

ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ КЕРМЫ В ВОЗДУХЕ ОТ МИКРОИСТОЧНИКОВ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ РАДИОНУКЛИДА ^{125}I

А.В. Оборин, С.Г. Трофимчук, А.Ю. Виллевальде, А.А. Яковенко
Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии
им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург

Описана процедура измерений мощности кермы в воздухе на опорном расстоянии от микроисточников медицинского назначения из радионуклида ^{125}I . Расширенная неопределенность (при $k=2$) результатов измерений составляет 3,6 % для измерений с ионизационной камерой; 4,8 % – для измерений со сцинтилляционным блоком детектирования; 2,9 % – для совокупных измерений с использованием двух детекторов.

Ключевые слова: брахитерапия, микроисточник, йод-125, мощность кермы в воздухе, ионизационная камера, сцинтилляционный детектор

Введение

Одним из наиболее перспективных и быстро развивающихся направлений лучевой терапии является контактная лучевая терапия или брахитерапия (от греческого *brachys* – короткий). Основным преимуществом брахитерапии является резкое уменьшение дозы по мере удаления от источника излучения, что позволяет щадить нормальные ткани организма при адекватном облучении опухоли. В брахитерапии применяются закрытые радионуклидные источники, которые могут быть временно или навсегда имплантированы в облучаемую область. Применение в качестве постоянных имплантатов микроисточников на основе радионуклида ^{125}I с низкими значениями мощности дозы оказалось эффективным при лечении некоторых видов опухолей глаза, головного мозга и особенно рака предстательной железы ранних стадий.

При этом в основе расчета доз, переданных тканям организма, лежат определенные дозиметрические характеристики микроисточников, которые заносятся в специализированные компьютерные программы (системы пла-

нирования облучения). Существует прямая зависимость между точностью измерений дозиметрических характеристик радионуклидных источников для брахитерапии и качеством лечения онкологических больных. Согласно требованиям МУ 2.6.1.2135-06, при внутритканевом или внутриволостном облучении пациентов погрешность измерений мощности дозы не должна превышать $\pm 5\%$ [1].

В настоящее время в мире разработано и применяется несколько типов микроисточников для брахитерапии на основе радионуклида ^{125}I . Измерения дозиметрических характеристик таких микроисточников при изготовлении или в клиниках выполняют дозиметрами с колодезными ионизационными камерами [2]. Калибровка этих дозиметров производится с помощью калибровочных микроисточников такого же типа, как микроисточники, используемые в клинике. В качестве калибровочных применяются микроисточники, предварительно откалиброванные на эталонах, которые имеют прослеживаемость к национальным эталонам единицы мощности кермы в воздухе.

В соответствии с рекомендациями комитета по радиационной терапии Американской

ассоциации медицинских физиков (American Association of Physicists in Medicine, AAPM) в качестве базовой величины при измерении полей ионизирующего излучения, создаваемых фотонными источниками медицинского назначения, в странах Северной Америки принята величина air kerma strength, S_K , в буквальном переводе – “интенсивность кермы в воздухе” [2]. S_K определена как произведение мощности кермы в воздухе \dot{K}_{av} в точке пространства в вакууме, расположенной в плоскости, перпендикулярной длинной оси источника, на расстоянии d от центра активной части источника, и квадрата этого расстояния: $S_K = \dot{K}_{av}(d) \cdot d^2$. Расстояние d , на котором проводятся измерения, должно быть достаточно большим, чтобы микроисточник мог рассматриваться как точечный. Единица измерений S_K – мкГр·м²·ч⁻¹.

Международной комиссией по радиационным единицам (International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU) для характеристики интенсивности излучения фотонных источников, используемых в брахитерапии, была предложена величина reference air-kerma rate, \dot{K}_s , или дословно “опорная мощность кермы в воздухе” [3].

\dot{K}_s определена как мощность кермы в воздухе от фотонов с энергией большей, чем некоторое заданное значение, в точке, расположенной на опорном расстоянии $d_{ref}=1$ м от центра источника в вакууме. Единица измерений \dot{K}_s – мкГр·ч⁻¹. Величину \dot{K}_s в качестве характеристики интенсивности излучения источников для брахитерапии используют в большинстве европейских стран. Поскольку обычно за опорное расстояние d_{ref} принимается 1 м, величины S_K и \dot{K}_s численно оказываются равны, хотя формально имеют разные единицы измерений.

Дозиметрические измерения с микроисточниками IPPE Seed во ВНИИМ

Методы и средства измерений

В рамках программы замещения импортной продукции в Физико-энергетическом институте им. А.И. Лейпунского (ФЭИ) было запущено производство микроисточников медицинского назначения на основе ¹²⁵I типа IPPE Seed. Микроисточник закрытого типа IPPE Seed представляет собой цилиндрическую капсулу из титана, внутри которой располагается

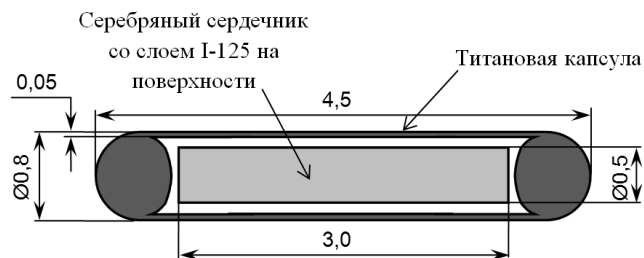


Рис. 1. Микроисточник IPPE Seed

сердечник – вставка серебряной проволоки длиной 3 мм и диаметром 0,5 мм (рис. 1). На поверхности вставки электрохимическим способом нанесен слой иодида серебра толщиной $8 \cdot 10^{-3}$ мкм, содержащий радиоактивный ¹²⁵I. Капсула с обеих сторон заварена электросваркой неплавящимся электродом в среде инертного газа. Средняя энергия фотонного излучения микроисточника составляет 28,37 кэВ, период полураспада радионуклида ¹²⁵I составляет $59,40 \pm 0,01$ сут [4].

Целью работы, выполненной в лаборатории дозиметрии ВНИИМ им. Д.И. Менделеева (ВНИИМ), явилось проведение калибровки выборки микроисточников для брахитерапии на основе ¹²⁵I типа IPPE Seed производства ФЭИ. Эти микроисточники предназначались для калибровки автоматизированной дозиметрической системы с ионизационной камерой колодезного типа, применяющейся в ФЭИ для паспортизации микроисточников типа IPPE Seed по мощности кермы в воздухе при их выпуске из производства.

Выборка микроисточников типа IPPE Seed для калибровки во ВНИИМ состояла из десяти штук отобранных случайным образом источников, не принадлежащих одной партии. Калибровка проводилась для каждого микроисточника в отдельности по мощности кермы в воздухе на опорном расстоянии. Мощность кермы в воздухе на опорном расстоянии – величина, аналогичная S_K , мкГр·м²·ч⁻¹, мощность кермы в воздухе на опорном расстоянии 1 м от центра активной части радионуклидного источника фотонного излучения перпендикулярно основной оси источника при отсутствии ослабления фотонного излучения от этого источника в воздухе.

В мире существует несколько первичных эталонов в области дозиметрических измерений, созданных специально для калибровки медицинских микроисточников на основе радионуклида ¹²⁵I (США, Германия, Италия [5–8]).

Расширенная неопределенность S_k (или \dot{K}_s) микроисточников с применением этих первичных эталонов составляет от 1,8 до 2,0 % [5–7]. В Российской Федерации такой первичный специальный эталон пока не создан, поэтому для калибровки микроисточников IPPE Seed во ВНИИМ использовалось эталонное оборудование, имеющее прослеживаемость к Государственному первичному эталону единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы и потока энергии рентгеновского и гамма-излучений (ГЭТ 8-2011) [9]. Аналогичный способ калибровки микроисточников для брахитерапии по вторичным эталонам применяется в ряде национальных метрологических институтов, например, в Великобритании [10]. Расширенная неопределенность измерений \dot{K}_s в этом случае составляет 5,6 % [10].

Измерения во ВНИИМ проводились с использованием ионизационной камеры типа ТМ32002 с электрометром Keithley 6517В из состава компаратора КПК-1 Государственного первичного эталона ГЭТ 8-2011 и спектрометрического сцинтилляционного блока детектирования БДКР-01М из состава компаратора КСБД-1 Государственного вторичного эталона единиц: кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы, амбиентного, направленного и индивидуального эквивалентов дозы, мощностей амбиентного, направленного и индивидуального эквивалентов дозы гамма-излучения (ГВЭТ 8-2). Измерения проводились при температуре воздуха от 20 до 23°C, атмосферном давлении от 100,5 до 101,0 кПа, относительной влажности от 40 до 50 %.

Сферическая полостная ионизационная камера ТМ32002 производства PTW-Freiburg (Германия) представляет собой сферу из графитированного дерлина (толщина стенки 3 мм) диаметром 140 мм. Чувствительный объем камеры – примерно 1 л. Камера не является герметичной, поэтому в результаты измерений вносилась поправка, учитывающая изменение плотности воздуха в измерительном объеме камеры при изменении условий окружающей среды: температуры, давления и влажности.

Блок детектирования направленного типа БДКР-01М производства УП “АТОМТЕХ” (Белоруссия) выполнен на основе сцинтилляционного детектора – кристалла иодида натрия толщиной 2 мм с бериллиевым входным окном диаметром 9 мм и толщиной 200 мкм. Сцинтилляционный детектор позволяет измерять

энергетическое распределение фотонного излучения в диапазоне энергий от 3 до 300 кэВ. Сигнал со сцинтилляционного детектора регистрируется фотоэлектронным умножителем, работающим в счетном режиме; мощность кермы в воздухе рассчитывается с помощью персонального компьютера со специализированным программным обеспечением, в основе которого лежит оператор преобразования “спектр–доза”.

Измерения мощности кермы в воздухе на опорном расстоянии от микроисточников типа IPPE Seed проводились с применением двух детекторов фотонного излучения, действие которых основано на разных принципах, для повышения достоверности и снижения неопределенности результатов.

Процедура калибровки оборудования

Ионизационная камера и сцинтилляционный блок детектирования были предварительно откалиброваны в полях эталонной установки низкоэнергетического рентгеновского излучения УЭД 5-50М из состава ГЭТ 8-2011. Калибровка проводилась с помощью эталонной свободно-воздушной ионизационной камеры ИК 10-100 на режимах N20–N40 и L20–L35 по ISO 4037 со средними энергиями в диапазоне от 16 до 33 кэВ [11].

Калибровка ионизационной камеры ТМ32002 проводилась на расстояниях 500 мм и 2000 мм от анода рентгеновской трубки эталонной установки на режимах излучения серий N и L. Сцинтилляционный блок детектирования БДКР-01М был откалиброван на режимах серии L на расстоянии 2000 мм от анода рентгеновской трубки. По результатам калибровки были построены зависимости калибровочных коэффициентов камеры и калибровочных факторов блока детектирования от энергии фотонного излучения в диапазоне от 16 до 33 кэВ. Калибровочный коэффициент камеры ТМ32002 и калибровочный фактор блока детектирования БДКР-01М, использованные при проведении измерений с микроисточниками IPPE Seed, были получены путем интерполяции полученных зависимостей для принятой средней энергии фотонного излучения микроисточника 28,37 кэВ.

Калибровочный коэффициент камеры ТМ32002 определялся как:

$$N_k = \frac{\dot{K}_{a0}}{I} \cdot k_{int}^N, \quad (1)$$

где \dot{K}_{a0} – эталонное значение мощности кермы в воздухе на режимах N20–N40 и L20–L35 по ISO4037, мкГр/с; I – соответствующий ток ка-

меры (за вычетом фонового тока), А; k_{int}^N – поправочный коэффициент, учитывающий погрешность интерполяции.

Калибровочный фактор сцинтилляционного блока детектирования БДКР-01М определялся как:

$$C_K = \frac{\dot{K}_{a0}}{M} \cdot k_{int}^C, \quad (2)$$

где \dot{K}_{a0} – эталонное значение мощности кермы в воздухе на режимах L20–L35 по ISO4037, мкГр/с; M – измеренное блоком детектирования значение мощности кермы в воздухе на соответствующих режимах, мкГр/с; k_{int}^C – поправочный коэффициент, учитывающий погрешность интерполяции.

Процедура измерений мощности кермы в воздухе на опорном расстоянии от микроисточника IPPE Seed

При проведении измерений микроисточники с помощью вакуумного пинцета помещались в специально изготовленный держатель из полиметилметакрилата (ПММА) (рис. 2). Положение микроисточника в держателе – строго фиксированное и воспроизводимое относительно направлений измерений. Толщина стенки держателя в месте расположения источника составляет 0,4 мм. Держатель с источником устанавливался на подставку градуировочной линейки, обеспечивающую возможность поворота источника вокруг его основной оси на заданный угол. Ионизационная камера и блок детектирования одновременно устанавливались на заданных расстояниях от центра активной части микроисточника в плоскости, перпендикулярной основной оси источника (рис. 3). Для минимизации влияния рассеянного фотонного излучения на результаты измерений микроисточники, ионизационная камера и блок детектирования устанавливались на достаточном удалении от конструктивных элементов градуировочной линейки, стен, пола и потолка помещения.

Измерения с ионизационной камерой проводились на расстояниях 210 мм и 300 мм, с блоком детектирования – на расстояниях 500 мм и 1000 мм от центра ионизационной камеры (или эффективного центра детектора) до центра активной части микроисточника. Измерения на двух расстояниях проводились для оценки вклада рассеянного излучения в результаты измерений и дополнительной проверки правильности учета ослабления фотонного излучения ^{125}I в воздухе. Для учета влияния

азимутальной анизотропии источника на результаты измерений мощности кермы в воздухе на опорном расстоянии измерения проводились при повороте микроисточника в держателе вокруг основной оси с шагом в 45° (всего проводилось восемь измерений для каждого микроисточника).

Вклад низкоэнергетических фотонов в результаты измерений не учитывался. Из резуль-

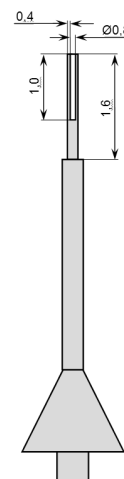


Рис. 2. Держатель для микроисточника

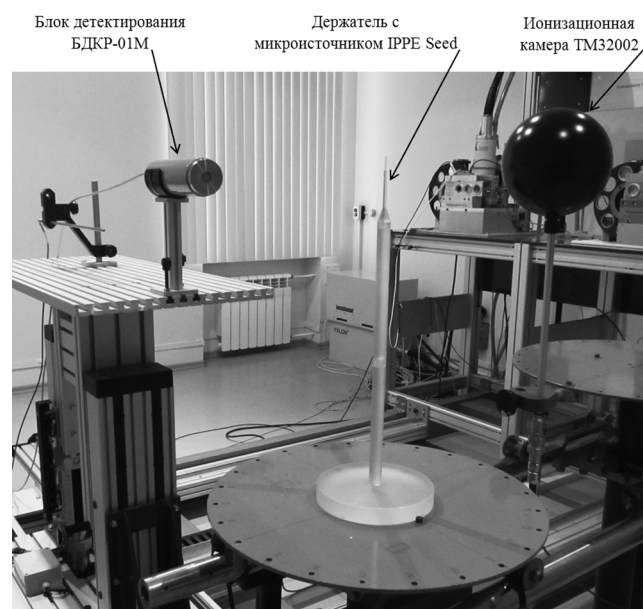


Рис. 3. Проведение измерений мощности кермы в воздухе от микроисточника IPPE Seed с ионизационной камерой ТМ32002 и сцинтилляционным блоком детектирования БДКР-01М

татов измерений, полученных с помощью блока детектирования, следует, что в спектре фотонного излучения от микроисточника IPPE Seed отсутствует линия титана с энергией 4,5 кэВ. Предполагается, что фотоны с такой энергией полностью поглощаются в веществе держателя, в воздушном слое между микроисточником и детектором и во входном окне блока детектирования. При измерениях с ионизационной камерой фотоны с энергией 4,5 кэВ полностью поглощаются в стенке камеры.

Мощность кермы в воздухе на опорном расстоянии от микроисточника рассчитывалась по формуле:

$$S_K = \bar{K}_a(d) \cdot d^2, \quad (3)$$

где $\bar{K}_a(d)$ – среднее значение мощности кермы в воздухе, рассчитанное из восьми результатов измерений, полученных при повороте микроисточника, при отсутствии ослабления фотонного излучения от микроисточника в воздухе, мкГр/ч; d – расстояние от центра ионизационной камеры (или эффективного центра детектора) до центра активной части микроисточника, м.

При измерениях с ионизационной камерой ТМЗ2002 мощность кермы в воздухе определялась как:

$$\bar{K}_a = N_K \cdot \bar{I} \cdot k_\rho \cdot k_{at} \cdot k_{sc} \cdot k_n \cdot k_{st} \cdot k_d, \quad (4)$$

где: N_K – калибровочный коэффициент камеры для фотонного излучения ^{125}I , мкГр/Кл;

\bar{I} – среднее арифметическое значение ионизационного тока камеры от микроисточника, рассчитанное из результатов измерений ионизационного тока для восьми положений источника (за вычетом фонового тока), А;

$k_\rho = \frac{\rho T_0}{\rho_0 T}$ – поправочный коэффициент, учитывающий отличие плотности воздуха при заданных условиях окружающей среды в камере от плотности воздуха при нормальных условиях;

T_0 – температура воздуха при нормальных условиях, $T_0 = 273,15$ К;

ρ_0 – атмосферное давление при нормальных условиях, $\rho_0 = 101,325$ кПа;

T – температура воздуха в заданных условиях измерений;

ρ – атмосферное давление в заданных условиях измерений;

$k_{at} = \exp\left(\left(\bar{\mu}/\rho\right)_{\text{air}} \rho'_{\text{air}} L\right)$ – поправочный коэффициент, учитывающий ослабление излучения

от микроисточника в воздухе между центром активной части микроисточника и центром ионизационной камеры;

$\left(\bar{\mu}/\rho\right)_{\text{air}}$ – средний массовый коэффициент ослабления излучения от микроисточника в воздухе, кг/м²;

ρ'_{air} – плотность воздуха при заданных условиях измерений, кг/м³;

L – расстояние между центром активной части микроисточника и центром ионизационной камеры;

$k_{sc} = 1 - \dot{K}_{sc} / \dot{K}_a$ – поправочный коэффициент, учитывающий рассеяние излучения;

\dot{K}_{sc} – часть измеренной мощности кермы в воздухе от рассеянного излучения, мкГр/ч;

\dot{K}_a – измеренная мощность кермы в воздухе, мкГр/ч [12].

k_{sc} был определен по результатам измерений мощности кермы в воздухе на двух расстояниях, исходя из результатов проверки выполнения закона обратных квадратов расстояний с учетом ослабления фотонного излучения в воздухе. Этот коэффициент оказался близким к единице, поэтому его значение было принято за единицу, а отличие от единицы учтено в бюджете неопределенностей.

$k_n = 1/A_{pn}(d)$ – поправочный коэффициент, учитывающий неравномерность потока электронов в воздушной полости камеры:

$$A_{pn}(d) = \frac{1}{2\alpha} \ln\left(\frac{1+\alpha}{1-\alpha}\right), \quad \alpha = R/d, \quad R - \text{внутренний}$$

радиус ионизационной камеры, м; d – расстояние от центра активной части микроисточника до центра ионизационной камеры, м [12].

$k_{st} = \exp\left(\left(\bar{\mu}/\rho\right)_{\text{PMMA}} \rho_{\text{PMMA}} L_{st}\right)$ – поправочный коэффициент, учитывающий ослабление излучения от микроисточника держателем;

$\left(\bar{\mu}/\rho\right)_{\text{PMMA}}$ – средний массовый коэффициент ослабления излучения от микроисточника в оргстекле, кг/м²;

ρ_{PMMA} – плотность оргстекла, кг/м³;

L_{st} – толщина стенки держателя.

$$k_d = \frac{1}{\exp\left(-\ln(2) \frac{T_D}{T_{1/2}}\right)} - \text{поправочный коэффициент, учитывающий распад радионуклида } ^{125}\text{I}$$

за время измерений; T_D – время, прошедшее с момента первого измерения, сутки; $T_{1/2}$ – период полураспада источника, равный $59,40 \pm 0,01$ сут для ^{125}I .

Средние массовые коэффициенты ослабления излучения от микроисточника в воздухе $(\bar{\mu}/\rho)_{\text{air}}$ и в оргстекле $(\bar{\mu}/\rho)_{\text{РММА}}$ рассчитывались с учетом спектра излучения радионуклида ^{125}I .

При измерениях со сцинтилляционным блоком детектирования БДКР-01М мощность кермы в воздухе от микроисточника рассчитывалась как:

$$\dot{K}_a = C_K \cdot \bar{M} \cdot k_{at} \cdot k_{st} \cdot k_d, \quad (5)$$

где C_K – калибровочный фактор блока детектирования для фотонного излучения ^{125}I ; \bar{M} – среднее арифметическое из измеренных блоком детектирования значений мощности кермы в воздухе от микроисточника при его восьми положениях (за вычетом фоновых показаний), мкГр/с.

В результат измерений мощности кермы в воздухе вносились следующие поправочные коэффициенты: поправка на ослабление излучения от микроисточника в воздухе между центром активной части микроисточника и эффективным центром блока детектирования, k_{at} ; поправка на ослабление излучения от микроисточника держателем, k_{st} ; поправка, учитывающая распад радионуклида ^{125}I за время измерений, k_d . Коэффициенты рассчитывались аналогично поправочным коэффициентам, используемым при измерениях с ионизационной камерой ТМ32002.

Поправочный коэффициент, учитывающий рассеяние фотонного излучения, в результате измерений с блоком детектирования БДКР-01М не вводился, так как блок имеет направленную зависимость чувствительности. Отсутствие влияния рассеянного излучения на показания блока детектирования было подтверждено при сравнении результатов измерений мощности кермы в воздухе на двух расстояниях от микроисточника (500 мм и 1000 мм). Отличие результатов этих измерений, приведенных к опорному расстоянию, находится в пределах статистической неопределенности измерений.

Результаты и выводы

Бюджеты неопределенностей калибровочного коэффициента ионизационной камеры ТМ32002 и калибровочного фактора сцин-

тилляционного блока детектирования БДКР-01М представлены в табл. 1, 2 соответственно.

Бюджеты неопределенностей мощности кермы в воздухе на опорном расстоянии от микроисточника IPPE Seed при измерениях с ионизационной камерой ТМ32002 и со сцинтилляционным блоком детектирования БДКР-01М, представлены в табл. 3, 4 соответственно. Расширенная неопределенность U при коэффициенте охвата $k=2$ результатов измерений мощности кермы в воздухе с ионизационной камерой ТМ32002 составляет 3,6 %; со сцинтилляционным блоком детектирования БДКР-01М – 4,8 %.

Полученные в результате измерений значения мощности кермы в воздухе на опорном расстоянии от микроисточников IPPE Seed без учета ослабления фотонного излучения в воздухе приведены в табл. 5. Результаты, полученные с помощью ионизационной камеры, согласуются в пределах расширенной неопределенности с результатами, полученными с помощью сцинтилляционного блока детектирования. Усредненное по десяти микроисточникам IPPE Seed значение мощности кермы в воздухе на опорном расстоянии при измерениях с помощью ионизационной камеры составляет $0,991 \text{ мкГр} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{ч}^{-1}$, при измерениях с помощью блока детектирования – $0,994 \text{ мкГр} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{ч}^{-1}$.

Расширенная неопределенность U ($k=2$) совокупных значений результатов измерений мощности кермы в воздухе на опорном расстоянии, полученных с использованием двух детекторов (ионизационной камеры и сцинтилляционного блока детектирования), рассчитанная в соответствии с Руководством по выражению неопределенности измерений [13], составляет 2,9 %.

Описанная процедура измерений позволяет определять мощность кермы в воздухе на опорном расстоянии от микроисточников медицинского назначения на основе радионуклида ^{125}I с неопределенностью, сопоставимой с неопределенностями результатов аналогичных измерений в ведущих зарубежных метрологических лабораториях. Калибровочные микроисточники, полученные с использованием такой процедуры измерений, позволяют обеспечить высокую точность калибровки дозиметров с ионизационными камерами колодезного типа для измерений медицинских микроисточников на основе радионуклида ^{125}I .

Таблица 1

Бюджет неопределенностей калибровочного коэффициента ионизационной камеры ТМ32002

Входная величина	Неопределенность, %	
	по типу А, u_A	по типу В, u_B
Эталонное значение мощности кермы в воздухе на режимах серий N и L по ISO4037, \dot{K}_{a0}	0,15	0,30
Ионизационный ток камеры на режимах серий N и L по ISO4037 (за вычетом фонового тока), I	0,20	0,03
Поправочный коэффициент, учитывающий погрешность интерполяции, k_{int}^N	–	1,0
Стандартная неопределенность	0,30	1,0
Суммарная стандартная неопределенность, u_C	1,1	

Таблица 2

Бюджет неопределенностей калибровочного фактора сцинтилляционного блока детектирования БДКР-01М

Входная величина	Неопределенность, %	
	по типу А, u_A	по типу В, u_B
Эталонное значение мощности кермы в воздухе на режимах серии L по ISO4037, \dot{K}_{a0}	0,15	0,30
Измеренное блоком детектирования значение кермы в воздухе на режимах серии L по ISO4037, M	0,20	–
Поправочный коэффициент, учитывающий погрешность интерполяции, k_{int}^C	–	2,0
Стандартная неопределенность	0,30	2,0
Суммарная стандартная неопределенность, u_C	2,0	

Таблица 3

Бюджет неопределенностей мощности кермы в воздухе на опорном расстоянии от микроисточника IPPE Seed при измерениях с ионизационной камерой ТМ32002

Входная величина	Неопределенность, %	
	по типу А, u_A	по типу В, u_B
Калибровочный коэффициент ионизационной камеры для фотонного излучения ^{125}I , N_K	0,30	1,0
Ионизационный ток камеры от микроисточника с учетом анизотропии (за вычетом фонового тока), \bar{I}	1,4	0,03
Поправочный коэффициент, учитывающий отличие плотности воздуха при заданных условиях окружающей среды в камере от плотности воздуха при нормальных условиях, k_p	–	0,01
Поправочный коэффициент, учитывающий рассеяние излучения, k_{sc}	0,10	0,35
Поправочный коэффициент, учитывающий ослабление излучения в воздухе между центром активной части микроисточника и центром ионизационной камеры, k_a	–	0,20
Поправочный коэффициент, учитывающий неравномерность потока электронов в воздушной полости камеры, k_n	–	0,30
Поправочный коэффициент, учитывающий ослабление излучения от микроисточника держателем, k_{st}	–	0,04
Поправочный коэффициент, учитывающий распад радионуклида ^{125}I за время измерений, k_d	–	0,02
Расстояние от центра ионизационной камеры до центра активной части микроисточника, d	–	0,02
Суммарная стандартная неопределенность, u_C	1,8	
Расширенная неопределенность при $k = 2$, U	3,6	

Таблица 4

Бюджет неопределенностей мощности кермы в воздухе на опорном расстоянии от микроисточника IPPE Seed при измерениях со сцинтилляционным блоком детектирования БДКР-01М

Входная величина	Неопределенность, %	
	по типу А, u_A	по типу В, u_B
Калибровочный фактор детектора для фотонного излучения ^{125}I , N_K	0,30	2,0
Измеренное блоком детектирования значение мощности кермы в воздухе от микроисточника с учетом анизотропии (за вычетом фоновых показаний), \bar{M}	1,3	0,01
Поправочный коэффициент, учитывающий ослабление излучения в воздухе между центром активной части микроисточника и центром ионизационной камеры, k_{at}	-	0,20
Поправочный коэффициент, учитывающий ослабление излучения от микроисточника держателем, k_{st}	-	0,04
Поправочный коэффициент, учитывающий распад радионуклида ^{125}I за время измерений, k_d	-	0,02
Расстояние от эффективного центра сцинтилляционного детектора до центра активной части микроисточника, d	-	0,02
Суммарная стандартная неопределенность, u_c	2,4	
Расширенная неопределенность при $k = 2$, U	4,8	

Таблица 5

Результаты измерений мощности кермы в воздухе на опорном расстоянии от микроисточников IPPE Seed

Номер источника	$S_K(\text{TM32002})$, $\text{мкГр}\cdot\text{м}^2\cdot\text{ч}^{-1}$	$U\{S_K(\text{TM32002})\}$, $\text{мкГр}\cdot\text{м}^2\cdot\text{ч}^{-1}$	$S_K(\text{БДКР-01М})$, $\text{мкГр}\cdot\text{м}^2\cdot\text{ч}^{-1}$	$U\{S_K(\text{БДКР-01М})\}$, $\text{мкГр}\cdot\text{м}^2\cdot\text{ч}^{-1}$	S_K , $\text{мкГр}\cdot\text{м}^2\cdot\text{ч}^{-1}$	$U\{S_K\}$, $\text{мкГр}\cdot\text{м}^2\cdot\text{ч}^{-1}$
26	1,020	$\pm 0,037$	1,042	$\pm 0,050$	1,031	$\pm 0,030$
5	0,895	$\pm 0,032$	0,924	$\pm 0,044$	0,910	$\pm 0,026$
24	0,998	$\pm 0,036$	1,012	$\pm 0,049$	1,005	$\pm 0,029$
22	1,047	$\pm 0,038$	1,034	$\pm 0,050$	1,041	$\pm 0,030$
17	0,965	$\pm 0,035$	0,979	$\pm 0,047$	0,972	$\pm 0,028$
14	1,023	$\pm 0,037$	1,038	$\pm 0,050$	1,030	$\pm 0,030$
15	1,003	$\pm 0,036$	0,995	$\pm 0,048$	0,999	$\pm 0,029$
12	0,925	$\pm 0,033$	0,910	$\pm 0,044$	0,918	$\pm 0,027$
6	1,026	$\pm 0,037$	1,018	$\pm 0,049$	1,022	$\pm 0,030$
13	1,006	$\pm 0,036$	0,987	$\pm 0,047$	0,997	$\pm 0,029$

$S_K(\text{TM32002})$ – результаты измерений мощности кермы в воздухе на опорном расстоянии с ионизационной камерой TM32002; $U\{S_K(\text{TM32002})\}$ – расширенная неопределенность результатов измерений $S_K(\text{TM32002})$; $S_K(\text{БДКР-01М})$ – результаты измерений мощности кермы в воздухе на опорном расстоянии со сцинтилляционным блоком детектирования БДКР-01М; $U\{S_K(\text{БДКР-01М})\}$ – расширенная неопределенность результатов измерений $S_K(\text{БДКР-01М})$; S_K – совокупные результаты измерений мощности кермы в воздухе на опорном расстоянии полученные из результатов измерений с ионизационной камерой и сцинтилляционным блоком детектирования; $U\{S_K\}$ – расширенная неопределенность совокупных результатов измерений S_K

Список литературы

1. МУ 2.6.1.2135-06 Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при лучевой терапии закрытыми радионуклидными источниками.
2. Nath R., Anderson L.L., Luxton G. et al. Dosimetry of interstitial brachytherapy sources: Recommendations of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 43 // *Med. Phys.* 1995. Vol. 22. P. 209–234.
3. Caswell R., Wambersie A., Cross W.G. et al. Dosimetry of beta rays and low-energy photons for brachytherapy with sealed sources. – ICRU Report 72, 2004.
4. Update of X Ray and Gamma Ray Decay Data Standards for Detector Calibration and Other Applications. Vol. 1. Recommended Decay Data, High Energy Gamma Ray Standards and Angular Correlation Coefficients. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2007.
5. Soares C.G., Douysset G., Mitch M.G. Primary standards and dosimetry protocols for brachytherapy sources // *Metrologia*. 2009. Vol. 46. P. S80–S98.
6. Seltzer S.M., Lamperti P.J., Loevinger R. et al. New National air-kerma-strength standards for ^{125}I and ^{103}Pd brachytherapy seeds // *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* 2003. Vol. 108. P. 337–358.
7. Selbach H.-J., Kramer H.-M., Culbertson W.S. Realization of reference air-kerma rate for low-energy photon sources // *Metrologia*. 2008. Vol. 45. P. 422–428.
8. Toni M.P., Pimpinella M., Pinto M. et al. Direct determination of the absorbed dose to water from ^{125}I low dose-rate brachytherapy seeds using the new absorbed dose primary standard developed at ENEA-INMRI // *Metrologia*. 2012. Vol. 49. P. S193–S197.
9. Оборин А.В., Виллевалде А.Ю., Трофимчук С.Г. Государственный первичный эталон единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы и потока энергии рентгеновского и гамма-излучений // *Измерительная техника*. 2012. № 8. С. 3–8.
10. Baker M., Bass G.A., Woods M.J. Calibration of the NPL secondary standard radionuclide calibrator for ^{125}I seeds used for prostate brachytherapy // *Applied Radiation and Isotopes*. 2002. Vol. 56. P. 321–325.
11. ISO 4037-4: 2004 X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy. Part 4: Calibration of area and personal dosimeters in low energy X reference radiation fields.
12. A practical guide to quality control of brachytherapy equipment. European guidelines for quality assurance in radiotherapy. ESTRO Booklet No. 8, 2004.
13. ГОСТ Р 54500.3-2011 Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008 Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерений.

AIR KERMA RATE MEASUREMENT FOR I-125 MEDICAL MICROSOURCES

A.V. Oborin, S.G. Trofimchuk, A.Y. Villevalde, A.A. Yakovenko
D.I. Mendelejev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia

Measurement procedure of air kerma rate at the reference distance for ^{125}I medical microsourses is described. Expanded uncertainty ($k=2$) is 3.6 % for the results of measurement with ionization chamber, 4.8 % for the results of measurement with scintillation detector and 2.9 % for the combined results received using both detectors.

Key words: *brachytherapy, microsource, iodine-125, air kerma rate, ionization chamber, scintillation detector*

E-mail: vay@vniim.ru