемент, который называют «полонием», в честь родины Марии. В том же году, они открыли ещё один элемент, который получил название «радий». Тогда они ввели термин «*радиоактивность*».

В 1899 г. Эрнст Резерфорд открыл, что уран излучает положительно заряженные альфа-частицы и отрицательно заряженные бета-частицы. В 1900 г. Поль Виллард открыл гамма-лучи при изучении распада урана.



Рис. 4. Мария Склодовская-Кюри (Skłodowska-Curie)

В результате взаимодействия радиоактивного излучения с внешней средой происходит ионизация и возбуждение ее нейтральных атомов и молекул. Эти процессы изменяют физико-химические свойства облучаемой среды. Взяв за основу эти явления, для регистрации и измерения ионизирующих излучений используют ионизационный и сцинтилляционный методы.



Рис. 5. Пьер Кюри (Curie)

Сущность ионизационного метода заключается в том, что под воздействием ионизирующих излучений в среде (газовом объеме) происходит ионизация молекул, в результате чего электропроводность этой среды увеличивается. Если в нее поместить два электрода, к которым приложено постоянное напряжение, то между электродами возникает направленное движение ионов, т.е. проходит так называемый ионизационный ток, который легко может быть измерен. Такие устройства называют *детекторами* излучений. В качестве детекторов в дозиметрических приборах используются ионизационные камеры и газоразрядные счетчики различных типов (Рис. 6.).



Рис. 6. Счетчик Гейгера-Мюллера

Сцинтилляционный метод основывается на том, что некоторые вещества (сернистый цинк, йодистый натрий, вольфрамат кальция) светятся при воздействии на них ионизирующих излучений. Возникновение свечения является следствием возбуждения атомов под воздействием излучений: при возвраще-

нии в основное состояние атомы испускают фотоны видимого света различной яркости (сцинтилляции). Родоначалник сцинтилляционных счётчиков быстрых заряженных частиц – спинтарископ Крукса (Рис. 7.). Фотоны видимого света улавливаются специальным прибором – так называемым фотоэлектронным умножителем, способным регистрировать каждую вспышку.



Рис. 7. Спинтарископ Крукса

## 2. РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

Радиометрические величины служат для характеристики источников и полей ионизирующего излучения.

Ионизирующее излучение – это любой вид излучения, взаимодействие которого со средой приводит к образованию электрических зарядов разных знаков.

Существует несколько основных типов направленности излучения:

– *поле точечного изотропного источника* это излучение, в поле которого частицы и фотоны распространяются из одной точки по всем возможным направлениям с одинаковой вероятностью;

– *мононаправленное* – излучение, в поле которого все частицы и фотоны распространяются в одном направлении, образуя плоскопараллельный пучок излучения;

– *изотропное* – излучение, в поле которого любые направления распространения частиц и фотонов являются равновероятными.

Ионизирующие излучения делятся на две группы. К первой группе относятся излучения, состоящие из заряженных частиц – электронов, позитронов,  $\alpha$ -частиц и др., которые непосредственно ионизируют атомы и молекулы при прохождении через вещество. Ко второй группе относятся незаряженные частицы – нейтроны и фотоны, которые порождают вторичные заряженные частицы. Взаимодействие этих вторичных частиц с веществом и приводит к его ионизации. Таким образом, различают два вида ионизирующего излучения:

– *непосредственно ионизирующее* – излучение, состоящее из заряженных частиц, способных ионизировать среду;

– *косвенно ионизирующее* – излучение, состоящее из незаряженных частиц, способных создавать непосредственно ионизирующее излучение и (или) вызывать ядерные превращения.

Различают *первичное* и *вторичное* ионизирующее излучение. Под *первичным* понимается излучение, которое в рассматриваемом процессе взаимодейст-

вия со средой принимается за исходное. Вторичное излучение возникает в результате взаимодействия *первичного* ионизирующего излучения с данной средой.

Характеристикой радионуклидного источника излучения является его *активность* – мера радиоактивности какого-либо количества радионуклида, которая определяется как ожидаемое число спонтанных превращений ядер в этом источнике в единицу времени:

$$A = \frac{dN}{dt}, \quad (2.1)$$

где  $dN$  – ожидаемое число спонтанных превращений ядер из данного энергетического состояния за промежуток времени  $dt$ . Единица активности носит специальное наименование беккерель (Бк). 1 Бк соответствует одному спонтанному преобразованию ядра в источнике в секунду. Ранее в качестве единицы активности использовали активность 1 грамма природного радионуклида  $^{226}\text{Ra}$ . Эта единица получила название кюри (Ки). 1 Ки равняется  $3.7 \cdot 10^{10}$  Бк. В настоящее время использовать эту единицу активности не рекомендуется. Ожидаемое число ядер радионуклида, претерпевших спонтанные ядерные превращения в единицу времени, пропорционально полному числу ядер  $N$  радионуклида, находящихся в источнике:

$$A = N \cdot \lambda, \quad (2.2)$$

где  $N$  – количество радиоактивных ядер данного типа;  $\lambda$  – постоянная распада радионуклида.

Используя определение  $\lambda$  (2.2), можно записать закон радиоактивного распада в дифференциальной форме:

$$dN = -N \cdot \lambda \cdot dt, \quad (2.3)$$

что позволяет интерпретировать  $\lambda$  как микроскопическую характеристику – вероятность распада одного ядра в единицу времени.

Интегрируя (2.3), получим закон радиоактивного распада в интегральной форме:

$$N = N_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot t). \quad (2.4)$$



Постоянная распада  $\lambda$  связана с другой характеристикой радионуклида, удобной для экспериментального определения. Эта характеристика – период полураспада радионуклида  $T_{1/2}$ , время, в течение которого число ядер в результате радиоактивного распада уменьшается в 2 раза (Рис. 8):

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot T_{1/2}), \quad (2.5)$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \ln 2, \quad \tau = \frac{1}{\lambda}, \quad \ln 2 = 0.693 \quad (2.6)$$

где  $\tau$  – средняя продолжительность жизни радионуклида – время, в течение которого число ядер радионуклида в результате радиоактивного распада уменьшается в  $e$  раз.

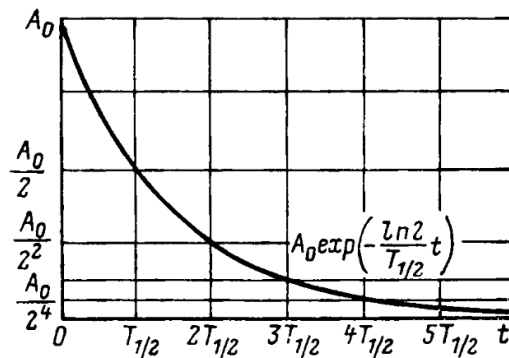


Рис. 8. Закон радиоактивного распада

Число распадов, произошедших в образце за период времени  $t$ :

$$N(t) = N_0 (1 - 2^{-t/T_{1/2}}), \quad (2.7)$$

$$N_0 = \frac{m}{\mu} N_A, \quad (2.8)$$

$$A = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \frac{m}{\mu} N_A 2^{-t/T_{1/2}}. \quad (2.9)$$

$N_0$  – начальное количество ядер,  $N_A$  – число Авогадро,  $N(t)$  – количество радиоактивных ядер данного типа,  $\mu$  – молярная масса радиоактивных ядер,  $m$  – масса радиоактивной части образца.

### 3. БАЗОВЫЕ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

Прохождение ионизирующего излучения через вещество приводит к взаимодействию частиц и фотонов с атомами, в процессе которого происходит передача энергии излучения веществу. Результат передачи энергии рассматривается с двух сторон. С одной стороны, происходит изменение энергии излучения вследствие ее поглощения веществом. Применительно к веществу происходит абсорбция энергии и изменение его состояния вследствие передачи энергии излучением. Таким образом, целесообразно рассматривать два аспекта передачи энергии излучения веществу:

– энергия излучения, *поглощенная веществом*, которая характеризует поле излучения по передаче энергии веществу;

– энергия излучения, *переданная ограниченному объему вещества*, которая характеризует изменение состояния вещества.

#### Поглощенная доза

Поглощенная доза, или доза излучения ( $D$ ), применяется для определения количества энергии ионизирующего излучения, поглощенного облучаемым веществом. Это одна из фундаментальных физических величин в дозиметрии, поскольку все изменения в объекте облучения происходят под воздействием ионизирующего излучения.

Поглощенная доза – отношение средней энергии  $d\bar{E}$ , переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе  $dm$  вещества в этом объеме:

$$D = \frac{d\bar{E}}{dm} \quad (3.1)$$

Под переданной энергией в определении поглощенной дозы понимается:

$$E = E_{вх} - E_{вых} + \sum Q_1 - \sum Q_2, \quad (3.2)$$

где  $E_{\text{вх}}$  – суммарная кинетическая энергия всех непосредственно и косвенно ионизирующих частиц, входящих в данный объем,  $E_{\text{вых}}$  – кинетическая энергия частиц, которые покидают указанный объем. Внутри данного объема возможны ядерные реакции и превращения элементарных частиц. В этих случаях возможны как выделение, так и затраты энергии. Суммарная выделившаяся при этом энергия обозначена  $\sum Q_1$ , а суммарная затраченная энергия  $\sum Q_2$ .

В Международной системе единиц (СИ) поглощенная доза измеряется в Дж/кг и имеет специальное название — грей (Гр). Используемая ранее внесистемная единица рад равна 0.01 Гр.

В биологическом отношении важно знать не просто дозу ионизирующего излучения, но и время, за которое она получена. Доза, полученная в единицу времени, называется мощностью дозы. Чем больше мощность дозы, тем быстрее растет доза излучения.

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \text{ (Гр/с)} . \quad (3.3)$$

### **Керма**

Величиной, отражающей взаимодействие поля косвенно ионизирующего излучения с веществом, является керма (русская транслитерация английской аббревиатуры термина kinetic energy released in material (kerma)). Она определяется как отношение среднего значения суммы начальных кинетических энергий всех заряженных ионизирующих частиц (электронов, позитронов, протонов альфа-частиц и др.), образовавшихся под действием ионизирующего излучения в элементарном объеме вещества, к массе вещества в этом объеме:

$$K = \frac{dE_k}{dm} . \quad (3.4)$$

Здесь  $dE_k$  – полная кинетическая энергия заряженных частиц, высвобождаемых в элементарном объеме;  $dm$  – масса этого объема. Единица кермы (Дж/кг) называется грей (Гр), как и в случае поглощенной дозы.

Значение кермы излучения в некоторой точке облучаемого вещества зависит только от свойств излучения и свойств облучаемой среды непосредственно в рассматриваемой точке. Керма не зависит от свойств среды, в которой распространяется излучение. Она не зависит также и от направленности поля излучения.

В условиях электронного равновесия, когда энергия всех электронов, вышедших из объема, равна энергии электронов, вошедших в него из окружающего вещества,  $K = D$ , если не учитывать потери энергии электронов на тормозное излучение.

### Экспозиционная доза

Экспозиционная доза характеризует излучение, падающее на объект, и является величиной, отражающей взаимодействие поля фотонного излучения с воздухом. Она пропорциональна энергии фотонного излучения, затраченной на ионизацию молекул воздуха, и равна отношению средней величины суммарного заряда  $d\bar{Q}$  всех ионов одного знака, созданных в сухом атмосферном воздухе (при нормальных условиях  $p = 101325$  Па,  $T = 273$  К), к массе воздуха  $dm$ :

$$X = \frac{d\bar{Q}}{dm} \quad (3.5)$$

Единица экспозиционной дозы – Кл/кг. Внесистемная единица экспозиционной дозы – *рентген* (Р),  $1 \text{ Р} = 2.58 \cdot 10^{-4}$  Кл/кг и соответствует образованию  $2.08 \cdot 10^9$  пар ионов (единица заряда в системе единиц СГСЭ) в  $1 \text{ см}^3$  воздуха. Поскольку средняя энергия ионизации воздуха 33.85 эВ, энергетический эквивалент кулона на килограмм равен  $1 \text{ Кл/кг} = 33.85 \text{ Дж/кг}$  воздуха. Экспозиционная доза является аналогом кермы фотонов в воздухе. Используя значение энергетического эквивалента кулона на килограмм, можно установить соотношение между кермой в воздухе и экспозиционной дозой: в одной и той же точке поля фотонного излучения в воздухе при экспозиционной дозе 1 Р значение кермы в воздухе будет равно  $8.8 \cdot 10^{-3}$  Гр.

Экспозиционная доза определяет дозовые характеристики поля излучения, не зависящие от свойств облучаемого вещества. Поэтому, в частности, удобно использовать ее в практических измерениях. Шкалы дозиметров фотонного излучения проградуированы в единицах экспозиционной дозы. Вместе с тем, невозможность применения экспозиционной дозы для характеристики смешанных излучений, ограничение по энергии гамма-квантов  $E \geq 3$  МэВ и некоторые другие соображения привели к тому, что использование этой величины не рекомендуется с 1.01.1990г.

Мощность экспозиционной дозы - отношение приращения экспозиционной дозы  $dX$  за интервал времени  $dt$  к этому интервалу времени:  $\dot{X} = \frac{dX}{dt}$ . Для экспозиционной дозы в СИ единица мощности дозы — ампер на килограмм (А/кг), внесистемная единица - рентген в секунду (Р/с).

Основываясь на активности точечного изотропного источника, можно сравнительно просто рассчитывать создаваемые им уровни мощности дозы. Кроме активности необходимо знать схему распада радионуклида, вероятность испускания каждой из частиц на один акт распада, а также потребуются величины, характеризующие взаимодействие частиц с веществом (сечения взаимодействий, линейный или массовый коэффициенты поглощения). Поскольку такой набор является явно избыточным, вводят некоторую усреднённую характеристику фотонного источника – *гамма-постоянную*. Гамма-постоянной  $\Gamma$ , предназначенной для расчёта экспозиционной дозы радионуклида, называется величина, численно равная мощности экспозиционной дозы  $\dot{X}$ , создаваемой фотонами точечного изотропного источника данного радионуклида с единичной активностью  $A$ , на единичном расстоянии  $r$  от источника. Определение следует из закона обратных квадратов расстояний:

$$\dot{X} = \Gamma \times \frac{A}{r^2}. \quad (3.6)$$

Распространённая единица измерения гамма-постоянной для мощности экспозиционной дозы –  $\text{Р} \cdot \text{см}^2 / (\text{ч} \cdot \text{мКи})$  (рентген на сантиметр в квадрате в час на

милиюри. В зависимости от задач размерность гамма-постоянной может варьироваться, например, часы могут быть заменены на секунды, активность может быть выражена в Бк и т.д. Аналогичным образом вводится гамма-постоянная для расчёта мощности поглощённой дозы в тканеэквивалентной среде.

#### 4. ЭКВИДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

Эквидозиметрические величины служат мерой воздействия излучения на человека – его облучения. Эквидозиметрические величины являются производными от базовых дозиметрических величин и определены для непосредственного использования в оценках радиогенного риска и служат характеристиками условий воздействия излучения на человека.

Радиобиологические исследования показали, что один и тот же радиобиологический эффект облучения какого-либо органа или ткани может наблюдаться при различных поглощенных дозах, если на орган или ткань действуют ионизирующие излучения различной природы. Для учета этих отличий и приведения к единому знаменателю эффектов излучений разного «качества» было предложено понятие *относительной биологической эффективности излучения* (ОБЭ).

Численным выражением ОБЭ является *коэффициент ОБЭ*, равный отношению поглощенной дозы образцового излучения к поглощенной дозе данного вида излучения, вызывающей такой же уровень радиационной опасности. В качестве образцового излучения принято рентгеновское излучение со сплошным спектром с граничной энергией 180-250 кэВ.

Многочисленные исследования показали, что при облучении одних и тех же биологических объектов ОБЭ зависит:

- от рассматриваемого эффекта,
- от дозы и мощности дозы,
- от вида излучения, его энергии, и т.д.

Для учета качества излучения в условиях хронического облучения людей в малых дозах, когда единственным гипотетическим последствием облучения может быть развитие стохастических эффектов излучения, рекомендуется использовать два показателя качества излучения, значения которых зависят от свойств излучения, но одинаковы для всех стохастических эффектов излучения:

- взвешивающий коэффициент качества излучения  $W_R$ ,



– средний коэффициент качества излучения  $\bar{Q}$ .

### Эквивалентная доза

Произведение поглощенной дозы (излучения вида R) облучения органа или ткани T –  $D_{T,R}$ , и взвешивающего коэффициента качества излучения  $W_R$  получило название – «эквивалентная доза облучения органа или ткани».

$$H_T = \sum_R D_{T,R} \cdot W_R. \quad (4.1)$$

Единица эквивалентной дозы – Дж/кг, обозначается как зиверт, Зв.

Таблица 1

Значения  $W_R$  для некоторых видов излучения

Вид излучения	$W_R$
Фотоны, электроны, мюоны любых энергий	1
Протоны с энергией более 2 МэВ	5
Альфа-частицы, осколки деления, тяжелые ядра	20
Нейтроны с энергией менее 10 кэВ или более 20 МэВ	5
Нейтроны с энергией от 10 кэВ до 100 кэВ	10
Нейтроны с энергией от 100 кэВ до 2 МэВ	20
Нейтроны с энергией от 2 МэВ до 20 МэВ	10

### Эффективная доза

Эффективная доза  $E$  определена как функция, равная сумме произведений эквивалентных доз  $H_T$  облучения отдельных органов и тканей тела человека T на соответствующие взвешивающие коэффициенты качества  $W_T$ :

$$E = \sum_T H_T \times W_T = \sum_{T,R} W_T \cdot W_R \cdot D_{T,R} \quad (4.2)$$

Источники ионизирующих излучений подразделяют на естественные (космические лучи, естественно распределенные на Земле радиоактивные вещества и др.) и искусственные (ядерные реакторы, ядерные материалы, ядерное оружие и др.). Все это является существенным экологическим фактором, воздействующим на все живые организмы. Воздействие ионизирующего излучения на организм с дозой, превышающей значение, обусловленное естественным фоном, представляет опасность (радиационное поражение). При этом нарушаются обменные процессы, замедляется и прекращается рост тканей, в организме возникают новые химические соединения, несвойственные ему прежде. Количественную оценку воздействия ионизирующего излучения на организм человека проводят по значению экспозиционной дозы, поглощенной и эквивалентной.

В зависимости от характера радиационного воздействия развиваются соответствующие клинические формы заболевания:

- острая лучевая болезнь от внешнего облучения;
- острая лучевая болезнь от сочетанного облучения (сочетанной травмой в медицине называется повреждение двух и более анатомических областей человека, одно из повреждений при этом является опасным для жизни);
- хроническая лучевая болезнь;
- местные радиационные поражения.

Под действием ионизирующего излучения в организме могут происходить следующие превращения: разложение воды на кислород и водород с образованием некоторого количества перекиси водорода; превращение молекул кислорода в молекулы озона; полимеризация соединений, содержащих двойные и тройные связи. Самая опасная ситуация возникает в случае осаждения в организме изотопов, излучающих альфа-частицы.

Обеспечение радиационной безопасности определяется следующими основными принципами:

1. Принцип нормирования – непревышение допустимых пределов индивидуальных доз облучения граждан от всех источников ионизирующего излучения.

2. Принцип обоснования – запрещение всех видов деятельности по использованию источников ионизирующего излучения, при которых полученная для человека и общества польза не превышает риск возможного вреда, причиненного облучением.

3. Принцип оптимизации – поддержание на возможно низком и достижимом уровне с учётом экономических и социальных факторов индивидуальных доз облучения и числа облучаемых лиц при использовании любого источника ионизирующего излучения.

В настоящее время признают два возможных пути взаимодействия ионизирующих излучений с органическими молекулами:

- путь *прямого*, непосредственного воздействия на радиочувствительные органические вещества с индуцированием в них радиохимических реакций (первичное действие ионизирующих излучений);

- путь *непрямого* воздействия (вторичное действие), при котором органические молекулы изменяются под воздействием свободных радикалов, возникающих в результате ионизации, создаваемой излучением в жидких средах организма и клеток. Свободные радикалы вызывают разрушения целостности цепочек макромолекул (белков и нуклеиновых кислот), что может привести как к массовой гибели клеток, так и канцерогенезу (развитию злокачественного процесса) и мутагенезу (нарушению деления клеток).

Характер радиохимических превращений во многом зависит от содержания кислорода в облучаемом субстрате. Это явление известно в радиобиологии под именем "кислородного эффекта". Так, вода ( $H_2O$ ), содержащая растворённый молекулярный кислород, при воздействии ионизирующего излучения образует не только атомарный водород ( $H^+$ ) и гидроксильную группу ( $OH^-$ ), но и другие химически активные продукты расщепления (пероксид водорода –  $H_2O_2$ , гидропероксид –  $HO_2$ ), в том числе и органического происхождения, способные

участвовать в реакции окисления и восстановления, вызывая первичные биохимические превращения в наиболее радиочувствительных биохимических компонентах живой ткани (первичный радиобиологический эффект). Поэтому радиолиз воды, т.е. распад при действии радиации на водородный (H) и гидроксильный (OH) радикалы с последующим образованием молекулярного водорода и пероксида водорода, имеет первостепенное значение в радиобиологических процессах. Наличие в системе кислорода усиливает эти процессы. При повышении парциального давления кислорода радиационный эффект усиливается, так что радиоустойчивость субстрата повышается при понижении кислорода в среде.

## Нормы радиационной безопасности

В этом разделе приводятся выдержки из Нормативов Радиационной Безопасности 99/2009 (НРБ 99/2009) – основного действующего документа, устанавливающего санитарные нормы и правила в сфере радиационной безопасности населения.

Таблица 2

### Основные пределы доз

Нормируемые величины*	Пределы доз	
	Персонал (группа А)**	Население
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год	1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год
Эквивалентная доза за год в хрусталике глаза***	150 мЗв	15 мЗв
коже****	500 мЗв	50 мЗв
кистях и стопах*****	500 мЗв	50 мЗв

\* - допускается одновременное облучение до указанных пределов по всем нормируемым величинам.

\*\* - основные пределы доз, как и все остальные допустимые уровни воздействия персонала группы Б, равны 1/4 значений для персонала группы А. Далее в тексте все нормативные значения для категории персонала приводятся только для группы А.

\*\*\* - относится к дозе на глубине 300 мг/см<sup>2</sup>. Здесь используются внесистемные единицы измерения длины, которые получаются из умножения длины на плотность поглотителя. Такое представление оказывается удобным в сочетании с массовым коэффициентом ослабления, который равен отношению линейного коэффициента ослабления к плотности вещества (единицы измерения для данного примера – см<sup>2</sup>/мг). Массовый коэффициент ослабления не зависит от агрегатного состояния вещества и очень просто рассчитывается для многокомпонентных веществ. По этой причине использование массового коэффициента ослабления вместо линейного общепринято в рентгеновской и гамма-оптике.

\*\*\*\* - относится к среднему по площади в 1 см<sup>2</sup> значению в базальном слое кожи, толщиной 5 мг/см<sup>2</sup> под покровным слоем толщиной 5 мг/см<sup>2</sup>. На ладонях толщина покровного слоя – 40 мг/см<sup>2</sup>. Указанным пределом допускается облучение всей кожи человека при условии, что в пределах усредненного облучения любого 1 см<sup>2</sup> площади кожи этот предел не будет превышен. Предел дозы при облучении кожи лица обеспечивает не превышение предела дозы на хрусталик от бета-частиц.

Группа А – категория лиц, прошедших инструктаж по радиационной безопасности и имеющая доступ к работе с источниками ионизирующего излучения.

Студенты, проходящие ядерный физический практикум, на время прохождения практикума относятся к группе Б – лицам, работающим на установках с источниками ионизирующего излучения, но не имеющим допуска к операциям с источниками (не допускается доставать или устанавливать источники).

*Таблица 3*

Прогнозируемые уровни облучения, при которых необходимо  
срочное вмешательство

<b>Орган или ткань</b>	<b>Поглощенная доза в органе или ткани за 2 суток, Гр</b>
Все тело	1
Легкие	6
Кожа	3
Щитовидная железа	5
Хрусталик глаза	2
Гонады	3
Плод	0.1

Ориентировочные пороги: возникновения лучевой болезни – 1 Зв, летальный – 6 Зв (за двое суток).

## Радиометрические величины

Наименование	Обозначение	Определение	Единица СИ
Период полураспада радионуклида	$T_{1/2}$	Время, в течение которого число ядер радионуклида в результате радиоактивного распада уменьшается в два раза	с
Постоянная радиоактивного распада радионуклида	$\lambda$	Отношение доли ядер $dN/N$ радионуклида, распадающихся за интервал времени $dt$ , к этому интервалу времени: $\lambda = \frac{1}{N} \frac{dN}{dt} = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}}$	$\text{с}^{-1}$
Активность радионуклида в источнике	$A$	Отношение числа $dN$ спонтанных переходов из определенного ядерного энергетического состояния радионуклида, происходящих в источнике (образце) за интервал времени $dt$ , к этому интервалу времени: $A = \frac{dN}{dt}$	Бк
Энергия ионизирующих частиц	$E$	Энергия ионизирующих частиц излучения (без учета энергии покоя)	Дж
Керма	$K$	Отношение $d\overline{E}_{tr}$ суммы начальных кинетических энергий всех заряженных ионизирующих частиц, высвобожденных незаряженными ионизирующими частицами в элементарном объеме, к массе $dm$ вещества в этом объеме: $K = \frac{d\overline{E}_{tr}}{dm}$	Гр
Мощность кермы	$\dot{K}$	Отношение приращения кермы $dK$ за интервал времени $dt$ к этому интервалу времени: $\dot{K} = \frac{dK}{dt}$	Гр/с
Экспозиционная доза фотонного излучения	$X$	Отношение средней величины суммарного заряда $\overline{Q}$ всех ионов одного знака, созданных в воздухе, когда все электроны и позитроны, освобожденные фотонами в элементарном объеме воздуха с массой $dm$ , полностью остановились в воздухе, к массе воздуха в указанном	Кл/кг

		объеме: $X = \frac{\bar{Q}}{dm}$	
Мощность экспозиционной дозы	$\dot{X}$	Отношение приращения экспозиционной дозы $dX$ за интервал времени $dt$ к этому интервалу времени: $\dot{X} = \frac{dX}{dt}$	А/кг
Доза, поглощенная в точке	$D$	Отношение средней энергии $d\bar{E}$ , переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе $dm$ вещества в этом объеме: $D = \frac{d\bar{E}}{dm}$	Гр
Мощность поглощенной дозы	$\dot{D}$	Отношение приращения поглощенной дозы $dD$ за интервал времени $dt$ к этому интервалу времени: $\dot{D} = \frac{dD}{dt}$	Гр/с



Соотношения между системными и внесистемными единицами величин,  
применяемых в дозиметрии

Величина	Название и обозначение единиц		Связь между единицами
	Единица СИ	Внесистемная единица	
Активность	Беккерель (Бк), равный одному распаду в секунду (расп./с)	Кюри (Ки)	$1 \text{ Ки} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$ ; $1 \text{ Бк} = 2.703 \cdot 10^{-11} \text{ Ки}$
Энергия частиц	Джоуль (Дж)	электронвольт (эВ)	$1 \text{ эВ} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$
Керма	Грэй (Гр), равный одному джоулю на килограмм (Дж/кг)	рад (рад)	$1 \text{ рад} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Гр}$ ; $1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}$
Экспозиционная доза	Кулон на килограмм (Кл/кг)	Рентген (Р)	$1 \text{ Р} = 2.58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$ ; $1 \text{ Кл/кг} = 3.88 \cdot 10^3 \text{ Р}$
Поглощенная доза	Грэй (Гр), равный одному джоулю на килограмм (Дж/кг)	рад (рад)	$1 \text{ рад} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Гр}$ ; $1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}$
Эквивалентная доза	Зиверт (Зв), джоуль на килограмм (Дж/кг)	бэр (бэр)	$1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}$ ; $1 \text{ бэр} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Зв}$ ; $1 \text{ бэр} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/кг}$
Мощность экспозиционной дозы излучения	Ампер на килограмм (А/кг)	Рентген в секунду (Р/с)	$1 \text{ Р/с} = 2.58 \cdot 10^{-4} \text{ А/кг}$
Мощность поглощенной дозы излучения	Грей в секунду (Гр/с)	рад в секунду (рад/с)	$1 \text{ рад/с} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Гр/с}$
Мощность эквивалентной дозы излучения	Ватт на килограмм (Вт/кг)	бэр в секунду (бэр/с)	$1 \text{ бэр/с} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/кг}$

## Вопросы для самоконтроля

1. Для чего вводятся понятия различных доз радиоактивного облучения?
2. Какие процессы происходят при прохождении ионизирующего излучения через вещество?
3. Какие виды излучения и при каких условиях наиболее опасны для человека?
4. Каковы способы защиты от различных видов излучения?
5. Системные и внесистемные единицы измерений в области радиационной безопасности и защиты.
6. Какие вещества называют радиоактивными, и что представляет собой период полураспада радиоактивного вещества?
7. Что такое активность радиоактивного вещества, каковы её единицы измерения?
8. Что характеризует поглощенная доза облучения, как она рассчитывается и в каких единицах измеряется?
9. Что учитывает эквивалентная доза облучения? Перечислите единицы ее измерения.
10. С какой целью введена эффективная и эквивалентная доза облучения и в чем сущность взвешивающих коэффициентов качества?
11. Что понимают под мощностью любой дозы облучения, в каких единицах ее измеряют?
12. Перечислите приборы, с помощью которых регистрируются ионизирующие излучения.

## Тест 1

Вопрос	Варианты ответа	Ответ
Какая часть атома вносит основной вклад в рассеяние альфа-частиц в опытах Резерфорда?	1) атомное ядро 2) отдельные протоны 3) отдельные электроны 4) электронная оболочка в целом	
Энергия фотона, испускаемого атомом при переходе атома из состояния с энергией $E_1$ в состояние с энергией $E_2$ , определяется выражением, ...	1) $E_1 - E_2$ 2) $E_1 + E_2$ 3) $E_1$ 4) $E_2$	
Сколько всего нуклонов содержится в ядре атомов изотопа урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ ?	1) 92 2) 235 3) 143 4) 327	
Ядро урана ${}_{92}^{238}\text{U}$ испытывает последовательно один альфа-распад и два бета-распада. В какое ядро оно превращается?	1) ${}_{92}^{234}\text{U}$ 2) ${}_{93}^{239}\text{Np}$ 3) ${}_{90}^{234}\text{Th}$ 4) ${}_{91}^{234}\text{Pa}$	
Сколько нейтронов содержится в ядре атома изотопа лития ${}_{3}^7\text{Li}$ ?	1) 10 2) 7 3) 4 4) 3	
В начале наблюдения было 8 млн. радиоактивных ядер. Через 30 суток остался 1 млн. Чему равен период полураспада (сут) данного радиоактивного изотопа?	1) 10 2) 5 3) 15 4) 20	
В каком из перечисленных ниже приборов для регистрации ядерных излучений прохождение быстрой заряженной частицы вызывает появление импульса электрического тока в газе?	1) в камере Вильсона 2) в счетчике Гейгера 3) в пузырьковой камере 4) в толстослойной фотоэмульсии	
Какие из следующих утверждений верны? Средний период полураспада: 1) увеличивается с увеличением массы радиоактивного образца; 2) уменьшается со временем; 3) не зависит ни от каких химических превращений данного образца; 4) зависит от химических превращений радиоактивного образца.	1) 1 2) 2 3) 3 4) 1, 2	

## Тест 2

Вопрос	Варианты ответа	Ответ
Доза излучения -	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) полный заряд, образованный в единице массы вещества</li> <li>2) поглощенная энергия в единице массы вещества</li> <li>3) поглощенная энергия в единице объема вещества</li> </ol>	
Керма – дозиметрическая характеристика	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) взаимодействия заряженных частиц с веществом</li> <li>2) взаимодействия непосредственно ионизирующего излучения с веществом</li> <li>3) взаимодействия косвенно ионизирующего излучения с веществом</li> </ol>	
Рентген – это единица	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) поглощенной дозы</li> <li>2) эквивалентной дозы</li> <li>3) экспозиционной дозы</li> </ol>	
Зиверт – это единица	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) поглощенной дозы</li> <li>2) эквивалентной дозы</li> <li>3) экспозиционной дозы</li> </ol>	
Понятие эквивалентная доза учитывает	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) относительную биологическую эффективность излучения</li> <li>2) вид облучаемого органа</li> <li>3) количество облучаемых лиц</li> </ol>	
Нормы радиационной безопасности устанавливают	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) допустимое время облучения</li> <li>2) допустимую мощность дозы</li> <li>3) предел дозы годового облучения</li> </ol>	
Экспозиционная доза характеризует	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) взаимодействие рентгеновского и гамма-излучения с веществом</li> <li>2) взаимодействие непосредственно ионизирующего излучения с воздухом</li> <li>3) взаимодействие рентгеновского и гамма-излучения с воздухом</li> </ol>	

## Примеры решения задач

**Задача 1.** Определить дефект массы, энергию связи и энергию связи на нуклон для ядра  ${}^7_3\text{Li}$ , если масса атома  $M=7.016$  а.е.м. (атомная единица массы  $1 \text{ а.е.м.} = 1.6605 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ )

Решение. Дефект массы  $\Delta m$  определяется выражением  $Zm_p + (A-Z)m_n - M(A, Z)$ .

В ядре  ${}^7_3\text{Li}$  имеется 3 протона и  $7-3=4$  нейтрона, следовательно

$$\Delta m = 3 \cdot 1.6726 \cdot 10^{-27} + 4 \cdot 1.6749 \cdot 10^{-27} - 7.016 \cdot 1.6605 \cdot 10^{-27} = 0.0695 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

В а.е.м. дефект масс равен  $\Delta m = 0.042$  а.е.м.

Энергия связи ядра  $E_{\text{св}}(A, Z) = [Zm_p + (A-Z)m_n - M(A, Z)]c^2$

$$E_{\text{св}} = 6.95 \cdot 10^{-25} \cdot 9 \cdot 10^{16} = 0.621 \cdot 10^{-11} \text{ Дж} = 39.3 \text{ МэВ}$$

Всего нуклонов 7; тогда энергия связи, приходящаяся на один нуклон, есть

$$E_{\text{св на нуклон}} = E_{\text{св}} / 7 = 5.6 \text{ МэВ.}$$

**Задача 2.** Требуется ли создание специальной защиты, если на рабочем месте персонала от источника ионизирующих излучений мощность эквивалентной дозы составляет  $P=2.3 \cdot 10^{-9}$  Зв/с? Доза облучения распределена по году равномерно. В течение года работа проводится 1700 часов.

Решение. Рассчитаем эквивалентную дозу, получаемую человеком за год:

$$P=2.3 \cdot 10^{-9} \text{ Зв/с}$$

$$t=1700 \text{ часов}$$

$$H=?$$

$$H=Pt=2.3 \cdot 10^{-9} \cdot 1700 \cdot 3600=1.41 \cdot 10^{-2} \text{ Зв/год.}$$

По нормам радиационной безопасности (НРБ-2000) предельно допустимая доза для облучаемых лиц категории А равна 50 мЗв/год. Таким образом, создание специальной защиты на рабочем месте не требуется.

**Задача 3.** Индивидуальная доза облучения, полученная в результате воздействия источника  ${}^{60}\text{Co}$  в течение 10 с, составила 100 Гр. Сколько фотонов  $\gamma$ -

излучения попало при этом в организм человека массой 75 кг, если каждый фотон теряет в тканях тела около 40 % своей энергии ?

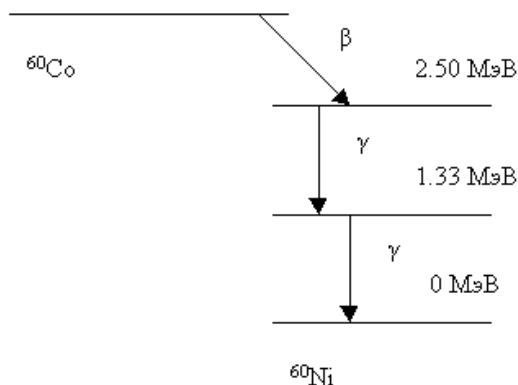
Решение. При распаде  $^{60}\text{Co}$  образуется 2  $\gamma$ -кванта с энергией 1.33 и 1.17 МэВ. Каждая такая пара фотонов выделит в тканях человека  $(1.33+1.17)\cdot 0.4 = 1$  МэВ  $= 1.6\cdot 10^{-13}$  Дж.

Для человека весом 75 кг поглощенная доза от одной пары фотонов составит

$$\frac{1.6\cdot 10^{-13} \text{ Дж}}{75 \text{ кг}} = 2.13\cdot 10^{-15} \text{ Гр}$$

При получении дозы 100 Гр число фотонов, попавших в организм, составит

$$2\frac{100 \text{ Гр}}{2.13\cdot 10^{-15} \text{ Гр}} = 9.4\cdot 10^{16}$$



**Задача 4.** Изучение лучевых катаракт на кроликах показало, что под действием  $\gamma$ -излучения катаракты развиваются при дозе  $D_1 = 200$  рад. Под действием быстрых нейтронов (залы ускорителей) катаракта возникает при дозе  $D_2 = 20$  рад. Определить коэффициент качества для быстрых нейтронов.

Решение. Для  $\gamma$ -излучения  $H=1\cdot D_1$

Для нейтронов  $H= W_R \cdot D_2$

$$W_R = D_1 / D_2=10$$

**Задача 5.** В ткани массой  $m = 10$  г поглощается  $10^9$   $\alpha$ -частиц с энергией  $E = 5$  МэВ. Найти эквивалентную дозу. Коэффициент качества для  $\alpha$ -частиц  $W_R = 20$ .

Решение.

Поглощенная энергия в Дж:  $E=5 \cdot 1.6 \cdot 10^{-13} \cdot 10^9 / 0.01 = 8 \cdot 10^{-6}$  Дж

Поглощенная доза  $D=E/m=8 \cdot 10^{-6} / 10^{-2} = 8 \cdot 10^{-4}$  Гр

Эквивалентная доза  $H= W_R \cdot D=20 \cdot 8 \cdot 10^{-4} = 1.6 \cdot 10^{-2}$  Зв=1.6 бэр

**Задача 6.** Определить число  $N$  слоев половинного ослабления, уменьшающих интенсивность  $I$  узкого пучка  $\gamma$ -излучения в  $k=100$  раз.

Решение. Если через слой половинного ослабления пройдет  $1/2$  исходной интенсивности, то через  $N$  слоев пройдет  $(1/2)^N$ . По условию ослабление в 100 раз, значит

$$\left(\frac{1}{2}\right)^N = \frac{1}{100} \Rightarrow 2^N = 100 \Rightarrow N = \frac{\log 100}{\log 2} = 6.6$$

**Задача 7.** Определить активность пробы, содержащей изотопы  $^{103}\text{Ru}$  и  $^{106}\text{Ru}$ , массой 32.6 и 120 граммов, соответственно.

Решение. Периоды полураспада  $^{103}\text{Ru}$  и  $^{106}\text{Ru}$ :  $T_{1/2}(^{103}\text{Ru})=39.3$  сут.;  $T_{1/2}(^{106}\text{Ru})=365$  сут.

Определим активность  $^{103}\text{Ru}$  и  $^{106}\text{Ru}$  используя выражение:  $m=k \times M \times T_{1/2} \times A$ ,

$k$  – константа, зависящая от избранных единиц измерения. Если  $T_{1/2}$  задан в сутках, активность в Бк, а масса в граммах, то  $k=2.07 \cdot 10^{-19}$ ,

$M$  – атомная масса радионуклида.

$$A_{103} = \frac{m_{103}}{k \times M \times T_{1/2}} = \frac{32.6}{2.07 \times 10^{-19} \times 103 \times 39.3} = 3.9 \times 10^{16} \text{ Бк}$$

$$A_{106} = \frac{m_{106}}{k \times M \times T_{1/2}} = \frac{120}{2.07 \times 10^{-19} \times 106 \times 365} = 1.5 \times 10^{16} \text{ Бк}$$

Активность пробы:  $A_{\text{пробы}} = A_{103} + A_{106} = (3.9 + 1.5) 10^{16} = 5.4 \times 10^{16}$  Бк

**Задача 8.** Начальная активность  $^{226}\text{Ra}$  составляет  $10^{12}$  Бк. Рассчитать число радиоактивных ядер этого вещества через 1000 лет.

Решение.  $A=A_0e^{-\lambda t}$

$$A=A_0e^{-\frac{0.693t}{T_{1/2}}}=10^{12}e^{-\frac{0.693 \times 1000}{1600}}=0.65 \times 10^{12} \text{ Бк}$$

Далее рассчитаем число радиоактивных ядер:  $A = \lambda N$

$$N = \frac{A}{\lambda} = \frac{A \times T_{1/2}}{0.693} = \frac{0.65 \times 10^{12} \times 1600 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60}{0.693} = 4.8 \times 10^{22} \text{ ядер.}$$

**Задача 9.** Определить величину экспозиционной дозы гамма-излучения от точечного источника  $^{60}\text{Co}$  активностью 10 мКи на расстоянии 0.5 м в течении 1 недели.

Решение. Период полураспада  $^{60}\text{Co}$ :  $T_{1/2}(^{60}\text{Co}) = 5.3$  года.

$$X = \frac{A \cdot \Gamma \cdot t}{r^2} = \frac{10 \cdot 12.93 \cdot 7 \cdot 24}{50^2} = 8.67 \text{ Р}$$

**Задача 10.** Определить, какую эквивалентную дозу накопил биологический объект за 7 суток, если он подвергся комбинированному облучению альфа- и бета-частицами, мощности поглощенных доз которых составили 20 и 300 Гр/ч, соответственно.

Решение.

Мощность поглощенной дозы  $\dot{D} = \frac{dD}{dt}$ , мощность экспозиционной дозы

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt}$$

Рассчитаем дозу, полученную биологическим объектом за 7 суток (168 ч.) об-

лучения альфа-частицами:  $D_\alpha = \dot{D}_\alpha \cdot t = 20 \cdot 168 = 3360 \text{ Гр}$

При облучении бета-частицами:  $D_\beta = \dot{D}_\beta \cdot t = 300 \cdot 168 = 50400 \text{ Гр}$

Определим эквивалентную дозу, с учетом коэффициентов качества облучения:

$$H = \sum_{\alpha, \beta} D \cdot W_R = 3360 \cdot 20 + 50400 \cdot 1 = 1.18 \cdot 10^5 \text{ Гр}$$



## Задачи для самостоятельной работы

**Задача 1.** Вычислить дефект массы  $\Delta m$  и энергию связи  $E_{\text{св}}$  ядра  ${}^5\text{B}^{11}$ .

**Задача 2.** Рассчитать керма-постоянную источника  ${}^{40}\text{K}$ .

**Задача 3.** Определить мощность экспозиционной дозы на расстоянии 1 м от точечного изотропного источника  ${}^{137}\text{Cs}$  активностью  $10^{10}$  Бк.

**Задача 4.** Определить мощность экспозиционной дозы на расстоянии 50 см от источника  ${}^{60}\text{Co}$  активностью 900 мКи.

**Задача 5.** Определить период полураспада  $T_{1/2}$  и постоянную распада радионуклида, если за сутки его активность уменьшилась на а) 75 %; б) 0.01 %.

**Задача 6.** Определить массу активных атомов нуклида  ${}^{239}\text{Pu}$  активностью а) 10 Бк, б) 10 Ки.  $T_{1/2} ({}^{239}\text{Pu}) = 24000$  лет.

**Задача 7.** Определить гамма постоянную  ${}^{137}\text{Cs}$  и активность источника из этого радионуклида, которая была бы эквивалентна по создаваемой мощности экспозиционной дозе 1мКи  ${}^{226}\text{Ra}$ .

**Задача 8.** Начальная активность  ${}^{60}\text{Co}$  составляла  $10^9$  Бк. Рассчитать активность  $A$  этого вещества через 5 лет.  $T_{1/2} ({}^{60}\text{Co}) = 5.27$  лет.

**Задача 9.** Найдите активность 1 кг хлорида калия (KCl), учитывая, что естественное содержание радиоактивного изотопа  ${}^{40}\text{K}$  составляет 0.012% (ат.), а его период полураспада равен  $1.251 \times 10^9$  лет.

**Задача 10.** Найдите годовую дозу, которую человек получает, находясь под действием естественного радиационного фона 10 мкР/ч, и сравните полученное значение с табличным значением годовой ПДД для населения в 1 мЗв. Коэффициент качества полагать равным единице.

**Задача 11.** Используя определение экспозиционной и поглощённой дозы, установите соотношение между ними во внесистемных единицах рентген и рад. Рассматривать случай поглощения в тканеэквивалентной среде (воздухе).

**Задача 12.** Найдите точное значение активности одного грамма  $^{226}\text{Ra}$  и сравните полученное значение с историческим определением 1 Ки. Период полураспада  $^{226}\text{Ra}$  – 1620 лет.

**Задача 13.** Рассчитайте гамма-постоянную в  $\text{Р}\cdot\text{см}^2/(\text{ч}\cdot\text{мКи})$  для  $^{137}\text{Cs}$ , используя табличные данные по схеме распада и линейному коэффициенту поглощения в воздухе.

## Литература

1. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика. В 3-х тт. Т. 1. Физика атомного ядра [Электронный ресурс]: учеб. – Электрон. дан. – Санкт-Петербург: Лань, 2009. – 384 с.
2. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика. В 3-х тт. Т. 2. Физика ядерных реакций [Электронный ресурс]: учеб. – Электрон. дан. – Санкт-Петербург: Лань, 2009. – 326 с.
3. Капитонов И.М. Введение в физику ядра и частиц [Электронный ресурс]: учеб. – Электрон. дан. – Москва: Физматлит. – 2010. – 512 с.
4. Латфуллин И.А. Основы поражающего действия ионизирующего излучения на организм человека: учебное пособие. – Казань: Изд-во Казан. ун-та. – 2015. – 144 с.
5. Кутьков В.А. Величины в радиационной защите и безопасности // АНРИ. – 2007. – №. 3. – 25 с.