

Государственный первичный эталон единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы и потока энергии рентгеновского и гамма-излучений

А. В. ОБОРИН, А. Ю. ВИЛЛЕВАЛЬДЕ, С. Г. ТРОФИМЧУК

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, С.-Петербург, Россия, e-mail: oav@vniim.ru

Рассмотрено современное состояние государственного первичного эталона единиц кермы в воздухе, экспозиционной дозы, их мощностей и потока энергии рентгеновского и гамма-излучений ГЭТ 8-2011, модернизация которого проводилась в 2007—2011 гг. Описаны состав эталона, принципы его работы, метрологические характеристики. Приведены результаты ключевых сличений.

Ключевые слова: эталон, керма в воздухе, экспозиционная доза, поток энергии, рентгеновское и гамма-излучения, ключевые сличения.

Present state of national primary standard of air kerma, air kerma rate, exposure, exposure rate and energy flux for X-rays and gamma radiation improved in 2007—2011 is considered. The standard structure, principles of operation and metrological characteristics are described. Key comparison results are represented.

Key words: standard, air kerma, exposure, energy flux, X-rays, gamma radiation, key comparison.

Государственный первичный эталон экспозиционной дозы и мощности экспозиционной дозы был создан в 1938 г. для обеспечения единства, точности и достоверности дозиметрических измерений [1]. Эти величины в дозиметрии рентгеновского и гамма-излучений в то время были базовыми. Совершенствование эталона в последующие годы было направлено на удовлетворение потребностей страны, связанных с развитием атомной энергетики, производства генерирующих и радионуклидных источников излучений, и обусловлено созданием новых дозиметрических средств измерений. Модернизация государственного первичного эталона проводилась в 1969 и 1982 гг. В 1982 г. к числу величин, воспроизводимых и передаваемых эталоном, был добавлен поток энергии рентгеновского излучения.

Согласно рекомендациям Международной комиссии по радиационным единицам (МКРЕ) [2], а также Постановлению Правительства РФ [3] в настоящее время в качестве базовой физической величины для описания полей косвенно ионизирующих излучений, в том числе рентгеновского и гамма, применяется керма. В отличие от экспозиционной дозы керма определена для взаимодействия незаряженных частиц с любым веществом и не имеет ограничения по измерению при энергиях свыше 3 МэВ. Керма (от англ. Kinetic Energy Released per Mass) — это отношение суммы первоначальных кинетических энергий всех заряженных ионизирующих частиц, возникающих под действием косвенно ионизирующего излучения в элементарном объеме специального вещества, к массе этого вещества [4]. Для фотонного излучения в качестве специального вещества применяют воздух. Единицей измерения кермы в системе СИ является грэй. В соответствии с рекомендациями Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) [5] керма в воздухе и ее мощность лежат в основе измерений операционных величин,

применяющихся в области радиационной безопасности населения и персонала, охраны окружающей среды: амбиентного, направленного, индивидуального эквивалентов доз и их мощностей. При дозиметрических измерениях в диагностической радиологии наряду с кермой в воздухе применяются ее производные: керма в воздухе на площадь и керма в воздухе на длину. Кроме того, большое количество средств измерений экспозиционной дозы и ее мощности еще находится в обращении, и некоторые производители продолжают выпускать дозиметрические средства измерений, градуированные, помимо кермы, и в этих единицах.

Требования к точности дозиметрических измерений зависят от сферы их применения. Согласно современным рекомендациям, погрешность дозиметрических измерений в лучевой терапии не должна превышать 3 % при внешнем облучении и 5 % при внутреннем (брахитерапия), в рентгеновской диагностике — 7 % [6, 7]. Погрешность измерений при индивидуальном дозиметрическом контроле персонала радиационно опасных объектов должна быть не более 30 % (15 % — при предельно допустимых уровнях облучения) [8].

С 2007 г. по 2011 г. во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева проводились работы по совершенствованию государственного первичного эталона: были модернизированы эталонные первичные измерительные преобразователи, в состав эталонных установок включены современные источники рентгеновского излучения и высокоточные измерительные приборы. В феврале 2012 г. был утвержден государственный первичный эталон единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы и потока энергии рентгеновского и гамма-излучений ГЭТ 8-2011. Метрологические характеристики эталона представлены в табл. 1.

Метрологические характеристики ГЭТ 8-2011

Наименование физической величины	Диапазон значений	Погрешность		Неопределенность				Нестабильность ν_0
		S_0	Θ_0	u_{0A}	u_{0B}	u_{0C}	U_0	
Керма в воздухе, Гр	$1 \cdot 10^{-7}$ —20	$1,1 \cdot 10^{-3}$ — $1,5 \cdot 10^{-3}$	$4,4 \cdot 10^{-3}$ — $8,6 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$ — $1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$ — $3,6 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$ — $3,9 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$ — $7,8 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
Мощность кермы в воздухе, Гр/с	$1 \cdot 10^{-8}$ —2							
Экспозиционная доза, Кл/кг	$3 \cdot 10^{-9}$ — $6 \cdot 10^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$ — $1,5 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$ — $8,3 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$ — $1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$ — $3,4 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$ — $3,7 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$ — $7,4 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
Мощность экспозиционной дозы, А/кг	$3 \cdot 10^{-10}$ — $6 \cdot 10^{-2}$							
Поток энергии, Вт	$2 \cdot 10^{-5}$ — $2 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$2,8 \cdot 10^{-2}$	—

Примечание. S_0 — среднее квадратическое отклонение результата измерений при числе независимых измерений 11; Θ_0 — неисключенная систематическая погрешность; u_{0A} , u_{0B} — стандартные неопределенности по типам А и В; u_{0C} — суммарная стандартная неопределенность; U_0 — расширенная неопределенность при $k = 2$; ν_0 — нестабильность эталона за год.

В состав государственного первичного эталона ГЭТ 8-2011 входят четыре эталонные установки, характеристики которых приведены в табл. 2. Также в эталон включены: набор источников гамма-излучения ИГИ; компаратор КПК-1 (набор полостных ионизационных камер объемом 0,02—10000 см³) для передачи единиц от первичного эталона вторичным и рабочим эталонам; спектрометр на основе полупроводникового детектора GLP-06165/05P5 для определения энергетического распределения рентгеновского излучения.

При воспроизведении единиц кермы в воздухе, экспозиционной дозы и их мощностей на эталонных установках УЭД 5-50М, УЭД 50-320 и ПИКЭ-1 используется ионизационный метод, основанный на измерении ионизационного эффек-

та, который возникает в веществе чувствительного объема ионизационной камеры под воздействием рентгеновского или гамма-излучения.

Эталонные установки УЭД 5-50М и УЭД 50-320. В качестве эталонных первичных измерительных преобразователей в этих установках применяются свободновоздушные ионизационные камеры плоскопараллельного типа. Измерительный объем таких камер со всех сторон окружен слоем воздуха, толщина которого превышает максимальную длину пробега заряженных частиц (вторичных электронов и ионов), рожденных в результате взаимодействия рентгеновского излучения с воздухом. Заряженные частицы собираются в электрическом поле камеры на собирающем электроде.

Таблица 2

Эталонные установки из состава ГЭТ 8-2011

Наименование	Первичный преобразователь	Диапазоны величин
УЭД 5-50М	Свободновоздушные ионизационные камеры ИК 5-20, ИК 20-60, ИК 10-100	Напряжение генерирования 5—50 кВ Мощность кермы в воздухе $4 \cdot 10^{-6}$ —2 Гр/с Керма в воздухе $4 \cdot 10^{-5}$ —20 Гр Мощность экспозиционной дозы $1,2 \cdot 10^{-7}$ — $6 \cdot 10^{-2}$ А/кг Экспозиционная доза $1,2 \cdot 10^{-6}$ — $6 \cdot 10^{-1}$ Кл/кг
УЭД 50-320	Свободновоздушные ионизационные камеры ИК 10-100, ИК 70-300	Напряжение генерирования 50—320 кВ Мощность кермы в воздухе $3 \cdot 10^{-6}$ — $1 \cdot 10^{-2}$ Гр/с Керма в воздухе $3 \cdot 10^{-5}$ —1 Гр Мощность экспозиционной дозы $9 \cdot 10^{-8}$ — $3 \cdot 10^{-4}$ А/кг Экспозиционная доза $9 \cdot 10^{-7}$ — $3 \cdot 10^{-2}$ Кл/кг
ПИКЭ-1	Графитовые полостные ионизационные камеры ND1005, Ц30, ИКГ40/2-2, ИКГ80/4	Энергия фотонов 0,2—3 МэВ Мощность кермы в воздухе $1 \cdot 10^{-8}$ — $5 \cdot 10^{-3}$ Гр/с Керма в воздухе $1 \cdot 10^{-7}$ — $5 \cdot 10^{-2}$ Гр Мощность экспозиционной дозы $3 \cdot 10^{-10}$ — $1,5 \cdot 10^{-4}$ А/кг Экспозиционная доза $3 \cdot 10^{-9}$ — $1,5 \cdot 10^{-3}$ Кл/кг
УЭК-1	Калориметры КЛ-1, КПЭ-200	Напряжение генерирования 5—200 кВ Поток энергии $2 \cdot 10^{-5}$ — $2 \cdot 10^{-4}$ Вт

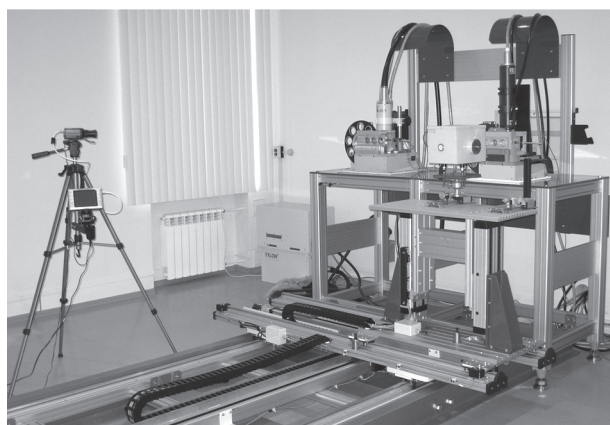


Рис. 2. Эталонная установка УЭД 5-50М

рующей способности электронов (k_e); искажение электрического поля в камере (k_d); рекомбинацию ионов (k_s); влияние диафрагмы камеры (k_{ap}); проникновение излучения через стенки камеры (k_p); реальную геометрию пучка излучения (k_g); недостаток электронного равновесия в камере (k_{CPE}); влияние влажности воздуха (k_h).

Поправочные коэффициенты k_a , k_s , k_p и k_h определяют экспериментально, а остальные рассчитываются с помощью компьютерного моделирования с применением метода Монте-Карло. Расчет поправочных коэффициентов k_{sc} , k_e , k_{ap} , k_g и k_{CPE} ионизационных камер из состава установок УЭД 5-50М и УЭД 50-320 проводился по программе EGSnrc [9].

На эталонной установке УЭД 5-50М созданы 38 режимов низкого энергетического диапазона, а на УЭД 50-320 воспроизводятся 37 режимов среднего энергетического диапазона рентгеновского излучения, в том числе режимы, служащие для передачи единиц в защитной дозиметрии [10]; режимы, применяющиеся для передачи единиц в рентгеновской диагностике (включая маммографию и томографию) [11, 12] и рентгенотерапии [13]; режимы для участия в ключевых сличениях ВІРМ.RI(I)-K2, ВІРМ.RI(I)-K3 и ВІРМ.RI(I)-K7 [14].

Для оценки спектрального состава режимов указанных установок используется спектрометр энергии рентгеновского излучения. С учетом энергетического спектра проводится расчет зависящих от энергии поправочных коэффициентов, входящих в уравнения воспроизведения единиц, и конверсионных коэффициентов для перехода к единицам операционных величин методом косвенных измерений.

Эталонная установка ПИКЭ-1. В качестве эталонных первичных измерительных преобразователей в этой установке применяются полостные графитовые ионизационные камеры цилиндрического типа, основные параметры которых приведены в табл. 4. Устройство полостной камеры показано на рис. 3.

Параметры полостных ионизационных камер выбирают на основании усовершенствованной теории Брэгга—Грея: толщину стенки камеры — больше максимального пробега заряженных частиц, образовавшихся в результате взаимодействия фотонов ионизирующего излучения в материале стенки, а полость камеры — достаточно малой, чтобы минимизировать вероятность взаимодействия фотонов данной энергии в полости.

В эталонной установке ПИКЭ-1 используется автоматизированная электроизмерительная система, аналогичная системам из состава эталонных установок УЭД 5-50М и УЭД 50-320.

При воспроизведении и передаче единиц кермы в воздухе и ее мощности, экспозиционной дозы и ее мощности на установке ПИКЭ-1 применяется набор источников гамма-излучения ИГИ из радионуклидов ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{226}Ra , устанавливаемых в типовые коллимационные устройства.

При воспроизведении единиц на эталонной установке ПИКЭ-1 с полостными ионизационными камерами керму в воздухе и экспозиционную дозу рассчитывают по формулам

$$K = \frac{Q}{m} \frac{W_{\text{air}}}{e} \frac{1}{1 - g_{\text{air}}} \left(\frac{\bar{\mu}_{en}}{\rho} \right)_{ac} \bar{s}_{ca} \prod_i k_i;$$

$$X = \frac{Q}{m} \left(\frac{\bar{\mu}_{en}}{\rho} \right)_{ac} \bar{s}_{ca} \prod_i k_i,$$

где $(\bar{\mu}_{en}/\rho)_{ac}$ — отношение массовых коэффициентов поглощения соответственно для воздуха и графита; \bar{s}_{ca} — отношение массовых тормозных способностей для графита и воздуха; $\prod_i k_i$ — произведение поправочных коэффициентов, учитывающих реальную плотность воздуха (k_p); влияние влажности воздуха (k_h); рекомбинацию ионов (k_s); рассеяние от держателя камеры (k_{st}); радиальную неравномерность пучка излучения (k_{rn}); ослабление и рассеяние излучения в стенках камеры (k_{wall}); аксиальную неравномерность пучка излучения (k_{an}).

Коэффициенты k_s , k_{st} , k_{rn} определяются экспериментально. Коэффициенты k_{wall} , k_{an} вычисляются при помощи компьютерного моделирования с применением метода Монте-Карло по программе EGSnrc [15]. Поскольку эти коэффициенты зависят от спектра воздействующего излучения, предварительно проводился расчет спектров гамма-излучения от радионуклидных источников из комплекта ИГИ по программе МСС [15].

Передача единиц кермы в воздухе, экспозиционной дозы и их мощностей в более широком диапазоне, чем они воспроизводятся на эталонных установках УЭД 5-50М, УЭД 50-320

Таблица 4

Параметры эталонных полостных ионизационных камер

Параметр	ND1005	Ц30	ИКГ40/2-2	ИКГ80/4
Внутренний диаметр, мм	11,022	32,10	31,77	71,90
Внутренняя высота, мм	10,985	37,20	32,02	71,78
Диаметр собирающего электрода, мм	2,001	2,00	2,7	3,0
Высота собирающего электрода, мм	10,424	25,9	15,0	40,0
Толщина стенки, мм	4	2+2 (колпачок)	2+2 (колпачок)	4
Объем, см ³	1,0204	30,024	25,30	291,2
Плотность графита, г/см ³	1,73	1,63	1,66	1,66
Напряжение, В	± 250	± 400	± 400	± 500

и ПИКЭ-1, осуществляется с помощью компаратора КПК-1 — набора полостных ионизационных камер объемами 0,02—10000 см³.

Эталонная установка УЭК-1. При воспроизведении единицы потока энергии рентгеновского излучения на этой установке исполь-

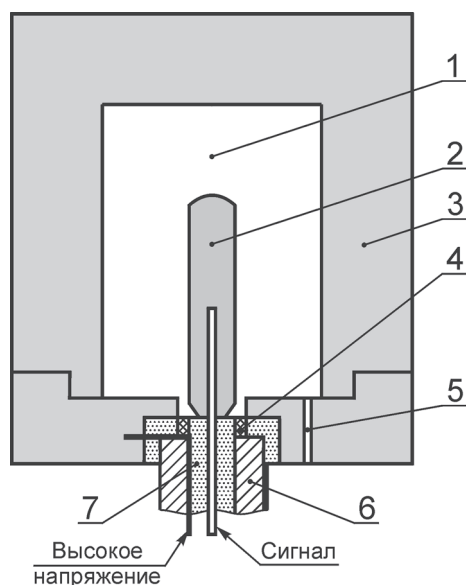


Рис. 3. Схема устройства графитовых полостных эталонных ионизационных камер:

1 — измерительный объем; 2, 3 — собирающий и потенциальный электроды; 4 — изолятор; 5 — вентиляционный канал; 6 — держатель; 7 — изолятор кабеля

зуется калориметрический метод измерений, основанный на измерении тепловой энергии, полученной калориметрическим детектором в результате преобразования энергии воздействующего рентгеновского излучения. В состав установки входят два изотермических дифференциальных калориметра КЛ-1 и КПЭ-200, параметры которых приведены в табл. 5. Устройство калориметра КЛ-1 показано на рис. 4.

Поглотители в обоих калориметрах выполнены в форме таблеток из свинца для обеспечения наиболее полного поглощения энергии рентгеновского излучения. Для компенсации влияния флуктуаций температуры окружающей среды используется дифференциальная схема измерений, по которой изменение температуры рабочего поглотителя определяется относительно температуры компенсационного поглотителя, идентичного рабочему. Изменение напряжения неравновесия моста постоянного тока при работе с калориметром КЛ-1 или изменении напряжения на термобатарее калориметра КПЭ-200 находится при помощи измерительной системы установки УЭК-1 при поочередном нагреве рабочего поглотителя калориметра рентгеновским излучением и электрическим током градуировки за одинаковый интервал времени.

Таблица 5

Основные параметры эталонных калориметров

Параметр	КПЭ-200	КЛ-1
Толщина входного окна (материал), мм	0,028 (Al)	0,051 (Be)
Расстояние от входного окна до центра рабочего поглотителя, мм	25,7	46,5
Диаметр коллиматора, мм	26,0	14,5
Толщина поглотителя (Pb), мм	3,01	2,99
Возможность вакуумирования	Нет	Да
Сопротивление нагревателя, Ом	120,5	105,4
Термопреобразователь	Термобатарея	Термосопротивление

При воспроизведении единицы потока энергии на эталонной установке УЭК-1 поток рассчитывается по формуле

$$\dot{R} = \frac{\Delta U_Q}{\Delta U_G} I_G^2 r_H \prod_i k_i,$$

где ΔU_Q , ΔU_G — изменения напряжения неравновесия моста постоянного тока калориметра КЛ-1 при нагреве поглотителя соответственно под действием рентгеновского излучения и при градуировке электрическим током за одинаковый интервал времени Δt , отнесенные к его длительности, или изменения напряжения термобатареи калориметра КПЭ-200 при нагреве поглотителя соответственно под действием рентгеновского излучения и при градуировке электрическим током за одинаковый интервал времени Δt , отнесенные к его длительности, В/с; $I_G = U_0/r_0$ — сила электрического тока, протекающего по нагревателю поглотителя во время градуировки калориметра, А; U_0 — падение напряжения на резисторах магазина сопротивлений, используемого при градуировке калориметра, В; r_0 — суммарное сопротивление резисторов в магазине сопротивлений, установленное при градуировке калориметра, Ом; r_H — сопротивление нагревателя поглотителя, Ом; $\prod_i k_i$ — произведение поправочных коэф-

фициентов, учитывающих неполное поглощение рентгеновского излучения в рабочем поглотителе (k_{loss}); потери энергии излучения в поглотителе за счет процессов рассеяния (k_{sc}); ослабление энергии излучения во входном окне калориметра (k_{ap}); ослабление энергии излучения слоем воздуха между входным окном и рабочим поглотителем калориметра (k_{att}); неидентичность источников тепла в процессе градуировки и под действием рентгеновского излучения (k_{uni}).

Поправочные коэффициенты калориметров определяются расчетным путем. В качестве поля воздействующего рентгеновского излучения при воспроизведении и передаче единицы потока энергии применяются поля эталонных установок УЭД 5-50М и УЭД 50-320.

Ключевые сличения. Метрологические характеристики первичного эталона ГЭТ 8-2011 в 2009 — 2011 гг. были подтверждены результатами ключевых сличений по керме в воздухе при использовании гамма-излучения ^{60}Co и ^{137}Cs —

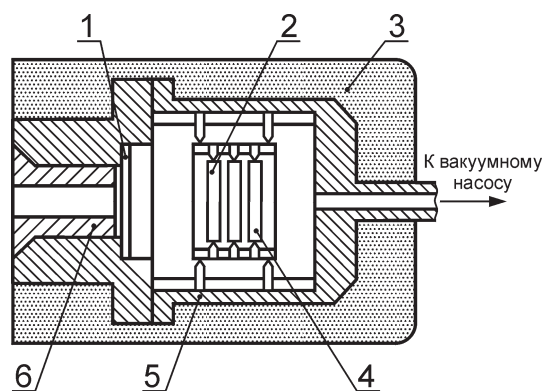


Рис. 4. Схема устройства эталонного дифференциального изотермического калориметра КЛ-1:

1 — входное окно; 2, 4 — рабочий и компенсационный поглотители; 3 — пассивный термостат; 5 — корпус калориметра; 6 — входной коллиматор

BIPM.RI(I)-K1 [16] и BIPM.RI(I)-K5 [17], а также рентгеновского излучения низкого (5—50 кВ) и среднего (100—250 кВ) энергетических диапазонов — BIPM.RI(I)-K2 [18] и BIPM.RI(I)-K3 [19]. За опорное значение кермы в воздухе в ключевых сличениях с Международным Бюро мер и весов (МБМВ) принималось значение, воспроизводимое его эталоном.

Сличения проводили косвенным методом с применением полостных ионизационных камер из состава компаратора КПК-1: их калибровочные коэффициенты определяли во ВНИИМ и МБМВ. Результаты сличений представлены в табл. 6 в виде степеней эквивалентности D_K с расширенными стандартными неопределенностями U_0 при коэффициенте охвата $k = 2$ [16—19]. Степени эквивалентности определены в соответствии с выражением

$$D_K = 1000 (R_K - 1),$$

где R_K — отношение калибровочных коэффициентов камер, полученных во ВНИИМ и МБМВ.

Таблица 6

Результаты ключевых сличений по керме в воздухе

Код сличений	Режим излучения	D_K , мГр/Гр	U_0 , мГр/Гр
BIPM.RI(I)-K1	^{60}Co	0,8	3,6
BIPM.RI(I)-K2	CCRI10	-3,2	4,7
	CCRI30	-2,1	4,7
	CCRI25	-2,2	4,7
	CCRI50b	-1,3	4,7
	CCRI50a	-0,7	4,7
BIPM.RI(I)-K3	CCRI100	1,4	3,6
	CCRI135	1,8	3,6
	CCRI180	2,6	3,6
	CCRI250	2,6	3,6
BIPM.RI(I)-K5	^{137}Cs	1,3	5,4

Значения кермы в воздухе, воспроизводимые на государственном первичном эталоне ГЭТ 8-2011, согласуются в пределах расширенной неопределенности ($k = 2$) с опорным значением кермы в воздухе во всем энергетическом диапазоне.

Государственный первичный эталон ГЭТ 8-2011 возглавляет систему метрологического обеспечения дозиметрических измерений в медицине, экологии, санитарии, биологии, ядерной энергетике, приборостроении и в ряде других областей. Эталон удовлетворяет современным отечественным и международным требованиям по точности и диапазонам воспроизведения и передачи единиц.

Л и т е р а т у р а

1. **Поройков И. В., Аглинцев К. К.** О воспроизведении рентгена с помощью эталонного измерительного устройства // Труды ВНИИМ. 1938. Вып. 17(33). С. 5—6.

2. **ICRU Report 85.** Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation // J. ICRU. 2011. V. 11. N 1.

3. **Постановление** Правительства РФ от 31.10.2009 № 879 «Об утверждении положения о единицах величин, допускаемых к применению в Российской Федерации».

4. **PMG 78—2005.** ГСИ. Излучения ионизирующие и их измерения. Термины и определения.

5. **ICRP Publ. 103.** The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Ann. ICRP 37 (2—4).

6. **МУ 2.6.1.2135—06.** Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при лучевой терапии закрытыми радионуклидными источниками.

7. **IAEA Techn. Reports Series № 457.** Dosimetry in Diagnostic Radiology: An International Code of Practice. Vienna, 2007.

8. **ICRU Report 20.** Radiation Protection Instrumentation and Its Application. Bethesda (MD, USA), 1971.

9. **Oborin A. V. e. a.** Progress Report on Radiation Dosimetry at the VNIIM // CCRI(I)/11-05, CCRI(I): 20th meeting. Sevres, 2011.

10. **ISO 4037-4.** X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy. Pt. 4. Calibration of area and personal dosimeters in low energy X reference radiation fields. 2004.

11. **IEC-61267.** Medical Diagnostic X-ray Equipment — Radiation Conditions for Use in the Determination of Characteristics. Geneva, 2005.

12. **ГОСТ Р МЭК 61267—2001.** Аппараты рентгеновские медицинские диагностические. Условия измерений при определении характеристик.

13. **ГОСТ 8.087—2000.** ГСИ. Установки дозиметрические рентгеновского и гамма-излучений эталонные. Методика поверки по мощности экспозиционной дозы и мощности кермы в воздухе.

14. **Allisy-Roberts P. J., Burns D. T., Kessler C.** Measuring conditions and uncertainties for the comparison and calibration of national dosimetric standards at the BIPM. Rapport BIPM-2011/04.

15. **Kharitonov I. A., Oborin A. V., Villevalde A. Yu.** Changes to the VNIIM air kerma primary standard // Metrologia. 2007. V. 44. P. L71—72.

16. **Kessler C. e. a.** Comparison of the standards for air kerma of the VNIIM and the BIPM for ^{60}Co gamma radiation // Metrologia. 2011. V. 48. Tech. Suppl. 06001.

17. **Kessler C. e. a.** Comparison of the standards for air kerma of the VNIIM and the BIPM for ^{137}Cs gamma radiation // Ibid. 06003.

18. **Burns D. T. e. a.** Key comparison BIPM.RI(I)-K2 of the air-kerma standards of the VNIIM, Russian Federation and the BIPM in low-energy x-rays // Metrologia. 2012. V. 49. Tech. Suppl. 06003.

19. **Burns D. T. e. a.** Key comparison BIPM.RI(I)-K3 of the air-kerma standards of the VNIIM, Russian Federation and the BIPM in medium-energy x-rays // Metrologia. 2011. V. 48. Tech. Suppl. 06004.

Дата принятия 20.04.2012 г.