

2.1 Физическая доза

Действие ионизирующих излучений на вещество представляет собой сложный процесс. Поглощенная энергия расходуется на нагрев вещества, а также на его химические и физические превращения. Эффект облучения зависит от величины поглощенной дозы, ее мощности, вида излучения, радиационной чувствительности облучаемого объекта и его компонентов (например, водного раствора и осадка). Сама по себе доза излучения зависит от вида излучения (нейтроны, γ -кванты и т. д.), плотности его потока, энергии его частиц, состава вещества и его структуры. В процессе облучения доза со временем накапливается.

Доза излучения, энергия ионизирующего излучения (потоков частиц и квантов), поглощенная облучаемым веществом и рассчитанная на единицу его массы. Является мерой радиационного воздействия.

Доза - мера энергии, которая передана ионизирующим излучением мишени. Обычно термин используется без уточнения, когда контекст делает смысл очевидным, или в качестве общего термина, когда различные определители могут быть использованы в равной степени.

Зависимость величины дозы от энергии частиц, плотности их потока и состава облучаемого вещества различна для разных видов излучения. Например, для рентгеновского и γ -излучений доза зависит от атомного номера Z элементов, входящих в состав вещества; характер этой зависимости определяется энергией фотонов $h\nu$ (h — Планка постоянная, ν — частота электромагнитных колебаний). Для этих видов излучений доза в тяжёлых веществах больше, чем в лёгких (при одинаковых условиях облучения). Нейтроны взаимодействуют с ядрами атомов. Характер этого взаимодействия существенно зависит от энергии нейтронов. Если происходят упругие соударения нейтронов с ядрами, то средняя величина энергии, переданной ядру в одном акте взаимодействия, оказывается большей для лёгких ядер. В этом случае (при одинаковых условиях облучения) поглощённая доза в лёгком веществе будет выше, чем в тяжёлом. Другие виды ионизирующих излучений имеют свои особенности взаимодействия с веществом, которые определяют зависимость дозы от энергии излучения и состава вещества.

Для характеристики дозового поля, возникающего в воздушной среде, окружающей источник излучения, используется понятие экспозиционной дозы.

2.1.1 Экспозиционная доза

Экспозиционная доза, X , - количественная характеристика гамма- и рентгеновского излучения, основанная на их ионизирующем действии в воздухе - отношение полного заряда dq всех ионов одного знака, создаваемых в воздухе, к массе воздуха в этом объеме.

Экспозиционная доза определяет энергетические возможности ионизирующего излучения.

Ее можно определить как часть энергии γ -излучения E_γ , преобразованную в кинетическую энергию заряженных частиц в единице массы Δm воздуха. Под энергией E_γ понимают ту часть энергии γ -излучения, которая затрачена на образование комптоновских и фотоэлектронов, электрон-позитронных пар (т.е. сопряжённая корпускулярная эмиссия) в некотором объёме воздуха массой Δm .

$$X_\gamma = \frac{E_\gamma}{\Delta m_{\text{возд}}}$$

За единицу экспозиционной дозы X принята единица кулон на килограмм (к/кг) т.е. доза, создаваемая γ -излучением, при котором сопряжённая корпускулярная эмиссия производит в 1 кг сухого атмосферного воздуха при нормальных условиях (при температуре 0°C и давлении 760 мм рт. ст.) 1 Кулон электричества положительно и отрицательно заряженных частиц ($6,24 \cdot 10^{18}$ пар ионов). 1 кулон = $3 \cdot 10^9$ ед. СГСЭ = 0,1 ед. СГСМ. Физический эквивалент 1 Кл/кг равен 33 Дж/кг (для воздуха).

Экспозиционная доза представляет собой суммарный электрический заряд вторичных частиц (ионов одного знака), образованных в единице объема воздуха в условиях электронного равновесия.

$$X = \frac{dq}{dm}$$

Внесистемная единица экспозиционной дозы - рентген (р), которой соответствует такое рентгеновское и гамма- излучение, которое при температуре 0°C и давлении 760 мм рт. ст. образует в 1 см³ сухого воздуха (имеющего при нормальных условиях вес 0,001293 г) $2,082 \cdot 10^9$ пар ионов ($2,08 \cdot 10^9 = 1/(4,8 \cdot 10^{-10})$). Эти ионы несут суммарный заряд одного знака в 1 эл.-статическую единицу (в системе СГСЭ), что в единицах работы и энергии (в системе СГС) составит около 0,114 эрг поглощённой воздухом энергии ($6,77 \cdot 10^4$ Мэв). (1 эрг = 10^{-7} Дж = $2,39 \cdot 10^{-8}$ кал). При пересчёте на 1 г воздуха это составит $1,610 \cdot 10^{12}$ пар ионов или 87,3 эрг/г сухого воздуха.

Значения 0,114 эрг/см³ и 8767 эрг/г являются энергетическими эквивалентами рентгена.

Замечание. Расчет энергии, затраченной на образование ионов, несущих заряд в 1 СГСЕ проводится следующим образом. Если принять среднюю энергию образования 1 пары ионов в воздухе равной 33,85 эВ, то при

экспозиционной дозе 1 р одному кубическому сантиметру воздуха передается энергия, равная : $(2.08 \cdot 10^9) \cdot 33.85 \cdot (1.6 \cdot 10^{-12}) = 0.114$ эрг, а одному грамму воздуха : $0.114 / \rho_{\text{возд}} = 0.113 / 0.001293 = 87.7$ эрг.

Таким образом, физический энергетический эквивалент рентгена равен 87,7 эрг/г для воздуха (для других веществ значения совершенно другие, например, для воды (биологической ткани) 95 эрг/г). В условиях электронного равновесия экспозиционной дозе 1 р соответствует поглощенная доза в воздухе, равная 0,877 рад.

Для получения экспозиционной дозы 1 р нужно, чтобы энергия, затраченная на ионизацию 1 см³ (или 1 г) воздуха, была равна:

$$1 \text{ р} = 7,06 \cdot 10^4 \text{ МэВ/см}^3 = 5,47 \cdot 10^7 \text{ МэВ.г} = 0,114 \text{ эрг/см}^3 = 87,7 \text{ эрг/г.}$$

Соотношения между рентгеном и Кл/кг следующие: $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$ - точно. $1 \text{ Кл/кг} = 3,88 \cdot 10^3 \text{ Р}$ - приблизительно.

Замечание. Еще раз напомним, что в соответствии с действующими в России нормами, термин «экспозиционная доза» исключен из использования где бы то ни было (см. керма).

Отказ от использования понятия «экспозиционная доза» и производных от нее величин произошел по следующим причинам:

- экспозиционная доза - характеристика поля только фотонного излучения - используется обычно при энергиях фотонов не выше 3 МэВ;
- при энергии фотонов выше 1,25 МэВ единица экспозиционной дозы не воспроизводится;
- значения экспозиционной (в рентгенах) и поглощенной (в радах) доз отличаются во внесистемных единицах всего лишь в 1,14 раза, в то время как в единицах СИ различие становится весьма существенным;
- между новыми и старыми единицами экспозиционной дозы отсутствует простое целочисленное соотношение $1 \text{ р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$ (точно), $1 \text{ Кл/кг} = 3,88 \cdot 10^3 \text{ р}$ (приближенно).

При утверждении единицы СИ экспозиционной дозы кулон на килограмм (Кл/кг) ей не было присвоено специального наименования, так как эта единица и величина, мерой которой она является, вышли из употребления.

Величина X для γ -излучения за время t действия потока квантов γ - излучения называют мощностью X^* экспозиционной дозы X . X^* характеризует интенсивность γ - излучения.

$$X^* = X/t.$$

X^* измеряют в амперах на кг, А/кг. При использовании вне системных единиц мощность экспозиционной дозы измеряют в Р/сек или Р/час. Более дробные доли – одна тысячная и одна миллионная (мР/ч, мкР/ч).

Мощность дозы - мера мощности, при которой энергия излучения передается мишени. Обычно используется без уточнения, если контекст очевиден, или как общий термин, если в одинаковой степени могут быть использованы различные уточняющие значения, например, мощность поглощенной дозы, мощность эквивалентной дозы.

По величине экспозиционной дозы можно рассчитать поглощенную дозу рентгеновского и γ -излучений в любом веществе. Для этого необходимо знать состав вещества и энергию фотонов излучения.

2.1.2 Электронное равновесие

Поглощение энергии ионизирующего излучения является первичным процессом, дающим начало последовательности физико-химических преобразований в облученном объекте, приводящим к наблюдаемому радиационному эффекту. Поэтому естественно сопоставить наблюдаемый эффект с количеством поглощенной энергии или поглощенной дозы.

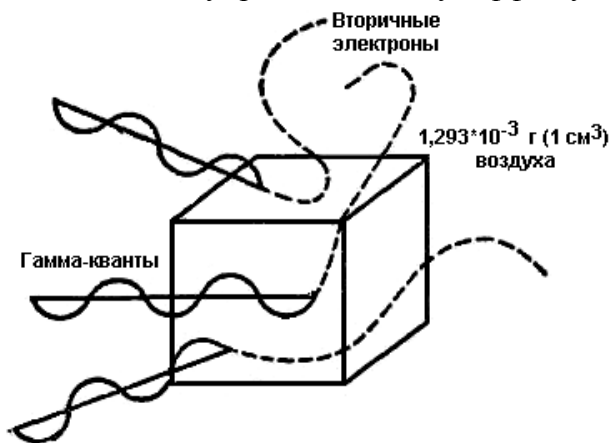


Рис.1 Взаимодействие γ -квантов с 1 см³ воздуха с образованием вторичных электронов, в свою очередь создающих ионы как внутри, так и вне рассматриваемой массы воздуха.

При прохождении рентгеновского или γ - излучения через вещество кванты взаимодействуют с электронами и атомами вещества, в результате чего энергия первичного γ - излучения преобразуется в кинетическую энергию электронов и в энергию вторичных

квантов (Рис.1). Линейный коэффициент ослабления моноэнергетического γ -излучения μ представляет собой сумму двух коэффициентов – коэффициента истинного поглощения (или электронного

преобразования) μ и коэффициента μ_k , характеризующего преобразование энергии первичных γ -квантов в энергию вторичного электромагнитного излучения:

$$\mu = \mu_e + \mu_k$$

В создании дозы участвует только та часть энергии, которая преобразовалась в энергию заряженных частиц.

Для перехода от X_γ к D необходимо, чтобы выполнялось условие электронного равновесия - это такое состояние взаимодействия излучения с веществом, при котором энергия излучения, поглощенная в некотором объеме вещества, равна кинетической энергии всех ионизирующих частиц, образовавшихся в том же объеме. Электронное равновесие может иметь место при поглощении γ -излучения неограниченно протяженной, однородной по составу средой (воздух).

Состояние взаимодействия фотонов с веществом, при котором вносимая в некоторый объем энергии освобожденных фотонами электронов равна энергии, уносимой электронами из того же объема, называется электронным равновесием. Определенное таким образом равновесное состояние может существовать в поле любого ионизирующего излучения; вторичными заряженными частицами при этом не обязательно будут электроны. Равновесие заряженных частиц наблюдается в данной точке среды в случае, если на расстоянии максимального пробега вторичных заряженных частиц во всех направлениях от данной точки и среда и поле заряженных частиц могут считаться однородными. В случаях не соблюдения этих условий говорят об относительном энергетическом равновесии.

Для бесконечного однородного по атомному составу пространства электронное равновесие для некоторой области V будет иметь место, если сделать только два допущения: линейные размеры области V значительно меньше, чем пробег самых быстрых электронов, и интенсивность и спектральный состав первичного излучения одинаковы для всех точек среды. Электронное равновесие будет обеспечено для небольшой области любого вещества, если эта область окружена слоем того же самого вещества толщиной, равной пробегу самых быстрых электронов, освобожденных в этом веществе γ -квантами. Изменением интенсивности γ -излучения за счет поглощения в окружающей среде можно пренебречь для γ -излучения средней энергии (до 10 МэВ). При электронном равновесии равенство массовых коэффициентов передачи энергии излучения для двух веществ означает, что при тождественных условиях облучения величины поглощенной энергии излучения на единицу массы в обоих веществах равны между собой.

2.1.3 Поглощенная доза

Мерой воздействия ионизирующего излучения на вещество служит поглощенная доза - фундаментальная дозиметрическая величина, определенная как отношение поглощенной энергии излучения в единице массы. Основной единицей поглощенной энергии в системе СИ является грей (Гр) - джоуль на килограмм массы (Дж/кг). Обозначается она символом «D». Поглощенная доза в 1 Гр является довольно значимой радиационной величиной и может вызвать в облученном организме ряд последствий. Но в собственном энергетическом смысле эта величина очень мала - повышение температуры тела человека в результате воздействия этой дозы менее одной тысячной градуса.

Доза поглощенная (D) - величина энергии ионизирующего излучения, переданная веществу:

$$D = \frac{dE}{dm},$$

где dE - средняя энергия, переданная ионизирующим излучением облучаемому веществу (теперь - не обязательно воздуху), находящемуся в элементарном объеме, а dm - масса вещества в этом элементарном объеме.

Термин определяет дозу в точке, усредняет дозу в органе или ткани.

Энергия может быть усреднена по любому определенному объему, и в этом случае средняя доза будет равна полной энергии, переданной объему, деленной на массу этого объема.

Если учитывать, что 1 Р=88 эрг/г воздуха, а 1 рад=100эрг/г, то при условии электронного равновесия

$$D_{\text{возд}}=0,877X_\gamma$$

Для веществ, отличных от воздуха, в это соотношение вводим коэффициент пропорциональности f , величина которого является функцией энергии γ -излучения и природы вещества - поглотителя.

$$D=fD_{\text{возд}}=0,877fX_\gamma$$

D можно рассчитать для любого конструкционного материала.

В единицах СИ поглощенная доза измеряется в джоулях, деленных на килограмм (Дж*кг⁻¹), и имеет специальное название - **грей** (Гр).

Рад - внесистемная единица поглощенной дозы. Соответствует энергии излучения 100 эрг, поглощенной веществом массой 1 грамм (сотая часть «Грэя»).

$$1 \text{ рад} = 100 \text{ эрг/г} = 0,01 \text{ Дж/кг} = 0,01 \text{ Гр} = 2,388 \cdot 10^{-6} \text{ кал/г}$$

При экспозиционной дозе в 1 рентген поглощённая доза в воздухе будет 0,85 рад (85 эрг/г).

Грэй (Гр.) - единица поглощённой дозы в системе единиц СИ. Соответствует энергии излучения в 1 Дж, поглощённой 1 кг вещества.

$$1 \text{ Гр.} = 1 \text{ Дж/кг} = 104 \text{ эрг/г} = 100 \text{ рад.}$$

Дозу излучения D , поглощенную веществом за время t действия потока корпускулярного ионизирующего излучения, называют мощностью поглощённой доз, D^* :

$$D^* = \frac{dD}{dt}.$$

Мощность поглощённой дозы D^* измеряют в ваттах на килограмм (Вт/кг). В случае использования внесистемных единиц мощность поглощенной дозы измеряется в рад/с или в рад/час.

Замечание. Термины «доза», «экспозиционная доза», «поглощенная доза» не так однозначны, как это может показаться на первый взгляд. Вокруг них велась (и ведется) бурная дискуссия. Например, термин «доза» может пониматься как: 1) некоторое количество чего-либо, предназначенное для передачи или переданное кому-либо или чему-либо; 2) некоторое количество чего-либо независимо от того, предназначено или нет это количество кому-либо или чему-либо. В системе терминов, рекомендованных законодательством России, принято первое из указанных двух значений «дозы». Применительно к ионизирующему излучению «количество чего-либо» означает энергию излучения. Исходя из такого энергетического понимания «дозы», понятие «доза излучения» определяется как энергия излучения, предназначенная для передачи или переданная веществу и рассчитанная на единицу массы этого вещества. В этом определении «дозы излучения» слово «переданная» еще не означает, что энергия излучения полностью осталась в веществе, т. е. воспринята и поглощена веществом. Часть переданной энергии после различных преобразований может выйти из рассматриваемого объема вещества. В отличие от этого «поглощенная энергия излучения» - это та энергия, которая фактически остается в веществе и, в конечном итоге, определяет радиационный эффект облучения. Через поглощенную энергию излучения определена «поглощенная доза излучения» («поглощенная доза»). Здесь важно помнить о существенном различии между понятием об энергии излучения, переданной веществу, и понятием о поглощенной энергии излучения.

Значительные трудности возникли при рассмотрении понятия «экспозиционная доза квантового излучения» («экспозиционная доза»). Дело в том, что «экспозиционная доза» отличается от «поглощенной дозы» только тем, что «экспозиционная доза» определяется в условиях электронного равновесия в образцовом веществе. Для квантового излучения образцовым веществом является воздух, и определение экспозиционной дозы производится по измеряемому ионизационному эффекту. При наличии электронного равновесия поглощенная доза квантового излучения в воздухе и экспозиционная доза квантового излучения, выраженные в одних и тех же энергетических единицах, равны между собой.

2.1.4 Керма и сема

Взаимодействие излучения с веществом состоит из двух стадий: преобразование энергии и вклад энергии. Этим стадиями соответствуют две группы дозиметрических величин.

Термин преобразование энергии относят к передаче энергии от ионизирующих частиц к вторичным ионизирующим частицам. Термин **керма** относят к кинетической энергии заряженных частиц, высвобожденных незаряженными частицами. Энергия, затрачиваемая на энергию связи, обычно мала и определением не учитывается. В дополнение к керме вводится величина называемая **сема**, которая определяет потерю энергии заряженными частицами в столкновениях с атомными электронами. В потерю энергии входит и потеря на преодоление связи электронов. Сема отличается от кермы помимо всего тем, что учитывает потерю энергии в столкновениях с атомными электронами входящих (в рассматриваемую массу вещества) заряженных частиц, в то время как керма учитывает переданную энергию, уносимую выходящими заряженными частицами из рассматриваемой массы.

Количество кинетической энергии, переданное заряженным частицам, которые образовались в единице массы облучаемой среды под действием ионизирующего излучения, называется **кермой**.

Керма: $K = dE_k/dm$ - мера поглощенной дозы косвенно ионизирующих излучений (название KERMA - аббревиатура английской фразы KINETIC ENERGY RELEASED PER UNIT MASS - выделение кинетической энергии на единицу массы). Керма (K) представляет собой сумму первоначальных кинетических энергий dE_k всех заряженных частиц, появившихся в элементарном объеме вещества в результате воздействия на него косвенно ионизирующих излучений, отнесенную к массе вещества в этом объеме dm . Единицей кермы в системе СИ является джоуль на килограмм (дж/кг или Грей).

Отметим, что dE_k включает не только кинетическую энергию частиц в результате столкновений, но также энергию, которую заряженные частицы теряют в виде тормозного излучения, а dm должно быть настолько мало, чтобы оно заметно не влияло на радиационное поле. В расчетах кермы, основанных на известных значениях флюенса частиц, можно говорить, например, о воздушной керме в точке, находящейся внутри водного фантома.

Таким образом, керма - суммарная начальная кинетическая энергия заряженных частиц, образованных в единице массы облучаемой среды под действием косвенно ионизирующего излучения. Применительно к гамма-излучению в условиях электронного равновесия (равновесие в среде между

входящими в dm заряженными частицами и выходящими из него) керма совпадает с дозой излучения, если можно пренебречь потерей энергии заряженных частиц (электронов и позитронов) на тормозное излучение. При этих условиях керма является энергетическим эквивалентом экспозиционной дозы. внесистемная единица кермы – рад. В системе СИ единицей кермы является Грей (Гр).

Часто используют понятие керма для единичного флюенса (K_p). Она соответствует керме для флюенса частиц, при котором в объем облучаемого вещества с площадью поперечного сечения 1 м^2 попадает одна частица. Единица измерения K (СИ) = Гр м^2 / частица.

Для γ - излучения керма выражает отношение суммарной кинетической энергии электронов и позитронов, образовавшихся под действием γ - квантов в некотором объеме вещества, к массе вещества в этом объеме, т.е.

$$K = \frac{\Delta E_\gamma}{\Delta m} = \Phi E_\gamma \frac{\mu}{\rho} \frac{\text{эрг}}{\text{г}}$$

где Φ - поток энергии γ - квантов, $\text{эрг}/\text{см}^2$; $\mu'_e = \mu/\rho$ - массовый коэффициент передачи энергии, $\text{см}^2/\text{г}$. Следовательно, под кермой можно понимать величину, которая характеризует первую ступень поглощения γ - квантов в веществе.

В случае спектра незаряженных частиц Φ_E , керма вычисляется следующим образом:

$$K = \int \Phi_E E \frac{\mu}{\rho} dE$$

Мощность кермы, K , есть отношение dK к dt , где dK - приращение кермы за время dt :

$$K^* = \frac{dK}{dt}$$

Единица: Дж $\text{кг}^{-1} \text{ с}^{-1}$ (Гр с^{-1}).

Сема - отношение dE_c к dm , где dE_c — потери энергии заряженных частиц, за исключением вторичных электронов, в столкновении с электронами в веществе массой dm :

$$C = dE_c / dm.$$

Единица: Дж кг^{-1} (Гр).

Наименование сема есть аббревиатура converted energy per unit mass.

Сема может быть определена с помощью энергетического распределения флюенса заряженных частиц, Φ_E . В это распределение не должны включаться вторичные электроны.

$$C = \int \Phi_E \frac{S_{el}}{\rho} dE = \int \Phi_E \frac{L_\infty}{\rho} dE,$$

где S_{el} - линейная электронная тормозная способность, L_∞ - неограниченная линейная передача энергии.

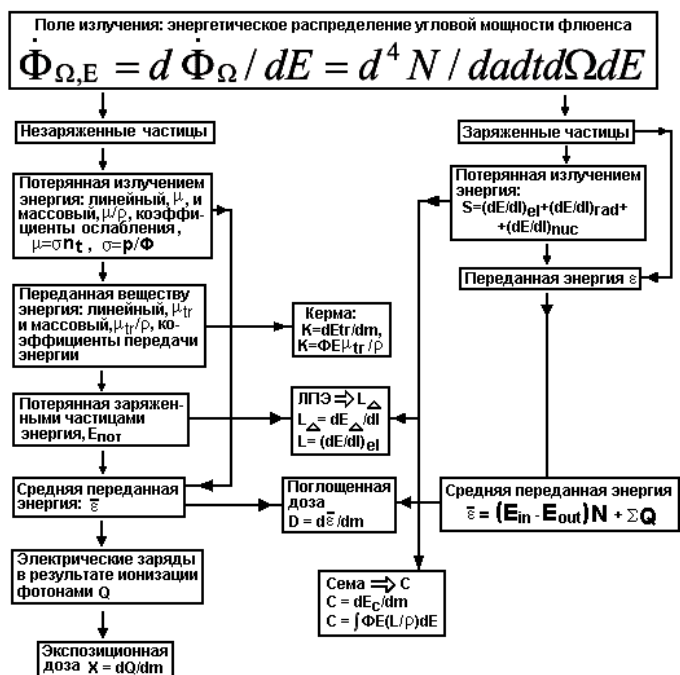
Величина сема может быть использована как приближенная величина поглощенной дозы заряженных частиц. Такое имеет место в условиях равновесия вторичных электронов и пренебрежения радиационными потерями и упругими ядерными взаимодействиями.

Постоянная мощности воздушной кермы радионуклида (керма-постоянная) Γ_δ — отношение мощности воздушной кермы K , создаваемой фотонами с энергией больше заданного порогового значения δ от точечного изотропно-излучающего источника данного радионуклида, находящегося в вакууме на расстоянии r от источника, умноженной на квадрат этого расстояния, к активности A источника:

Грэй-метр в квадрате в секунду-беккерель ($\text{Гр м}^2/\text{с Бк}$) равен постоянной мощности воздушной кермы радионуклида, при которой мощность воздушной кермы, создаваемой фотонным излучением с энергией больше δ , точечного изотропно-излучающего источника активностью 1 Бк в вакууме на расстоянии 1 м равна 1 $\text{Гр}/\text{с}$.

Рис.2. Связи между различными дозиметрическими величинами

Керма-эквивалент источника K_e — мощность воздушной кермы фотонного излучения с энергией фотонов больше заданного порогового значения δ точечного изотропно-излучающего источника, находящегося в вакууме, на расстоянии l



от источника, умноженная на квадрат этого расстояния. Грэй-метр в квадрате в секунду ($\text{Грм}^2/\text{с}$) равен керма-эквиваленту источника, при котором точечный изотропно-излучающий источник фотонов с энергией фотонов, большей δ , создает в вакууме на расстоянии 1 м мощность воздушной кермы 1 $\text{Гр}/\text{с}$.

Пользуясь понятием кермы мы можем пересмотреть ныне отвергнутое, но приятное многим понятие экспозиционной дозы. Напомним, что экспозиционная доза, X равна отношению dQ к dm , где dQ — абсолютное значение полного заряда ионов одного знака, образованных в воздухе при условии, что все электроны и позитроны, образованные в объеме воздуха с массой dm , полностью тормозятся в воздухе:

$$X = dQ / dm.$$

Ионизация, производимая электронами Оже, включается в dQ . Ионизация, производимая фотонами тормозного излучения и в результате флюоресценции, не включается в dQ . За исключением этого отличия, существенного только при больших энергиях, экспозиционная доза является ионизационным эквивалентом воздушной кермы. Экспозиционная доза может быть выражена через энергетическое распределение флюенса фотонов Φ_E и массовый коэффициент передачи энергии, μ_e/ρ , для воздуха:

$$X = \frac{e}{W} \int \Phi_E E \frac{\mu_{tr}}{\rho} (1 - g) dE, \quad (1.39)$$

где e -элементарный заряд, g - часть энергии высвобожденных заряженных частиц, которое расходуется на тормозное излучение в веществе, $W = E/N$ - средняя энергия ионообразования, N - среднее число пар ионов, образованных, когда начальная кинетическая энергия E заряженных частиц полностью расходуется в газе (единица: Дж (эВ)).

Для фотонов с энергией около 1 МэВ или ниже, когда g достаточно мало, формула упрощается:

$$X = \frac{e}{W} K (1 - \bar{g}), \quad (1.40)$$

где K — воздушная керма первичных фотонов, а \bar{g} есть величина g , усредненная по распределению воздушной кермы в зависимости от энергии электронов.

Отметим, что в условиях относительного энергетического равновесия тканевая керма гамма-излучения кобальта-60 всего приблизительно на 0,5 % меньше поглощенной дозы.

На **Рис.2** представлена схема формирования базисных величин дозиметрии.