

К ВОПРОСУ О МЕТРОЛОГИЧЕСКОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ПРОИЗВЕДЕНИЯ ДОЗЫ НА ПЛОЩАДЬ

А.Ю. Виллевалде^{1,2}, А.В. Оборин¹

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева*, Санкт-Петербург

² *Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина)*, Санкт-Петербург

Описаны особенности измерителей произведения дозы на площадь, которые следует учитывать при определении доз облучения пациентов во время рентгенодиагностических исследований. Разъясняется понятие измеряемой величины произведения дозы на площадь. Рассматриваются основные метрологические и технические характеристики измерителей произведения дозы на площадь и обсуждаются вопросы их метрологического обеспечения, в том числе приводятся основные методы поверки. Даны рекомендации по корректному применению измерителей произведения дозы на площадь.

Ключевые слова: *рентгенодиагностика, произведение дозы на площадь, средства измерения, зависимость чувствительности от энергии, поверка*

Введение

В современной дозиметрической практике измерения произведения дозы на площадь (далее – ПДП) широко применяются при оценке дозы облучения пациентов во время рентгенодиагностических исследований. В основе общепринятого метода получения ПДП при этом лежит использование специализированных средств измерений – измерителей ПДП.

Принцип действия измерителей ПДП основан на ионизационном методе измерений рентгеновского излучения. В состав измерителей ПДП входят полостные проходные плоскопараллельные ионизационные камеры с пластиковыми стенками. Ионизационная камера измерителя ПДП обычно устанавливается на штатное место диагностического рентгеновского аппарата, расположенное на выходном окне коллиматора рентгеновской трубки, под

ее кожухом. Ионизационные камеры, которые устанавливаются между оптическим центратором рентгеновского аппарата и местом расположения пациента, имеют прямоугольную форму и оптически прозрачны. Геометрические размеры измерительного объема ионизационной камеры превышают сечение поля рентгеновского излучения в месте расположения камеры. Под действием рентгеновского излучения, проходящего через измерительный объем ионизационной камеры измерителя ПДП, в ней протекает ионизационный ток, пропорциональный произведению мощности дозы на площадь облучаемой поверхности. Этот ионизационный ток интегрируется измерительной схемой измерителя за время действия излучения.

Основное преимущество ПДП заключается в том, что эта величина практически не зависит от расстояния до фокуса рентгеновской

трубки, если пренебречь взаимодействием излучения с окружающим воздухом, и если плоскость измерений расположена достаточно далеко от плоскости размещения пациента, чтобы можно было не учитывать влияние излучения, рассеянного от пациента.

Произведение дозы на площадь

Произведение дозы на площадь согласно ГОСТ IEC 60580-2011 [1] – это произведение кермы в воздухе в поперечном сечении пучка излучения на площадь сечения этого пучка, причем обе величины должны быть измерены на одном и том же расстоянии от фокуса рентгеновской трубки. Единицы измерения ПДП: Гр·м² (мкГр·м², сГр·см², мГр·см²). ПДП является производной величиной от одной из базовых физических величин в дозиметрии – кермы в воздухе. В международных документах величина ПДП носит название произведения кермы в воздухе на площадь и определяется как интеграл кермы в воздухе по площади пучка рентгеновского излучения в плоскости, перпендикулярной оси пучка излучения:

$$P_{ка} = \int_A K(x,y) dx dy \approx K \cdot A, \quad (1)$$

где K – керма в воздухе; A – площадь сечения пучка излучения в плоскости измерений; x, y – координаты в плоскости измерений [2]. Однако фактически наименование и способы выражения величины ПДП не всегда соответствуют современным нормативным документам.

В названии величины ПДП присутствует неоднозначность, вследствие которой измерители ПДП, применяющиеся на территории Российской Федерации, калибруются как в единицах произведения кермы в воздухе на площадь сечения пучка излучения в соответствии с определением ПДП, так и в единицах произведения поглощенной дозы в воздухе на площадь сечения пучка излучения. Тем не менее, использование на практике величины поглощенной дозы в воздухе при проведении измерений с помощью измерителей ПДП является затруднительным из-за отсутствия равновесия вторичных электронов, образовавшихся под воздействием рентгеновского излучения на границе раздела стенки ионизационной камеры и воздуха, который ее заполняет.

В отличие от кермы в воздухе, которая, если пренебречь ослаблением излучения, не зависит от расстояния до границы раздела сред, поглощенная доза в воздухе постепенно накап-

ливается по мере удаления от границы раздела. Ширина области накопления при этом зависит от длины пробега в воздухе вторичных электронов с наиболее высокой энергией и определяется спектром воздействующего рентгеновского излучения. Из-за неопределенного характера поглощенной дозы в воздухе вблизи границы раздела сред невозможно преобразовать ее для данного рентгеновского пучка, например, в дозу для органов с помощью единственного коэффициента преобразования, как обычно происходит при переходе от кермы в воздухе [2]. В этом случае применение поглощенной дозы в воздухе оказывается не только некорректным, но и малоинформативным.

Основные метрологические и технические характеристики измерителей ПДП

Требования к точности дозиметрических измерений с целью контроля облучения населения при рентгенодиагностике установлены в международных и отечественных документах: погрешность измерения дозы, переданной пациенту, не должна превышать $\pm 7\%$ согласно международным рекомендациям [2] и $\pm 15\%$ в соответствии с регламентирующими документами Российской Федерации [3].

В настоящее время в Госреестр средств измерений Российской Федерации включены 20 типов измерителей ПДП. Все приборы, кроме дозиметров рентгеновского излучения клинических ДРК, ДРК-1 и дозиметров рентгеновского излучения эталонных ДРК-1П, откалиброваны в единицах произведения кермы в воздухе на площадь. Согласно описанию типа средства измерений, калибровка ДРК выполнена в единицах произведения кермы или поглощенной дозы в воздухе на площадь, ДРК-1 и ДРК-1П – в единицах произведения поглощенной дозы в воздухе на площадь. В табл. 1 представлено сравнение значений основных характеристик некоторых измерителей ПДП, применяющихся на территории Российской Федерации, с допустимыми значениями этих характеристик согласно ГОСТ IEC 60580-2011 [1]. Видно, что не все измерители ПДП в полной мере соответствуют современным требованиям.

В основном, измерители ПДП обладают значительной энергетической зависимостью чувствительности, определяемой относительно стандартного режима, на котором проводится калибровка. Эту зависимость чувствительности следует учитывать при измерении ПДП в

Таблица 1

Основные метрологические и технические характеристики измерителей ПДП

Наименование	Рабочий диапазон U_{anode}	h_{eq} , не более	Диапазон измерений ПДП	ПДП	Диапазон измерений ПМДП	ПМДП	δ_e , не более	$\delta_{ка}$, не более	δ_A , не более
Допустимые значения по ГОСТ IEC 60580-2011	от 50 до 150 кВ	0,5 мм Al	от 0,1 до 10^6 мкГр·м	при ПДП < 10 мкГр·м $\pm(10\% + 1 \text{ е. м. р.})\%$, при ПДП > 10 мкГр·м $\pm 10\%$	от 0,01 до 10^4 мкГр·м / с	при ПМДП < 1 мкГр·м ² /с $\pm(10\% + 1 \text{ е. м. р.})\%$, при ПМДП > 1 мкГр·м ² /с $\pm 10\%$	$\pm 8\%$	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$
ДРК (модификации ДРК-1, ДРК-1М, ДРК-1Э)	от 20 до 200 кВ	от 0,5 до 1,5 мм Al	от 1,0 до 10^4 мкГр·м от 0,1 до 10^9 мкГр·м от 0,08 до 10^9 мкГр·м	$\pm 15\%$ $\pm 5\%$	от 0,6 до $6 \cdot 10^4$ мкГр·м / с	$\pm 15\%$ $\pm 5\%$	от $\pm 2\%$ до $\pm 8\%$	-	-
ДРК-1П	от 30 до 200 кВ	-	от 1 до 10^4 сГр·см	$\pm(7\% + 35/\text{ПДП})\%$	-	-	$\pm 25\%$	-	$\pm 5\%$
KermaX plus 120-132	от 50 до 150 кВ	0,5 мм Al	от 0,1 до 999999,9 мкГр·м	$\pm(7\% + 5/\text{ПДП})\%$	от 0,1 до $3 \cdot 10^4$ мкГр·м / с	$\pm(7\% + 5/\text{ПМДП})\%$	$\pm 8\%$	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$
KermaX-plus DDP	от 50 до 150 кВ	0,5 мм Al	от 0,1 до 99999,99 мкГр·м	$\pm(7\% + 5/\text{ПДП})\%$	от 0,1 до $3 \cdot 10^3$ мкГр·м / с	$\pm(7\% + 1/\text{ПМДП})\%$	$\pm 8\%$	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$
KermaX plus 120-160 LFD	от 40 до 150 кВ	0,3 мм Al	от 0,1 до 42949672,96 мкГр·м	$\pm(7\% + 1/\text{ПДП})\%$	от 0,1 до $6,5 \cdot 10^3$ мкГр·м / с	$\pm(7\% + 1/\text{ПМДП})\%$	$\pm 8\%$	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$
KermaX plus 120-130 CAN	от 40 до 150 кВ	0,3 мм Al	от 0,1 до 99999999,99 мкГр·м	$\pm(7\% + 1/\text{ПДП})\%$	от 0,1 до $2,5 \cdot 10^3$ мкГр·м / с	$\pm(7\% + 1/\text{ПМДП})\%$	$\pm 8\%$	$\pm 4\%$	$\pm 3\%$
KermaX plus 120-160 EAS	от 40 до 150 кВ	0,3 мм Al	от 0,1 до 42949673 мкГр·м	$\pm(7\% + 1/\text{ПДП})\%$	от 0,1 до $3 \cdot 10^3$ мкГр·м / с	$\pm(7\% + 1/\text{ПМДП})\%$	$\pm 8\%$	$\pm 2\%$	$\pm 2\%$
VacuDap System (модификации VacuDAP-01, VacuDAP-C)	от 40 до 150 кВ	0,2 мм Al 0,5 мм Al	от 0,1 до 10^7 мкГр·м от 1 до 10^7 мкГр·м	$\pm 15\%$	от 6 до $2,8 \cdot 10^5$ мкГр·м ² /м ин от 60 до $2,2 \cdot 10^6$ мкГр·м ² /м ин от 6,0 до $6 \cdot 10^4$ мкГр·м ² /м ин	$\pm 15\%$	$\pm 8\%$ $\pm 5\%$	-	-
DIAMENTOR K1S T11028, K2S T11029	от 50 до 150 кВ	0,2 мм Al 0,3 мм Al	от 1,0 до 10^6 мкГр·м	$\pm 10\%$	-	-	$\pm 10\%$ $\pm 8\%$	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$

Обозначения в таблице: U_{anode} – анодное напряжение рентгеновской трубки; h_{eq} – эквивалент по ослаблению ионизационной камеры; ПДП – произведение кермы в воздухе на площадь; δ – пределы допускаемой основной относительной погрешности; ПМДП – произведение мощности кермы в воздухе на площадь; δ_e – энергетическая зависимость чувствительности; $\delta_{ка}$ – дополнительная погрешность, вызванная зависимостью чувствительности измерителя от мощности произведения кермы в воздухе на площадь; δ_A – дополнительная погрешность, вызванная зависимостью чувствительности измерителя от площади облучения; е.м.р. – единица младшего разряда

полям с режимами рентгеновского излучения, отличающимися от стандартного. Для всех приборов из табл. 1, кроме дозиметров рентгеновского излучения клинических ДРК и дозиметров клинических для контроля радиологи-

ческих процедур VacuDap System, стандартный режим – это режим с анодным напряжением 100 кВ по ГОСТ Р МЭК 61267-2001 [4]; для ДРК и VacuDap System – режим с анодным напряжением 70 кВ.

Ионизационные камеры измерителей ПДП не являются герметичными, поэтому показания измерителей ПДП зависят от изменения массы воздуха в измерительном объеме их ионизационных камер. В свою очередь, изменения массы воздуха в камере зависят от изменения его плотности, которое определяется отличием температуры, давления и относительной влажности воздуха от значений, соответствующих нормальным условиям. Дополнительный нагрев воздуха в месте расположения ионизационной камеры измерителя ПДП под кожухом диагностического рентгеновского аппарата может возникать за счет работы рентгеновской трубки и оптического центратора рентгеновского аппарата.

Некоторые из находящихся в обращении измерителей ПДП оснащены системами измерения температуры воздуха и атмосферного давления и автоматически вводят в свои показания соответствующую поправку на изменение плотности воздуха. Если же автоматическая коррекция не предусмотрена, производители большинства измерителей ПДП в руководствах по эксплуатации указывают на необходимость умножать показания измерителя ПДП на поправочный коэффициент, учитывающий отличие плотности воздуха в камере от плотности воздуха при нормальных условиях измерений. При этом расчет поправочного коэффициента рекомендуется выполнять по формуле:

$$k_p = p_0 T / p T_0, \quad (2)$$

где $p_0 = 101,325$ кПа, и $T_0 = 293,15$ К – соответственно атмосферное давление и температура воздуха при нормальных условиях, p и T – соответственно атмосферное давление и температура воздуха в условиях проведения измерений.

Так, например, если в реальных условиях проведения измерений атмосферное давление и температура воздуха составляют $p = 99$ кПа и $T = 23^\circ\text{C} = 296,15$ К соответственно, то поправочный коэффициент k_p на отличие плотности воздуха в ионизационной камере измерителя ПДП от плотности воздуха при нормальных условиях измерений приблизительно составит 3,4 %. Если не корректировать показания измерителя ПДП на k_p , это приведет к соответствующей погрешности в результате измерений ПДП.

Метрологическое обеспечение измерителей ПДП

Приборы, применяющиеся при проведении рентгенодиагностики, в том числе измерители ПДП, в Российской Федерации относятся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений и подлежат обязательной метрологической поверке. Поверка выполняется в целях подтверждения соответствия средств измерений установленным метрологическим требованиям.

Уверенность в точном измерении доз, полученных пациентами, может быть обеспечена только при реализации прослеживаемости этих измерений к национальным эталонам. В основе метрологического обеспечения дозиметрических измерений в России лежат Государственный первичный эталон (ГПЭ) кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы и потока энергии рентгеновского и гамма-излучений ГЭТ 8-2011, содержащийся в ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», и ГПЭ единиц поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы фотонного и электронного излучений ГЭТ 38-2011, содержащийся в ФГУП «ВНИИФТРИ». Прослеживаемость измерений от ГЭТ 8-2011 и ГЭТ 38-2011 реализуется на основании поверочных схем ГОСТ Р 8.804-2012 и ГОСТ 8.070-2014 соответственно [5, 6].

Согласно Приказу Минпромторга Российской Федерации № 1815 от 2.07.2015 г. [7, 8], средства измерений, предназначенные для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, до ввода в эксплуатацию, а также после ремонта подлежат первичной поверке, а в процессе эксплуатации – периодической поверке. Поверка измерителей ПДП производится по методикам поверки, которые разрабатываются при проведении испытаний в целях утверждения типа средств измерений. Основные операции поверки измерителей ПДП, методы проведения поверки и эталонное оборудование, применяемое при поверке, указаны в табл. 2.

Операции поверки измерителей ПДП при контроле их метрологических характеристик обычно включают:

1. Определение основной относительной погрешности измерителя при измерениях произведения кермы в воздухе на площадь и произведения мощности кермы в воздухе на площадь (выполняется при первичной и периодической поверке).

Таблица 2

Методы поверки измерителей ПДП

Вид поверки	Основные операции поверки	Метод проведения поверки	Эталоны, применяющиеся при поверке
Первичная	1. Определение основной погрешности	С демонтажем в поверочной лаборатории	Поверочная дозиметрическая установка
	2. Определение энергетической зависимости чувствительности	Без демонтажа на месте эксплуатации	Дозиметр кермы в воздухе рентгеновского излучения
Периодическая	Определение основной погрешности	Без демонтажа на месте эксплуатации	Дозиметр кермы в воздухе рентгеновского излучения; измеритель ПДП

2. Определение энергетической зависимости чувствительности измерителя (выполняется, как правило, только при первичной поверке).

Поверка измерителей ПДП может проводиться как с демонтажем поверяемого прибора, так и на месте его эксплуатации. При этом может применяться следующее оборудование согласно поверочной схеме ГОСТ Р 8.804-2012 [5]: рабочие эталоны 1-го разряда – поверочная дозиметрическая установка рентгеновского излучения и дозиметр кермы в воздухе рентгеновского излучения, а также рабочий эталон 2-го разряда – измеритель ПДП. Согласно поверочной схеме ГОСТ 8.070-2014 [6], прослеживаемость измерений с измерителями ПДП может быть организована к вторичным эталонам единиц поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы рентгеновского излучения в воде – дозиметрическим эталонным установкам с источниками рентгеновского излучения с ионизационными камерами, а также к рабочим эталонам 2-го разряда – измерителям ПДП.

Чаще всего первичная поверка измерителей ПДП проводится на эталонных дозиметрических установках рентгеновского излучения (с демонтажем поверяемого прибора). При этом применяется метод косвенных измерений произведения кермы или мощности кермы в воздухе на площадь. В основе метода лежит измерение кермы или мощности кермы в воздухе в опорной точке поля рентгеновского излучения эталонной установки и определение линейных размеров поля рентгеновского излучения в плоскости, проходящей через эту опорную точку и перпендикулярной оси пучка рентгеновского излучения. Действительное значение произведения кермы или мощности кермы в

воздухе на площадь рассчитывается из результатов измерений указанных величин.

Формирование поля рентгеновского излучения заданных размеров в месте расположения ионизационной камеры измерителя ПДП допускается производить с использованием свинцовых или вольфрамовых пластин толщиной не менее 10 мм, имеющих калиброванные отверстия и такие геометрические размеры, чтобы полностью перекрывать камеру измерителя.

Поверка измерителей ПДП на дозиметрических установках может проводиться как по входному, так и по прошедшему через камеру измерителя излучению и не учитывает ослабление и рассеяние излучения, которые могут возникать в реальных условиях эксплуатации при установке камеры измерителя на штатное место рентгеновского аппарата, например, под кожух рентгеновской трубки. Если поверка проводится по входному излучению, дополнительно определяется коэффициент ослабления излучения ионизационной камерой измерителя ПДП, который следует учитывать при выполнении измерений на месте эксплуатации. Оценить влияние условий эксплуатации измерителя ПДП, в том числе ослабления и рассеяния излучения, на его показания можно, сравнив показания измерителя ПДП при установке его ионизационной камеры на штатное место рентгеновского аппарата и на большем расстоянии от фокуса рентгеновской трубки (как при поверке).

Если измеритель ПДП невозможно демонтировать, и он не был поверен перед установкой на рентгеновский аппарат, первичная поверка измерителя ПДП может проводиться на месте его эксплуатации. В этом случае поверка выполняется методом косвенных измерений с помощью эталонного дозиметра кермы в

воздухе рентгеновского излучения с полостной ионизационной камерой объемом не более 1 см^3 . Для определения действительного значения произведения кермы или мощности кермы в воздухе на площадь при этом используется значение кермы или мощности кермы в воздухе, усредненное по плоскости поперечного сечения поля излучения в месте расположения ионизационной камеры эталонного дозиметра. Коэффициент учета неоднородности поля излучения вычисляется, исходя из относительно распределения мощности кермы в воздухе при равномерном перемещении ионизационной камеры эталонного дозиметра по двум взаимно перпендикулярным осям в плоскости поперечного сечения поля излучения. Размер поля излучения в месте расположения ионизационной камеры эталонного дозиметра при этом следует определять по рентгеновскому снимку, по световому полю рентгеновского аппарата или другим способом с погрешностью, не превышающей $\pm 3 \%$.

Поверка измерителей ПДП без демонтажа позволяет учесть влияние условий эксплуатации прибора на его показания. С другой стороны, точное определение площади и неоднородности поля излучения в месте расположения ионизационной камеры эталонного дозиметра может вызвать значительные затруднения.

Первичная поверка, помимо определения основной погрешности измерителя ПДП, должна включать определение зависимости чувствительности измерителя ПДП от энергии воздействующего излучения на нескольких режимах излучения в диапазоне рабочих значений анодного напряжения (обычно от 50 до 150 кВ).

Чувствительность измерителя ПДП определяется относительно стандартного режима (обычно режим с анодным напряжением 100 кВ по ГОСТ Р МЭК 61267-2001 [4]). Кроме того, для каждого j -го режима излучения необходимо найти зависящий от энергии излучения поправочный множитель C_j , который рассчитывается как отношение действительного значения произведения кермы или мощности кермы в воздухе на площадь $(KA)_{0j}$ к показанию прибора M_j :

$$C_j = (KA)_{0j} / M_j. \quad (3)$$

Полученные значения поправочных множителей нормируются к значению поправочного множителя, полученному для стандартного режима, и приводятся в свидетельстве о первичной поверке измерителя ПДП. Эти множи-

тели рекомендуется использовать для получения результатов измерений ПДП при эксплуатации измерителей ПДП в условиях, отличных от условий калибровки.

Проблемы, возникающие при определении энергетической зависимости чувствительности измерителей ПДП на месте эксплуатации, обычно бывают вызваны трудностями при задании параметров режимов излучения на медицинских рентгеновских аппаратах, вплоть до невозможности ручного ввода этих параметров (например, в некоторых ангиографах).

Периодическая поверка измерителей ПДП подразумевает, как правило, только определение основной погрешности прибора и, помимо методов первичной поверки, может проводиться на месте эксплуатации тандемным методом с помощью эталонного измерителя ПДП. При этом необходимо, чтобы эталонный измеритель был откалиброван по входному излучению. Ионизационная камера эталонного измерителя ПДП устанавливается в центре поля излучения между выходным окном рентгеновской трубки и местом размещения пациента таким образом, чтобы минимизировать влияние рассеянного от эталонного измерителя ПДП излучения на поверяемый прибор. Размер поля излучения в месте расположения эталонного измерителя ПДП не должен превышать размеры рабочей площади его ионизационной камеры.

Основное преимущество тандемного метода – его простота. Для получения действительного значения произведения кермы или мощности кермы в воздухе на площадь с эталонным измерителем ПДП не требуется определять площадь и учитывать неоднородность поля излучения в месте расположения эталонного прибора [9].

Трудности при выполнении поверки с помощью эталонного измерителя ПДП могут возникнуть, если режимы излучения при поверке отличаются от тех, на которых был откалиброван эталонный прибор. Тогда при определении действительного значения произведения кермы или мощности кермы в воздухе на площадь следует учесть энергетическую зависимость чувствительности эталонного измерителя ПДП.

В случае положительных результатов поверки на измеритель ПДП выдается свидетельство о поверке установленного образца. Помимо результатов поверки в свидетельство реко-

мендуется включать следующую информацию согласно применявшейся методике поверки:

- ✓ о виде излучения, по которому проводилась поверка (входное или прошедшее через измеритель ПДП);
- ✓ о режимах рентгеновского излучения, на которых проводилась поверка;
- ✓ в случае первичной поверки значения поправочного множителя C_j , учитывающего зависимость чувствительности измерителя ПДП от энергии, для заданных режимов излучения с указанием погрешности определения этого множителя;
- ✓ в случае поверки по входному излучению, значение коэффициента ослабления излучения ионизационной камерой измерителя ПДП.

Рекомендации

Корректное применение измерителей ПДП для учета доз облучения пациентов при проведении рентгенодиагностических исследований может быть обеспечено в случае соблюдения следующих рекомендаций:

1. Измеритель ПДП должен быть откалиброван в единицах произведения кермы в воздухе на площадь сечения пучка излучения в плоскости измерений.
2. Измерения ПДП с помощью измерителя ПДП следует проводить с учетом необходимых поправок и дополнительных погрешностей измерителя, в том числе присущей измерителям ПДП зависимости чувствительности от энергии воздействующего излучения. В общем случае результат измерений ПДП следует определять по формуле:

$$P_{ка} = M \cdot k_p \cdot C_j, \quad (4)$$

где M – показания измерителя ПДП; k_p – поправочный коэффициент учета отличия плотности воздуха в камере измерителя от плотности воздуха при нормальных условиях измерений и рассчитываемый по формуле (2); C_j – поправочный множитель учета зависимости чувствительности измерителя ПДП от энергии для данного режима излучения. Поправочный коэффициент k_p следует вводить в результат измерений ПДП только в том случае, если в измерителе ПДП не предусмотрена соответствующая автоматическая коррекция показаний.

Оценку суммарной погрешности измерений ПДП с измерителем ПДП следует проводить с учетом дополнительных погрешностей, при-

сущих данному виду средств измерений. Согласно рекомендациям Р 50.2.038-2004 [10] суммарная погрешность измерений ПДП при доверительной вероятности 0,95 будет определяться как:

$$\Delta(0,95) = 1,1 \sqrt{\delta^2 + \delta_{ка}^2 + \Delta_p^2 + \Delta_j^2}, \quad (5)$$

где δ – основная погрешность измерителя при измерении произведения кермы в воздухе на площадь; $\delta_{ка}$ – дополнительная погрешность, вызванная зависимостью чувствительности измерителя от мощности произведения кермы в воздухе на площадь; δ_A – дополнительная погрешность, вызванная зависимостью чувствительности измерителя от площади облучения; Δ_p – погрешность поправочного коэффициента k_p , учитывающего отличие плотности воздуха в камере измерителя от плотности воздуха при нормальных условиях измерений; Δ_j – погрешность поправочного множителя C_j , учитывающего зависимость чувствительности измерителя ПДП от энергии, для данного режима излучения. При этом значения основной погрешности измерителя ПДП δ и погрешности поправочного множителя C_j должны быть указаны в свидетельстве о поверке на измеритель ПДП, значения дополнительных погрешностей $\delta_{ка}$ и δ_A , как правило, содержатся в документации на измеритель ПДП, а значение погрешности поправочного коэффициента k_p определяется, исходя из погрешностей измерения входящих в формулу (2) величин – температуры воздуха и атмосферного давления.

3. Поверка измерителя ПДП должна проводиться своевременно с применением допустимых методов поверки. При выборе метода поверки следует учитывать достоинства и недостатки каждого из них. Первичная поверка должна включать определение зависимости чувствительности измерителя от энергии воздействующего рентгеновского излучения.

Список литературы

1. ГОСТ ИЕС 60580-2011 Изделия медицинские электрические. Измерители произведения дозы на площадь.

2. IAEA Technical Reports Series № 457. Dosimetry in Diagnostic Radiology: An International Code of Practice, 2007.
3. Приказ Минздрава Российской Федерации от 21.02.2014 г. № 81н “Об утверждении перечня измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, выполняемых при осуществлении деятельности в области здравоохранения, и обязательных метрологических требований к ним, в том числе показателей точности измерений”.
4. ГОСТ Р МЭК 61267-2001 Аппараты рентгеновские медицинские диагностические. Условия излучения при определении характеристик.
5. ГОСТ Р 8.804-2012 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Государственная поверочная схема для средств измерений 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 и потока энергии рентгеновского и гамма-излучений.
6. ГОСТ 8.070-2014 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Государственная поверочная схема для средств измерений поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы, эквивалента дозы и мощности эквивалента дозы фотононного и электронного излучений.
7. Приказ Минпромторга Российской Федерации № 1815 от 2.07.2015 г. «Об утверждении Порядка проведения поверки средств измерений, требований к знаку поверки и содержанию свидетельств о поверке».
8. Приказ Минпромторга Российской Федерации № 5329 от 28.12.2018 «О внесении изменений в приказ Минпромторга Российской Федерации от 2.07.2015 г. № 1815 “Об утверждении Порядка проведения поверки средств измерений, требования к знаку поверки и содержанию свидетельства о поверке”».
9. Toroi P. Field calibration of KAP meters. Radiation and Nuclear Safety Authority. STUK, Finland, 7.11.2008 (<http://ncrrp.org/projects/bg-fin/docs/19.pdf>, ссылка активна на 04.02.2020).
10. Р 50.2.038-2004 Измерения прямые однократные. Оценивание погрешностей и неопределенности результата измерений.

ON THE METROLOGICAL SUPPORT FOR DOSE-AREA PRODUCT METERS

A.Y. Villevalde^{1,2}, A.V. Oborin¹

¹ D.I. Mendeleev Institute for Metrology, Saint-Petersburg, Russia

² Saint-Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Saint-Petersburg, Russia

The features of dose-area product meters which should be taken into account when determining the patients' radiation doses during x-ray diagnostics are described. The concept of the dose-area product is explained. The basic metrological and technical characteristics of dose-area product meters are considered and the issues of their metrological support are discussed, including the main verification methods. Recommendations are given on the correct use of dose-area product meters.

Key words: *x-ray diagnostics, dose-area product, dose-area product meter, energy dependence of sensitivity, verification*

E-mail: vay@vniim.ru