**Единицы измерения в радиационной физике**

С. Панкратов

специальный корреспондент журнала «Наука и жизнь»

Для оценки радиационной опасности, которой подвергается человек вблизи источников ионизирующих излучений, существует большой набор дозиметрических приборов. Каждый из них служит для измерения вполне определенной физической величины, а измерить какую-либо величину – это значит установить, сколько раз в ней содержится некоторая элементарная порция, называемая единицей физической величины. Выбор такой единицы, вообще говоря, произволен, и он закрепляется соответствующим международным соглашением. Какие же единицы выбраны для измерения свойств ионизирующих излучений?

Основная физическая величина, которая характеризует радиоактивный источник, это число происходящих в нем распадов в единицу времени. Такая величина была названа активностью. Активность того или иного вещества, например, радиоактивного изотопа, определяется количеством атомов, распадающихся в единицу времени (скажем, за одну секунду), и, следовательно, число испускаемых веществом радиоактивных частиц прямо пропорционально его активности.

В качестве единицы активности и Международной системе единиц СИ выбран беккерель (Бк, Bq). Активность в 1 Бк соответствует одному распаду в секунду. Однако в практической дозиметрии и радиационной физике чаще используется другая единица – кюри (обозначается Ки, Ci). Кюри в 37 миллиардов раз больше одного беккереля (1 Ки = 3,7 1010 Бк), то есть соответствует 37 миллиардам радиоактивных распадов в секунду. С чем связан такой, казалось бы, странный и произвольный выбор единицы? Дело в том, что именно такое число распадов происходит в одном грамме радия-226 – исторически первого вещества, в котором были изучены законы радиоактивного распада. Поскольку активность одного грамма чистого радия близка к 1 Ки, то ее часто выражают в граммах. В этом (и только в этом) случае единица массы вещества обладает единичной активностью.

Благодаря распаду количество радиоактивных атомов в первоначальной массе вещества уменьшается с течением времени. Соответственно снижается, и активность. Это уменьшение активности подчиняется экспоненциальному закону:

Ct = C0 exp (– [0,693/T]t)

который называется законом радиоактивного распада. Здесь Ct – активность вещества по прошествии времени t, С0 – активность в начальный момент. Как видно из формулы, описывающей распад, величина T служит важнейшей характеристикой радиоактивности – она показывает то время, по истечении которого активность вещества (или число радиоактивных атомов) уменьшается вдвое. Это время T называется периодом полураспада.

У разных радиоактивных веществ период полураспада меняется в очень широких пределах: от миллионных долей секунды до нескольких миллиардов лет. Например, период полураспада урана-238 равен 4,5 миллиарда лет, радиоактивного изотопа йода-131 – около 8 дней, цезия-137 – тридцать лет. При авариях с ядерными установками последние два изотопа способны доставить наибольшие неприятности. Оба представляют собой летучие продукты деления, поэтому они легко могут попасть в атмосферу и образовать аэрозоли. Однако если йода-131 через несколько месяцев останется ничтожно мало – он практически весь распадется, – то цезий-137 вместе с другими выпавшими долгоживущими изотопами еще сохраняет способность заражать местность. Во что же превращается радиоактивный йод в результате распада? В инертный газ ксенон-131, который вполне устойчив. За 100 дней содержание йода-131 и соответственно его активность уменьшатся в 212 = 4096 раз.

Под действием излучений, испускаемых радиоактивными изотопами, в облучаемом объекте накапливаются различные нарушения. Принято считать (хотя это сегодня все чаще подвергается сомнению), что изменения, происходящие в облучаемом веществе, полностью определяются поглощенной энергией радиоактивного излучения. Это положение, строго говоря, не доказано, и его можно назвать энергетическим постулатом. Во всяком случае, поглощенная энергия излучения служит самой удобной физической величиной, характеризующей действие радиации на организмы.

И вот на VII Международном конгрессе радиологов, который состоялся в 1953 году в Копенгагене, в период наиболее острого интереса к атомной науке и технике, энергию любого вида излучения, поглощенную в одном грамме вещества, было рекомендовано называть поглощенной дозой. В качестве единицы поглощенной дозы был выбран рад (rad, по первым буквам английского словосочетания «radiation absorbed dose», – поглощенная доза излучения). Один рад соответствует такой поглощенной дозе, при которой количество энергии, которая выделяется в одном грамме любого вещества, равно 100 эрг независимо от вида и энергии ионизирующего излучения. Таким образом,

1 рад = 100 эрг/г = 10–2 Дж/кг = 6,25·107 МэВ/г

для любого материала.

Поглощенная доза, образуемая в веществе в единицу времени, называется мощностью поглощенной дозы и измеряется в единицах рад/с, рад/мин, рад/ч и т.д.

Рад, так же как и кюри (1 Ки = 3,7 гигабеккерелей, ГБк), – это так называемые внесистемные единицы, и с точки зрения ортодоксальных приверженцев системы СИ на их использование должен быть наложен суровый запрет. Однако жизненная практика оказалась сильнее формальных предписаний, и «незаконная» единица поглощенной дозы – рад – используется гораздо чаще, чем соответствующая единица системы СИ – грэй (обозначается Гр, Gy). (Например, в широко используемом юбилейном справочнике, посвященном 50-летню Американского института физики, которое отмечалось в 1981 году, единица «грэй» вообще не упоминается.) Соотношение между единицами поглощенной дозы таково:

1 Гр = 1 Дж/кг = 100 рад.

Мощность поглощенной дозы измеряется в системе СИ в Гр/с, Гр/ч и т.д.

Стоит обратить внимание на то обстоятельство, что рад (или грэй) – единица чисто физической величины. По существу, это энергетическая единица, никак не учитывающая те биологические эффекты, которые производит проникающая радиация при взаимодействии с веществом. Однако то, что действительно интересует специалистов по дозиметрии и радиационной физике, – это изменения в организме, возникающие при облучении человека. Оказалось, что тяжесть всяческих нарушений сильно различается в зависимости от типа излучения.

Другими словами, знания поглощенной дозы совершенно недостаточно для оценки радиационной опасности. Более того, измерить поглощенную дозу непосредственно в живой ткани чрезвычайно трудно, и даже если бы удалось проделать такие измерения, их ценность оказалась бы невелика. Действительно, отклик живого организма па облучение определяется не столько поглощенной дозой, сколько микроскопическим – то есть на уровне отдельных молекул – распределением энергии по чувствительным структурам живых клеток. Поэтому возникла необходимость ввести такую измеримую величину, которая учитывала бы не только выделение энергии, но и биологические последствия облучения.

Из соображений простоты и удобства биологические эффекты, вызванные любыми ионизирующими агентами, принято сравнивать с воздействием па живой организм рентгеновского или гамма-излучения. Удобство здесь состоит в том, что для рентгеновского излучения заданные дозы и их мощности сравнительно просто получаются (например, с помощью калиброванных рентгеновских источников), хорошо воспроизводятся и надежно измеряются. Все эти процедуры становятся заметно сложнее для других типов излучений. Чтобы можно было сравнивать воздействие последних с биологическими эффектами от рентгеновского и гамма-излучения, вводится так называемая эквивалентная доза, которая определяется как произведение поглощенной дозы на некоторый коэффициент, зависящий от вида излучения.

Этот коэффициент, называемый «фактором качества» Q, приблизительно равен единице для гамма-лучей и протонов высокой энергии; для тепловых нейтронов Q ≈ 3, а для быстрых нейтронов значение Q достигает десяти. При облучении α-частицами и тяжелыми ионами Q ≈ 20, а это значит, что даже сравнительно малые поглощенные дозы могут вызвать серьезные биологические последствия. Эквивалентная доза измеряется в бэрах (бэр – биологический эквивалент рентгена). Иногда употребляется также наименование «рем» (от английской аббревиатуры rem – roentgen equivalent for man, эквивалент рентгена для человека). Коэффициент качества излучения Q устанавливается на основе радиобиологических экспериментов и приводится в специальных таблицах. Для рентгеновского излучения (Q = 1) один рад поглощенной дозы соответствует одному бэру.

Рис. 1. Радиоактивный распад

При радиоактивном распаде число нестабильных ядер уменьшается с течением времени очень быстро – экспоненциально. Продолжительность жизни распадающегося вещества характеризуют временем, по истечении которого количество активных атомов в веществе в среднем уменьшается вдвое. Этот промежуток времени Т называется периодом полураспада. Если, например, в материале, испытывающем радиоактивное превращение, первоначально было N0 ядер, то через время Т их станет 1/2 N0, через 2Т – 1/4 N0, через 3Т – уже 1/8 N0, и так далее. Число радиоактивных ядер будет «выгорать» в геометрической прогрессии с показателем, равным двойке. Периоды полураспада для различных радиоактивных веществ изменяются от миллиардов лет до миллионных долей секунды и хорошо поддаются вычислению с помощью квантовой механики.

В принципе особой необходимости в специальной единице эквивалентной дозы нет, она может измеряться в тех же единицах, что и поглощенная доза, поскольку коэффициент Q – безразмерный. Тем не менее, учитывая важность проблемы биологического действия ионизирующих излучений, в радиационной физике и при расчете защиты от ядерных излучений стали использовать единицу эквивалентной дозы. В системе СИ эта единица установлена совсем недавно и называется зиверт (обозначается Зв, Sv). Эквивалентная доза в 4...5 зиверт (примерно 400...500 бэр), полученная за короткое время, вызывает тяжелое лучевое поражение и может привести к смертельному исходу. Предельно допустимая доза (ПДД) для персонала, работающего с радиоактивными веществами, установлена в 5 бэр/год (или примерно 100 мбэр/неделя).

При этом имеется в виду облучение всего тела, как говорят, тотальное облучение. Для населения установлен предел дозы за год в десять раз меньший – 500 мбэр/год.

Как же узнать, какую дозу радиации получает человек, находящийся вблизи радиоактивного источника? В том-то и состоит предательская особенность ядерных излучений, что с точки зрения человека, попадающего в опасную зону, они никак себя не проявляют. Человеческие органы чувств, сформировавшиеся как инструмент выживания, совершенно не приспособлены к восприятию проникающей радиации, и в этом ее существенное отличие, трагическая выделенность по сравнению с другими природными воздействиями. Ведь даже небольшие с точки зрения физики изменения светового потока, температуры воздуха или механического давления вызывают довольно бурную реакцию человеческого организма.

По отношению к этим изменениям в окружающей среде природа с самого начала была поставлена в жесткие условия – жизнь обрывалась, если природные воздействия выходили за допустимые пределы. Острота восприятия помогает человеку ориентироваться в обстановке и принимать необходимые меры предосторожности. Скажем, зрение, которое на протяжении многих поколений служило почти единственным способом обнаружить врага, должно было действовать и в сумерках, и даже при свете звезд, когда световая энергия поступает лишь редкими порциями. Собрать и использовать каждый фотон, чтобы лучше увидеть надвигающуюся опасность, было делом жизни или смерти.

Рис. 2. Основные виды ядерных превращений, приводящие к испусканию радиоактивных излучений

При альфа-распаде из ядра вылетает сравнительно тяжелая альфа-частица, которая представляет собой ядро атома гелия. Энергия вылетающей альфа-частицы по атомным масштабам довольно высока – примерно 5...10 МэВ, то есть почти в миллион раз больше энергии электрона в атоме. Поэтому альфа-частицы, проходя через вещество, могут производить в нем обильные нарушения вследствие ионизации и возбуждения атомов. При бета-распаде нейтрон внутри ядра самопроизвольно превращается в протон, и при этом испускается электрон (или, наоборот, протон переходит в нейтрон с испусканием позитрона). Кроме электрона и позитрона, при бета-распаде возникают также нейтрино и антинейтрино, однако их воздействие на вещество ничтожно. Образовавшееся в результате радиоактивного распада ядро, как правило, сильно возбуждено, и оно освобождается от избыточной энергии, испуская жесткие гамма-кванты. Это гамма-излучение обладает большой проникающей способностью и может причинить немалый вред живому организму.

Если зрение или обоняние – вспомним нюх собаки! – по своей обнаружительной способности близки к физическим пределам (которые невозможно преодолеть никакими техническими ухищрениями), то при восприятии радиации человек находится почти на пределе «тупости». Поэтому без специальных приборов мы не можем судить ни об уровне радиации, ни даже об ее наличии или отсутствии, а следовательно, и о грозящей нам опасности. В таких приборах используются те же самые радиационные эффекты, которые причиняют нам вред, в частности, ионизация частиц среды. Ионизационный метод регистрации излучения стал исторически первым – он начал широко использоваться в 20-х годах. В связи с этим были предприняты попытки установить такие единицы измерения радиации, которые позволили бы связать ионизационный эффект с биологическим, а также с поглощением энергии излучения. В 1928 году в качестве такой единицы был принят рентген (обозначается Р, R).

Введение новой единицы вызвало много споров. Прежде всего возник вопрос: рентген – единица чего? Какой наблюдаемой физической величине она соответствует? Ответ на этот вопрос давался по-разному, однозначного толкования рентгена вначале не было. Какое-то время рентген рассматривали как количество излучения, характеризующее поглощенную из потока радиации энергию в единице массы воздуха. Такая интерпретация рентгена, вообще говоря, не соответствовала его определению как меры ионизационного эффекта. Ведь поглощенная энергия и число образовавшихся пар ионов – разные физические величины, поэтому использовать рентген для оценки поглощенной энергии оказалось неудобным.

Однако в соответствии с «энергетическим постулатом», специалистов по физике защиты от излучений и радиобиологов интересовала в первую очередь поглощенная в живой ткани энергия. Трудности, возникавшие при ее подсчете через единицу «рентген», требовали разных уточнений и оговорок. Применение рентгена для оценки поглощенной энергии было неудобно еще и потому, что эта единица была введена и соответственно метрологически поддерживалась только для рентгеновского и гамма-излучений (да и то, строго говоря, с определенным спектром). Чтобы сравнивать эффекты, производимые в веществе корпускулярным излучением, например, электронами или нейтронами, приходилось вводить поправочные коэффициенты для каждого типа среды – воздуха, мышечной ткани, кости и т.д. Такие коэффициенты назывались эквивалентами рентгена. Одним словом, прямое использование рентгена, понимаемого как единица поглощенной энергии, создавало в радиационной физике много неудобств.

Рис. 3. Слой «половинного ослабления» для жесткого гамма-излучения

Так в физике защиты от излучений называют толщину того или иного материала, после прохождения которого интенсивность гамма-излучения уменьшается наполовину. Полного поглощения гамма-излучения (с энергией ниже 10 МэВ) в веществе не происходит, однако интенсивность потока гамма-квантов ослабляется по экспоненциальному закону, в точности такому же, как закон радиоактивного распада. При этом роль периода полураспада играет слой половинного ослабления. Для жесткого гамма-излучения с энергией квантов 1 МэВ толщина этого слоя составляет 5 см бетона, 3 см стали или 1 см свинца. Если необходимо уменьшить интенсивность опасного гамма-излучения в миллион раз, то потребуется свинцовый экран толщиной 20 см либо бетонная стенка метровой толщины (220 примерно равно 106). 10 см свинца ослабляют жесткое излучение в тысячу раз. Для сравнения: альфа-излучение с энергией 1 МэВ практически полностью поглощается алюминиевой фольгой толщиной 5 микрон, а для поглощения бета-радиации с такой же энергией достаточно 1,6 мм алюминия.

В современной дозиметрии рентген рассматривается не как единица, характеризующая поглощенную энергию и тем самым напрямую связанная с биологическим эффектом, а только как единица, определяющая ионизирующую способность рентгеновского и гамма-излучений в 1 см3 воздуха. Физическая величина, которой соответствует единица «рентген», называется экспозиционной дозой рентгеновского и гамма-излучений. Экспозиционная доза определяется по ионизации воздуха – как отношение суммарного заряда всех ионов одного знака, созданных в воздушном объеме ионизирующим агентом, к массе воздуха в этом объеме. В системе СИ единицей экспозиционной дозы служит Кл/кг (кулон, деленный на килограмм). Экспозиционная доза в 1 Кл/кг означает, что суммарный заряд всех ионов одного знака (например, положительных), которые возникли под действием излучения в 1 кг воздуха, равен одному кулону.

С точки зрения убежденных приверженцев системы СИ, рентген – устаревшая и как бы «незаконная», внесистемная единица. Один рентген – это такая экспозиционная доза рентгеновского или гамма-излучения, при которой в 1 см3 атмосферного воздуха при температуре 0°C и давлении 760 мм ртутного столба возникают ионы, несущие положительный или отрицательный заряд в одну электростатическую единицу (1 CGSE). Поскольку заряд электрона равен 4,8 10–10 электростатических единиц, то число образовавшихся пар ионов, как нетрудно подсчитать, будет равно для экспозиционной дозы в 1 рентген 208 миллиардам на 0,001293 г воздуха (такова масса одного кубического сантиметра). На образование одной пары ионов в воздухе в среднем затрачивается энергия, примерно равная 34 электрон-вольтам (эВ), следовательно, при экспозиционной дозе в 1 рентген в 1 см3 воздуха поглощается около 0,114 эрг или, в пересчете на один грамм воздуха, 88 эрг/г. Таким образом, 88 эрг/г – это энергетический эквивалент рентгена для воздуха.

Хотя однозначную связь между поглощенной дозой радиации и экспозиционной дозой, измеренной в рентгенах, можно установить лишь приближенно (с точностью до флуктуации), практическое удобство единицы «рентген» бесспорно, так как ионизацию в воздухе можно легко измерить с помощью ионизационной камеры. По результатам таких измерений мы можем судить о поглощенной энергии в биологической ткани.