

4.6. Современная система дозиметрических величин

Нормы радиационной безопасности Республики Беларусь – НРБ-2000 – отражают современное состояние радиационной безопасности промышленно развитых стран. С выходом Норм преодолен многолетний разрыв в принципах и методологии обеспечения радиационной безопасности между отечественной практикой и требованиями МАГАТЭ в этой области. Введение в действие НРБ-2000 приведет к коренному изменению системы обеспечения радиационной безопасности. Прямым следствием этого является введение в практику новых дозиметрических величин.

Результат воздействия ионизирующих излучений на облучаемые объекты заключается в физико-химических или биологических изменениях в этих объектах. Примерами таких изменений могут служить нагрев тела, фотохимическая реакция рентгеновской пленки, изменение биологических показателей живого организма и т. п. Радиационный эффект зависит от физических величин X_i , характеризующих поле излучения или взаимодействие излучения с веществом:

$$\eta = F(X_i).$$

Величины X_i функционально связанные с радиационным эффектом η , называются дозиметрическими. Целью дозиметрии является измерение, исследование и теоретические расчёты дозиметрических величин для предсказания или оценки радиационного эффекта, в частности – радиобиологического эффекта.

Обеспечение условий использования источников ионизирующего излучения, при которых вред для человека от возможных радиационных эффектов был бы приемлемым, является главной целью радиационной безопасности. Частные задачи радиационной безопасности заключаются в определении нормируемых дозиметрических величин и в установлении для них пределов, определяющих границы допустимого уровня воздействия излучения на человека. Развитие радиационной безопасности заключается в определении критериев и принципов, формирующих требования к нормируемым величинам и их допустимым уровням.

Система дозиметрических величин формируется как результат развития радиобиологии, дозиметрии и радиационной безопасности. Критерии безопасности в значительной степени определяются обществом, поэтому в разных странах сформировались и различные системы дозиметрических величин. Важную роль в унификации этих систем играет Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ) – независимая организация, объединяющая экспертов в области биологического действия излучения, дозиметрии и радиационной безопасности. Под влиянием регулярно публикуемых Рекомендаций МКРЗ сформировалась современная система дозиметрических величин, включающая (рис. 23, 24):

- физические величины, являющиеся мерой воздействия ионизирующего излучения на вещество;
- нормируемые величины, являющиеся мерой ущерба (вреда) от воздействия излучения на человека;
- операционные величины, являющиеся непосредственно определяемыми в измерениях величинами, предназначенными для оценки нормируемых величин при радиационном контроле.

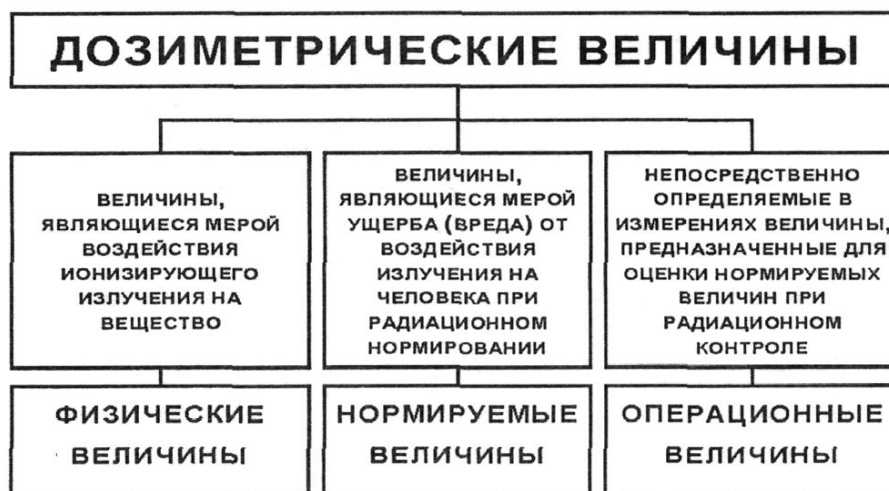


Рис.23. Современная система дозиметрических величин.



Рис. 24. Связь между дозиметрическими величинами.

Распространенными дозиметрическими величинами являются доза излучения (поглощенная доза), экспозиционная доза, флюенс, плотность потока частиц, линейная передача энергии, эквивалентная доза облучения органа или ткани, коэффициент качества излучения, относительная биологическая эффективность, взвешивающий коэффициент для излучения, эффективная доза, взвешивающие коэффициенты для тканей и органов, эквивалент дозы. Ниже даны краткие пояснения основных дозиметрических величин, а в табл.3 приведены единицы их измерения.

Таблица 3. Основные дозиметрические величины и единицы их измерения

Величина	Основная единица	Внесистемная единица	Примечания
Плотность потока частиц	$1/(с \cdot м^2)$	–	Можно обозначать в зависимости от вида излучения: част./ $(с \cdot м^2)$, фотон/ $(с \cdot м^2)$ и т. п.
Доза излучения	Гр	рад	$1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Дж/кг} = 10^{-2} \text{ Гр}$
Экспозиционная доза	Кл/кг	Р (Рентген)	$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$
Эквивалентная доза облучения органа или ткани	Зв	бэр	Принято, что при эквивалентной дозе 1 Зв данного вида излучения возникает такой же биологический эффект, как и при дозе 1 Гр образцового излучения
Эффективная доза	Зв	бэр	Принято, что при эффективной дозе 1 Зв данного вида излучения человеку причиняется тот же ущерб, как и при равномерном облучении тела человека с эквивалентной дозой 1 Зв
Эквивалент дозы	Зв	бэр	Равен поглощенной дозе в точке, умноженной на средний коэффициент качества для излучения, воздействующего на ткань в данной точке.

Первоначально развитие дозиметрии определялось главным образом необходимостью защиты от воздействия рентгеновского и гамма-излучений природных радиоактивных веществ при медицинском применении ионизирующих излучений. Ионизация среды под воздействием этих излучений явилась первым физическим эффектом, который сопоставляли с биологическим действием излучения. Мерой ионизационного действия фотонного излучения, определяемой по ионизации воздуха в условиях электронного равновесия, является **экспозиционная доза**. Непосредственно измеряемой физической величиной при определении экспозиционной дозы фотонного излучения является общий электрический заряд ионов одного знака, образованных в воздухе за время облучения. Ионизация просто измеряется воздушными ионизационными камерами, при этом воздух для широкого диапазона энергии рентгеновского и гамма-излучения может служить хорошей моделью мышечной ткани при оценке ионизационного эффекта. Экспозиционная доза определяется как концентрация ионов одного знака в воздухе и равна отношению суммарного заряда всех ионов одного знака, созданных в воздухе излучением при полном торможении вторичных электронов и позитронов, образующихся в элементарном объеме, к массе воздуха в этом объеме. С открытием нейтрона и деления ядер возникли новые мощные источники излучения: потоки нейтронов, ускоренных электронов, позитронов и тяжёлых заряженных частиц. Необходимость защиты от воздействия различных излучений привела к созданию универсальной энергетической концепции, применимой к любым видам ионизирующего излучения и ко всем средам. При этом **поглощенная доза излучения D** была введена как основная дозиметрическая величина, отражающая концентрацию энергии, переданной ионизирующим излучением веществу.

Важной физической характеристикой воздействия излучения на вещество является линейная передача энергии (ЛПЭ) излучения – отношение энергии переданной веществу заряженной частицей вследствие столкновений на элементарном пути, к длине этого пути. Если не определяется иное, через ЛПЭ обозначают полную потерю энергии заряженной частицей в воде.

Важными характеристиками потока излучения являются флюенс и плотность потока частиц (квантов) излучения. **Флюенс частиц Φ** – отношение числа частиц dN , проникающих в элементарную сферу, к площади центрального сечения dS этой сферы.

Плотность потока частиц – флюенс за единицу времени.

Нормируемые величины. Научной основой радиационной безопасности служат многолетние эпидемиологические исследования групп облученных людей. Цель таких исследований – выявление закономерностей действия ионизирующего излучения в области малых доз, характерных для условий нормальной эксплуатации источников излучения. Наибольший вклад в развитие радиационной безопасности внесли результаты изучения радиационных эффектов у жертв военного применения атомного оружия, переживших атомные бомбардировки Хиросимы и Нагасаки. По мере изучения биологических эффектов излучения и становления ядерной науки и техники, развивались концепции нормирования – от концепции эквивалента дозы через эффективный эквивалент дозы к современной концепции эффективной дозы.

В конце 80-х прошлого века концепция обеспечения радиационной безопасности получила современное представление в виде Рекомендаций МКРЗ 1990 года, которыми была предложена концепция «эффективной эквивалентной дозы». Эта концепция является результатом последовательного развития представлений о биологическом действии ионизирующего излучения и поиска меры воздействия ионизирующего излучения, отвечающей целям радиационной безопасности. Использование эффективной дозы позволяет перейти от характеристик поля ионизирующего излучения к социально обусловленной мере воздействия излучения на человека – ущербу, использование которого создает условия для приведения к единому стоимостному знаменателю вреда, затраты и выгоды от использования источников ионизирующего излучения. Согласно МКРЗ **ущерб** – «сложное понятие, сочетающее вероятность, степень тяжести эффекта и время его проявления», величину которого можно выразить в числе лет полноценной жизни, потерянных в результате преждевременного заболевания или смерти, вызванных воздействием ионизирующего излучения.

При определении ущерба учитываются:

1) вероятности преждевременной смерти в результате реализации смертельного рака за все время ожидаемой жизни или тяжелого генетического нарушения, которое приводит к преждевременной гибели потомков облученных лиц в первых двух поколениях;

2) вклад в ущерб от несмертельных (излечиваемых) случаев рака, как реализации стохастических эффектов облучения;

3) продолжительность потерянных лет жизни в результате реализации тех или иных стохастических эффектов.

Облучение вызывает эффекты двух классов: стохастические и детерминированные (нестохастические). К стохастическим эффектам, реализация которых имеет вероятностный характер, относят радиогенные раки (злокачественные опухоли и лейкозы) и тяжелые наследственные болезни. Все остальные эффекты, как правило, относят к классу детерминированных (нестохастических). Вероятность реализации воздействия излучения в виде того или иного эффекта зависит от дозы облучения и времени, прошедшего после облучения. Для целей радиационной безопасности, как правило, рассматривается вероятность, отнесенная ко всей ожидаемой продолжительности жизни человека – т.н. **пожизненная вероятность**. Пожизненную вероятность эффектов, приводящих к смерти человека, обычно называют вероятностью преждевременной смерти. **Дозовая зависимость** пожизненной вероятности для детерминированных эффектов имеет в области больших доз порог, ниже которого проявление эффекта практически невозможно. При превышении порога эта вероятность быстро приближается к единице. Для пожизненной вероятности реализации стохастических эффектов принята линейная зависимость от дозы.

Радиобиологические исследования показали, что в области малых доз одни и те же радиобиологические эффекты облучения органов могут иметь одинаковую степень

тяжести при различных дозах, если на орган или ткань воздействуют ионизирующие излучения различной природы. Для учета этих отличий было введено понятие **относительной биологической эффективности излучений (ОБЭ)** и изучена ее зависимость от множества характеристик излучения, в том числе и от его ЛПЭ. Относительная биологическая эффективность некоторого излучения принята равной отношению поглощенной дозы D_0 образцового излучения, вызывающего определенный биологический эффект, к поглощенной дозе D данного излучения, вызывающей такой же эффект. В качестве **образцового принято рентгеновское излучение с граничной энергией 200 кэВ**. Многочисленными исследованиями было показано, что при облучении одних и тех же биологических объектов ОБЭ излучения зависит от конкретного эффекта, условий облучения, вида излучения, его энергии и интенсивности. ОБЭ зависит от ЛПЭ ионизирующих частиц и приблизительно одинакова для различных видов излучений с равными ЛПЭ.

Применительно к хроническому облучению людей в малых дозах в Рекомендациях МКРЗ 1990 года используются две величины, подобные ОБЭ - взвешивающий коэффициент для излучения W_R и средний коэффициент качества излучения k . Для определения этих величин в качестве тестовых были приняты эффекты возникновения радиогенных раков различной локализации у млекопитающих и злокачественные трансформации *in vitro* клеток млекопитающих. В системе дозиметрических величин регламентирована зависимость W_R и k от энергии, вида и ЛПЭ излучения.

В радиационной безопасности в качестве меры неблагоприятных последствий при облучении живого организма, отдельной ткани или органа используется специальная величина – **эквивалентная доза облучения органа или ткани**. Она равна поглощенной дозе в органе или ткани, умноженной на соответствующий взвешивающий коэффициент для данного излучения W_R . Эквивалентная доза является функционалом, приводящим облучения органов и тканей человека любым излучением к эквивалентному по ущербу облучению стандартным редкоизионизирующим излучением.

Взвешивающий коэффициент для излучения используется при определении нормируемых величин, предназначенных для контроля обеспечения радиационной безопасности в условиях хронического облучения в малых дозах. Для рентгеновского и гамма-излучений $W_R=1$. Для всех других ионизирующих излучений $W_R>1$ и устанавливается на основании обобщения ОБЭ для облучения органов и тканей излучениями различного вида. Взвешивающие коэффициенты могут быть разными для различных энергий излучения одного и того же вида, но их значение не зависит от облучаемого органа или ткани. Взвешивающие коэффициенты относятся к внешнему излучению, падающему на поверхность тела, а в случае внутреннего облучения – испускаемому при ядерном превращении.

Одной из наиболее важных величин, введенных в практику радиационной защиты Рекомендациями МКРЗ 1977 года, является **ожидаемая эквивалентная доза** внутреннего облучения $H_T(t)$. Эта величина является аналогом эквивалентной дозы внешнего излучения и играет роль меры неблагоприятных последствий при облучении отдельной ткани или отдельного органа человека источниками внутреннего излучения.

Поступление радиоактивного вещества в организм зачастую приводит к облучению органов и тканей в течение длительного времени. Управлять таким облучением после проникновения радиоактивного вещества вовнутрь организма практически невозможно. Используя закономерности биокинетики радионуклидов, можно только предсказать величину мощности доз в отдельных органах тела человека. Эти особенности внутреннего облучения требуют рассматривать поступление радиоактивного вещества в организм как событие, за которым неотвратимо следует облучение органов и тканей и, как следствие, причинение вреда. При внутреннем облучении момент причинения вреда совмещается с поступлением радиоактивного вещества в организм, а реализация его в виде того или иного эффекта ожидается в течение всей оставшейся жизни человека $H_T(t)$. При равенстве

величин H_T и $H_T(t)$ следует ожидать в течение оставшейся жизни одинаковые последствия внешнего и внутреннего облучения.

Ожидаемая эквивалентная доза имеет смысл временного интеграла мощности эквивалентной дозы в органе или ткани, которая формируется в течение некоторого времени после поступления в организм радиоактивного вещества.

В области малых доз облучение различных органов или тканей с различными эквивалентными дозами могут приводить к одним и тем же ущербам. Мерой ущерба, причиненного облучением человеку, является эффективная эквивалентная доза или сокращенно – эффективная доза. Величина ущерба в концепции эффективной дозы МКРЗ рассматривает как «математическое ожидание размера нежелательных последствий, т.е. произведение вероятности и тяжести последствий события (преждевременной смерти в результате облучения). Величина ущерба равна произведению пожизненной вероятности смерти от радиогенного рака на среднее число лет, которые в результате могут быть потеряны. Последняя величина не зависит от дозы облучения и лежит в строго ограниченных пределах (10-30 лет) в зависимости от того, какой орган облучен. Вероятность преждевременной смерти в результате реализации стохастических эффектов зависит оттого, какой орган облучен, от эквивалентной дозы в органе, от возраста человека в момент облучения. Для населения в целом эта вероятность равна $6 \cdot 10^{-2}$ при равномерном облучении всего тела с эквивалентной дозой 1 Зв. Облучение отдельного человека приводит к редким событиям, имеющим дискретный спектр размеров, поэтому применение эффективной дозы для оценки индивидуального ущерба практически бесполезно, поскольку неопределенности таких оценок для конкретного человека громадны.

Эффективную дозу целесообразно использовать для прогнозной оценки пожизненного ущерба при облучении больших групп людей. Необходимо подчеркнуть, что МКРЗ в определении меры пожизненного радиологического ущерба оставляет за рамками рассмотрения вероятность реализации этого ущерба в течение оставшейся после облучения человеческой жизни. Человеческая смерть есть уникальная реализация одного из множества пожизненных рисков различной природы: риска умереть от сердечно-сосудистого заболевания; в результате аварии на транспорте; стихийного бедствия и т.д. Радиологический пожизненный риск преждевременной смерти является только одним из элементов этого множества. Таким образом, эффективную дозу следует рассматривать как меру радиологического ущерба, не рассматривая возможность реализации этого ущерба в виде возникновения у облученного какого-то заболевания в оставшийся период жизни. Дозиметрической величиной, предназначенной для оценки радиологического ущерба в области облучения с малыми дозами, является **коллективная эффективная доза S**, равная для коллектива из N человек сумме индивидуальных эффективных доз E_1, \dots, E_N . Единица эффективной коллективной дозы – **человеко-зиверт (чел.-Зв)**.

В области малых доз облучению с эффективной коллективной дозой 1 чел.-Зв соответствует ущерб, равный потере 1 чел.-года полноценной «коллективной» жизни облученного коллектива. Абсолютное значение коллективной дозы подобно сумме температур больных в какой-нибудь больнице и не несет полезной информации. Коллективную дозу следует использовать для сравнения последствий облучения разных групп людей при анализе соотношения «затраты - выгода». За пределами области облучений с малыми дозами, в случае, когда эффективная доза, полученная в течении года, превышает 200 мЗв, коллективную дозу применять для оценки потенциальных последствий облучения не следует. В этом случае нужно использовать более общий подход, основанный на концепции риска, как это сделано в НРБ-2000.

Операционные дозиметрические величины. Как правило, нормируемые величины, в которых выражены основные дозовые пределы, непосредственно измерить невозможно. Для оценки нормируемых величин при радиационном контроле

предназначены операционные величины, которые являются непосредственно определяемыми в измерениях величинами. Введение в практику радиационного контроля операционных величин необходимо в первую очередь для унификации методов контроля и определения таких требований к функции отклика приборов радиационного контроля.

Система операционных величин внешнего облучения, созданная в результате совместной работы МКРЕ и МКРЗ, существует более 50 лет. По мере того, как менялись нормируемые величины, операционные величины развились от максимального эквивалента дозы (МЭД) через индексы эквивалента дозы к рекомендуемым в настоящее время величинам **амбиентного и индивидуального эквивалента дозы**.

В определении операционных величин внешнего облучения используется эквивалент дозы (Н) – поглощенная доза в точке, умноженная на средний коэффициент качества излучения, воздействующую на ткань в данной точке. Эквивалент дозы равен поглощенной дозе в точке, умноженной на средний коэффициент качества излучения, воздействующего на биологическую ткань в данной точке. Единица эквивалента дозы – зиверт (Зв).

Для обеспечения однозначности при расчете или измерении операционных величин регламентирована зависимость от ЛПЭ коэффициента качества излучения $k(L)$ – величина которая учитывает повреждения биологической ткани, возникающие вследствие микроскопического распределения поглощенной энергии в точке взаимодействия излучения с веществом. Коэффициент качества излучения является функцией ЛПЭ, (L):

$$k(L) = \begin{cases} 1 & \text{при } L \leq 10 \text{кэВ/мкм} \\ 0,32 \times L - 2,2 & \text{при } 10 \leq L < 100 \text{кэВ/мкм} \\ 300/\sqrt{L} & \text{при } L \geq 100 \text{кэВ/мкм} \end{cases}$$

Среднее значение коэффициента качества \bar{k} излучения в точке определяется соотношением:

$$\bar{k} = \frac{1}{D} \int_0^{\infty} k(L)D(L)d(L),$$

где D – поглощенная доза, $k(L)$ – зависимость коэффициента качества от ЛПЭ, $D(L)dL$ – поглощенная доза в точке от излучения с ЛПЭ от L до L+dL.

Взаимодействие излучения с телом человека приводит к изменению самого радиационного поля. Операционные величины определяются таким образом, чтобы воспроизвести этот эффект, для чего используется фантомы человеческого тела.

Операционной величиной внешнего облучения для контроля радиационной обстановки принят **амбиентный эквивалент дозы Н(d)**. (Амбиентная доза – от англ. ambient (от лат. ambi кругом, вокруг, с обеих сторон), dose equivalent – эквивалент дозы, характеризующей радиационную обстановку. **Н(d) – эквивалент дозы, который был бы создан в шаровом фантоме МКРЕ на глубине d (мм) от поверхности по диаметру, параллельному направлению излучения, в поле излучения идентичном рассматриваемому по составу, флюенсу и энергетическому распределению, но мононаправленном и однородном** (рис. 25).

Амбиентный эквивалент дозы используется для характеристики поля излучения в точке, совпадающей с центром шарового фантома. Эта величина является изотропной и применительно к реальному полю характеризует консервативную оценку дозы облучения человека. **Единица амбиентного эквивалента дозы – зиверт (Зв)**.

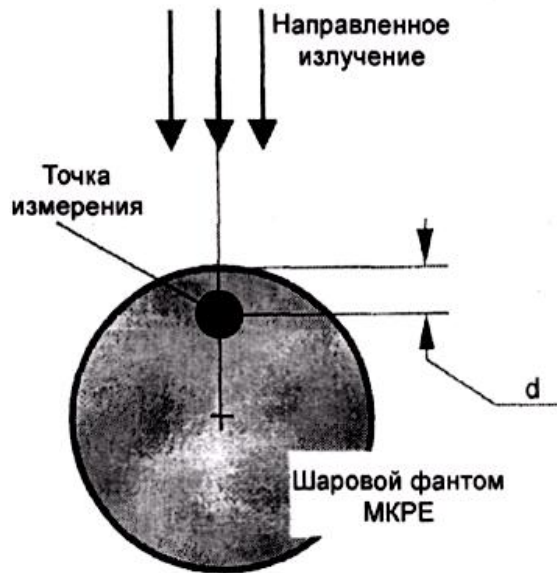


Рис.25. Схема определения амбиентного эквивалента дозы.

Шаровой фантом МКРЕ – шар диаметром 30 см из тканеэквивалентного материала, имеющего следующий массовый химический состав: 76,2% - кислород, 11,1% – углерод, 10,1% – водород и 2,6% – азот и плотность 1 г/см³.

Операционной величиной внешнего облучения для индивидуального контроля доз облучения человека принят **индивидуальный эквивалент дозы $H_p(d)$** – эквивалент дозы в мягкой биологической ткани, определяемый на глубине d (мм) под рассматриваемой точкой на теле (рис.26).

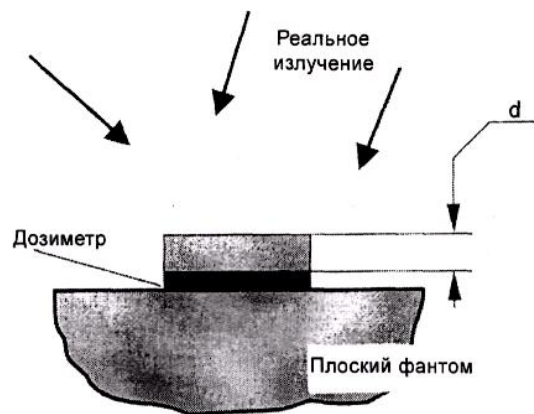


Рис.26. Схема определения индивидуального эквивалента дозы.

При определении операционных величин значение d принимается равным **10 мм** для контроля величины эффективной дозы, **0,07 мм** – для эквивалента дозы облучения **кожи** и **3 мм** – для эквивалента дозы облучения **хрусталика глаза**.

Операционной величиной для контроля радиационной обстановки на рабочих при внутреннем облучении персонала является **объемная активность радионуклида на рабочем месте, С**. Единица измерения объемной активности - **Бк/м³**.

Поступление радионуклида в организм человека через органы дыхания является операционной величиной для индивидуального контроля внутреннего облучения. Величина индивидуального поступления определяется:

- для γ -излучающих радионуклидов – путем математического расчета с использованием функции выведения радионуклида из всего тела или его отдельных

органов по данным систематических измерений содержания радионуклидов в теле человека или его отдельных органах при помощи спектрометра излучения человека;

- для α - и β -излучающих радионуклидов – путем математического расчета поступления с использованием функции удержания радионуклида в теле человека по данным систематических измерений выведения радионуклидов из его тела с помощью биофизических методов;

- для любых радионуклидов – путем расчета поступления с использованием объемной скорости поступления вдыхаемого воздуха в органы дыхания по данным систематических измерений объемной активности радионуклида в зоне дыхания работника с помощью индивидуального пробоотборника радиоактивных аэрозолей и фиксирования времени выполнения работ при данной объемной активности радионуклида.

Использование операционных величин в радиационном контроле нацелено на консервативную оценку значений соответствующих нормируемых величин. В общем виде связь между величинами, используемыми в радиационном контроле, выглядит следующим образом (рис.27):



Рис.27. Связь между величинами в радиационном контроле.

Коэффициент связи α и физическая схема определения операционных величин выбраны таким образом, чтобы произведенная с их помощью оценка значения нормируемой величины была бы больше истинного значения нормируемой величины в данных условиях облучения. Например, в контроле эффективной дозы внешнего излучения применяют замещение

$$E^{\text{внеш}} \leftarrow \alpha \times H_p(10),$$

где $\alpha = 1$.

На рисунке 28 показано, как соотносятся оценки эффективной дозы с истинным значением этой величины при облучении тела человека мононаправленным потоком фотонного излучения.

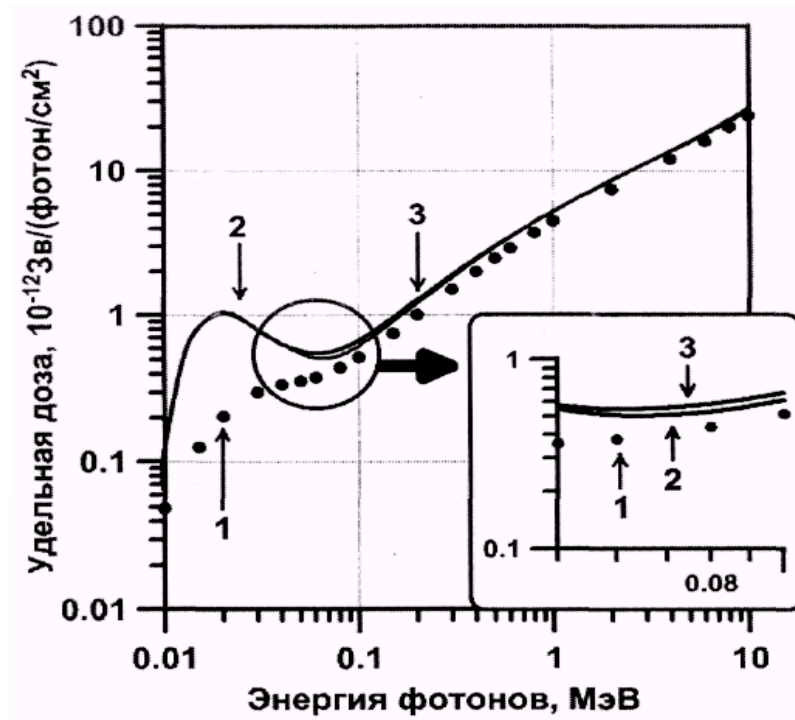


Рис.28. Соотношение между эффективной дозой и ее оценками с помощью операционных величин: 1 - эффективная доза при облучении человека в направлении грудь-спина; 2 - оценка с помощью индивидуального эквивалента дозы; 3 - оценка с помощью AMBIENTНОГО эквивалента дозы.

Внедрение в отечественную практику современной системы дозиметрических величин является необходимым условием успешного введения в действие в Беларуси новых Норм радиационной безопасности (НРБ–2000).

Вспомогательные дозиметрические величины. Оказалось полезным иметь несколько вспомогательных дозиметрических величин. После поступления в организм радиоактивного вещества оно в течение некоторого времени формирует с изменяющейся мощностью эквивалентную дозу в тканях тела. **Временной интеграл мощности эквивалентной дозы называется полувековой эквивалентной дозой** (committed equivalent dose) $H_T(50)$, где τ – время интегрирования (в годах) вслед за поступлением. Если τ не указано, то подразумевается, что оно составляет **50 лет** для взрослых и от поступления до возраста **70 лет** для детей. Аналогичным образом определяется и полувековая эффективная доза $E(50)$ (committed effective dose). Когда Комиссия упоминает эквивалентную или эффективную дозу, накопленную за данный период времени, подразумевается, что включены все полувековые дозы от поступлений, произошедших за этот период.

Полувековая эффективная доза $E(50)$ для персонала определяется выражением:

$$E(50) = \sum_{T=i}^{T=j} w_T H_T(50) + w_r \frac{\sum_{T=k}^{T=l} m_T H_T(50)}{\sum_{T=k}^{T=l} m_T},$$

где, $H_T(50)$ - полувековая эквивалентная доза; w_T – весовой множитель для тканей и органов от T_i до T_j , m_T - масса остальных тканей от T_k до T_l .

Значения тканевых весовых множителей выведены для условного контингента населения с равным числом лиц обоего пола и с широким диапазоном возрастов. При определении эффективной дозы эти значения применимы для персонала, для всего

населения и для каждого пола.

При вычислениях в остальные органы включены надпочечники, головной мозг, тонкий кишечник, верхний отдел толстого кишечника, почки, мышцы, поджелудочная железа, селезенка, вилочковая железа и матка. В этот перечень включены органы, которые предположительно могут избирательно облучаться. Известно, что некоторые органы из перечня чувствительны к индуцированию рака. Если в последующем выявятся другие ткани и органы со значительным риском заболевания раком, то они будут включены в таблицу со своим значением w_T либо в список остальных органов. В него можно включать также другие избирательно облучаемые органы и ткани.

В исключительных случаях, когда ткань или орган из перечня остальных тканей и органов получает эквивалентную дозу, превышающую наибольшую дозу в любом из 12 органов с установленными значениями весовых множителей, для этой ткани или органа нужно использовать весовой множитель 0,025; и такой же весовой множитель 0,025 следует использовать для средней дозы на оставшиеся органы из перечня.

В исключительных случаях одна из остальных тканей или органов может в результате вычислений получать полувековую эквивалентную дозу, превышающую наибольшую дозу в любом органе, для которого установлен весовой множитель. Тогда для нее используется весовой множитель 0,025 (половина w_T), а 0,025 (другая половина w_T) - для средней эквивалентной дозы у оставшихся тканей и органов из группы остальных.

Полувековая эффективная доза $E(50)$ для персонала вычисляется тогда по формуле:

$$E(50) = \sum_{T=i}^{T=j} w_T H_T(50) + 0,025 \frac{\sum_{T=k}^{T=l} m_T H_T(50) - m'_T H'_T(50)}{\sum_{T=k}^{T=l} m_T - m'_T} + 0,025 H'_T(50),$$

где, m'_T – масса той ткани или органа из группы остальных, для которой вычисленная полувековая эквивалентная доза оказывается больше, чем для любой ткани или органа с установленным значением w_T ; $H'_T(50)$ – полувековая эквивалентная доза в этой ткани.

Все упомянутые выше дозиметрические величины относятся к облучению отдельного человека.

Комиссия МКРЗ использует и другие величины, связанные с облучением групп или популяцией людей. Эти величины учитывают численность населения, подвергшегося облучению от источника путем умножения средней дозы по облученной источником группе людей на число лиц в этой группе. Такими величинами являются **коллективная эквивалентная дозы S_T** , относящаяся к определенному органу или ткани, и **коллективная эффективная доза S** . При вовлечении нескольких групп полная коллективная доза представляет сумму коллективных доз для каждой группы. Единицей измерения этих коллективных величин является **человеко-зиверт**. Можно считать, что коллективные величины представляют общие последствия облучения населения или группы, но такое их применение должно быть ограничено случаями, когда последствия действительно пропорциональны дозиметрической величине и численности облученного населения и когда имеются соответствующие коэффициенты вероятности. При необходимости различить коллективную дозу и дозу у отдельного человека последнюю называют индивидуальной дозой.

Коллективная эффективная доза, создаваемая присутствием радиоактивных веществ в окружающей среде, может накапливаться в течение длительного периода времени, охватывающего последующие поколения людей. Ожидаемая в данной ситуации полная коллективная доза равна интегралу за весь период времени от мощности коллективной эффективной дозы, создаваемой или ожидаемой при единичном выбросе (или в случае продолжительной работы за единичный период деятельности). Если интегрирование проводится не по бесконечному периоду времени, то величину представляют в виде

усеченной в определенный момент времени. Если диапазоны индивидуальной дозы или времени велики, то может оказаться полезным разделить коллективные дозы на части, охватывающие более ограниченные диапазоны дозы и времени. При рассмотрении последствий единичного периода практической деятельности иногда удобно различать уже полученную коллективную эффективную дозу и коллективную эффективную дозу, ожидаемую за все время.

Ожидаемая доза (dose committment) $H_{c,T}$ или E_c – это расчетная величина. Она может относиться как к критической группе, так и ко всему населению земного шара. Она определяется как **интеграл до бесконечности от мощности дозы на душу населения** (per caput dose rate) (\dot{H}_T или \dot{E}), связанной с определенным событием, например единичной практической деятельностью (за год, месяц и т. д.):

$$H_{c,T} = \int_0^{\infty} \dot{H}_T(t) dt$$

или

$$E_c = \int_0^{\infty} \dot{E}_T(t) dt$$

В случае неограниченной во времени практической деятельности с постоянной мощностью максимальная годовая мощность дозы на душу населения (\dot{H}_T или \dot{E}) в будущем для конкретного населения будет равна ожидаемой дозе за год практической деятельности независимо от изменения численности населения. Если практическая деятельность продолжается лишь в течение периода времени t , то максимальная будущая годовая доза на душу населения будет равна соответствующей усеченной ожидаемой дозе, а именно:

$$H_{c,T}(\tau) = \int_0^{\infty} \dot{H}_T(t) dt \quad \text{или} \quad E_c(\tau) = \int_0^{\infty} \dot{E}_T(t) dt .$$

Направленный эквивалент дозы, $H'(d, \Omega)$, в точке поля излучения, является эквивалентом дозы, который был бы произведен соответствующим расширенным полем излучения, в шаровом фантоме МКРЕ на глубине, d , от поверхности по радиусу, ориентированному в указанном направлении, Ω . Единица: Дж кг^{-1} или (Гр). Специальное название единицы **направленного эквивалента дозы – зиверт (Зв)**.

Любая запись направленного эквивалента дозы должна включать глубину d и направление Ω . Чтобы упростить примечание, d должна быть выражена в мм.

Величина, аналогичная направленному эквиваленту дозы может быть определена через поглощенную дозу. Ее называют **направленной поглощенной дозой, $D'(d, \Omega)$** .

Для слабопроникающего излучения используется глубина $d = 0,07$ мм для **кожи** и $d = 3$ мм для **глаза**. Направленный эквивалент дозы для этих глубин тогда обозначается **$H'(0,07, \Omega)$ и $H'(3, \Omega)$** . Для **сильно проникающего излучения** рекомендуется глубина **10 мм**.

Для измерения **$H(d, \Omega)$** требуется, чтобы поле излучения было однородным в объеме детектора, и чтобы детектор имел необходимый направленный отклик (изонаправленный отклик).

Детальное описание направления, Ω , требует выбора исходной системы координат, в которой выражено направление, Ω (например, полярные и азимутальные углы). Эта система координат может быть связывана с полем излучения. В частном случае однонаправленного поля, направление может быть определено через угол, α , между радиусом, ориентированному навстречу подающему излучению, и указанным радиусом.

Для слабопроникающкго излучения, прибор, который определяет эквивалент дозы на соответствующей глубине в плоской пластине тканеэквивалентного материала, соответственно определит **$H(0,07, \Omega)$** , а также **$H(3, \Omega)$** , если поверхность пластины

перпендикулярна Ω .