

4.5. Эквидозиметрия ионизирующих излучений

В 1954 г. Международная комиссия по радиационной защите (МКРЗ) рекомендовала конкретные значения коэффициента ОБЭ в зависимости от линейной плотности ионизации или от средних линейных потерь энергии в воде. Именно эти регламентированные значения предлагалось использовать в дальнейшем при определении бэра.

Таким образом, рекомендации МКРЗ 1954 г. заложили количественные основы эквидозиметрии. Единицу бэр стали понимать как биологический эквивалент рада. Рекомендации подсказывали прямолинейный способ измерения ОБЭ–дозы: для этого нужно определить отдельно поглощенную дозу отдельных компонент излучения (фотонов, нейтронов и т. п.), умножить полученные значения на соответствующие округленные значения коэффициента ОБЭ и сложить.

В том же 1954 г. Боуг впервые вычислил распределение поглощенной дозы нейтронов в воде по спектру ЛПЭ, что позволило определить более точные значения коэффициента ОБЭ. Эта работа положила начало расчетным методам, связывающим энергетический спектр и состав излучения с его качеством. В 1955 г. Снайдер и Нойфельд впервые применили метод Монте–Карло для получения распределения ОБЭ–дозы тепловых нейтронов в модели тела человека.

В 1955 г. Росси выдвинул идею создания сферического пропорционального счетчика, способного непосредственно измерять ОБЭ–дозу в бэрах. Совместно с Розенцвейгом они изготовили такой счетчик, применили его и развили метод обработки аппаратурных спектров, позволяющий восстанавливать спектр излучения в шкале ЛПЭ. Счетчик Росси был по существу первым эквидозиметром.

Дальнейшее развитие идеологии, расчетных и аппаратурных методов позволило констатировать появление новой отрасли науки и техники, которую первоначально рекомендовали называть бэрметрией, а соответствующие измерительные приборы — бэрметрами. Это название в дальнейшем использовалось и МКРЗ. Однако в последующем в связи с введением Международной системы единиц СИ МКРЗ в Рекомендации 26 отказалась от применения единицы бэр и рекомендовала новую единицу эквивалентной дозы в системе СИ – **зиверт**.

Поэтому, название бэрметрия стало анахроничным, и было предложено новое название – эквидозиметрия. Понятие эквидозиметрия толкуется по-разному. Под ней можно понимать раздел измерительной техники, обеспечивающий измерение эквивалентной дозы, т. е. решение задачи контроля уровня хронического облучения людей в малых дозах. Можно рассматривать эквидозиметрию как раздел науки и техники, занимающийся обоснованием величин, характеризующих действие излучения на человека при разных условиях воздействия с учетом пространственной и временной макро- и микронеоднородности облучения, а также разрабатывающий способы и средства измерения выбранных величин и обеспечивающий их измерение. Наконец, под эквидозиметрией можно понимать раздел науки и техники, занимающийся количественной оценкой воздействия излучения не только на человека, но и на другие биологические объекты и вообще на любые объекты, но такого воздействия, при котором существенно сказывается качество излучения. В рамках последнего определения эквидозиметрия подразделяется на отдельные ветви по типам облучаемых объектов – организмы, клетки, химические соединения, твердые тела и т. п. Объединяет их общая структура основных понятий, величин и одинаковый подход к измерению этих величин.

Эквидозиметрия находится на стыке таких дисциплин, как дозиметрия ионизирующего излучения, метрология ИИ, радиобиология, радиационная медицина, радиационная безопасность.

Вопросы радиационной безопасности персонала и населения при использовании источников ИИ в народном хозяйстве, применение их в медицине, воздействие широкого

спектра ИИ при освоении человеком космического пространства, внедрение радиационной технологии и обеспечение радиационной стойкости материалов, приборов и механизмов – все это нуждается в развитии того раздела науки и техники, который назвали эквидозиметрией.

Применительно к хроническому облучению людей в малых дозах в Рекомендациях МКРЗ 1990 года используется две величины, подобные ОБЭ:

– взвешивающий коэффициент для излучения W_R , относящийся к излучению, падающему на тело, а в случае внутреннего, к излучению испущенному при ядерном превращении. Значения W_R определены в зависимости от вида и энергии излучения и характеризуют источник излучения. Взвешивающие коэффициенты для излучения предназначены для определения нормируемых величин: величина, являющаяся мерой ущерба (вреда) от воздействия излучений на человека и его потомства.

– коэффициент качества излучения, относящийся к излучению, непосредственно передающему энергию в точке внутри облучаемого объекта.

Эквивалентная доза, единицы измерения. Эквивалентная доза (биологическая, тканевая доза) ионизирующего излучения – это произведение поглощенной дозы « D_p » на средний коэффициент качества излучения « k » в данном объеме биологической ткани стандартного состава:

$$D_{\text{экв}} = k D_p.$$

Единица измерения в СИ: **Зиверт (Зв)**. $1\text{Зв} = 10^3 \text{ мЗв} = 10^6 \text{ мкЗв}$.

Зиверт равен эквивалентной дозе, при которой произведение поглощенной дозы в биоткани стандартного состава на средний коэффициент качества равно **1 Дж/кг**. Иными словами **зиверт – это единица эквивалентной дозы любого вида излучения в биоткани, которое создает такой же биологический эффект, как и поглощенная доза в 1 Гр образцового рентгеновского или гамма-излучения.** ($1\text{Зв} = 1\text{Дж/кг}$).

В качестве **образцового** обычно принимают рентгеновское излучение с граничной энергией **200 кэВ**.

Внесистемная единица эквивалентной дозы – **бэр (биологический эквивалент рада)**. **Бэр** равен эквивалентной дозе, при которой произведение поглощенной дозы в биоткани стандартного состава на средний коэффициент качества равно **100 эрг/г**. Иными словами, бэр – единица эквивалентной дозы любого вида излучения в биоткани, которое создает такой же биологический эффект, как и поглощенная доза в 1 рад образцового рентгеновского излучения, тогда:

$$1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}, 1 \text{ бэр} = 0,01 \text{ Зв}.$$

В реальных задачах поток излучения может падать не перпендикулярно к поверхности тела человека, а быть разнонаправленным. Тогда реальная тканевая доза, отнесенная к единичному флюенсу, может отличаться от дозы при нормальном падении излучения на поверхность тела человека за счет самоэкранировки. Для оценки этого эффекта введено понятие коэффициента изотропности, определяемого как отношение максимальной эквивалентной дозы при нормальном падении внешнего излучения на тело человека к максимальной эквивалентной дозе при угловом распределении этого излучения в реальных условиях для одного и того же флюенса.

Мощность эквивалентной дозы, единицы измерения. Мощность эквивалентной дозы ($P_{\text{экв}}$) – это отношение приращения эквивалентной дозы « $dD_{\text{экв}}$ » за интервал времени « dt » к этому интервалу:

$$P_{\text{экв}} = dD_{\text{экв}} / dt.$$

Единицы измерения мощности эквивалентной дозы: Зв/с, мЗв/с, мкЗв/с; бэр/с, мбэр/с, мкбэр/с.

Для мягких тканей и для гамма-излучения можно условно принять:

$1 \text{ Р} = 1 \text{ рад} = 1 \text{ бэр}$, или $1 \text{ Р} = 0,01 \text{ Гр} = 0,01 \text{ Зв}$ (0,01Дж/кг).

Эффективная эквивалентная доза. Различные органы и ткани человека имеют разные чувствительности к излучению. Известно, например, что при одинаковой эквивалентной дозе облучения возникновение рака в легких более вероятно, чем в щитовидной железе, а облучение гонад особенно опасно из-за риска генетических повреждений. Поэтому для случаев неравномерного облучения разных органов и тканей тела человека введено понятие **эффективной эквивалентной дозы**.

Для определения этой величины необходимо ввести понятие риска. **Риск** – это вероятность возникновения неблагоприятных последствий для человека вследствие облучения, аварии или другой причины, проявление которой носит стохастический характер.

Эффективная эквивалентная доза определяется по формуле:

$$D_{\text{эфф}} = \sum W_T \cdot H_T,$$

где, H_T – средняя эквивалентная доза в i -ом органе или ткани; W_T – взвешивающий фактор, представляющий собой отношение стохастического риска смерти в результате облучения i -го органа или ткани к риску смерти от равномерного облучения тела при одинаковых эквивалентных дозах.

То есть, W_T определяет весовой вклад данного органа или ткани в риск неблагоприятных последствий для организма при равномерном облучении. Другими словами, эффективная эквивалентная доза, при неравномерном по органам и тканям облучении, равна такой эквивалентной дозе при равномерном облучении всего организма, при которой риск неблагоприятных последствий будет таким же, как и при данном неравномерном облучении.

Единицы измерения эффективной эквивалентной дозы: Зиверт (Зв), бэр.

Взвешивающие коэффициенты для тканей и органов при расчете эффективной дозы приведены ниже (НРБ–2000):

Гонады	0,20
Костный мозг	0,12
Тонкий 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

Эквивалентная доза и эффективная эквивалентная доза характеризуют меру ожидаемого эффекта облучения для одного индивидуума, это индивидуальные дозы. На практике возникает также необходимость оценивать меру ожидаемого эффекта при облучении больших групп людей, вплоть до целых популяций.

Для оценки стохастических ожидаемых эффектов облучения персонала или населения часто используется **коллективная эквивалентная доза**.

Единицы измерения коллективной дозы: человеко-зиверт, человеко-бэр, (чел. Зв, чел. бэр). Таким образом, для получения коллективной эквивалентной дозы необходимо просуммировать индивидуальные эффективные эквивалентные дозы полученные группой людей.

Многие радионуклиды распадаются очень медленно и останутся радиоактивными и в отдаленном будущем. Коллективную эффективную дозу, которую получают многие

поколения людей от какого-либо радиоактивного источника, за все время его дальнейшего существования называют **ожидаемой (полной) коллективной эффективной эквивалентной дозой** и ее также измеряют в **человеко–зивертах** или **человеко–бэрах**, (**чел.Зв, чел.бэр**).

И в заключение этого раздела можно отметить некоторые основные закономерности связи между различными единицами измерения доз ионизирующего излучения. Экспозиционную дозу можно использовать для более точной, но приближенной оценки поглощенной и эквивалентной доз в веществе (табл. 2).

Таблица 2. Пересчет доз для гамма-излучения (мышцы)

Величина	Система	Единица	Пересчет в:
Экспозиционная доза	СИ	Кл/кг	Поглощенную 1 Р = 0,0091 Гр = 0,96 рад
Экспозиционная доза	Внесистемная	Р	Эквивалентную 1 Р = 0,0091 Зв = 0,91 бэр
Поглощенная доза	СИ	Гр	Экспозиционную 1 Гр = 100 рад = 110 Р
Поглощенная доза	Внесистемная	рад	Эквивалентную 1 Гр = 1 Зв = 100 бэр
Эквивалентная доза	СИ	Зв	Экспозиционную 1 Зв ~ 110 Р
Эквивалентная доза	Внесистемная	бэр	Поглощенную 1 Зв = 100 бэр = 1 Гр