КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДОЗИМЕТРИИ
РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Казань
2017

УДК 539.164
ББК 22.38

Опубликовано по решению

Учебно-методической комиссии Института физики

ФГАУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

Протокол №__ от _____ 2017 г.

Заседания кафедры физики твердого тела

Протокол №__ от _____ 2017 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.

Физические основы дозиметрии. Радиационная безопасность. Учебное пособие к общему физическому практикуму, раздел ядерной физики, для обучающихся по направлению «Физика», «Радиофизика», «Астрономия» / Воронина Е.В, Дулов Е.Н., Иванова А.Г., Бикчантаев М.М. – Казань, 2017. – 19 с.

Аннотация:

Методическое пособие предназначено для обучающихся по направлению «Физика», «Радиофизика», «Астрономия».

© Дулов Е.Н.,
Воронина Е.В.,
Иванова А.Г.,
Бикчантаев М.М.
©Казанский федеральный университет, 2017

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 (Φ) и т.д. Медико-биологические исследования потребовали введения специфических характеристик: эквивалентной дозы (H), эффективной дозы (H_E), относительной биологической эффективности 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. 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, α-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 взаимодействия со средой принимается за исходное. Вторичное излучение возникает в результате взаимодействия первичного ионизирующего излучения с данной средой.

Флюенс частиц является количественной характеристикой поля излучения. Эта величина определяется следующим образом. Поместим в поле излучения абсолютно прозрачную пробную сферу с площадью сечения, равной dS. Подсчитаем число dN частиц, которые пересекут поверхность и попадут внутрь сферы. Флюенс частиц определяется как отношение числа проникших в сферу частиц dN к площади поперечного сечения сферы dS:

$$\Phi=\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}S}. \qquad (1.1)$$

Единица величины флюенса – число частиц на см^2.

Изменение флюенса излучения во времени характеризует плотность потока частиц (мощность флюенса), которая равна отношению величины приращения флюенса dΦ за некоторый промежуток времени dt к длительности этого промежутка:

$$\varphi=\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}^2N}{\mathrm{d}S\mathrm{d}t}. \qquad (1.2)$$

Единица величины плотности потока частиц – 1/(см^2·с).

Флюенс энергии:

$$\Phi_E=\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}S}, \qquad (1.3)$$

$$\varphi_E=\frac{\mathrm{d}\Phi_E}{\mathrm{d}t}. \qquad (1.4)$$

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:

$$A=\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}t}, \qquad (1.5)$$

где dN – ожидаемое число спонтанных преобразований 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}Ra. Эта единица получила название кюри (Ки). 1 Ки = $3.7\cdot10^{10}$ 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:

$$A=N\cdot\lambda, \qquad (1.6)$$

где N – количество радиоактивных ядер данного типа; λ – постоянная распада радионуклида.

Используя определение λ (1.6), можно записать закон радиоактивного распада в дифференциальной форме:

$$\mathrm{d}N=-N\cdot\lambda\cdot\mathrm{d}t, \qquad (1.7)$$

что позволяет интерпретировать λ как микроскопическую характеристику – вероятность распада одного ядра в единицу времени.

Интегрируя (1.7), получим закон радиоактивного распада в интегральной форме:

$$N=N_0\cdot\exp\left(-\lambda\cdot t\right). \qquad (1.8)$$

Постоянная распада λ 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:

$$\frac{N_0}{2}=N_0\cdot\exp\left(-\lambda\cdot T_{1/2}\right), \qquad (1.9)$$

$$T_{1/2}=\frac{\ln 2}{\lambda}=\tau\ln 2,\ \ \tau=\frac{1}{\lambda},\ \ \ln 2=0.693 \qquad (1.10)$$

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

Число распадов, произошедших в образце за период времени t:

$$N(t)=N_0(1\text{-}2^{-t/T_{1/2}}), \qquad (1.11)$$

$$N_0=\frac{m}{\mu}N_A, \qquad (1.12)$$

$$A=\frac{\ln 2}{T_{1/2}}\frac{m}{\mu}N_A 2^{-t/T_{1/2}}. \qquad (1.13)$$

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

2.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 $\mathrm{d}\overline{E}$, переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе $\mathrm{d}m$ вещества в этом объеме:

$$D=\frac{\mathrm{d}\overline{E}}{\mathrm{d}m}. \qquad (2.1)$$

Под переданной энергией в определении поглощенной дозы понимается:

$$E=E_{вх}-E_{вых}+\sum Q_1-\sum Q_2, \qquad (2.2)$$

где $E_{вх}$ – суммарная кинетическая энергия всех непосредственно и косвенно ионизирующих частиц, входящих в данный объем, $E_{вых}$ – 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). Использовавшаяся 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.

$$\dot{D}=\frac{\mathrm{d}D}{\mathrm{d}t}\ \text{(Гр/с)}. \qquad (2.3)$$

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:

$$K = \frac{\mathrm{d}E_k}{\mathrm{d}m}. \qquad (2.4)$$

Здесь $\mathrm{d}E_k$ – полная кинетическая энергия заряженных частиц, высвобождаемых в элементарном объеме; $\mathrm{d}m$ – масса этого объема. Единица кермы (Дж/кг) называется грей (Гр), как и в случае поглощённой 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 $\mathrm{d}m$:

$$X = \frac{\mathrm{d}\bar{Q}}{\mathrm{d}m}. \qquad (2.5)$$

Единица экспозиционной дозы – Кл/кг. Внесистемная единица экспозиционной дозы – *рентген* (Р), 1 Р = $2.58\cdot10^{-4}$ Кл/кг и соответствует образованию $2.08\cdot10^{9}$ пар ионов (единица заряда в системе единиц СГСЭ) в 1 см^3 воздуха. Поскольку средняя энергия ионизации воздуха 33.85 эВ, энергетический эквивалент кулона на килограмм равен 1 Кл/кг = 33.85 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 $8.8\cdot10^{-3}$ 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 $\mathrm{d}X$ за интервал времени $\mathrm{d}t$ к этому интервалу времени: $\dot{X} = \frac{\mathrm{d}X}{\mathrm{d}t}$. Для экспозиционной дозы в СИ единица мощности дозы — ампер на килограмм (А/кг), внесистемная единица - рентген в секунду (Р/с).

Зная активность точечного изотропного источника, можно сравнительно просто рассчитывать создаваемые им значения мощности дозы. Кроме активности,

необходимо иметь сведения о схеме распада радионуклида, вероятности 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 Г, 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:

$$\dot{X} = \Gamma \times \frac{A}{r^2}. \qquad (2.6)$$

Распространённая единица измерения гамма-постоянной для мощности экспозиционной дозы – Р·см^2/(ч·мКи) (рентген на сантиметр в квадрате в час на миликюри. 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.

Передача энергии излучением

Характеристикой взаимодействия косвенно ионизирующего излучения с веществом является сумма начальных кинетических энергий всех заряженных ионизирующих частиц, высвобожденных незаряженными ионизирующими частицами в веществе – E_{tr}. Индекс *tr* (сокращение английского transferred from – переданный от кого-либо, или от чего-либо) указывает, что высвобождение этих частиц является следствием передачи энергии от излучения веществу, а результатом является потеря энергии излучения.

Отношение средней доли энергии $\mathrm{d}\overline{E_{tr}} / E$ косвенно ионизирующего излучения с энергией E, которая преобразуется в кинетическую энергию заряженных частиц при прохождении элементарного пути dl в веществе, к длине этого пути является величиной линейного коэффициента передачи энергии излучения

$$\mu_{tr}(E) = \frac{\mathrm{d}\overline{E_{tr}} / E}{\mathrm{d}l}. \qquad (2.7)$$

Здесь $\mathrm{d}\overline{E_{tr}}$ означает среднюю величину начальной энергии заряженных частиц, высвобождаемых на элементарном пути dl. Единица измерения линейного коэффициента передачи энергии косвенно ионизирующего излучения – 1/м.

Характеристикой взаимодействия заряженных частиц с веществом является энергия излучения, переданная веществу во взаимодействиях, приводящих к ионизации и возбуждению атомов и молекул – ε. Отношение $\mathrm{d}\overline{\varepsilon}$, средней энергии, потерянной заряженной частицей вследствие столкновений на элементарном пути dl, к длине этого пути является величиной *полной линейной передачи энергии L*.

$$L = \frac{\mathrm{d}\overline{\varepsilon}}{\mathrm{d}l}. \qquad (2.8)$$

Здесь $\overline{\varepsilon}$ означает полную среднюю энергию, потерянную заряженной частицей при столкновениях с электронами и поглощенную веществом. Для обозначения полной линейной передачи энергии используется аббревиатура ЛПЭ. Единица измерения ЛПЭ – Дж/м.

Установлено, что биологический эффект облучения существенно зависит от вида и энергии излучения, а именно от величины L - линейной передачи энергии (ЛПЭ) от первичных или вторичных заряженных частиц. ЛПЭ – величина, равная dE/dl, это средняя энергия, локально переданная веществу заряженной частицей на интервале длины ее следа dl. Локальность может быть определена заданием максимального расстояния, на котором учитывается передача энергии. Так, энергия, унесенная квантами тормозного излучения и поглощенная на значительном расстоянии от следа части-

цы, не учитывается при оценке ЛПЭ. Можно считать, что величина ЛПЭ характеризует степень повреждения отдельной клетки живой ткани, через которую прошла заряженная частица.

3. 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, приводящей к тем же биологическим эффектам. 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, ЛПЭ 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 $\overline{Q}$.

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”.

$$H_T = \sum_R D_{T,R} \cdot W_R \ . \qquad (3.1)$$

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:

$$E = \sum_T H_T \times W_T = \sum_{T,R} W_T \cdot W_R \cdot D_{T,R} \ . \qquad (3.2)$$

Эффективная доза также измеряется в зивертах, Зв (Дж/кг).

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*** коже**** кистях и стопах*****	 150 мЗв 500 мЗв 500 мЗв	 15 мЗв 50 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^2. 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^2/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^2 значению в базальном слое кожи, толщиной 5 мг/см^2 под покровным слоем толщиной 5 мг/см^2. На ладонях толщина покровного слоя – 40 мг/см^2. Указанным пределом допускается облучение всей кожи человека при условии, что в пределах усредненного облучения любого 1 см^2 площади кожи этот предел не будет превышен. Предел дозы при облучении кожи лица обеспечивает непревышение 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

Орган или ткань	**Поглощенная доза в органе или ткани за 2 суток, Гр**
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).

Таблица 4. 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	λ	Отношение доли ядер dN/N радионуклида, распадающихся за интервал времени dt, к этому интервалу времени: $\lambda = \frac{1}{N}\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}t} = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}}$	$с^{-1}$
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: $A = \frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}t}$	Бк
Энергия ионизирующих частиц	E	Энергия ионизирующих частиц излучения (без учета энергии покоя)	Дж
Флюенс (перенос) ионизирующих частиц	Φ	Отношение числа ионизирующих частиц dN, проникающих в элементарную сферу, к площади центрального сечения dS этой сферы: $\Phi = \frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}S}$	$см^{-2}$
Плотность потока ионизирующих частиц	φ	Отношение потока ионизирующих частиц dF, проникающих в элементарную сферу, к площади центрального сечения dS этой сферы: $\varphi = \frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}S}\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}^2N}{\mathrm{d}S\mathrm{d}t}$	$с^{-1}\cdot см^{-2}$
Передача энергии линейная полная (ЛПЭ) (Если не определяется иное, через ЛПЭ и L обозначают полную передачу энергии заряженной частицей воде).	L	Отношение средней энергии d$\bar{\varepsilon}$, переданной веществу заряженной частицей вследствие столкновений на элементарном пути dl, к длине этого пути: $L = \frac{\mathrm{d}\bar{\varepsilon}}{\mathrm{d}l}$	Дж/м
Базовые дозиметрические величины			
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: $K = \frac{\mathrm{d}\overline{E_{tr}}}{\mathrm{d}m}$	Гр

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

Таблица 5. 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 Ки = $3.7\cdot10^{10}$ Бк; 1 Бк = $2.703\cdot10^{-11}$ Ки
Энергия частиц	Джоуль (Дж)	электронвольт (эВ)	1 эВ = $1.602\cdot10^{-19}$ Дж
Керма	Грэй (Гр), равный одному джоулю на килограмм (Дж/кг)	рад (рад)	1 рад = $1\cdot10^{-2}$ Гр; 1 Гр = 100 рад
Экспозиционная доза	Кулон на килограмм (Кл/кг)	Рентген (Р)	1 Р = $2.58\cdot10^{-4}$ Кл/кг; 1 Кл/кг = $3.88\cdot10^{3}$ Р
Поглощенная доза	Грэй (Гр), равный одному джоулю на килограмм (Дж/кг)	рад (рад)	1 рад = $1\cdot10^{-2}$ Гр; 1 Гр = 100 рад
Эквивалентная доза	Зиверт (Зв), джоуль на килограмм (Дж/кг)	бэр (бэр)	1 Зв = 100 бэр; 1 бэр = $1\cdot10^{-2}$ Зв=$1\cdot10^{-2}$ Дж/кг
Мощность экспозиционной дозы излучения	Ампер на килограмм (А/кг)	Рентген в секунду (Р/с)	1 Р/с = $2.58\cdot10^{-4}$ А/кг
Мощность поглощенной дозы излучения	Грей в секунду (Гр/с)	рад в секунду (рад/с)	1 рад/с = $1\cdot10^{-2}$ Гр/с
Мощность эквивалентной дозы излучения	Ватт на килограмм (Вт/кг)	бэр в секунду (бэр/с)	1 бэр/с = $1\cdot10^{-2}$ Вт/кг

Вопросы для самоконтроля

1. С какой целью 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?

Тест

Вопрос	Варианты ответа	Ответ
Доза излучения -	1 полный заряд, образованный в единице массы вещества 2 поглощенная энергия в единице массы вещества 3 поглощенная энергия в единице объема вещества	
Керма – дозиметрическая характеристика	1 взаимодействия заряженных частиц с веществом 2 взаимодействия непосредственно ионизирующего излучения с веществом 3 взаимодействия косвенно ионизирующего излучения с веществом	
Рентген – это единица	1 поглощенной дозы 2 эквивалентной дозы 3 экспозиционной дозы	
Зиверт – это единица	1 поглощенной дозы 2 эквивалентной дозы 3 экспозиционной дозы	
Понятие эквивалентная доза учитывает	1 относительную биологическую эффективность излучения 2 вид облучаемого органа 3 количество облучаемых лиц	
Нормы радиационной безопасности устанавливают	1 допустимое время облучения 2 допустимую мощность дозы 3 предел дозы годового облучения	
Экспозиционная доза характеризует	1 взаимодействие рентгеновского и гамма-излучения с веществом 2 взаимодействие непосредственно ионизирующего излучения с воздухом 3 взаимодействие рентгеновского и гамма-излучения с воздухом	

Примеры решения задач

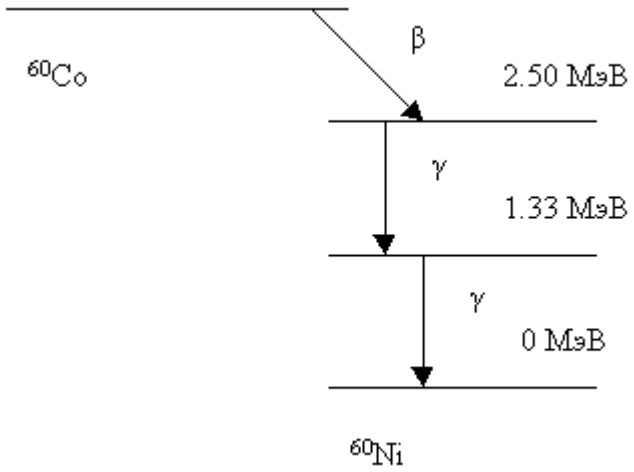
Задача 1. Требуется ли создание специальной защиты, если на рабочем месте персонала от источника ионизирующих излучений мощность эквивалентной дозы составляет P=2.3·10^{-9} Зв/с? Доза облучения распределена по году равномерно. В течение года работа проводится 1700 часов.

Решение. Рассчитаем эквивалентную дозу, получаемую человеком за год:
P=2.3·10^{-9} Зв/с
t=1700 часов
H=?

$H=Pt$=2.3·10^{-9}·1700·3600=1.41·10^{-2} 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 2. Индивидуальная доза облучения, полученная в результате воздействия источника ^{60}Co в течение 10 с, составила 100 Гр. Сколько фотонов γ-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}Co образуется 2 γ-кванта с энергией 1.33 и 1.17 МэВ. Каждая такая пара фотонов выделит в тканях человека (1.33+1.17)·0.4 = 1 МэВ = 1.3·10^{-13} Дж.



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

$$\frac{1.3\cdot10^{-13}\,\text{Дж}}{75\ \text{кг}} = 2.13\cdot10^{-15}\ \text{Гр}$$

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

$$2\frac{100\ \text{Гр}}{2.13\cdot10^{-15}\ \text{Гр}} = 9.4\cdot10^{16}$$

Задача 3. Изучение лучевых катаракт на кроликах показало, что под действием **γ**-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 γ-излучения $H=1\cdot D_1$
Для нейтронов $H= W_R \cdot D_2$
$W_R = D_1/D_2=10$

Задача 4. В ткани массой m = 10 г поглощается 10^9 α-частиц с энергией E = 5 МэВ. Найти эквивалентную дозу. Коэффициент качества для α-частиц W_R = 20.

Решение.
Поглощенная энергия в Дж $E=5\cdot1.6\cdot10^{-13}\cdot10^9=8\cdot10^{-6}$ Дж
Поглощенная доза $D=E/m=8\cdot10^{-6}/10^{-2}=8\cdot10^{-4}$ Гр
Эквивалентная доза $H= W_R \cdot D=20\cdot8\cdot10^{-4}=1.6\cdot10^{-2}$ Зв=1.6 бэр

Задача 5. Определить число N слоев половинного ослабления, уменьшающих интенсивность I узкого пучка γ-излучения в k=100 раз.

Решение. Если через слой половинного ослабления пройдет ½ исходной интенсивности, то через N слоев пройдет $(1/2)^N$. По условию ослабление в 100 раз, значит

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

Задача 6. Определить активность пробы, содержащей изотопы ^{103}Ru и ^{106}Ru, массой 32.6 и 120 граммов, соответственно.

Решение. Периоды полураспада ^{103}Ru и ^{106}Ru: $T_{1/2}(^{103}\text{Ru})$=39.3 сут.; $T_{1/2}(^{106}\text{Ru})$=365 сут.
Определим активность ^{103}Ru и ^{106}Ru используя выражение: $m=\text{k}\times M\times T_{1/2}\times A$,
k – констатнта, зависящая от избранных единиц измерения. Если $T_{1/2}$ задан в сутках, активность в Бк, а масса в граммах, то $\text{k}=2.07\cdot10^{-19}$,
M – атомная масса радионуклида.

$$A_{103} = \frac{m_{103}}{\text{k}\times M\times T_{1/2}} = \frac{32.6}{2.07\times10^{-19}\times103\times39.3} = 3.9\times10^{16} \text{ Бк}$$

$$A_{106} = \frac{m_{106}}{\text{k}\times M\times T_{1/2}} = \frac{120}{2.07\times10^{-19}\times106\times365} = 1.5\times10^{16}$$

Активность пробы:

$$A_{\text{пробы}} = A_{103} + A_{106} = (3.9+1.5)10^{16} = 5.4\times10^{16}$$

Задача 7. Начальная активность ^{226}Ra составляет 10^{12} Бк. Рассчитать число радиоактивных ядер этого вещества через 1000 лет.

Решение.

$$A=A_0e^{-\lambda t}$$

$$A=A_0e^{-\frac{0.693t}{T_{1/2}}} = 10^{12}e^{-\frac{0.693\times1000}{1600}} = 0.65\times10^{12} \text{ Бк}$$

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

$$N=\frac{A}{\lambda}=\frac{A\times T_{1/2}}{0.693}=\frac{0.65\times10^{12}\times1600\times365\times24\times60\times60}{0.693}=4.8\times10^{22}\ \text{ядер.}$$

Задача 8. Определить величину экспозиционной дозы гамма-излучения от точечного источника ^{60}Co активностью 10 мКи на расстоянии 0.5 м в течении 1 недели.

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

$$X=\frac{A\cdot\Gamma\cdot t}{r^2}=\frac{10\cdot12.93\cdot7\cdot24}{50^2}=8.67\ \text{Р.}$$

Задача 9. 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 $\dot{D}=\frac{\mathrm{d}D}{\mathrm{d}t}$, мощность экспозиционной дозы $\dot{X}=\frac{\mathrm{d}X}{\mathrm{d}t}$.

Рассчитаем дозу, полученную биологическим объектом за 7 суток (168 ч.) облучения альфа-частицами: $D_\alpha=\dot{D}_\alpha\cdot t=20\cdot168=3360$ Гр

При облучении бета-частицами: $D_\beta=\dot{D}_\beta\cdot t=300\cdot168=50400$ Гр

Определим эквивалентную дозу, с учетом коэффициентов качества облучения:

$$H=\sum_{\alpha,\beta}D\cdot W_{\mathrm{R}}=3360\cdot20+50400\cdot1=1.18\cdot10^5\ \text{Гр}$$

Задачи для самостоятельной работы

Задача 1. Рассчитать керма-постоянную источника ^{40}K.

Задача 2. Определить мощность экспозиционной дозы на расстоянии 1 м от точечного изотропного источника ^{137}Cs активностью 10^{10} Бк.

Задача 3. Определить мощность экспозиционной дозы на расстоянии 50 см от источника ^{60}Co активностью 900 мКи.

Задача 4. Определить период полураспада $T_{1/2}$ и постоянную распада радионуклида, если за сутки его активность уменьшилась на а) 75 %; б) 0.01 %.

Задача 5. Определить массу активных атомов нуклида ^{239}Pu активностью а) 10 Бк, б) 10 Ки. $T_{1/2}$ (^{239}Pu) = 24000 лет.

Задача 6. Определить гамма постоянную ^{137}Cs и активность источника из этого радионуклида, которая была бы эквивалентна по создаваемой мощности экспозиционной дозе 1мКи ^{226}Ra.

Задача 7. Начальная активность ^{60}Co составляла 10^9 Бк. Рассчитать активность A этого вещества через 5 лет. $T_{1/2}$ (^{60}Co) = 5.27 лет.

Задача 8. Найдите активность 1 кг хлорида калия (KCl), учитывая, что естественное содержание радиоактивного изотопа ^{40}K составляет 0.012% (ат.), а его период полураспада равен 1.251×10^9 лет.

Задача 9. 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 10. Используя определение экспозиционной и поглощённой дозы, установите соотношение между ними во внесистемных единицах рентген и рад. Рассматривать случай поглощения в тканеэквивалентной среде (воздухе).

Задача 11. Найдите точное значение активности одного грамма ^{226}Ra и сравните полученное значение с историческим определением 1 Ки. Период полураспада ^{226}Ra – 1620 лет.

Задача 12. Рассчитайте гамма-постоянную в Р·см^2/(ч·мКи) для ^{137}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.