

Государственный первичный эталон единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы и потока энергии рентгеновского и гамма-излучений ГЭТ 8-2019

А. В. Оборин, А. Ю. Виллевальде, С. Г. Трофимчук

Всероссийский научно-исследовательский институт им. Д. И. Менделеева,
Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: oav@vniim.ru,
vay@vniim.ru, tsg@vniim.ru

Описаны результаты работ по совершенствованию Государственного первичного эталона единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы и потока энергии рентгеновского и гамма-излучений ГЭТ 8-2011. Работы выполнены в 2019 г. в целях реализации рекомендаций отчёта № 90 Международной комиссии по радиационным единицам и измерениям «Ключевые данные для дозиметрии ионизирующих излучений: эталоны и применение». В уравнения воспроизведения единиц величин на ГЭТ 8-2019 внесены следующие изменения: в области рентгеновского излучения введены новые поправочные коэффициенты свободно-воздушных ионизационных камер и изменено значение относительной стандартной неопределённости средней энергии ионообразования, в области гамма-излучения изменены значения произведения средней энергии ионообразования на отношение массовых тормозных способностей графита к воздуху при измерениях с полостными ионизационными камерами. Уточнены воспроизводимые ГЭТ 8-2019 значения единиц величин.

Ключевые слова: эталон, рентгеновское излучение, гамма-излучение, керма в воздухе, экспозиционная доза, свободно-воздушная ионизационная камера, полостная ионизационная камера.

Ионизирующие излучения, в том числе гамма-излучение и рентгеновское, находят широкое применение во многих отраслях российской экономики. Измерения дозиметрических величин, характеризующих поля ионизирующих излучений и меру их влияния на человека, являются одними из самых массовых измерений в области метрологии ионизирующих излучений. Дозиметрия повсеместно используется в радиационной диагностике и терапии, радиационной защите и при промышленном применении излучения.

Государственный первичный эталон единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы и потока энергии рентгеновского и гамма-излучений составляет основу метрологического обеспечения дозиметрических измерений в Российской Федерации. Более чем за восьмидесятилетний период существования эталон неоднократно совершенствовался и модернизировался, результаты модернизации 2007–2011 гг. представлены в [1].

Предпосылкой для очередного усовершенствования Государственного первичного эталона единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы и потока энергии рентгеновского и гамма-излучений ГЭТ 8-2011 стало внедрение

в отечественную практику эталонных дозиметрических измерений данных и рекомендаций Отчёта № 90 Международной комиссии по радиационным единицам и измерениям (МКРЕ) [2]. Работы по совершенствованию ГЭТ 8-2011 выполнены во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева в период с января по сентябрь 2019 г. Государственный первичный эталон единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы и потока энергии рентгеновского и гамма-излучений ГЭТ 8-2019 утверждён Приказом Росстандарта № 3386 от 27 декабря 2019 г.

Влияние Отчёта № 90 МКРЕ на эталонные дозиметрические измерения. Основными методами эталонных измерений в дозиметрии ионизирующих излучений традиционно являются ионизационный, основанный на применении свободно-воздушных и полостных ионизационных камер, и калориметрический, предполагающий использование различных калориметров. Современная реализация указанных методов измерений предполагает использование численных методов моделирования взаимодействия излучения с материалами, входящими в конструкцию эталонного измерительного преобразователя. При этом для получения корректных результатов измерений и вычислений необходимо

знание базовых величин или ключевых данных, описывающих взаимодействие излучения с веществом: фотонных сечений взаимодействия, тормозных способностей, средней энергии ионизации в различных веществах и др. Анализ и систематизация полученных данных, а также разработка рекомендаций по их использованию являются задачами МКРЕ с момента её создания в 1925 г.

В октябре 2016 г. МКРЕ опубликовала Отчёт № 90 «Ключевые данные для дозиметрии ионизирующих излучений: эталоны и применение» [2]. Отчёт № 90 МКРЕ содержит полученные в результате современных исследований новые значения ключевых данных, влияющих на результаты воспроизведения единиц дозиметрических величин первичными эталонами. Для анализа этого влияния Консультативным комитетом по ионизирующим излучениям Международного бюро мер и весов была создана специальная рабочая группа [3]. В основном сведения из Отчёта № 90 МКРЕ касаются воспроизведения кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы и мощности экспозиционной дозы рентгеновского излучения с помощью свободно-воздушных эталонных ионизационных камер и гамма-излучения с помощью графитовых полостных эталонных ионизационных камер. Рекомендации Отчёта № 90 МКРЕ направлены на уточнение воспроизводимых значений единиц величин, а также на изменение их неопределённости.

По состоянию на 2019 г. большинство национальных метрологических институтов заявили о принятии Отчёта № 90 МКРЕ и использовании новых ключевых данных при воспроизведении и передаче единиц величин.

Состав ГЭТ 8-2019. В состав ГЭТ 8-2019 входят следующие установки:

УЭД 5-50М и УЭД 50-320 со свободно-воздушными ионизационными камерами для воспроизведения единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы и мощности экспозиционной дозы рентгеновского излучения при напряжении генерирования соответственно 5–50 кВ и 50–320 кВ;

ПИКЭ-1 с набором полостных ионизационных камер из графита для воспроизведения единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы и мощности экспозиционной дозы гамма-излучения с энергией фотонов 0,2–3 МэВ;

УЭК-1 с калориметрами для воспроизведения единицы потока энергии рентгеновского излучения при напряжениях генерирования 5–200 кВ.

Также в состав ГЭТ 8-2019 входят: набор источников гамма-излучения переменного состава ИГИ; компаратор КПК-1 (набор полостных ионизационных камер объёмом 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.

Использование ключевых данных и рекомендаций Отчёта № 90 МКРЕ в ГЭТ 8-2019. Работа установок УЭД 5-50М,

УЭД 50-320 и ПИКЭ-1 основана на ионизационном методе, поэтому ключевые данные и рекомендации Отчёта № 90 МКРЕ оказывают непосредственное влияние на характеристики ГЭТ 8-2019 при воспроизведении единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы и мощности экспозиционной дозы на этих установках.

Отчёт № 90 МКРЕ не затрагивает вопросы воспроизведения единицы потока энергии рентгеновского излучения калориметрическим методом, поэтому ключевые данные и рекомендации Отчёта № 90 МКРЕ не повлияли на метрологические характеристики эталонной установки УЭК-1.

В установках УЭД 5-50М и УЭД 50-320 в качестве эталонных измерительных преобразователей для воспроизведения единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы и мощности экспозиционной дозы используются свободно-воздушные ионизационные камеры. Воспроизведение единиц величин осуществляется в соответствии со следующими уравнениями:

$$K = \frac{Q}{m} \frac{W_{air}}{e} \frac{1}{1 - g_{air}} k_a k_{sc} k_e k_d k_s k_{ap} k_p k_g k_{CPE} k_{ij} k_w k_h;$$

$$\dot{K} = \frac{I}{m} \frac{W_{air}}{e} \frac{1}{1 - g_{air}} k_a k_{sc} k_e k_d k_s k_{ap} k_p k_g k_{CPE} k_{ij} k_w k_h;$$

$$X = \frac{Q}{m} k_a k_{sc} k_e k_d k_s k_{ap} k_p k_g k_{CPE} k_h;$$

$$\dot{X} = \frac{I}{m} k_a k_{sc} k_e k_d k_s k_{ap} k_p k_g k_{CPE} k_h,$$

где $K, \dot{K}$ – керма и мощность кермы в воздухе соответственно; $X, \dot{X}$ – экспозиционная доза и мощность экспозиционной дозы соответственно; Q – заряд, собранный в ионизационной камере за время измерения; I – сила ионизационного тока в ионизационной камере; m – масса воздуха в измерительном объёме ионизационной камеры; W_{air}/e – средняя энергия, затрачиваемая на образование пары ионов в воздухе (средняя энергия ионизации); g_{air} – доля энергии электронов, идущая на тормозное излучение; k_a – поправочный коэффициент, учитывающий ослабление излучения в воздухе камеры; k_{sc} – поправочный коэффициент, учитывающий рассеяние излучения и флуоресценцию фотонов; k_{ap} – поправочный коэффициент, учитывающий неполное использование ионизирующей способности электронов (потери электронов); k_d – поправочный коэффициент, учитывающий искажение электрического поля в камере; k_s – поправочный коэффициент, учитывающий рекомбинацию ионов; k_{ap} – поправочный коэффициент, учитывающий влияние диафрагмы камеры; k_p – поправочный коэффициент, учитывающий проникновение излучения через стенки камеры; k_g – поправочный коэффициент, учитывающий реальную геометрию пучка излучения; k_{CPE} – поправочный коэффициент, учитывающий недостаток электронного равновесия в камере; k_{ij} – поправочный коэффициент, учитывающий начальную ионизацию; k_w – поправочный коэффициент, учитывающий зависимость средней энергии ионизации от энергии;

k_h – поправочный коэффициент, учитывающий влияние влажности воздуха.

Поправочные коэффициенты k_a , k_s , k_p определяли экспериментально, а поправочные коэффициенты k_{sc} , k_e , k_d , k_{ap} , k_g , k_{CPE} , k_h рассчитывали методами численного моделирования [4–6].

При воспроизведении единиц кермы в воздухе и мощности кермы в воздухе на установках УЭД 5-50М и УЭД 50-320 ключевые данные и рекомендации Отчёта № 90 МКРЕ учтены посредством следующих нововведений:

относительная стандартная неопределённость средней энергии ионизации $W_{air}/e=33,97$ Дж/Кл увеличена с 0,15 до 0,35 %;

в уравнения измерений кермы в воздухе и мощности кермы в воздухе введены два новых поправочных коэффициента: k_{ij} , k_w .

Значение W_{air}/e , определяется для воздействующих заряженных частиц и учитывает заряд, порождённый этими частицами, когда они замедляются до состояния покоя. В то же время в W_{air}/e не учитывается заряд изначально заряженной частицы (в случае фотонного излучения – заряд, порождённый начальным событием ионизации), тогда как он тоже собирается эталонной измерительной системой. Таким образом, поправочный коэффициент k_{ij} вводится для учёта избыточного заряда и правильной оценки энергии, поглощённой веществом. Поскольку при проведении измерений со свободно-воздушными камерами рекомендуется использовать постоянное значение W_{air}/e , то чтобы учесть увеличение W_{air}/e под влиянием неионизирующих процессов при энергии воздействующего излучения меньше 10 кэВ, вводится поправочный коэффициент k_w . По своей природе k_{ij} , k_w не зависят от конструкции свободно-воздушных камер.

Произведение поправочных коэффициентов $k_{ij}k_w$ эталонных свободно-воздушных ионизационных камер из состава установок УЭД 5-50М и УЭД 50-320 рассчитано на основании данных для моноэнергетических фотонов,

представленных в Отчёте № 90 МКРЕ, путем взвешивания значений $k_{ij}k_w$ по измеренным энергетическим спектрам режимов рентгеновского излучения установок.

В установке ПИКЭ-1 в качестве эталонных измерительных преобразователей для воспроизведения единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы и мощности экспозиционной дозы используются полостные графитовые ионизационные камеры. Воспроизведение единиц осуществляется в соответствии со следующими уравнениями:

$$K = \frac{Q}{m} \frac{W_{air}}{e} \frac{1}{1-g_{air}} \left(\frac{\bar{\mu}_{en}}{\rho} \right)_{air,g} \bar{s}_{g,air} k_p k_h k_s k_{st} k_m k_{wall} k_{an};$$

$$\dot{K} = \frac{I}{m} \frac{W_{air}}{e} \frac{1}{1-g_{air}} \left(\frac{\bar{\mu}_{en}}{\rho} \right)_{air,g} \bar{s}_{g,air} k_p k_h k_s k_{st} k_m k_{wall} k_{an};$$

$$X = \frac{Q}{m} \left(\frac{\bar{\mu}_{en}}{\rho} \right)_{air,g} \bar{s}_{g,air} k_p k_h k_s k_{st} k_m k_{wall} k_{an};$$

$$\dot{X} = \frac{I}{m} \left(\frac{\bar{\mu}_{en}}{\rho} \right)_{air,g} \bar{s}_{g,air} k_p k_h k_s k_{st} k_m k_{wall} k_{an};$$

где $(\bar{\mu}_{en}/\rho)_{air,g}$ – отношение массовых коэффициентов поглощения для воздуха и графита; $\bar{s}_{g,air}$ – отношение массовых тормозных способностей для графита и воздуха; k_p – коэффициент, учитывающий реальную плотность воздуха; k_{st} – коэффициент, учитывающий рассеяние от держателя камеры; k_m – коэффициент, учитывающий радиальную неравномерность пучка излучения; k_{wall} – коэффициент, учитывающий ослабление и рассеяние излучения в стенках камеры; k_{an} – коэффициент, учитывающий аксиальную неравномерность пучка излучения.

Поправочные коэффициенты k_s , k_{st} , k_m определяли экспериментально, остальные – методами численного моделирования [5, 7].

В Отчёте № 90 МКРЕ содержатся новые данные, связанные с определением отношения тормозных способностей графита к воздуху $\bar{s}_{g,air}$, которое используется при воспроизведении единиц с помощью эталонных полостных графитовых ионизационных камер:

значение средней энергии возбуждения графита I_g увеличено с 78 до 81 эВ с соответствующим уменьшением стандартной неопределённости с 4 до 1,8 эВ;

Метрологические характеристики ГЭТ 8-2019

Характеристика	Керма в воздухе, мощность кермы в воздухе	Экспозиционная доза, мощность экспозиционной дозы	Поток энергии
Диапазон измерений величины	$1 \cdot 10^{-7}$ – 20 Гр, $1 \cdot 10^{-8}$ – 2 Гр/с	$3 \cdot 10^{-9}$ – $6 \cdot 10^{-1}$ Кл/кг, $3 \cdot 10^{-10}$ – $6 \cdot 10^{-2}$ А/кг	$2 \cdot 10^{-5}$ – $2 \cdot 10^{-4}$ Вт
S_0	$1,1 \cdot 10^{-3}$ – $1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$ – $1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$
θ_0	$4,2 \cdot 10^{-3}$ – $1,1 \cdot 10^{-2}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$ – $8,2 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$
Стандартная неопределённость по типу А u_{0A}	$1,1 \cdot 10^{-3}$ – $1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$ – $1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$
по типу В u_{0B}	$1,7 \cdot 10^{-3}$ – $4,6 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$ – $3,4 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$
суммарная u_{0c}	$2,0 \cdot 10^{-3}$ – $4,8 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$ – $3,7 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$
Расширенная неопределённость при коэффициенте охвата $k=2$ U_0	$4,0 \cdot 10^{-3}$ – $9,6 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$ – $7,4 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-2}$
Нестабильность эталона за год u_0	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	–

плотность графита ρ_g рекомендуется принимать равной кристаллической плотности графита 2,265 г/см³ при оценке эффекта плотности графита.

С учётом новых данных по I_g и ρ_g получены новые значения произведений средней энергии ионизации и отношения массовых тормозных способностей графита к воздуху $(W_{air}/e)\bar{s}_{g,air}$, используемые в уравнениях воспроизведения единиц величин на установке ПИКЭ-1 при измерениях с эталонными полостными графитовыми ионизационными камерами. Так, для гамма-излучения кобальта-60 $(W_{air}/e)\bar{s}_{g,air}=33,72$ эВ с относительной стандартной неопределённостью 0,08 % при $\bar{s}_{g,air}=0,9928$, для гамма-излучения цезия-137 $(W_{air}/e)\bar{s}_{g,air}=34,05$ эВ с относительной стандартной неопределённостью 0,12 % при $\bar{s}_{g,air}=1,0023$ [8].

Метрологические характеристики ГЭТ 8-2019. Метрологические характеристики ГЭТ 8-2019, определённые в результате исследований с учётом данных и рекомендаций Отчёта № 90 МКРЕ, приведены в таблице, где S_o – относительное среднее квадратическое отклонение результата измерений при количестве измерений $n=15$, θ_o – относительная неисключённая систематическая погрешность.

В результате значения единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы и мощности экспозиционной дозы, воспроизводимые ГЭТ 8-2019, уточнены с использованием приведённых в Отчёте № 90 МКРЕ современных ключевых данных в области дозиметрии фотонного излучения. В области рентгеновского излучения уточнённые значения единиц кермы в воздухе и мощности кермы уменьшились по сравнению с воспроизводимыми ранее до 0,5 %. В области гамма-излучения уточнённые значения единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы и мощности экспозиционной дозы уменьшились по сравнению с воспроизводимыми ранее до 0,8 %.

Ключевые данные Отчёта № 90 МКРЕ внедрены на международном уровне, поэтому степени эквивалентности национальных эталонов, полученные ранее в международных сличениях, сохраняются неизменными. Результаты ключевых и дополнительных сличений, выполненных в период 2009–2016 гг., подтверждают соответствие основных метрологических характеристик ГЭТ 8-2019 характеристикам национальных эталонов ведущих зарубежных стран.

Заключение. Дозиметрические измерения, реализующиеся на ГЭТ 8-2019, гармонизированы с современной международной практикой и удовлетворяют требованиям к точности и диапазону воспроизведения и передачи единиц. С помощью ГЭТ 8-2019 реализуются все функции, связанные с поддержанием единства измерений в стране в соответствии с мировыми метрологическими стандартами: поверка и калибровка дозиметрических средств измерений, испытания и сертификация приборостроительной продукции и источников фотонного излучения, проведение ключевых и дополнительных сличений.

Список литературы

1. Оборин А. В., Виллеальде 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.
2. ICRU Report No. 90 Key Data for Ionizing-Radiation Dosimetry: Measurement Standards and Applications, *Journal of the International Commission on Radiation Units and Measurements*, 2014, vol. 14, Iss. 1.
3. McEwen M. et al., Rapp B. Report to CCRI(I) on the recommendations of ICRU Report 90, 2017.
4. Burns D. T., Buermann L., *Metrologia*, 2009, vol. 46, pp. S9–S23. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/46/2/S02>
5. Kawrakow I. et al., The EGSnrc Code System: Monte Carlo simulation of electron and photon transport, Technical Report PIRS-701, 2017, National Research Council Canada.
6. Mainegra-Hing E., Reynaert N., Kawrakow I., *Med. Phys.*, 2008, 35(8), pp. 3650–3660. <https://doi.org/10.1118/1.2955551>
7. Burns D. T., Buermann L., *Metrologia*, 2009, vol. 46, pp. S24–S38. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/46/2/S03>
8. Burns D. T., Kessler C., *Metrologia*, 2018, vol. 55, R21. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aacb01>

References

1. Oborin A. V., Villevalde A. Y., Trofimchuk S. G., *Measurement Techniques*, 2012, vol. 55, no. 8, pp. 849–857. <https://doi.org/10.1007/s11018-012-0050-8>
2. ICRU Report No. 90 Key Data for Ionizing-Radiation Dosimetry: Measurement Standards and Applications, *Journal of the International Commission on Radiation Units and Measurements*, 2014, vol. 14, Iss. 1.
3. McEwen M. et al., Rapp B. Report to CCRI(I) on the recommendations of ICRU Report 90, 2017.
4. Burns D. T., Buermann L., *Metrologia*, 2009, vol. 46, pp. S9–S23. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/46/2/S02>
5. Kawrakow I. et al., The EGSnrc Code System: Monte Carlo simulation of electron and photon transport, Technical Report PIRS-701, 2017, National Research Council Canada.
6. Mainegra-Hing E., Reynaert N., Kawrakow I., *Med. Phys.*, 2008, 35(8), pp. 3650–3660. <https://doi.org/10.1118/1.2955551>
7. Burns D. T., Buermann L., *Metrologia*, 2009, vol. 46, pp. S24–S38. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/46/2/S03>
8. Burns D. T., Kessler C., *Metrologia*, 2018, vol. 55, R21. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aacb01>

Дата поступления: 22.04.2020.

Дата принятия: 22.05.2020.

National primary standard of air kerma, air kerma rate, exposure, exposure rate and energy flux for X-rays and gamma radiation GET 8-2019

Alexandr V. Oborin, Anna Y. Villevalde, Sergey G. Trofimchuk

*D. I. Mendeleev Institute for Metrology (VNIIM), St. Petersburg, Russian Federation,
e-mail: oav@vniim.ru, vay@vniim.ru, tsg@vniim.ru*

The results of development of the national primary standard of air kerma, air kerma rate, exposure, exposure rate and energy flux for X-rays and gamma radiation GET 8-2011 in 2019 are presented according to the recommendations of the ICRU Report No. 90 "Key Data for Ionizing-Radiation Dosimetry: Measurement Standards and Applications". The following changes are made to the equations for the units determination with the standard: in the field of X-rays, new correction coefficients of the free-air ionization chambers are introduced and the relative standard uncertainty of the average energy to create an ion pair in air is changed; in the field of gamma radiation, the product of the average energy to create an ion pair in air and the electron stopping-power graphite to air ratio for the cavity ionization chambers is changed. More accurate values of the units reproduced by GET 8-2019 are obtained and new metrological characteristics of the standard are stated.

Key words: standard, X-rays, gamma radiation, air kerma, exposure, free-air ionization chamber, cavity ionization chamber.