



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Регулярно публикуемые доклады МКРЕ и Рекомендации МКРЗ позволяют рассматривать современную систему дозиметрических величин состоящей из трех больших разделов:

базовые физические величины, являющиеся мерой воздействия ионизирующего излучения на вещество;

нормируемые величины, являющиеся мерой ущерба (вреда) от воздействия излучения на человека;

рабочие (операционные) величины, являющиеся непосредственно определяемыми в измерениях величинами, предназначенными для оценки нормируемых величин при радиационном контроле.



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Базовые физические величины характеризуют *источник излучения*, само *излучение* и *радиационные поля*, возникающие при прохождении излучения через вещество.

Для описания облучения, воздействия излучения на человека, базовые физические величины напрямую не используют.



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Облучение характеризуют **нормируемые дозиметрические величины**, в определении которых используются соподчиненные базовые физические величины.

Измерение нормируемых величин при контроле облучения практически невозможно.



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



При оценке соответствия условий *облучения* нормативным требованиям используются **рабочие (операционные) величины**, значения которых при определенных условиях облучения близки к значениям соответствующих нормируемых величин.

Важнейшим качеством рабочих величин является то, что они могут быть непосредственно измерены (определены) при радиационном контроле.

Под **радиационным контролем** понимаем мониторинг (определение и регистрацию) параметров, характеризующих воздействие ионизирующего излучения на людей.



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Базовые физические величины

Активность

Вещество, имеющее в своем составе радионуклиды, называют радиоактивным. Такое вещество рассматривают как радионуклидный источник ионизирующего излучения. Главной характеристикой радионуклидного источника является его

активность (A) - мера радиоактивности какого-либо количества радионуклида, находящегося в данный момент времени в определенном энергетическом состоянии, ожидаемое число ядер радионуклида, претерпевших спонтанные ядерные превращения в единицу времени. Системная единица активности Беккерель (Бк) – 1 распад в секунду. Несистемная единица активности Кюри – активность грамма радия-226.
 $1\text{Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{Бк}$.



Базовые физические величины

Активность

При радиационном контроле используются:

- общая активность A (Бк, Ки);
- удельная активность $A_{уд}$ (Бк/кг);
- объемная активность $A_{об}$ (Бк/м³, Бк/л);
- поверхностная активность $A_{пов}$ (Бк/м², Ки/км²).

Активность, являясь скоростью радиоактивного распада, характеризует содержание рассматриваемого радионуклида в объектах окружающей среды, сырье, продуктах питания и в теле человека.



Базовые физические величины

Флюенс

Важными характеристиками потока излучения при его переносе в среде от источника к облучаемому объекту 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; единица флюенса частиц или квантов част./см^2 ;

плотность потока частиц ϕ - флюенс за единицу времени; единица плотности потока частиц или квантов $\text{част./}(\text{см}^2 \cdot \text{с})$.



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Первоначально развитие дозиметрии определялось необходимостью защиты от воздействия рентгеновского и γ -излучений природных радиоактивных веществ при их медицинском применении. Ионизация среды под воздействием этих излучений явилась первым физическим эффектом, который был сопоставлен с биологическим эффектом излучения. **Для оценки интенсивности поля фотонного излучения в воздухе применяют величину называемую экспозиционной дозой.**

Экспозиционная доза является мерой ионизационного действия фотонного излучения, определяемой по ионизации воздуха в условиях электронного равновесия.

Непосредственно измеряемой физической величиной является суммарный электрический заряд ионов одного знака, образованных в воздухе за время облучения. Для фотонов с энергией менее 3 МэВ воздух служит хорошей моделью мышечной ткани при оценке ионизационного эффекта.



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Базовые физические величины

Экспозиционная доза

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.

Единица экспозиционной дозы — один кулон на килограмм (Кл/кг). Внесистемная единица экспозиционной дозы — Рентген (Р). Один рентген равен $2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг. Единица названа по имени немецкого физика В. Рентгена и принята на 2-м Международном радиологическом конгрессе (1928 г.).



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Базовые физические величины

Поглощенная доза

Поглощенная доза излучения, D введена как основная дозиметрическая величина, которая является мерой энергии, переданной ионизирующим излучением веществу.

Поглощенная доза отражает концентрацию энергии излучения, переданной веществу. Единица поглощенной дозы Грей (Гр), $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$. Используемая ранее внесистемная единица **рад** равна $0,01 \text{ Гр}$.

Названа по имени английского физика Л. Грея.

рад - русская транслитерация английской аббревиатуры термина *radiation adsorbed dose* (**rad**).



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Базовые физические величины

Поглощенная доза

Поглощенная доза D является основополагающей дозиметрической величиной в радиационной безопасности. В дозиметрии поглощенная доза определена таким образом, что позволяет отнести ее значение к некоторой точке среды, но в радиационной безопасности, если специально не оговорен другой ее смысл, она понимается как средняя доза в ткани или в органе



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Базовые физические величины

Поглощенная доза

Для целей радиационной безопасности определяют среднюю поглощенную дозу в ткани или органе, т. е.

$$D_T = \frac{\epsilon_T}{m_T}$$

где ϵ_T – полная энергия, переданная ткани или органу; m_T – масса этой ткани или органа.

Например, m_T может изменяться в диапазоне от менее 10 г для яичников до более 70 кг для всего тела.



Базовые физические величины

Керма

Для оценки воздействия на среду косвенно ионизирующих излучений, используют понятие кермы. Керма (K) – отношение суммы начальных кинетических энергий всех заряженных ионизирующих частиц образовавшихся под действием косвенно ионизирующего излучения в элементарном объеме вещества, к массе вещества в этом объеме. Единица кермы - Грей (Гр) совпадает с единицей поглощенной дозы.



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Базовые физические величины

Керма

Керма определяется кинетической энергией вторичных заряженных частиц, в том числе и той ее частью, которая расходуется затем на тормозное излучение. Значение кермы для фотонов в условиях электронного равновесия совпадает с поглощенной дозой с погрешностью, определяемой долей энергии вторичных заряженных частиц, которая расходуется на тормозное излучение. Для энергий фотонов радионуклидных источников ($E_{\gamma} \leq 3 \text{ МэВ}$) значение кермы в воздухе может превышать значение поглощенной дозы в воздухе не более чем на 1%.



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Базовые физические величины

Керма

В биологической ткани керма уменьшается с глубиной из-за ослабления первичного излучения. Таким образом, максимум кермы фотонного излучения наблюдается на поверхности тела человека.

Русская транслитерация английской аббревиатуры термина *kinetic energy released in material (kerma)*.



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Базовые физические величины

Керма

Размерность поглощенной дозы и кермы отлична от размерности экспозиционной дозы. Эти величины имеют различную природу. Керму фотонного излучения в воздухе рассматривают как энергетический эквивалент экспозиционной дозы. Поскольку один рентген соответствует образованию $2,08 \cdot 10^9$ пар ионов в 1 см^3 воздуха, то, принимая энергию образования пары ионов в воздухе равной 34 эВ, получаем соотношение:

*1Р соответствует керме фотонов в воздухе, равной
примерно $8,8 \cdot 10^{-3}$ Гр.*



Базовые физические величины

Линейная передача энергии

Важной характеристикой ионизирующего излучения, показывающей, как передает излучение свою энергию веществу, является **линейная передача энергии** - энергия, переданная ионизирующей частицей веществу в заданной окрестности её траектории на единицу длины траектории. Как правило, в радиационной безопасности под **линейной передачей энергии** (ЛПЭ или L) излучения подразумевают полную передачу энергии в воде.

Учет этой характеристики излучения позволяет единым образом описать биологическое действие различных излучений, например, состоящих из фотонов и альфа-частиц.



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Нормируемые величины

Нормируемые дозиметрические величины характеризуют облучение человека, т.е. воздействие на него ионизирующего излучения. Их определение служит задачам обеспечения радиационной безопасности человека. Результат таких исследований выработка научных концепций ограничения вредного действия ионизирующего излучения на человека без чрезмерного ограничения практического применения источников. С изменением этих концепций менялись и основные нормируемые величины:

с начала 30-х годов XX в. и до Второй мировой войны экспозиционная доза;

после Второй мировой войны и до конца 70-х годов эквивалент дозы;

в 80-е годы эффективный эквивалент дозы;

начиная с 90-х годов прошлого века и по настоящее время эффективная и эквивалентная дозы.



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Нормируемые величины

До конца 70-х годов XX в. в основе радиационного нормирования лежала концепция предотвращения детерминированных эффектов излучения, которая опиралась на гипотезу порогового действия излучения.

В конце 70-х годов в основу нормирования была положена концепция ограничения вероятности преждевременной смерти вследствие возникновения стохастических эффектов излучения, которая опиралась на гипотезу беспорогового действия излучения. С 90-х годов на смену этой концепции пришла концепция ограничения ущерба вследствие возникновения стохастических эффектов излучения, которая сформулирована в Рекомендациях МКРЗ 1990г. (Публикация МКРЗ №60).



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Нормируемые величины

МКРЗ определяет ущерб как «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 в результате облучения учитывается

- 1) вероятность 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 полноценной жизни в результате реализации тех или иных стохастических эффектов.



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Нормируемые величины

Качество излучения. Радиобиологические исследования показали, что в области малых доз один и тот же радиобиологический эффект облучения какого-либо органа или ткани может наблюдаться при различных поглощенных дозах, если на орган или ткань воздействуют ионизирующие излучения различной природы. Для описания этих отличий было введено понятие **относительной биологической эффективности излучений (ОБЭ)**. 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.



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Нормируемые величины

Многочисленными исследованиями было показано, что при облучении одних и тех же биологических объектов ОБЭ излучения зависит

- от конкретного эффекта,
- от условий облучения,
- от вида излучения, его энергии и интенсивности.

Для одного и того же биологического эффекта, например, выживаемости определенной доли облученных клеток, ОБЭ зависит от ЛПЭ и близка для различных видов излучений с равными ЛПЭ. Как правило, чем выше ЛПЭ частиц излучения, тем выше его биологическая эффективность. При этом зависимость ОБЭ от ЛПЭ излучения оказалась различной для разных биологических эффектов. Последнее обстоятельство фактически сделало невозможным прямое использование ОБЭ в радиационной безопасности.



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Нормируемые величины

Применительно к хроническому облучению людей в малых дозах МКРЗ в Рекомендациях 1990 г. предлагает использовать две величины, производные от ОБЭ, **взвешивающий коэффициент для излучения W_R** и **средний коэффициент качества излучения**. Области применимости этих величин приведены далее в таблице



Величины, характеризующие качество излучения

Величина и область ее использования		Свойства	Метод определения
ОБЭ	Радиобиология	Характеризует облучение в зависимости от его свойств, свойств биологического объекта и изучаемого биологического эффекта	Определяется в радиобиологическом эксперименте
W_R	Радиационная безопасность (ограничение облучения)	Характеризует воздействие источника излучения на человека в зависимости от свойств излучения, падающего на тело человека (внешнее облучение) или возникающего при ядерном превращении радиоактивных ядер внутри тела человека (внутреннее облучение)	W_R устанавливается на основе обобщения значений ОБЭ для стохастических эффектов и трансформации клеток млекопитающих <i>in vitro</i>
Q	Радиационная безопасность (радиационный контроль)	Характеризует передачу энергии излучения биологической ткани в зависимости от распределения поглощенной дозы по ЛПЭ в точке взаимодействия излучения с веществом	Зависимость $Q(L)$ устанавливается на основе согласования с установленными значениями W_R



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Нормируемые величины

Взвешивающий коэффициент излучения используется в определении нормируемой величины эквивалентной дозы облучения органа или ткани. Установленная МКРЗ зависимость W_R от энергии и вида излучения является результатом обобщения имеющихся радиобиологических данных об ОБЭ излучений в отношении возникновения радиогенных раков различной локализации у млекопитающих и злокачественной трансформации клеток млекопитающих *in vitro*. Взвешивающие коэффициенты относятся к внешнему излучению, падающему на поверхность тела, а в случае внутреннего облучения к излучению, испускаемому при ядерном превращении радионуклидов, попавших в организм.



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Нормируемые величины

Для фотонов (рентгеновского излучения и γ -излучения) $W_R=1$, для других излучений $W_R \geq 1$.

В отличие от значений ОБЭ, которые определены только для конкретного биологического эффекта, облучаемого объекта и условий облучения, установленные значения взвешивающего коэффициента излучения нельзя соотнести с каким-либо определенным эффектом облучения человека.



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Нормируемые величины

Взвешивающие коэффициенты для отдельных видов излучения W_R

Вид излучения	Взвешивающий коэффициент излучения W_R
фотоны	1
электроны и мюоны	1
протоны и заряженные пионы	2
α-частицы, осколки деления, тяжелые ядра	20
нейтроны	<i>непрерывная функция от энергии</i>



Нормируемые величины

При расчете взвешивающих коэффициентов нейтронного излучения рекомендуется следующая непрерывная зависимость от энергии нейтронов, E_n (МэВ):

$$W_R = \begin{cases} 2,5 + 18,2e^{-\frac{[\ln(E_n)]^2}{6}}, & E_n < 1 \text{ MeV}; \\ 5,0 + 17,0e^{-\frac{[\ln(2E_n)]^2}{6}}, & 1 \text{ МэВ} \leq E_n \leq 50 \text{ МэВ}; \\ 2,5 + 3,25e^{-\frac{[\ln(0,04E_n)]^2}{6}}, & E_n > 50 \text{ MeV}; \end{cases}$$



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Нормируемые величины

Являясь обобщением большого объема экспериментальных данных, значения W_R характеризуют вероятность возникновения некоторого стандартного стохастического эффекта при воздействии излучений различной природы на стандартного человека в условиях хронического облучения в области малых доз. Взвешивающий коэффициент излучения равен отношению дозы рентгеновского или γ -излучения к дозе данного излучения, при которых равны вероятности возникновения стандартного стохастического эффекта при облучении стандартного человека.



Нормируемые величины

Средний коэффициент качества излучения МКРЗ используют в определении рабочих (операционных) величин внешнего облучения - эквивалентов дозы, соподчиненных величинам нормируемым.

$$Q(L) = \begin{cases} 1 & \text{при } L \leq 10 \text{ кэВ/мкм} \\ 0,32 \cdot L - 2,2 & \text{при } 10 \leq L < 100 \text{ кэВ/мкм,} \\ 300/\sqrt{L} & \text{при } L \geq 100 \text{ кэВ/мкм} \end{cases} \quad (6)$$



Нормируемые величины

Для обеспечения соответствия между операционными и нормируемыми величинами была установлена зависимость коэффициента качества излучения $Q(L)$ таким образом, чтобы в определенных условиях (в точке на глубине 10 мм в тканезквивалентном фантоме МКРЕ) для всех проникающих излучений (нейтронов и гамма-квантов), для которых были установлены значения W_R , выполнялось равенство

$$\bar{Q} = \frac{1}{D_R} \int_0^{\infty} Q(L) D_R(L) dL = W_R, \quad (7)$$

Где $D_R(L)dL$ - поглощенная доза излучения R в точке взаимодействия излучения с веществом, обусловленная частицами с ЛПЭ в интервале $(L, L+dL)$.



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Нормируемые величины

Эквивалентная доза. В качестве меры ущерба при облучении отдельной ткани или органа человека Рекомендациями МКРЗ 1990 г. была введена специальная величина **эквивалентная доза облучения органа или ткани**, равная поглощенной дозе в органе или ткани, умноженной на соответствующий взвешивающий коэффициент излучения W_R . Эквивалентная доза является функционалом, приводящим облучение органов и тканей человека любым излучением к эквивалентному по ущербу облучению стандартным редкоионизирующим излучением



Нормируемые величины

Эквивалентная доза (equivalent dose) в т-й ткани или органе выражается соотношением

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$$

где $D_{T,R}$ – поглощенная доза, усредненная по т-й ткани или органу и созданная R-м излучением. Единицей измерения эквивалентной дозы является Джоуль на килограмм, и она имеет специальное наименование Зиверт (Зв).

Единица эквивалентной дозы названа по имени шведского ученого Р. Зиверта первого председателя МКРЗ.



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Нормируемые величины

При внешнем облучении человека принимают, что ущерб его здоровью причиняется в момент прохождения излучения через тело, хотя при этом ожидается, что реализация ущерба в виде того или иного заболевания (эффекта излучения) при нормальных уровнях доз, характерных для облучения профессиональных работников, является маловероятным событием и может произойти в течение всей оставшейся жизни человека, как это показано далее на примере динамики возникновения радиогенных раков после облучения.



Нормируемые величины



Динамика возникновения радиогенных раков после облучения



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Нормируемые величины

Разные органы тела человека по-разному экранируются другими частями человеческого тела, что приводит к существенной разнице между эквивалентными дозами их облучения. Вот почему указание на облучаемый орган является существенным в определении эквивалентной дозы облучения органа (equivalent dose in organ). Эту величину необходимо отличать от «эквивалентной дозы», использовавшейся до последнего времени в русскоязычной научной и нормативной литературе.

Русскоязычный термин «эквивалентная доза» относится к величине, равной произведению поглощенной дозы на коэффициент качества излучения, и является неверным переводом англоязычного термина, обозначающего эквивалент дозы (dose equivalent).

Весьма примечательно, что в отечественной практике при переводе с русского языка на английский «эквивалентная доза» переводилась как «dose equivalent», а вовсе не как «equivalent dose», что следовало бы из грамматики английского языка.



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Нормируемые величины

Ожидаемая эквивалентная доза облучения органа или ткани. Важной величиной, введенной в практику радиационной безопасности Рекомендациями МКРЗ 1990 г., является ожидаемая эквивалентная доза внутреннего облучения органа или ткани, $H_T(t)$.

Эта величина является аналогом эквивалентной дозы внешнего излучения при облучении отдельной ткани или отдельного органа человека источниками внутреннего излучения.



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Нормируемые величины

Ожидаемая эквивалентная доза

К сожалению, в переводе этого термина, принятом в русскоязычной литературе, утерян содержащийся в изначальном английском термине смысл завершенности действия (облучения) и неотвратимости его последствий: *committed equivalent dose* - дословно «неизбежная эквивалентная доза» (*committo* совершать что-либо, за чем следует неотвратимое наказание).

«Неотвратимость» последствий при внутреннем облучении означает следующее. Поступление радиоактивного вещества в организм приводит к облучению органов и тканей в течение длительного времени. В отличие от внешнего облучения доза внутреннего облучения органа или ткани формируется в течение длительного времени после поступления радиоактивного вещества в организм.



Нормируемые величины

Ожидаемая эквивалентная доза

Ожидаемая эквивалентная доза определена как временной интеграл мощности эквивалентной дозы в органе или ткани, которая формируется в течение некоторого времени t после поступления радиоактивного вещества в организм стандартного человека:

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \dot{H}_T(t) dt, \quad (10)$$

где t_0 - момент поступления, а $H_T(\tau)$ - мощность эквивалентной дозы в органе или ткани T к моменту времени t . Значение t соответствует ожидаемой оставшейся продолжительности жизни человека. Для стандартизации дозиметрических расчетов принято, что $t = 50$ лет для взрослых людей старше двадцати лет и $t = (70 - t_0)$ лет для детей и лиц моложе двадцати лет. Единица ожидаемой эквивалентной дозы зиверт (Зв).



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Нормируемые величины

Ожидаемая эквивалентная доза

Для целей обеспечения радиационной безопасности за время причинения ущерба человеку в результате внутреннего облучения его органов или тканей принимают момент поступления радиоактивного вещества в организм; при этом ожидается, что реализация ущерба в виде того или иного эффекта излучения может произойти в течение всей оставшейся жизни человека. Тем самым приводятся к единой мере разные по протяженности во времени облучения. При равенстве величин H_T и $H_T(t)$ следует ожидать в течение оставшейся жизни одинаковые последствия внешнего и внутреннего облучений.



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Нормируемые величины

Эффективная доза. В области малых доз облучение различных органов или тканей с различными эквивалентными дозами может приводить к одним и тем же ущербам. Мерой ущерба, причиненного человеку в результате облучения всего тела или нескольких органов и тканей, является эффективная эквивалентная доза или сокращенно - эффективная доза. Эффективная доза определена как функционал, приводящий все возможные случаи пространственно неоднородного (внешнего или внутреннего) облучения тканей и органов тела стандартного человека к эквивалентному по ущербу равномерному облучению всего тела. Облучению с равными эффективными дозами соответствуют равные ущербы.



Нормируемые величины

Эффективная доза.

В случае внешнего облучения эффективная доза $E^{\text{внеш}}$ определяется как сумма произведений эквивалентных доз H_T на соответствующие взвешивающие коэффициенты для тканей и органов W_T :

$$E^{\text{внеш}} = \sum_T W_T \cdot H_T, \quad (11)$$

Регламентированные числовые значения взвешивающих коэффициентов W_T установлены примерно равными отношению эквивалентной дозы равномерного облучения всего тела стандартного человека и эквивалентной дозы H_T облучения органа T , при которых ожидается один и тот же ущерб вследствие сокращения продолжительности периода полноценной жизни человека в результате возникновения стохастических эффектов, вызванных облучением.



Нормируемые величины

Эффективная доза.

Взвешивающие коэффициенты для тканей и органов при
расчете эффективной дозы (W_T)

Ткань	W_T	(ΣW_T)
красный костный мозг, толстый кишечник, легкие, желудок, молочная железа, остальные ткани*	0,12	(0,72)
гонады	0,08	(0,08)
мочевой пузырь, пищевод, печень, щитовидная железа	0,04	(0,16)
костная поверхность, кожа, головной мозг, слюнные железы	0,01	(0,04)

*- ткани категории «остальные» включают: надпочечники, ткани экстраоракального отдела, желчный пузырь, сердце, почки, лимфоузлы, мышечную ткань, слизистую полости рта, поджелудочную железу, тонкий кишечник, селезенку, тимус, предстательную железу (мужчины), матку/шейку матки.



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Нормируемые величины

Эффективная доза.

Значения W_R и W_T 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.

Значения, как весовых множителей излучения, так и тканевых весовых множителей зависят от наших современных знаний в радиобиологии и могут время от времени изменяться.



Нормируемые величины

Эффективная доза.

Для упрощения расчета эффективной дозы в часто встречающихся на практике стандартных условиях облучения внешнего облучения используют соотношение:

$$E^{\text{внеш}} = \sum_K \Phi(\varepsilon)_R \cdot e(\varepsilon)_R^{\text{внеш}}, \quad (13)$$

где - $e(\varepsilon)_R^{\text{внеш}}$ дозовый коэффициент излучения R, равный эффективной дозе при облучении тела человека потоком излучения R с единичным флюенсом и энергией ε , Зв/(част./см²); $\Phi(\varepsilon)_R$ - флюенс излучения R с энергией ε , част./см² и



Нормируемые величины

Эффективная доза.

В случае внутреннего облучения эффективная доза определяется аналогично эффективной дозе внешнего излучения и называется ожидаемой эффективной дозой $E(t)$:

Для упрощения расчета эффективной дозы в часто встречающихся на практике стандартных условиях внутреннего облучения используют соотношение:

$$E(\tau) = \sum_{U,G} \Pi_{U,G} \cdot e(\tau)_{U,G}^{\text{внутр}}, \quad (14)$$

где - $e(\varepsilon)_R^{\text{внутр}}$ дозовый коэффициент радионуклида U , равный ожидаемой эффективной дозе при поступлении в организм 1 Бк радио нуклида U в виде соединения типа G , Зв/Бк; $\Pi_{U,G}$ - поступление радионуклида U в виде соединения типа G , Бк.



Нормируемые величины

Эффективная доза.

В системе дозиметрических величин эффективная доза внешнего облучения и ожидаемая эффективная доза внутреннего облучения эквивалентны: ущербы, причиненные источниками внешнего и внутреннего облучения, суммируются. Поэтому годовая эффективная доза равна сумме эффективной дозы внешнего облучения, полученной за год, и ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения, обусловленной поступлением в организм радионуклидов за этот же год. Если не оговаривается иное, эффективной дозой **E** называют сумму эффективной дозы внешнего облучения и ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения:

$$E = E^{\text{внеш}} + E(\tau). \quad (15)$$



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Нормируемые величины

Эффективная доза.

Желательно, чтобы равномерная по всему телу эквивалентная доза давала эффективную дозу, численно равную этой равномерной эквивалентной дозе. Это достигается нормированием суммы тканевых весовых множителей на единицу.

Значения весовых множителей излучения зависят от вида и энергии излучения и не зависят от ткани или органа. Аналогичным образом значения тканевых весовых множителей выбирают независимыми от вида и энергии излучения, падающего на тело.

Такие упрощения не более чем приближения к реальной биологической ситуации, но они позволяют определить поле излучений вне тела в дозиметрических терминах без указания органа, подвергающегося воздействию.

Можно также представить эффективную дозу в виде суммы дважды взвешенных поглощенных доз во всех тканях и органах тела.



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Нормируемые величины

Эффективная доза.

Последствия облучения зависят не только от дозы, вида и энергии излучения (связанных с весовым множителем излучения) и распределения дозы в теле (связанного с тканевым весовым множителем), но и от распределения дозы по времени (мощности дозы и продолжительности воздействия). Влияние этих условий облучения по мнению МКРЗ может быть учтено использованием различных значений коэффициентов, связывающих эквивалентную и эффективную дозы с вероятностью возникновения стохастических эффектов, а не введением дополнительных весовых множителей в определения дозиметрических величин.



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Нормируемые величины

Эффективная доза.

Как нормируемая величина, эффективная доза является результатом последовательного развития представлений о биологическом действии ионизирующего излучения и поиска меры воздействия ионизирующего излучения, отвечающей целям радиационной безопасности, оценке и ограничению радиогенного ущерба. Применение этой величины позволяет перейти от измеряемых физических характеристик поля ионизирующего излучения к потенциальному ущербу в качестве меры воздействия излучения на человека, использование которой создает условия для приведения к единому стоимостному знаменателю вред, затраты и выгоду от использования источников ионизирующего излучения.



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Нормируемые величины

Эффективная доза.

Эквивалентная и эффективная дозы являются величинами, которые предназначены для применения в радиационной безопасности, включая в общем виде и оценку риска. Они обеспечивают основу для оценки вероятности стохастических эффектов только для поглощенной дозы значительно ниже порогов детерминированных эффектов.

Чтобы связать вероятность стохастических эффектов с дозиметрическими величинами, удобно использовать коэффициент риска представляющий собой отношение вероятного числа стохастических эффектов к приращению дозы вызывающей эти стохастические эффекты. Упомянутая доза – это обычно эквивалентная доза или эффективная доза.



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Нормируемые величины

Эффективная доза.

Коэффициенты номинального риска (10^{-2}Зв^{-1}) для стохастических эффектов с учетом их вреда после облучения с малой мощностью дозы – рекомендации МКРЗ

Облученная популяция	Рак		Наследств. эффекты		Всего	
	Публ.103 2007г.	Публ.60 1990г.	Публ.103 2007г.	Публ.60 1990г.	Публ.103 2007г.	Публ.60 1990г.
Вся популяция	5,5	6,0	0,2	1,3	5,7	7,3
Взрослые	4,1	4,8	0,1	0,8	4,2	5,6

Усредненная величина коэффициента риска, используемая для установления пределов доз облучения персонала и населения, принята равной **$5 \times 10^{-2} \text{Зв}^{-1}$** .

Санитарные нормы и правила Республики Беларусь «Требования к радиационной безопасности»



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Нормируемые величины

Эффективная доза, отнесенная к большой группе облученных людей, отражает ожидаемый (в статистическом смысле) ущерб, который связан с облучением членов этой группы. Специальной дозиметрической величиной, предназначенной в области облучения с малыми дозами для оценки коллективного радиологического ущерба, является коллективная эффективная доза S , равная для коллектива из N человек сумме индивидуальных эффективных доз облучения членов этого коллектива E_1, \dots, E_N :

Единица коллективной эффективной дозы человеко-зиверт (чел.-Зв). Как правило, коллективная доза соотносится с некоторой практической деятельностью и периодом времени, в течение которого эта деятельность приводит к облучению определенной группы людей.



Нормируемые величины

Коллективный ущерб определяется как укорочение суммарной длительности периода полноценной жизни членов рассматриваемого коллектива из-за возможного возникновения в облученной группе дополнительных по отношению к фоновому уровню радиогенных стохастических эффектов:

$$G = \Delta t \times R_E \times S, \quad (17)$$

где R_E - коэффициент вероятности (радиогенный риск) сокращения длительности суммарного (коллективного) периода полноценной жизни в среднем на 15 лет на один стохастический эффект (от смертельного рака, серьезных наследственных эффектов и несмертельного рака, приведенного по ущербу к последствиям от смертельного рака), равный

- $R_E = 5,6 \cdot 10^{-2}$ 1/чел.-Зв для профессионального облучения;
- $R_E = 7,3 \cdot 10^{-2}$ 1/чел.-Зв для облучения населения;

Δt - ожидаемое (среднее) число лет сокращения длительности периода полноценной жизни при реализации какого-либо стохастического эффекта облучения, равное 15 годам.

Коллективная эффективная доза является инструментом для оценки ожидаемого ущерба при облучении больших групп людей. Облучению с коллективной эффективной дозой 1 чел.-Зв соответствует ожидаемый ущерб, равный потере 1 года суммарной длительности периода полноценной жизни облученного коллектива.



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Рабочие (операционные) величины

Нормируемые величины, в которых выражены основные пределы доз, непосредственно измерить невозможно. Для оценки нормируемых величин при радиационном контроле предназначены рабочие величины, которые являются непосредственно определяемыми в измерениях величинами. Введение в практику радиационного контроля рабочих величин необходимо, в первую очередь, для унификации методов контроля и определения требований к функции отклика приборов радиационного контроля.



Рабочие величины

Рабочая (операционная) величина - величина, однозначно определяемая через физические характеристики поля излучения в точке, максимально возможно приближенная в стандартных условиях облучения к нормируемой величине и предназначенная для консервативной оценки этой величины при дозиметрическом контроле. В общем виде связь между величинами, используемыми в радиационном контроле, представлена ниже на рисунке.

В определении рабочих величин внешнего облучения используется **эквивалент дозы H** , который равен поглощенной дозе в точке, умноженной на средний коэффициент качества для излучения, воздействующего на ткань в данной точке:

$$H = \bar{Q} \cdot D = \int_0^{\infty} Q(L)D(L)dL . \quad (18)$$

Единица эквивалента дозы - зиверт (Зв).



Связь между величинами, используемыми в радиационном контроле



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Рабочие величины

Взаимодействие излучения с телом человека приводит к изменению самого радиационного поля. Рабочие величины определяются таким образом, чтобы результаты их измерения с помощью соответствующих дозиметрических приборов учитывали этот эффект.

Рабочей (операционной) величиной внешнего облучения для индивидуального контроля облучения человека принят эквивалент индивидуальной дозы - $H_p(d)$ - эквивалент дозы в мягкой биологической ткани, определяемый на глубине d (мм) под рассматриваемой точкой на поверхности плоского фантома или на теле взрослого человека (см. схему определения индивидуального эквивалента дозы). Использование фантома или тела человека в этом случае позволяет напрямую обеспечить учет возмущения реального поля излучения человеком.



Рабочие величины

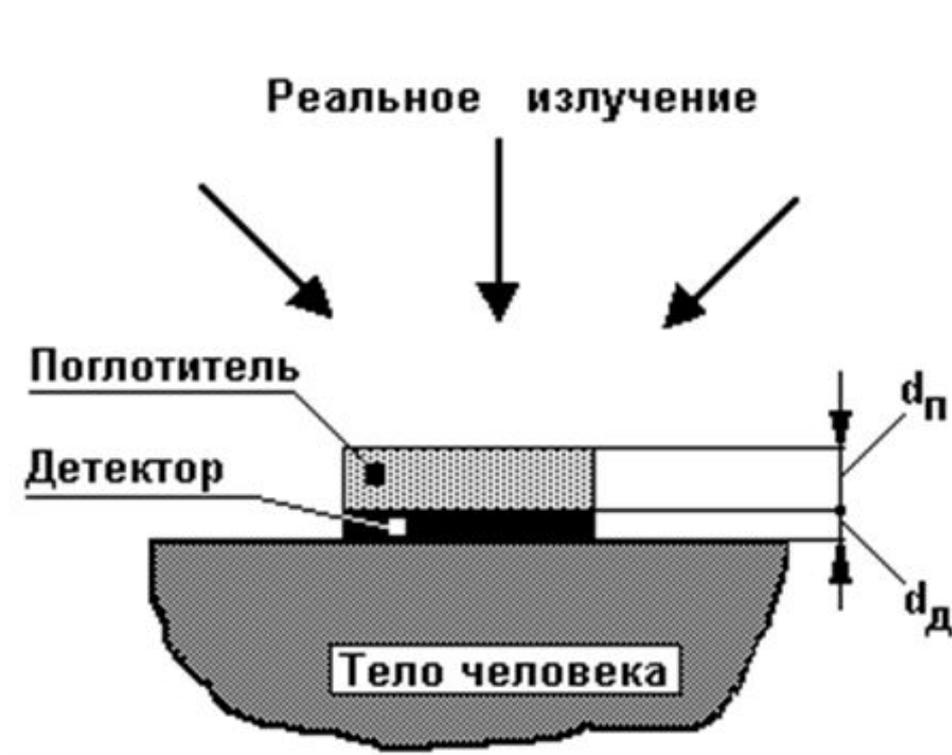


Схема определения эквивалента индивидуальной дозы



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

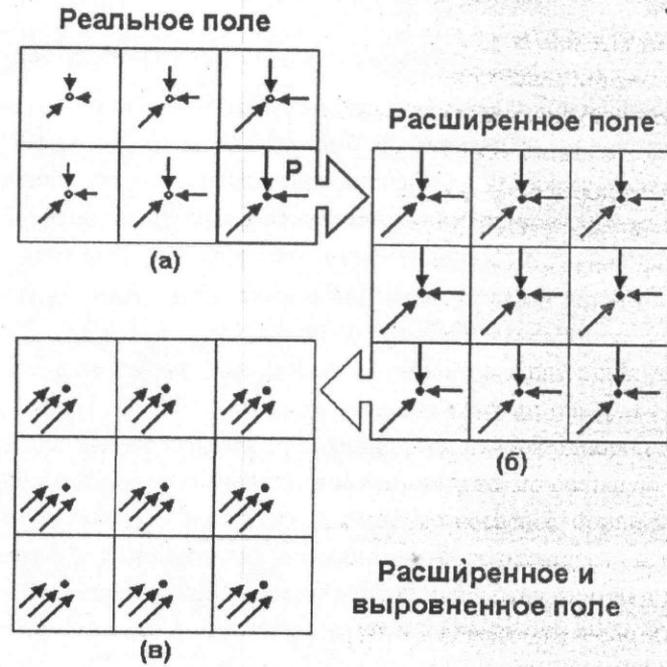


Рабочие величины

Рабочей (перационной) величиной внешнего облучения для контроля радиационной обстановки принят эквивалент амбиентной дозы (амбиентная доза) $H^*(d)$.

Перевод англоязычного термина *ambient* (от лат. *ambi* - кругом, вокруг, с обеих сторон) *dose equivalent* - эквивалент дозы, характеризующей радиационную обстановку.

Рабочие величины для мониторинга радиационной обстановки определяются с использованием концепций *расширения и выравнивания* в описании характеристик поля излучения, необходимых для определения характеристик соответствующих дозиметров. Эти концепции иллюстрирует ниже приведенный рисунок.



Расширение и выравнивание поля излучения



Рабочие (операционные) величины

Представим, что детектор находится в точке P неоднородного поля излучения и не вносит в это поле каких-либо возмущений. Длина стрелок (векторов) на рис. **а** представляет энергию реального излучения, а направление потока излучения представлено направлением стрелки. Необходимо наделить дозиметр с таким детектором характеристиками (например, функцией энергетической чувствительности), которые позволили бы учесть возмущение поля излучения, которое возникло бы, если в ту же точку был помещен условный человек. Процедура *расширения* поля излучения приводит к тому, что после расширения поле излучения становится однородно и достаточно велико по размерам (занимает достаточно большую область пространства) для того, чтобы полностью «освещать» или облучать детектор. Стрелки на рис. **б** указывают, что *расширенное* поле излучения однородно, т.е. его свойства не меняются от точки к точке; рис. **в** иллюстрирует *расширенное и выровненное* поле. Как обозначено направлением стрелок, *выровненное* поле является мононаправленным.



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Рабочие величины

Прибор, измеряющий $H^*(d)$ в реальном поле излучения, должен воспроизводить значение эквивалента дозы, который был бы создан в шаровом фантоме МКРЕ на глубине d (мм) от поверхности по диаметру, параллельному направлению излучения, если бы такой фантом был помещен в расширенное и выровненное поле излучения (см. далее рисунок), идентичное рассматриваемому по составу, флюенсу и энергетическому распределению. Эквивалент амбиентной дозы используется для характеристики поля излучения в точке, совпадающей с центром такого шарового фантома. Эта величина применительно к реальному полю характеризует консервативную оценку дозы облучения человека. Единица эквивалента амбиентной дозы Зиверт (Зв).



Рабочие величины

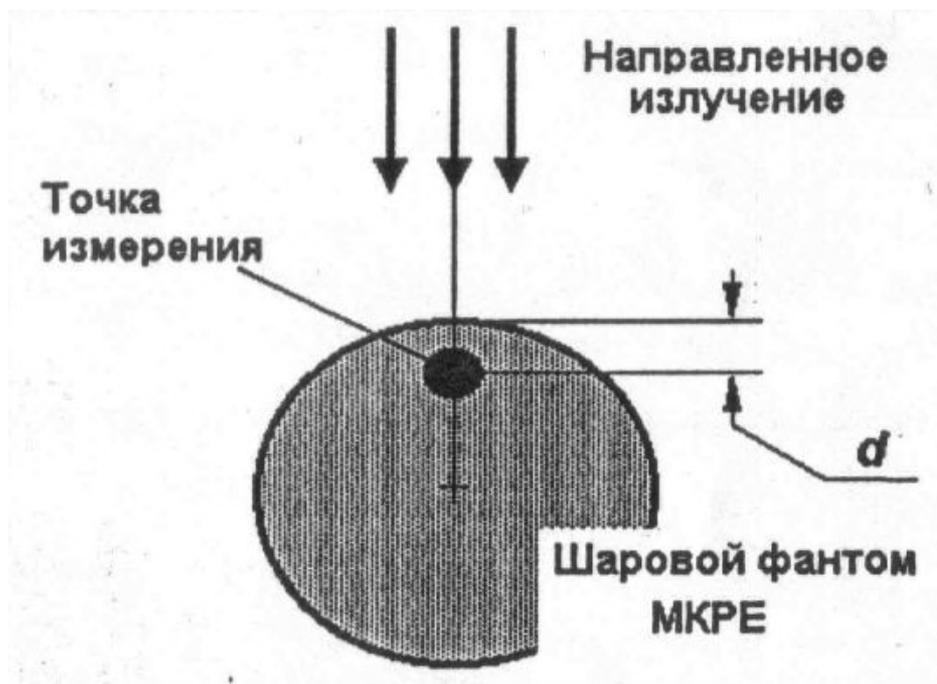


Схема определения эквивалента амбиентной дозы



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Рабочие величины

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

Шаровой фантом МКРЕ

сфера диаметром 30 см
заполненная

Тканезквивалентным веществом, содержащим:

кислород – 76,2 %

углерод – 11,1 %

водород – 10,1 %

азот – 2,6 %



СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН



Рабочие величины

При введении в практику современной системы обеспечения радиационной безопасности необходимо соблюсти преемственность показателей и единиц измерения дозиметрических величин (смотри далее таблицу) Особое внимание необходимо обратить на интерпретацию результатов измерения тех величин, определения которых претерпели изменения. В первую очередь, это относится к эквиваленту дозы.

Происшедшее после 1990 г. изменение регламентированной МКРЗ зависимости коэффициента качества от ЛПЭ требует быть осторожным при анализе данных, полученных с помощью измерительных приборов, в которых была реализована иная зависимость коэффициента качества от ЛПЭ (например предложенная Рекомендациями МКРЗ 1977 г.).



Рабочие величины

Основные дозиметрические величины и соотношения между ними

Величина/обозначение	Единица		Соотношение
	СИ	традиционная	
Активность / А	Бк	Ки	$1\text{Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$
Энергия излучения R/ E _R	Дж	эВ	$1\text{эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$
ЛПЭ / L	Дж/м	кэВ/мкм	$1 \text{кэВ/мкм} = 62 \text{ Дж/м}$
Экспозиционная доза/ X	Кл/кг	Р	$1\text{Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$
Керма / К	Гр	рад	$1 \text{рад} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Гр}$
Поглощенная доза / D	Гр	рад	$1 \text{рад} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Гр}$
Эквивалентная доза в органе T / H _T	Зв	НП*	нет
Эффективная доза/ E	Зв	НП*	нет
Эквивалент дозы / H	Зв	бэр	$1 \text{бэр} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Зв}$

* Неприменялась (НП), т.к. эта величина впервые была введена Рекомендациями МКРЗ 1990 г.