

Дозиметрия ионизирующих излучений

Дозы ионизирующего излучения

Основной физической величиной, принятой в дозиметрии для измерения ионизирующего излучения, является **доза** излучения. Понятие «доза» допускает два толкования. В соответствии с первой трактовкой доза излучения является количественной характеристикой излучения, в соответствии со второй трактовкой – количественной характеристикой результата взаимодействия излучения с веществом. Приведенный ниже термин «экспозиционная доза» в большей степени соответствует первой трактовке, а термин «поглощенная доза» – второй.

Радиационную обстановку на местности определяет имеющееся там поле ионизирующего излучения, и в первую очередь поле гамма излучения вследствие его большой проникающей способности. Взаимодействуя с воздухом, гамма излучение вызывает его ионизацию, причем уровень ионизации воздуха соответствует интенсивности излучения и может служить характеристикой поля излучения.

Экспозиционная доза X определяется как отношение суммарного заряда dQ всех ионов одного знака, созданных гамма излучением в элементарном объеме воздуха, к массе dm воздуха в этом объеме:

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad . \quad (1)$$

Само определение экспозиционной дозы допускает простой и удобный способ ее измерения: для этого достаточно измерить заряд ионов одного знака, образовавшихся в облучаемой воздушной ионизационной камере.

Единицей измерения экспозиционной дозы в системе СИ должен быть кулон на килограмм [C/kg; Кл/кг]. Однако исторически сложилось так, что экспозиционную дозу обычно выражают во внесистемных единицах – рентгенах [R; P].

Рентген - это единица экспозиционной дозы фотонного излучения, при прохождении которого через 0,001293 г воздуха (это 1см³ воздуха при нормальных условиях) в результате всех ионизационных процессов в воздухе создаются ионы, несущие одну электростатическую единицу количества электричества каждого знака.

То, что экспозиционная доза определена только для воздуха и только для фотонного излучения, существенно ограничивает область ее применения. Переход на единицы СИ предполагает изъятие из употребления понятия экспозиционная доза.

Воздействие ионизирующего излучения на вещество зависит как от состава вещества, так и от энергии, переданной излучением этому веществу. Результат воздействия излучения характеризуется поглощенной дозой, определяемой следующим образом.

Поглощенная доза ионизирующего излучения D равна отношению средней энергии dE , переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе dm вещества в этом объеме:

$$D = \frac{dE}{dm} . \quad (2)$$

В системе СИ поглощенная доза измеряется в джоулях, деленных на килограмм (Дж/кг), и имеет специальное название – грей [Gy; Гр].

Грэй равен поглощенной дозе ионизирующего излучения, при которой веществу массой 1 кг передается энергия ионизирующего излучения, равная 1 Дж.

Вопрос о соответствии между экспозиционной и поглощенной дозами можно ставить только в том случае, если эти дозы создаются гамма излучением в воздушной среде. Даже в этом случае, строго говоря, нет взаимно однозначного соответствия между ними. Одно и то же количество поглощенной воздухом энергии может образовать различное число пар ионов в зависимости от энергии гамма излучения. Тем не менее, это различие невелико и можно говорить, что 1 рентген в среднем соответствует поглощенной в воздухе энергии 87,3 эрг т.е.

$$1R \approx 0,873 \cdot 10^{-2} \text{ Гр} \quad \text{или} \quad 1 \text{ Гр} \approx 115 R.$$

Любая доза является интегральной по времени характеристикой. Скорость накопления дозы характеризуется понятием *мощность дозы* – это отношение приращения дозы dD за некоторый промежуток времени dt к этому интервалу времени:

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} . \quad (3)$$

Мощность экспозиционной дозы в системе СИ должна выражаться в единицах ампер на килограмм [А/кг]. На практике используется внесистемная единица – рентген в секунду [Р/с] и ее производные: [Р/час], [мР/час], [мкР/час].

Мощность поглощенной дозы в СИ измеряется в единицах грей в секунду [Гр/с]. Также используются производные единицы – [Гр/мин], [мкГр/час] и т.п.

Воздействие ионизирующего излучения на ткани организма.

Поглощенная доза радиации, получаемая веществом любого живого организма вследствие естественного радиационного фона Земли, составляет величину порядка 10^{-3} Гр/год. Считается, что эта доза не вызывает видимых вредных биологических эффектов. Более того, сама жизнь на Земле возникла, эволюционировала и существует в условиях определенного радиационного фона.

Тем не менее, слишком большие дозы радиации опасны для живых организмов и даже могут привести к смерти.

Механизм действия радиации на молекулярном уровне можно описать следующей последовательностью событий. Частицы излучения, проникающего в биологические ткани, прямо или косвенно вызывают ионизацию многих атомов, отрывая от них электроны. Заряженные частицы (альфа или бета) непосредственно ионизируют атомы своим электрическим полем, электрически нейтральные частицы (гамма или нейтроны) вызывают ионизацию после взаимодействий, в которых образуются вторичные заряженные частицы, электрическое поле которых и вызывает ионизацию.

При ионизации атома от него отрывается электрон, который может свободно перемещаться в веществе. И свободный электрон, и ионизированный атом за время $\sim 10^{-8}$ сек участвуют в сложной цепи реакций, в результате которых образуются новые молекулы, включая и такие чрезвычайно реакционноспособные, как свободные радикалы. Далее за время $\sim 10^{-6}$ сек образовавшиеся свободные радикалы реагируют как друг с другом, так и с другими молекулами и через цепочку реакций, еще не изученных до конца, могут вызвать химическую модификацию важных в биологическом отношении молекул, необходимых для нормального функционирования клетки. Последующие биохимические изменения могут произойти как через несколько секунд, так и через десятилетия после облучения и явиться причиной немедленной гибели клеток или таких изменений в них, которые могут привести к раку.

Повреждений, вызванных в живом организме излучением, будет тем больше, чем больше энергии излучение передаст тканям. Переданная энергия полностью определяется поглощенной дозой излучения. Однако поглощенная доза не полностью определяет последствия облучения. Дело в том, что при одинаковой поглощенной дозе альфа излучение или нейтроны гораздо опаснее бета или гамма излучения. Причиной этого является различное пространственное распределение ионизации. При одном и том же общем количестве ионов более высокая их концентрация (например, в треках альфа частиц) представляет и большую опасность для клеток организма.

Если принять во внимание этот факт, для оценки последствий облучения дозу следует умножать на коэффициент, отражающий способность излучения данного вида повреждать ткани организма. Пересчитанную таким образом дозу называют **эквивалентной дозой**, а пересчетный множитель – **коэффициентом качества излучения**.

Эквивалентная доза ионизирующего излучения H – произведение поглощенной дозы D на средний коэффициент качества K ионизирующего излучения в данном элементе объема биологической ткани стандартного состава

$$H = K \cdot D \quad (4)$$

Численные значения коэффициентов качества для различных излучений приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Коэффициенты качества для различных видов излучений [5].

Виды излучений	К
Рентгеновское и γ -излучение	1
Электроны и мюоны	1
Нейтроны с энергией:	
менее 10 КэВ	5
от 10 КэВ до 100 КэВ	10
от 100 КэВ до 2 МэВ	20
от 2 МэВ до 20 МэВ	10
более 20 МэВ	5
Протоны с энергией более 2 МэВ, кроме протонов отдачи	5
Альфа- частицы, осколки деления, тяжёлые ядра отдачи	20

Единицей измерения эквивалентной дозы излучения является Дж/кг, имеющей специальное название – **зиверт** (Sv,Зв). Отметим, что для рентгеновского, бета и гамма излучения численные значения поглощенной и эквивалентной дозы совпадают.

Эквивалентная доза более адекватно учитывает возможный ущерб здоровью человека от воздействия ионизирующего излучения произвольного состава. Однако необходимо принять во внимание и тот факт, что одни части тела (органы, ткани) более чувствительны к действию радиации, чем другие. Например, при одинаковой эквивалентной дозе облучения возникновение рака в легких более вероятно, чем в щитовидной железе, а облучение половых желез особенно опасно из-за риска генетических повреждений. Для учета неодинаковой чувствительности различных органов к радиации вводится специальная дозовая характеристика - эффективная эквивалентная доза.

Эффективная эквивалентная доза определяется как сумма произведений эквивалентных доз, полученных каждым органом, на соответствующие коэффициенты радиационного риска:

$$H_{\dot{\gamma}} = \sum_i R_i \cdot H_i \quad (5)$$

где H_i – эквивалентная доза в данной ткани или органе, R_i – взвешивающий коэффициент для данной ткани или органа.

Список органов и тканей, по которым производится суммирование, а также значения взвешивающих коэффициентов приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Взвешивающие коэффициенты для тканей и органов [5].

Орган, ткань	R
гонады	0,20
костный мозг (красный)	0,12

толстый кишечник	0,12
легкие	0,12
желудок	0,12
мочевой пузырь	0,05
грудная железа	0,05
печень	0,05
пищевод	0,05
щитовидная железа	0,05
кожа	0,01
клетки костных поверхностей	0,01
остальное	0,05
Всё тело	1,00

Эффективная эквивалентная доза отражает суммарный эффект облучения для организма и используется как мера риска возникновения отдаленных последствий облучения. Она также измеряется в зивертах.

Доза в 1 Гр, получаемая водой, сможет нагреть ее только на 0,00024 °С. Тем не менее, для человека доза в 1 Зв приблизительно соответствует порогу появления детерминированных последствий после облучения или, как говорят, «лучевой болезни». При дозе 6 Зв смертность достигает 50%. При дозе менее 1 Зв явных последствий облучения не наблюдается, однако возрастает вероятность раковых заболеваний или генетических нарушений у потомства. При этом считается, что возрастание вероятности неблагоприятных последствий пропорционально полученной дозе.

Поскольку 1Зв – это очень большая доза, обычно пользуются тысячной или миллионной дозой зиверта: мЗв, мкЗв.

Мощность экспозиционной дозы фонового гамма излучения, типичная для равнинных территорий, сложенных осадочными породами, соответствует 10 – 20 мкР/час (или 0,1 – 0,2 мкЗв/час для мощности поглощенной дозы).