

УДК 539.165.074.089.68-027.548(476)

С. А. Сорока,
К. А. Кривецкий

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЭТАЛОН ЕДИНИЦ ИНДИВИДУАЛЬНОГО И АМБИЕНТНОГО ЭКВИВАЛЕНТА МОЩНОСТИ ДОЗЫ БЕТА-ИЗЛУЧЕНИЯ

В статье представлен новый национальный эталон единиц индивидуального и AMBIENTНОГО эквивалента мощности дозы бета-излучения, разработанный специалистами БелГИМ в рамках подпрограммы «Эталонны Беларусі» ГНТП «Эталонны і навучныя прыборы» на 2016–2020 годы. Приведены расчеты мощности поглощенной дозы от дозиметрического источника бета-излучения, представлено оборудование эталона.

Актуальность работы подтверждает тот факт, что до настоящего времени в Беларуси отсутствовали методы и средства передачи единиц величин в области измерений дозиметрических характеристик бета-излучения.

The article describes a new national standard for individual and ambient equivalent dose rate of beta radiation, which was developed by BelGIM within the scope of the subprogramme "Measuring Standards of Belarus" as a part of the State Scientific and Technical Programme "Measuring standards and Scientific Instruments" valid for the period 2016–2020. It contains calculations of absorbed dose rate produced by the dosimetric beta radiation source and provides information on the equipment components of the measuring standard.

The high relevance of the work can be proven by the fact that until now there were no methods and means available in Belarus for dissemination of units in the field of measuring dosimetric characteristics of beta radiation.

Введение

Источники бета-излучения применяются во многих областях человеческой деятельности: в технологических установках химического и машиностроительного производства, в атомной промышленности, приборостроении, легкой промышленности, сельском хозяйстве и др. Но наиболее значимый эффект от их использования сейчас наблюдается в медицине, археологии, химии, физике, биологии, геномной инженерии и др.

Так, в медицине источники бета-излучения применяются в офтальмологии в качестве медицинских аппликаторов для безоперационного удаления новообразований в области глаза, в радиоизотопной диагностике в качестве радиоактивной метки для обнаружения опухолевых тканей, бета-терапии. Для терапевтических целей на пораженные участки накладывают бета-аппликаторы, при злокачественных опухолях используют источники, которые размещают внутри организма человека непосредственно в пораженных тканях (брахитерапия). Лечебный эффект достигается за счет разрушающего действия, которое бета-излучение оказывает на патологически измененные ткани.

Важным фактором лучевого лечения злокачественных внутриглазных опухолей является индивидуальное планирование воздействия на основе таких показателей, как толщина опухоли, ее диаметр (радиальный и меридиональный), знание точной локализации опухоли. По этим показате-



Рис. 1. Национальный эталон единиц индивидуального и AMBIENTНОГО эквивалента мощности дозы бета-излучения

лям подбирается специальный бета-аппликатор необходимой формы и размера с точно известными параметрами и характеристиками мощности дозы бета-излучения и ее пространственного распределения.

Бета-источники медицинского назначения калибруют по мощности поглощенной дозы (МПД) в воде. Основой всех первичных эталонов, воспроизводящих единицу МПД в воде, являются экстраполяционные водозэквивалентные ионизационные камеры. К калибровке медицинских источников

бета-излучения предъявляются повышенные требования по точности измерений, которые указаны в ряде нормативных документов. Кроме знания МПД большое значение имеет и знание распределения этой мощности дозы по поверхности источника и на расстоянии от нее.

Бета-частицы могут оказывать негативное воздействие на человека, вызывая радиационные поражения кожи и внутренних органов. Очевидно, что эффективное использование радионуклидных источников бета-излучения невозможно без гарантированного обеспечения радиационной безопасности обращения с этими источниками. Эту задачу решает практическая дозиметрия, которая располагает соответствующими расчетными и инструментальными методами.

Для выполнения требований радиационной безопасности и обеспечения дозиметрического контроля предназначенных для этих целей средств измерений в Республике Беларусь в рамках подпрограммы «Эталоны Беларуси» ГНТП «Эталоны и научные приборы» на 2016–2020 годы был создан эталон единиц индивидуального и амбиентного эквивалента мощности дозы бета-излучения.

Состав эталона

В состав эталона (рис. 2) входит следующее оборудование:

- экстраполяционная ионизационная камера МЭК-1;
- прецизионный стенд С-1;
- электрометр Keithley 6517В;
- цифровой барометр с измерительными каналами давления, температуры и влажности Vaisala PTU303;
- комплект источников бета-излучения из радионуклидов ^{147}Pm , ^{85}Kr , $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$;
- комплект дополнительного оборудования (фильтры, входные окна, держатели).

Экстраполяционная камера МЭК-1 обеспечивает прецизионные измерения МПД в тканеэквивалентном веществе от дозиметрических бета-источников. Подвижный блок электродов экстраполяционной камеры имеет цилиндрическую форму и выполнен из полиметилметакрилата диаметром 31 мм. На блоке методом графитового напыления выполнены собирающий и охранный электроды, разделенные между собой изоляционной канавкой. Входное окно экстраполяционной камеры является потенциальным электродом и выполнено на основе пленки из полиэтилентерефталата с алюминиевым покрытием со стороны, обращенной внутрь объема экстраполяционной камеры, и имеет диаметр 100 мм. Поверхностная плотность (толщина) пленки входного окна составляет не более 1 мг/см^2 . Перемещение под-

вижного блока электродов экстраполяционной камеры от внутренней поверхности входного окна осуществляется в диапазоне рабочих расстояний от 0,250 до 2,950 мм с шагом 0,001 мм.

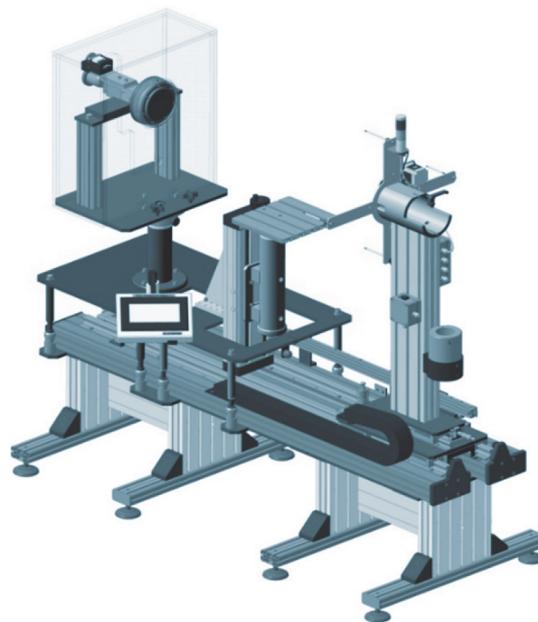


Рис. 2. Общий вид стенда С-1 с установленной экстраполяционной ионизационной камерой МЭК-1

Стенд С-1 предназначен для воспроизведения МПД бета-излучения в тканеэквивалентном веществе с использованием эталонной автоматизированной экстраполяционной ионизационной камеры МЭК-1 и передачи МПД бета-излучения в ткани от первичного эталона рабочим эталонам и дозиметрам бета-излучения.

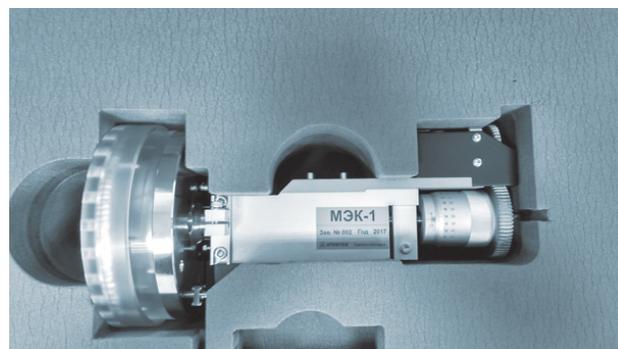


Рис. 3. Автоматизированная экстраполяционная ионизационная камера МЭК-1

Дистанционное перемещение блока излучателя осуществляется в диапазоне расстояний от 110 до 1 000 мм.

Погрешность перемещения блока излучателя относительно опорной плоскости стенда С-1

с использованием системы автоматического управления в диапазоне от 110 до 500 мкм – не более ± 50 мкм, в диапазоне от 500 до 1 000 мкм – не более ± 80 мкм.

Стенд С-1 обеспечивает юстировку камеры МЭК-1 и размещаемых на стенде С-1 дозиметров по оси пучка бета-излучения с использованием лазерного устройства.

Для измерения токов ионизации применяется высокоточный электрометр Keithley 6517В со встроенным источником высокого напряжения для питания камеры и низким уровнем токов утечки.

Для контроля условий окружающей среды был выбран цифровой барометр РТУ303 производства фирмы Vaisala. Этот прибор имеет оптимальное соотношение цены и точности и хорошо зарекомендовал себя во многих дозиметрических лабораториях.

Измерение и расчет мощности поглощенной дозы от эталонного набора источников

Измерение МПД от дозиметрического источника бета-излучения на установке с экстраполяционной камерой проводится путем регистрации значений ионизационного тока (либо заряда за одинаковый промежуток времени) в камере при нескольких последовательно увеличивающихся расстояниях между электродами камеры для обеих полярностей напряжения на камере. Напряженность электрического поля в камере должна быть не менее 100 В/см^{-1} . При измерении значений ионизационного тока в камере расстояние между электродами разбивается на 5 точек, равноудаленных друг от друга.

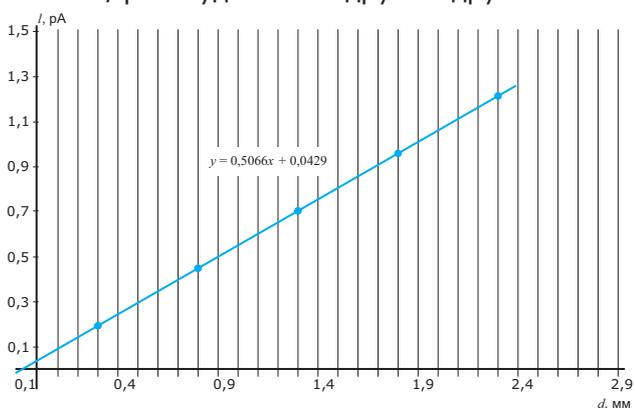


Рис. 4. Пример экстраполяционной прямой источника ^{85}Kr

В нашем случае минимальное расстояние составляет 300 мкм, максимальное – 2 300 мкм, шаг – 500 мкм. Такие параметры измерений обусловлены техническим недостатком программного обеспечения. Согласно стандарту

ISO 6980-2 должен быть задействован весь диапазон расстояния между электродами от 250 до 2 950 мкм. При проведении измерений необходимо измерять температуру, давление и влажность для проведения дальнейших расчетов коэффициентов, учитывающих условия окружающей среды. После завершения серии измерений строится экстраполяционная прямая (рис. 4).

Для определения значения МПД за входным окном камеры при нулевой величине воздушного зазора между электродами используется формула

$$\dot{D} = \frac{(\bar{W}_0 / e) \cdot S_{t,a}}{\rho_{a_0} \cdot a} \left[\frac{d}{dl} (kk'I(l)) \right]_{l=0} \cdot 10^7, \quad (1)$$

где (\bar{W}_0 / e) – отношение средней энергии ионообразования в воздухе при образцовых условиях к величине элементарного заряда e ($33,83 \pm 0,07$) Дж/Кл;

ρ_{a_0} – плотность воздуха при образцовых условиях: $T_0 = 293,15 \text{ К}$; $p_0 = 101,325 \text{ кПа}$; $r_0 = 0,65$;

a – эффективная площадь измерительного электрода;

$S_{t,a}$ – коэффициенты тормозных способностей для бета-источников:

^{147}Pm : $S_{t,a} = 1,124$, ^{85}Kr : $S_{t,a} = 1,121$, $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$: $S_{t,a} = 1,110$;

$\left[\frac{d}{dl} (kk'I(l)) \right]_{l=0}$ – наклон прямой графика зависимости тока (с учетом поправок) от глубины камеры l в ограниченной области, А/мм;

k' – произведение поправочных коэффициентов, которые не зависят от глубины камеры [2]:

$$k' = k_{ba} k_{el} k_{hu} k_{in}, \quad (2)$$

где k_{ba} – коэффициент коррекции разницы обратного рассеивания между тканью и материалом собирающего электрода и кольца экранирования. Рассчитывается по формуле [2] $k_{ba} = B_t / B_{\text{ПММА}}$, где B_t – коэффициент обратного рассеивания ткани, $B_{\text{ПММА}}$ – коэффициент обратного рассеивания полиметилметакрилата;

k_{el} – коэффициент коррекции для электростатического притяжения входного окна. Поскольку рекомендуется проводить все замеры при напряженности поля, которое на порядок меньше, электростатическим притяжением можно пренебречь и, следовательно, в расчетах принять коэффициент коррекции $k_{el} = 1$ [2];

k_{hu} – коэффициент коррекции для воздействия влажности воздуха в собирающем объеме на среднюю энергию, требуемую для получения ионной пары. В настоящее время коэффициент определен лишь для одного значения $r = 0$ (сухой воздух) – $k_{hu}(r = 0) = 1,004$. Для стандартных условий теста коэффициент k_{hu} можно принимать за единицу [2];

k_{in} – коэффициент коррекции для эффектов перехода между воздухом в собирающем объеме и

расположенным рядом входным окном. Для глубины камеры 0,5 мм и меньше нет информации о зависимости данного коэффициента. До тех пор, пока не появится больше данных, коэффициент коррекции для эффектов перехода принимается за $k_{in} = 1$ вне зависимости от использованной глубины камеры [2].

Произведение поправочных коэффициентов k , которые изменяются с глубиной камеры [2], составляет

$$k = k_{ad}k_{abs}k_{ac}k_{di}k_{pe}k_{sat} \quad (3)$$

где k_{ad} – коэффициент коррекции на плотность воздуха в собирающем объеме [2], рассчитывается по формуле $k_{ad} = \rho_{a_0} / \rho_a$, где ρ_{a_0} – плотность воздуха при $T_0 = 293,15$ К, $p_0 = 101,325$ кПа, $r_0 = 0,65$, ρ_a – плотность воздуха при проведении измерений МПД;

k_{abs} – коэффициент коррекции ослабления бета-частиц между источником и собирающим объемом ввиду отклонений от нормальных условий. Рассчитывается по формуле $k_{abs} = 1 / T'_i(\eta_{a,t}\rho_a y_0 + \eta_{m,t}d_m \rho_m; \alpha)$, где $\eta_{m,t}d_m \rho_m$ – тканезквивалентная толщина окна из материала m , толщиной d_m и плотностью ρ_m , $T'_i(\rho_i d_i; \alpha)$ – функция переноса, специально приведенная к единице для нормальных условий. Для низкоэнергетических полей ($E_{MAX} < 200$ кэВ) $T'_i(\rho_i d_i; \alpha)$ рассчитывается по формуле $T'_i(\rho_i d_i; \alpha) = \exp[f_0(\alpha) + f_1(\alpha)\rho_i d_i + f_2(\alpha)(\rho_i d_i)^3]$. Для полей более высоких энергий данная функция имеет вид: $T'_i(\rho_i d_i; \alpha) = f_3(\alpha) + f_4(\alpha)\rho_i d_i + f_5(\alpha)(\rho_i d_i)^2$. Значения коэффициентов полинома f_0-f_5 представлены в ISO 6980-2 в таблице С. 3 для $a = 0^\circ$;

k_{ac} – коэффициент коррекции для ослабления бета-частиц в собирающем объеме, который рассчитывается по формуле

$$k_{ac} = T'_i(\rho_i d_0 + \eta_{a,t} y_0 \rho_{a_0}; \alpha) / T'_i(\rho_i d_0 + \eta_{a,t} [y_0 + \frac{l}{2}] \rho_{a_0}; \alpha),$$

где y_0 – расстояние от опорной точки источника до входного окна камеры, l – значение глубины камеры;

k_{di} – коэффициент коррекции для осевой неоднородности. Причины осевой неоднородности пучка излученных бета-частиц – расходимость радиационного поля вследствие точечной природы источника, а также ослабление в фантоме. Рассчитывается по формуле [2]: $k_{di} = 1 + l/y_0$;

k_{pe} – коэффициент коррекции для возмущений плотности потока бета-частиц боковыми стенками камеры экстраполяции. Возмущение плотности потока бета-частиц боковыми стенками камеры экстраполяции детально исследовалось Дж. Бомом [6]. Результаты показали, что коэффициент коррекции возмущения k_{pe} можно выразить как произведение коэффициента экранирования и коэффициента рассеяния, величины которых зависят от глубины камеры l . Коэффициент рассчитывается по формуле [2]: $k_{pe} = f_6 + f_7 l + f_8 l^2$. Значения ко-

эффициентов полинома f_6-f_8 представлены в ISO 6980-2 в таблице С. 5;

k_{sat} – коэффициент коррекции для ионизационных потерь ввиду рекомбинации. Коэффициент коррекции необходимо применять для учета потерь сбора ионизации в объеме камеры ввиду влияния рекомбинации. Дж. Бом детально рассмотрел три типа рекомбинации: объемную рекомбинацию, начальную рекомбинацию и диффузионные потери [6]. Эти эффекты учитываются с помощью коэффициента коррекции k_{sat} , рассчитать который можно по формуле [2]:

$$k_{sat} = \frac{1}{\left(1 - \frac{5,05 \cdot 10^{13} I^3}{a U^2}\right) \left(1 - \frac{4,4 I}{U}\right) \left(1 - \frac{17,24 \cdot 10^{-5} T}{U}\right)},$$

где I – ток, А, l – значение глубины камеры, α – эффективная площадь собирающего электрода, U – абсолютное значение собирающего напряжения, T – температура, К.

Созданный эталон обладает метрологическими характеристиками, представленными в таблице 1.

В настоящее время продолжают работы по уточнению метрологических и технических характеристик эталона.



Рис. 5. Общий вид эталона

Выводы

Эталон предназначен для воспроизведения, хранения и передачи размера единиц индивидуального и Ambientного эквивалента мощности дозы бета-излучения, мощности поглощенной дозы бета-

Таблица 1

Наименование метрологических характеристик	Полученное значение метрологических характеристик
Диапазон установки расстояний между электродами экстраполяционной камеры	от 250 до 2 950 мкм
Погрешность установки расстояний между электродами экстраполяционной камеры, не более	2 мкм
Токи утечки экстраполяционной камеры, не более	5 фА
Диаметр подвижного электрода экстраполяционной камеры	(30,312 ± 0,005) мм
Диапазон перемещения блока излучателя	от 110 до 1 000 мм
Погрешность перемещения блока излучателя, не более	±50 мкм
Диаметр однородного поля при использовании выравнивающих фильтров, не менее	100 мм
Мощность поглощенной дозы	
БИП-50 № 091, на расстоянии 200 см	9,457 мГр/ч
КАСВ14466 № АК-4523, на расстоянии 300 см	603,8 мГр/ч
БИС-50 № 097, на расстоянии 300 см	54,77 мГр/ч
БИС-10 № 245, на расстоянии 300 см	81,77 мГр/ч
Диапазон воспроизведения мощности поглощенной дозы бета-излучения	от 4 мГр/ч до 4 Гр/ч
Неопределенность воспроизведения мощности поглощенной дозы бета-излучения	от 3 до 5 %

излучения рабочим средствам измерений, применяемым в области радиационной безопасности, радиационной медицины, атомной энергетики, а также в различных отраслях машиностроения и приборостроения с целью обеспечения единства измерений в Республике Беларусь. Благодаря новому эталону в республике создается общепринятая в мире система метрологического обеспечения средств измерений индивидуальных дозиметров бета-излучения и дозиметров бета-излучения для контроля безопасности персонала и состояния окружающей среды, соответствующая требованиям международных стандартов.

 Список использованной литературы

1. Measurement Techniques / W. G. Cross [et al.] // ICRU. – 1997. – Vol. 29, Iss. 1. – P. 33–55.
2. ISO 6980-2:2004 Nuclear energy – Reference beta-particle radiation – Part 2: Calibration funda-

mentals related to basic quantities characterizing the radiation field.

3. Technical Protocol «EUROMET supplementary comparison of absorbed dose rate in tissue for beta radiation» / EUROMET project No. 739 BIPM KCDB: EUROMET.R(I)-S2, 2005.

5. IAEA-TECDOC-1274 Calibration of photon and beta ray sources used in brachytherapy, IAEA. – Vienna, 2002.

6. Böhm, J. The perturbation correction factor of ionisation chambers in beta-radiation fields / J. Böhm // Phys. Med. Biol. – 1980. – Vol. 25, № 1. – P. 65.

Сергей Александрович СОРОКА,

начальник отдела измерений ионизирующих излучений БелГИМ;

Кирилл Андреевич КРИВЕЦКИЙ,

инженер отдела измерений ионизирующих излучений БелГИМ

Дата поступления 20.01.2020