

Погрешность или неопределенность в дозиметрии

Мартынюк Ю.Н., Нурлыбаев К., НПП «Доза»

РМГ 29-99[1] определяет погрешность результата измерения как «отклонение результата измерения от истинного (действительного) значения измеряемой величины», т.е. предполагает знание действительного значения измеряемой величины – значение величины, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него.

Неопределенность измерения – это параметр, связанный с результатом измерения и характеризующий рассеяние значений, которые могли бы быть приписаны измеряемой величине и понимается как «сомнение, неполное знание значения измеряемой величины после проведения измерений»

Рассмотрим вышеприведенные понятия с нашей точки зрения, т.е. с точки зрения приборостроителей, какие значения погрешностей приборов мы должны приводить в НТД на приборы и какие мы должны давать рекомендации потребителям для определения погрешности результата измерения проведенного нашими приборами.

РМГ 29-99 для погрешности средства измерения вводит понятие «инструментальная погрешность измерения» как «составляющую погрешности измерения, обусловленную погрешностью применяемого средства измерений».

ГОСТ 27451-87[2], основополагающий документ в нашей области деятельности, определяет «Основная погрешность средств измерений, кроме спектрометрических, должна нормироваться пределом допускаемой основной относительной погрешности» и предписывает, например, чтобы средства измерений мощности поглощенной дозы фотонного излучения обеспечивали измерение мощности поглощенной дозы с пределом допускаемой относительной основной погрешности 50%.

Вышеприведенное определение основной относительной погрешности относится не к погрешности дозиметров, а к погрешности результата измерений мощности дозы.

Таким образом в определение основной относительной погрешности дозиметра по ГОСТ 27451-87 входят:

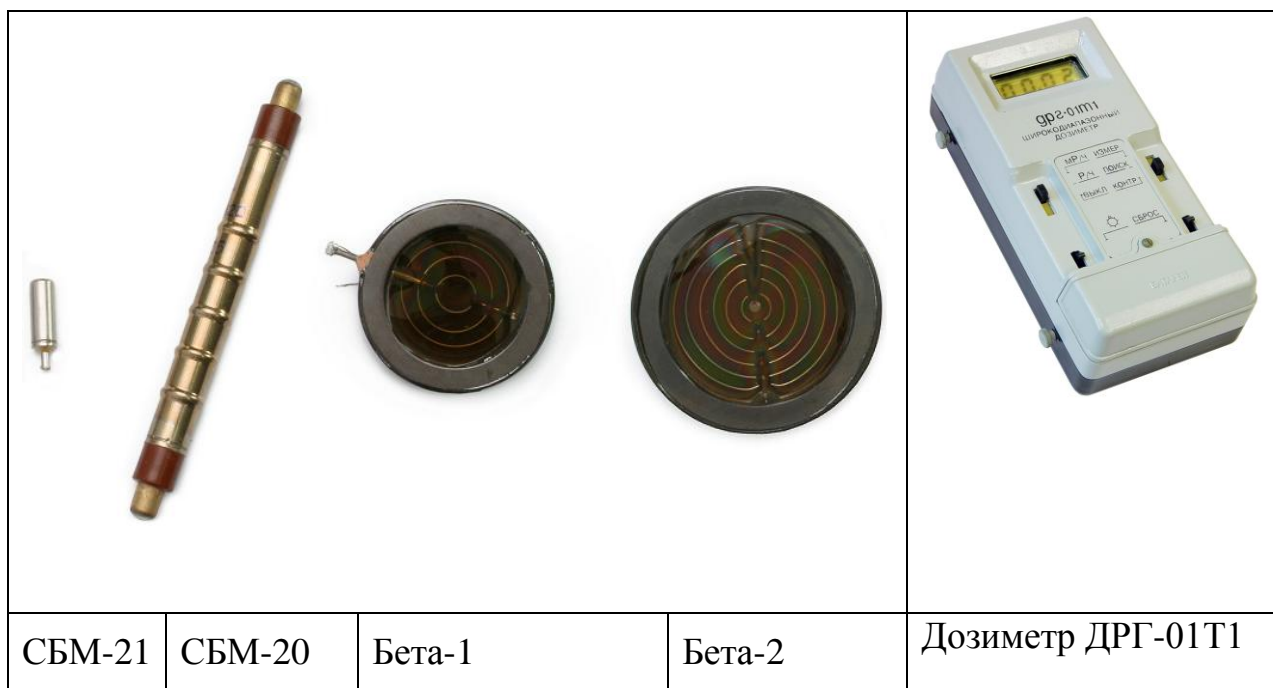
- погрешность калибровки дозиметра;
- и погрешности дозиметра, связанные с:
 - зависимостью чувствительности дозиметра от энергий гамма-излучения;
 - зависимостью чувствительности дозиметра от угла падения гамма-квантов;
 - нелинейностью чувствительности при разных мощностях дозы;
 - статистическими флуктуациями при малых значениях мощностей дозы;
 - изменением чувствительности при разрядке батарей,
- а также погрешности обусловленные внешними условиями измерения:
 - изменением чувствительности от температуры, влажности и давления
 - изменением чувствительности из-за влияния электромагнитных полей
 - изменением чувствительности из-за вибрации и механических ударов.

Производитель не может привести в документах на прибор данные по основной относительной погрешности дозиметра в вышеуказанной трактовке, т.к. не знает условий измерения, например:

- не знает энергию гамма-излучения в реальных условиях измерения;
- не знает как направлен дозиметр к падающим гамма-квантам;
- не знает внешние условия измерения.

Требования ГОСТ 27451-87 к основной относительной погрешности дозиметров невыполнимы.

Приведем практический пример – широко используемый дозиметр ДРГ-01Т:



В приборе используются четыре счетчика СБМ-20 (чувствительный канал) и два счетчика СИ-34Г (грубый канал). Диапазон измерения от 10 мкР/ч до 10 Р/ч в диапазоне энергий 50 кэВ – 3 МэВ. Номер в Государственном реестре средств измерений №11036-04. Заявленная производителем ОАО "Механический завод" (С.-Петербург) и подтвержденная Центром испытаний средств измерений основная относительная погрешность в режиме «Измерение» $\pm[15 + 0,05(y/x-1)]\%$,

где y – предел измерения в единицах соответствующего поддиапазона измерения (мР/ч или Р/ч);

x – измеренное значение мощности экспозиционной дозы в единицах соответствующего поддиапазона измерения (мР/ч или Р/ч).

Прибор имеет два поддиапазона: от 0,010 до 10 мР/ч и 0,010 до 10 Р/ч.

Рассмотрим следующие источники основной относительной погрешности прибора (в трактовке [1]):

- зависимость чувствительности дозиметра от энергий гамма-излучения;
- зависимость чувствительности дозиметра от угла падения гамма-квантов.

Для выравнивания зависимости чувствительности дозиметра от энергий излучения применены корректирующие свинцовые фильтры и

«изменение чувствительности дозиметра в зависимости от энергий излучения в диапазоне энергий 50 кэВ – 3 МэВ при нормальном рабочем положении дозиметра не отличается более чем на $\pm 25\%$ от значения, полученного от источника цезий-137 (662 кэВ)».

Нормальное рабочее положение дозиметра – направление излучения перпендикулярно плоскости расположения детекторов (детекторы расположены в одной плоскости параллельно задней крышке).

Касательно зависимости чувствительности прибора от угла падения излучения написано «Анизотропия чувствительности дозиметра при изменении угла падения излучения от 0° до 180° относительно плоскости расположения детекторов не должна превышать $\pm 80\%$ относительно измеряемого значения при угле 90° (нормальное положение)» и это естественно, т.к. из габаритных размеров СБМ-20 ($\varnothing 11 \times 108$ мм) можно посчитать, что площадь облучения при падении излучения в торец счетчика в 12,5 раз меньше чем при нормальном положении.

Таким образом только из этих двух источников при неблагоприятном стечении обстоятельств мы можем получить $(0,8^2 + 0,25^2)^{1/2} = 0,84$, т.е. 84% погрешности результата измерения.

Рассмотрим составляющую основной относительной погрешности прибора обусловленную статистическими флуктуациями при малых значениях мощностей доз.

В дозиметре используются четыре счетчика СБМ-20 чувствительность каждого из которых составляет $0,02 \text{ имп}\cdot\text{с}^{-1}$ на $\text{мкР}\cdot\text{ч}^{-1}$ (по ^{137}Cs), т.е. общая чувствительность прибора $0,08 \text{ имп}\cdot\text{с}^{-1}$ на $\text{мкР}\cdot\text{ч}^{-1}$. Таким образом за время измерения 30 секунд (в приборе фиксированное время измерения) фонового значения $10 \text{ мкР}/\text{ч}$ мы получим $N = 0,08 \text{ (имп/с)}/(\text{мкР/ч}) \times 10 \text{ мкР/ч} \times 30\text{с} = 24$ импульса. По свойству распределения Пуассона дисперсия равна N , статистическая погрешность равна $2/N^{1/2}$, т.е. составляет 41%, а при мощности дозы $20 \text{ мкР}/\text{ч}$ – 29%.

Теперь рассчитаем основную относительную погрешность по формуле

приведенной в документах на прибор $\pm[15 + 0,05(y/x-1)]\%$. При мощности дозы 10 мкР/ч получим 65%, а при 20 мкР/ч – 40%.

Вывод: Основная относительная погрешность дозиметра ДРГ-01Т1 не соответствует требованию ГОСТ 27451-87.

На практике приведенная изготовителем значение основной относительной погрешности некорректно используется как значение погрешности результата измерения.

Из вышеуказанного ясно, что при измерениях мы должны не только определять погрешность результата измерения, но и вводить поправки на результат измерения в соответствии с условиями измерения (в спектрометрии, насколько мне известно, это делается), поэтому переход к неопределенности измерения необходим.

Что касается основной относительной погрешности дозиметра в стандарте МЭК IEC 60846[3] дается следующее определение относительной собственной погрешности (указано intrinsic error, далее будем трактовать это выражение как основная относительная погрешность, т.к. в отечественных документах этот термин применяется как погрешность средства измерения): «отношение погрешности показания измеренного (ой) (мощности) эквивалента дозы к условно истинному значению (мощности) эквивалента дозы. Может быть выражена в виде процентного отношения: $I=(N_i - N_t) \times 100\% / N_t$ » и предъявлено требование «В стандартных условиях испытаний основная относительная погрешность чувствительности дозиметра для измерения (мощности) эквивалента дозы к эталонному гамма-излучению ^{137}Cs не должно превышать $\pm 20\%$ для всех (мощностей) амбиентных эквивалентов дозы».

Таким образом относительная погрешность дозиметра по МЭК IEC 60846 относится не к погрешности результата измерения, а только погрешности показаний прибора при в стандартных условиях испытаний в поле источника ^{137}Cs при стандартной ориентации дозиметра относительно направления падающего излучения во время калибровки указанной

производителем.

Относительная погрешность дозиметра при данной трактовке обусловлена двумя факторами: **нелинейностью чувствительности и статистической неопределенностью** значений измеряемой величины

Поэтому в действующем стандарте МЭК IEC 60846-1[4] понятие относительной погрешности отсутствует и предъявлены требования к линейности чувствительности и статистическим флуктуациям показаний дозиметра:

- к линейности чувствительности:

от – 15 % до + 22 % в диапазоне трех порядков величины, включая значение 100 мкЗв/ч.

- к статистическим флуктуациям показаний:

15 % при $H=H_0$;

$(16 - H / H_0)$ % при $H_0 < H < 11 H_0$;

5 % при $H \geq 11 H_0$,

где H_0 – нижний предел диапазона измерений мощности эквивалента дозы.

Совсем убирать понятие относительной погрешности дозиметра, наверное, не совсем хорошо, т.к. определять нелинейность чувствительности и статистическую неопределенность при каждой поверке будет сложно.

Пример вычисления поправок и суммарной неопределенности результата измерения дозиметром ДКС-96 [5]

А.1 Условия измерений

Измерение МЭД выполнено в точке производственного помещения атомной станции с применением дозиметра ДКС-96. Определены следующие условия измерений:

- гамма-поле в помещении представляет собой преимущественно рассеянные при прохождении через защитные материалы гамма-кванты (в основном от Cs-137 и Co-60) со средней энергией спектра около 0,2 МэВ (данные из типовой методики ОАО «Концерн Росэнергоатом» МВР

«Методика определения операционных дозиметрических величин по показаниям штатной аппаратуры»);

- угловое распределение гамма-поля при облучении дозиметра близко к изотропному (по результатам экспериментальной оценки гамма-поля и выполнении наблюдений с разной ориентацией дозиметра);

- температура в помещении около 30°C;

- остальные условия (давление, влажность, уровень электромагнитного поля и др.) соответствуют предусмотренным для прибора нормальным условиям.

Измеренное по показаниям прибора значение МЭД составило $N = 0,85$ мкЗв/ч со статистической стандартной неопределенностью $\sigma_N = 3\%$ (результаты обработки ряда из 10 наблюдений).

Основная погрешность дозиметра $U_{\text{осн}} = 15\%$ ($P = 0,95$).

А.2 Оценка поправок

Поправка на энергию гамма-квантов (учет отличия от стандартных условий 662 кэВ) определяется по приведенной в НТД на дозиметр энергетической зависимости относительной чувствительности для реальной средней энергии около 0,2 МэВ. Поправка k_E является обратной величиной к относительной чувствительности и по оценке может принимать значения от 1,0 до 1,1 со средним значением $k_E = 1,05$ и максимальной неопределенностью

$U_E = \pm 5\%$.

Поправка на изотропность облучения дозиметра для условий по п. А.1 должна уменьшить показания дозиметра при изотропном облучении по сравнению со стандартным условием калибровки (параллельный узкий пучок гамма-квантов). Используя данные о вариациях показаний дозиметра для разных углов падения фотонов из НТД на дозиметр и применив угловое интегрирование, получим для изотропного облучения с энергией 200 кэВ

следующее значение поправки $k_{\text{ур}} = 1,56$. Максимальная неопределенность поправки оценена значением $U_{\text{ур}} = \pm 9\%$

Температура при измерениях находится в разрешенных пределах эксплуатации и не требует введения соответствующей поправки ($k_T = 1$). В то же время нормальные условия превышены на 10°C , что вызывает дополнительную максимальную неопределенность $U_T = \pm 3\%$.

Остальные условия соответствуют нормальным, поэтому не требуют введения поправок и не вызывают дополнительных неопределенностей.

А.3 Бюджет неопределенности результата

В таблице А.1 сведены данные анализа по пп.А.1 и А.2 и представлены в виде бюджета неопределенности результата измерений МЭД дозиметром ДКС-96.

Таблица А.1. Бюджет неопределенности результата измерений МЭД

Величина	Значение величины	Относительная неопределенность величины	Относительная стандартная неопределенность
Показание дозиметра, N	0,85 мкЗв/ч	статистическая стандартная $\sigma_N = 3\%$ Основная погрешность $U_{\text{осн}} = 15\% (P=0,95)$	$\sigma_N = 3\%$ $u_{\text{осн}} = \frac{15}{\sqrt{3}} = 8,7\%$
Поправка на энергию, k_E	1,05	Максимальная неопределенность $U_E = 5\%$	$u_E = \frac{5}{\sqrt{3}} = 2,9\%$
Поправка на изотропность,	1,56	Максимальная неопределенность	

$k_{yг}$		$U_{yг} = 9\%$	$u_{yг} = \frac{9}{\sqrt{3}} = 5,2\%$
Температурная поправка, k_T	1	Максимальная неопределенность $U_T = 3\%$	$u_T = \frac{3}{\sqrt{3}} = 1,7\%$

Произведение поправок:

$$k_E \cdot k_{yг} = 1,05 \times 1,56 = 1,64$$

Искомое значение МЭД составило:

$$H^*(10) = 0,85 \times 1,64 = 1,39$$

Суммарная стандартная неопределенность МЭД составила:

$$u_{MЭД} = \sqrt{3^2 + 8,7^2 + 2,9^2 + 5,2^2 + 1,7^2} = 11\%$$

Для получения неопределенности при $P=0,95$ используем коэффициент расширения, равный 2:

$$U_{MЭД} = 2u_{MЭД} = 22\%$$

Результат измерения МЭД составил:

$$H^*(10) = 1,39 \pm 22\%$$

1. РМГ 29-99 (Рекомендации по межгосударственной стандартизации, приняты Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол № 15 от 26 - 28 мая 1999 г.))
2. ГОСТ 27451-87, Средства измерений ионизирующих излучений, Общие технические условия, Издательство стандартов, Москва, 1989
3. IEC 60846, Radiation protection instrumentation – Ambient and/or directional dose equivalent (rate) meters and/or monitors for beta, X and gamma radiation, 2002
4. IEC 60846-1, 2009-04 Radiation protection instrumentation – Ambient and/or directional dose equivalent (rate) meters and/or monitors for beta, X and gamma radiation, Part 1: Portable workplace and environmental meters and monitors Maintenance Result Date: 2014
5. EC/TR 62461, 2006-12, Radiation protection instrumentation Determination of uncertainty in measurement Maintenance Result Date: 2009