

## Методика калибровки дозиметра

Контрольный источник фотонного ионизирующего излучения (ИИИ) представляет собой алюминиевое кольцо диаметром 25 мм и высотой 3 мм. Активная часть в источнике термически загерметизирована между двумя полиимидными пленками, диаметр активной части не более 3 мм.



### Теоретическая часть

Физический смысл понятия активность таков: это ожидаемое число элементарных радиоактивных распадов в единицу времени, поэтому для ясности и удобства лучше выражать активность в беккерелях (Бк). 1 Бк – это один радиоактивный распад в секунду.

Энергия испускаемых гамма-квантов однозначно определяется видом радионуклида.

Например,  $^{137}\text{Cs}$  (цезий-137) бета- и гамма-активен. Испускаемые им гамма-кванты имеют энергию 661,657 кэВ (килоэлектронвольт).

Итак, рассмотрим контрольный ИИИ на основе радионуклида  $^{137}\text{Cs}$ . Производитель указывает в паспорте активность ИИИ на момент изготовления. Допустим, активность рассматриваемого ИИИ составляет 30 кБк. Это означает, что каждую секунду в ИИИ происходит 30 тысяч актов радиоактивного распада, сопровождающихся выходом  $\beta^-$  частиц (электронов) и  $\gamma$ -квантов (в дальнейшем я буду называть их обобщенно частицами распада) которые покидают источник по случайным траекториям, поэтому если мы мысленно очертим сферу радиусом  $R$ , центр которой совпадает с центром источника, то в среднем на каждую единицу поверхности этой сферы будет приходиться число частиц распада, определяемое из выражения

$\frac{A}{S_{\text{сферы}}}$ , где  $A$  – активность ИИИ,  $S_{\text{сферы}}$  – площадь сферы. Если выразить площадь через радиус, получим

$$\frac{A}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \quad [1]$$

Можно считать, что частицы распада распределяются по поверхности нашей сферы случайным образом, но в статистике распределение довольно-таки равномерно (вспомните моделирование по методу Монте-Карло, тут аналогичный принцип). Теперь представьте, что мы подносим к ИИИ наш дозиметр на расстоянии  $R$ . При этом воображаемая сфера радиусом  $R$  является секущей плоскостью (начиная с определенных значений радиуса  $R$ , криволиней-

ностью "секущей сферы" можно пренебречь) для чувствительного элемента дозиметра (в нашем случае счетчика Гейгера-Мюллера, СГМ), как показано на рисунке 1. Таким образом, на нашей сфере радиусом  $R$  образуется проекция СГМ, представляющая собой прямоугольник со сторонами  $d$  на  $l$ , где  $d$  – диаметр СГМ, а  $l$  – его длина.

Теперь мы можем узнать число частиц распада, попадающих на чувствительный элемент:

$$a = \frac{A \cdot d \cdot l}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \quad [2]$$

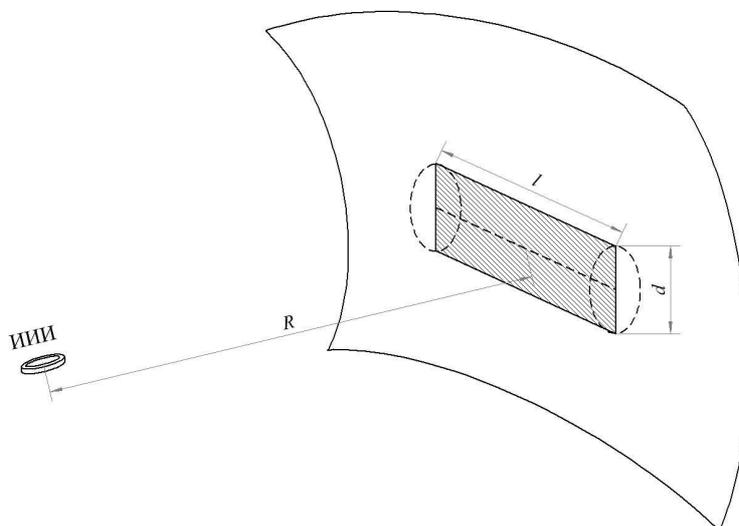


Рисунок 1.

Примечание. Из этой формулы [2] становится ясно, откуда взялась обратная квадратичная зависимость мощности получаемой дозы от расстояния до источника – поскольку квадрат расстояния стоит в знаменателе дроби, то понятно, почему при увеличении расстояния до ИИИ в два раза мощность экспозиционной дозы, создаваемой этим источником, уменьшается в четыре раза.

Необходимо помнить, что активность любого радионуклида с течением времени уменьшается и это нужно обязательно учесть в расчетах.

Допустим, наш ИИИ  $^{137}\text{Cs}$  имел активность 30 кБк на момент его изготовления 01.01 2000.

Как изменилась и чему равна его активность 01.09.2014?

Формула для расчета текущей активности нуклида в общем случае выглядит так:

$$A = e^{\left(\frac{-0,693 \cdot T}{T_{1/2}}\right)} \cdot A' \quad [3], \text{ где}$$

$A$  – активность нуклида на текущий момент;

$A'$  – активность нуклида на момент изготовления ИИИ либо его поверки;

$T$  – количество суток, прошедшее с момента изготовления или поверки ИИИ до текущего момента;

$T_{1/2}$  – период полураспада, выраженный в сутках.

Для перехода от теоретического вида формулы [3] к практической формуле для конкретного нуклида (в нашем случае  $^{137}\text{Cs}$ ) необходимо разобраться в структуре распада нуклида.

Распад  $^{137}\text{Cs}$  выглядит следующим образом: нуклид  $^{137}\text{Cs}$  претерпевает  $\beta^-$  распад, в результате которого образуется стабильный изотоп  $^{137}\text{Ba}$  и  $\beta^-$  частица. Тем не менее, в 94,4 процентах распадов образуется ядерный изомер  $^{137}\text{Ba}^m$ , который переходит в стабильное состояние с выделением  $\gamma$ -кванта с энергией 661,657 кэВ (в 85 процентах от общего количества распадов) либо электрона с такой же энергией, уменьшенной на величину энергии связи.

Полная энергия одного акта распада составляет примерно 1174 МэВ, при этом

в 0,056 случаях выделяется  $\beta^-$  частица с энергией 1,174 МэВ;

в 0,944 случаях выделяется  $\beta^-$  частица с энергией 0,512 МэВ;

в 0,094 случаях выделяется  $\beta^-$  частица с энергией 661,7 кэВ (за вычетом энергии связи)

в 0,85 случаях выделяется  $\gamma$ -квант с энергией 661,7 кэВ

Таким образом, полный выход частиц распада можно рассчитать следующим образом:

$$N = N_{\beta} + N_{\gamma}$$

$$N_{\beta} = 1,094 \cdot A$$

$$N_{\gamma} = 0,85 \cdot A$$

В том, что количество  $\beta^-$  частиц превышает исходную активность, нет никакого парадокса. Важна энергия распада, а она остается неизменной.

Полный выход частиц нужно знать, если калибруется дозиметр, чувствительный и в  $\beta^-$ , и в  $\gamma$ -диапазоне.

Если же требуется знать только  $\gamma$ -активность ИИИ, можно модернизировать формулу [3] следующим образом:

$$A_{\gamma} = e^{\left(\frac{-0,693 \cdot T}{T_{1/2}}\right)} \cdot A' \cdot 0,85 \quad [5]$$

Подставив в формулу [5] значения периода полураспада  $^{137}\text{Cs}$  (11018,5 суток) и количество суток, прошедшее с момента 01.01.2000 до 01.09.2014 (5356,5 суток), получим значение 18,207 кБк при исходной активности 30 кБк.

Таким образом, в формулу [2] необходимо подставлять либо значение активности  $A_\gamma$ , рассчитанное именно на тот день, в который проводится замер, либо величину полного выхода частиц  $N$ , для расчета которой также берется значение  $A$ , рассчитанное на день замера..

Теперь от теоретических выкладок перейдем к практике. Если калибруется дозиметр, в качестве чувствительного элемента в котором применен СГМ, то (поскольку СГМ чувствителен как к  $\beta$ -частицам, так и к  $\gamma$ -квантам) в случае, если калибруемый дозиметр должен быть чувствителен и в  $\beta$ -диапазоне тоже (СГМ не экранируется от  $\beta$ -частиц), необходимо производить калибровку отдельно в  $\beta$ - и  $\gamma$ -диапазонах. Если же калибруемый дозиметр чувствителен только в  $\gamma$ -диапазоне, то, естественно, калибровка проводится только в нем.

Для выполнения отдельной калибровки её проводят в 4 этапа:

1. Измерение скорости счета (в импульсах в секунду) по фону совместно в  $\beta$ - и  $\gamma$ -диапазонах (ИИИ убран так, чтобы он не оказывал влияния на дозиметр)..
2. Измерение общей скорости по фону + ИИИ ( $\beta$  и  $\gamma$ ).
3. Измерение скорости счета по фону только в  $\gamma$ -диапазоне, для этого СГМ должен быть помещен в алюминиевую трубку с толщиной стенок 1,5 мм (ИИИ убран).
4. Измерение общей скорости счета по фону + ИИИ ( $\gamma$ ).

Результатом всех этих действий должно стать определение теоретического количества  $\beta$ -частиц и(или)  $\gamma$ -квантов, попадающих на чувствительный элемент дозиметра и практически измеренного количества  $\beta$ -частиц и(или)  $\gamma$ -квантов. Если соотношение в обоих случаях 1:1, то введение поправочного коэффициента не требуется. Если же количество частиц, зарегистрированных дозиметром, меньше теоретического значения, то нужно введение поправочного коэффициента.

### Практическая часть

Результаты замеров должны индексироваться как количество импульсов, поступивших от СГМ, за секунду. Рассмотрим калибровку по  $\gamma$ -диапазону. СГМ при этом должен быть экранирован от  $\beta$ -частиц, например, путем помещения СГМ в алюминиевую трубку с толщиной стенок 1-1,5 мм.

1. Зная активность контрольного ИИИ и геометрические размеры СГМ, вычислить теоретическое количество  $\gamma$ -квантов, попадающих на чувствительный элемент дозиметра, пользуясь формулами [5] и [2]. Вычисленные по формуле [2] значения  $a$  (для нескольких расстояний  $R$ ) и есть искомые величины.
2. Убрать ИИИ в свинцовый футляр, вынести футляр с ИИИ из комнаты, где проводятся измерения.
3. Измерить скорость счета по фону, для чего включить дозиметр в режим циклического измерения, записать результаты 15 следующих друг за другом замеров. Скорость счета по фону будет равна среднему арифметическому значению этих замеров.
4. Измерить скорость счета ИИИ+фон, для чего расположить ИИИ на одном из расстояний  $R$ , для которых вычислялись значения  $a$ . Замеры выполнять, аналогично п.3 – результат должен быть равен среднему арифметическому 15 идущих подряд замеров.
5. Выполнить замеры скорости счета ИИИ+фон для остальных расстояний  $R$ .
6. Выполнить вычисление калибровки для точки 1, для чего из скорости скорости счета ИИИ+фон, измеренной в п.4, вычесть скорость счета по фону, измеренную в п.2. Полученная разность и есть практическое значение количества  $\gamma$ -квантов, испущенных ИИИ и попавших на СГМ. У идеального дозиметра данное количество должно быть равно теоретической величине  $a$ , рассчитанной по формуле [2]. На практике измеренное количество  $\gamma$ -квантов будет меньше теоретического, поэтому необходимо вычислить калибровочный коэффициент  $k$  по формуле

$$k = \frac{a_{\text{изм}}}{a_{\text{теор}}}, \text{ где}$$

$a_{\text{изм}}$  – измеренное количество  $\gamma$ –квантов;

$a_{\text{теор}}$  – кол – во  $\gamma$ –квантов, вычисленное по формуле [2]

7. Выполнить вычисление калибровок для остальных точек, используя расчетные и практические данные для остальных расстояний R.
8. Вычислить общее значение калибровочного коэффициента  $K$  как среднее арифметическое вычисленных значений  $k$  во всех точках

На этом собственно калибровка дозиметра окончена. Для вычисления мощности дозы необходимо измеренное кол-во  $\gamma$ -квантов умножить на коэффициент  $K$ , а затем умножить полученную величину на гамма-постоянную нуклида. Поскольку речь идет о дозиметре, который, в отличие от спектрометра, не может определить тип нуклида, обычно берут гамма-постоянную  $^{137}\text{Cs}$ . Естественно, что обязательно согласование размерности единиц измерения используемого в расчетах значения гамма-постоянной с размерностью измеренного кол-ва  $\gamma$ -квантов.

