

Критический анализ и предложения по совершенствованию существующей системы радиационного контроля в рентгеновских кабинетах

В.Ю. Голиков¹, А.В. Водоватов^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

В статье продемонстрированы недостатки существующей методики радиационного контроля в рентгеновских кабинетах и интерпретации получаемых с ее помощью результатов измерений для оценки соответствия условий труда различных групп облучаемых лиц требованиям радиационной безопасности. Предложена новая методика интерпретации результатов измерений, учитывающая относительное время пребывания отдельных категорий облучаемых лиц в соответствующих помещениях во время работы рентгеновского аппарата, а также наличие у работника в процедурной комнате средств индивидуальной защиты. Интерпретация результатов измерений в процедурной комнате, согласно предложенному подходу, продемонстрировала соответствие условий труда в отношении требований радиационной безопасности при условии использования работником средств индивидуальной защиты. Согласно предложенному подходу к интерпретации результатов измерений в смежных помещениях, возможно как ослабление, так и ужесточение требований к элементам стационарной защиты. Продемонстрирован некорректный алгоритм расчета защиты при размещении нескольких рентгеновских аппаратов в одном кабинете в рамках действующего подхода.

Ключевые слова: радиационная защита, радиационный контроль, медицинский рентгеновский кабинет, персонал, AMBIENTНЫЙ эквивалент дозы.

Введение

Существующая методика проведения радиационного контроля (РК) в рентгеновских кабинетах и интерпретация получаемых с ее помощью результатов измерений для оценки соответствия условий труда различных групп облучаемых лиц требованиям радиационной безопасности (РБ) была разработана и утверждена более 15 лет назад^{1,2}. К сожалению, часть ее положений, на наш взгляд, являются необоснованными, а часть к настоящему времени устарели и вызывают множество нареканий на практике.

Существенным недостатком действующей системы РК является некорректный учет категории облучаемых лиц и доли времени, проводимого ими в различных помещениях, при интерпретации результатов измерений мощности дозы рентгеновского излучения для облучаемых лиц, отличных от категории «персонал группы А», при оценке адекватности физической защиты помещения.

На этапе проектирования радиационной защиты для каждого помещения определяются категории лиц, которые могут в нем находиться (персонал группы А, Б, население) и максимальная доля рабочего времени, которое данные лица могут проводить в рассматриваемом поме-

¹ Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 18.02.2003 г. № 8 «О введении в действие СанПиН 2.6.1.1192-03» (СанПиН 2.6.1.1192-03. Гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских аппаратов и проведению рентгенологических исследований). (Зарегистрировано в Минюсте РФ 14.03.2003 г. № 4282). (Decree of the Chief state sanitary doctor of Russia #8, 18.02.2003 "On the establishment of the SanPiN 2.6.1.1192-03" [SanPiN 2.6.1.1192-03. Hygienic requirements on the construction and use of the X-ray units and radiography examinations). Registered in the Ministry of Justice of Russia № 4282, 14.03.2003]

² МУ 2.6.1.1982-05. Проведение радиационного контроля в рентгеновских кабинетах. Методические указания (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 25.04.2005 г.). [Methodical guidelines 2.6.1.1982-05. Radiation control in the X-ray units. Approved by the Chief state sanitary doctor of Russia 25.04.2005]

Голиков Владислав Юрьевич

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева.

Адрес для переписки: 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: sg235@rambler.ru

щении. При этом учитывается возможность работы рентгеновского аппарата в одну или две смены. Результатом является получение для каждого из рассматриваемых помещений проектных значений мощностей доз, т.е. максимальных значений усредненной за рабочее время мощности дозы (с учетом коэффициента запаса), которые не будут превышать установленные допустимые значения для соответствующих категорий облучаемых лиц.

Задачей радиационного контроля является получение усредненной за рабочее время мощности дозы в контролируемых помещениях для определения соответствия их установленным допустимым значениям для соответствующих категорий облучаемых лиц и помещений. Произведение измеренной мощности дозы на значение стандартной недельной рабочей нагрузки рентгеновского аппарата, деленное на анодный ток, при котором проводились измерения, является дозой, накопленной в точке измерения за неделю. Далее определяется аналогичная величина за год, а средняя за рабочее время мощность дозы получается делением этой величины на полное рабочее время в течение года, проводимое представителями соответствующей категории облучаемых лиц (персонал группы А, Б, население) в помещении соответствующей категории (процедурная, коридор, туалет и т.п.). Это время равно произведению $t_c \cdot n \cdot T$ (см. табл. 4.2, СанПиН 2.6.1.1192-03¹). Однако как в действующем СанПиН 2.6.1.1192-03, так и в действующих МУ 2.6.1.1982-05² значения параметров $t_c \cdot n$ и T , соответствующие категории облучаемых лиц персонала группы А ($t_c = 1500$ ч/год, $n = 1$, $T = 1$), применяются для всех категорий облучаемых лиц, что неверно.

Кроме того, методика РК была разработана применительно к измерениям мощности поглощенной дозы (кермы) в воздухе, тогда как в настоящее время подавляющее большинство приборов разработаны для измерений амбиентного эквивалента дозы. Не отражен в существующей методике РК также и тот факт, что в процедурной (вблизи источника излучения) персонал использует средства индивидуальной защиты (защитные фартуки, передники и пр.), тем самым существенно уменьшая облучение части тела.

Цель исследования – критический анализ существующей методики радиационного контроля полей рентгеновского излучения при его медицинском использовании в части, касающейся интерпретации результатов измерений, с целью оценки адекватности радиационной защиты персонала и разработка предложений по ее изменению.

Интерпретация результатов измерений для оценки адекватности радиационной защиты

Согласно современным принципам радиационной защиты, регламентируемые пределы доз облучения представителей различных групп облучаемых лиц (персонал, население) выражаются в терминах эквивалентных доз в органах и эффективной дозы (биофизические величины). Эти величины не являются измеримыми, и их оценка на практике проводится на основе физических или операционных, т.е. измеряемых величин [1].

Согласно ОСПОРБ 99/2010 (п. 3.3.4), «проектирование защиты от внешнего ионизирующего излучения должно выполняться с учетом назначения помещений,

категорий облучаемых лиц и длительности облучения. При расчете защиты с коэффициентом запаса, равным 2, проектная мощность эквивалентной дозы излучения H на поверхности защиты определяется по формуле:

$$H = \frac{500 \cdot D}{T}, \text{ мЗв/ч}$$

где: D – предел дозы для персонала или населения, мЗв/год;

T – продолжительность облучения, час/год».

То есть, согласно ОСПОРБ 99/2010, предлагается регламентировать эквивалентную дозу. К сожалению, в этом определении имеется существенная неточность. Понятие «Эквивалентная доза» относится исключительно к органу или ткани. В основе определения эквивалентной дозы облучения органа или ткани лежит величина средней поглощенной дозы в этом органе (ткани) и взвешивающего коэффициента излучения W_R , который характеризует источник излучения. Как в международных, так и в отечественных нормативах в области радиационной защиты есть определение термина «Эквивалентная доза облучения органа или ткани» и отсутствует определение термина «Эквивалентная доза» [2].

В действующем СанПиН 2.6.1.1192-03 регламентируется не биофизическая величина, а допустимая мощность дозы (ДМД) рентгеновского излучения за стационарной защитой в помещениях различного назначения. ДМД выражается в терминах физической измеряемой величины – мощности поглощенной дозы в воздухе (в области энергий рентгеновского излучения практически численно равной значению кермы в воздухе). При этом ДМД рассчитывается, исходя из значений пределов, установленных для эффективной дозы (биофизической величины), с использованием коэффициентов перехода от эффективной дозы к воздушной керме, сложным образом зависящих от энергии излучения и геометрии облучения человека:

$$\text{ДМД} = 10^3 \cdot \frac{\lambda \cdot ПД}{t_c \cdot n \cdot T}, \text{ мГр/ч}, \quad (1)$$

где λ – коэффициент перехода от эффективной дозы к воздушной керме, Гр/Зв.

Для расчета радиационной защиты с учетом двукратного запаса по ослаблению излучения значение λ в СанПиН 2.6.1.1192-03 принимается равным 1. Из этой не очень корректной формулировки следует, что само значение коэффициента перехода от эффективной дозы к воздушной керме было принято равным 2 Гр/Зв, что соответствует значению более употребляемого на практике коэффициента перехода от воздушной кермы к эффективной дозе $C^E = E/K_a = 0,5$ Зв/Гр.

Рассмотрим, как меняются значения коэффициента перехода C^E в области энергий рентгеновского излучения, используемого в медицине, т.е. в области энергий фотонов 20–140 кэВ, или напряжений на аноде трубки рентгеновского аппарата 50–140 кВ. Как указывалось выше, в действующем СанПин 2.6.1.1192-03 без каких либо объяснений C^E полагается равным 0,5 Зв/Гр. На самом деле все обстоит несколько сложнее. Коэффициент перехода C^E зависит от энергии фотонного излучения и геометрии облучения человека в поле этого излучения. На рисунке 1 представлены примеры энергетической зависимости C^E для двух наиболее вероятных геоме-

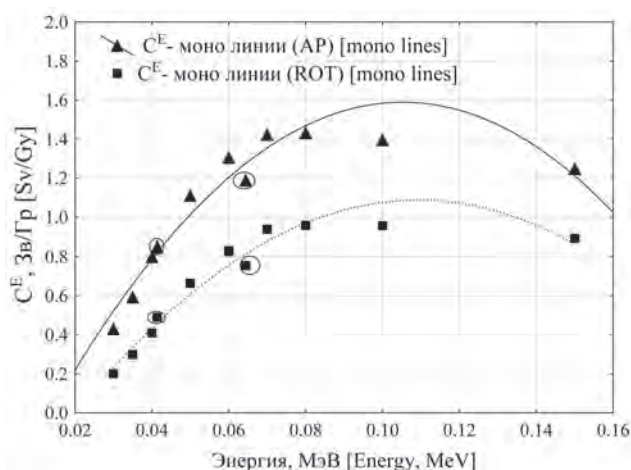


Рис. 1. Зависимость коэффициента перехода C^E от кермы в воздухе к эффективной дозе от энергии фотонного излучения для геометрии передне-заднего (AP) и ротационного (ROT) облучения человека

[Fig. 1. Relationship between the conversion coefficient from kerma in air to the effective dose C^E and the photon energy for the anterior – posterior (AP) and rotational geometry (ROT) of human exposure]

трий облучения медицинского персонала на рабочих местах, передне-заднего (AP) и ротационного (ROT). Эти зависимости были построены на основании данных Публикации 116 МКРЗ [3] для моноэнергетического фотонного излучения. Однако в реальности на рабочих местах медицинского персонала мы имеем дело со спектрами излучения. Поэтому нами на основании данных о реальных спектрах рентгеновского излучения [4] были рассчитаны значения C^E для двух спектров: 70 кВ, 4 мм Al (суммарный фильтр), $E_{cp} = 41,4$ кэВ (средняя энергия спектра) и 140 кВ, 4,5 мм Al, $E_{cp} = 62,7$ кэВ. Они также представлены на рисунке 1 (обведенные значки) и соответствуют значениям средней энергии спектров излучения. Непосредственно видно, что средняя энергия спектра вполне адекватно характеризует значение коэффициента перехода C^E .

Если рассчитать средние значения C^E в диапазоне напряжений на трубке рентгеновского аппарата от 50 до 140 кВ, то для передне-задней геометрии облучения это будет 1,1 Зв/Гр, а для ротационной – 0,7 Зв/Гр. Исходя из консервативных соображений, разумно использовать для персонала геометрию облучения AP и значение $C^E = 1$ Зв/Гр. То есть, если использовать в действующем СанПин 2.6.1.1192-03 правильное среднее значение коэффициента перехода от эффективной дозы к воздушной керме, равное 1 Гр/Зв, а не 2 Гр/Зв, как сейчас, то с учетом коэффициента запаса 2 значения ДМД уменьшились бы в два раза, т.е. требования к толщине защитных барьеров ужесточились бы. Поэтому для сохранения преемственности процедуры расчетов, с одной стороны, и решения этой проблемы – с другой, предлагается при проектировании защиты от рентгеновского излучения, используемого в медицинских целях, не вводить коэффициент запаса 2. Дело в том, что в этом случае использовать его представляется излишним [5, 6] по следующим причинам. При расчете кратности ослабления защиты в этом случае не учитывается ряд обстоятельств, значительно уменьшающих на

практике мощность дозы рентгеновского излучения еще до защиты, а именно – поглощение излучения в теле пациента, рассеивающей решетке, приемнике изображения и других конструкциях. Так, согласно данным работы [7], поглощение рентгеновского излучения только в рассеивающей решетке и кассете приемника изображения для спектров с напряжением на трубке в диапазоне от 50 кВ до 140 кВ уменьшает его интенсивность в 4–40 раз. Кроме того, для расчета толщины защиты предписывается использовать значения напряжения на аноде трубки и рабочие нагрузки рентгеновских аппаратов (W), близкие к максимальным, что существенно увеличивает ее толщину. Так, например, в работе [8] было показано, что на практике значения W для рентгеновских аппаратов общего назначения как минимум в два раза ниже, а использование реального распределения значений напряжения на аноде трубки вместо предписываемого в действующем СанПин 2.6.1.1192-03 значения 100 кВ позволяет уменьшить толщину стационарной защиты в 2 раза.

Учитывая вышесказанное, предлагается следующая формулировка п. 4.1.4. СанПин 2.6.1.1192-03: «Значения допустимой мощности эффективной дозы ДМЭД (мкЗв/ч) в помещениях и на территориях различного назначения рассчитываются, исходя из основных пределов годовой эффективной дозы для соответствующих категорий облучаемых лиц ПД (мЗв/год) и возможной продолжительности их облучения по формуле:

$$ДМЭД = 10^3 \cdot \frac{ПД}{t_c \cdot n \cdot T}, \text{ мкЗв/ч}, \quad (2)$$

где 10^3 – коэффициент перевода мГр в мкГр;

t_c – стандартизованное время односменной работы персонала группы А, $t_c = 1500$ ч/год (30-часовая рабочая неделя);

n – коэффициент сменности, учитывающий возможность двухсменной работы рентгеновского аппарата и связанную с ней продолжительность облучения персонала группы Б, пациентов и населения;

T – коэффициент занятости помещения, учитывающий максимально возможную долю рабочего времени нахождения людей в зоне облучения.

В этой формулировке фигурируют биофизические величины, в которых выражены основные дозовые пределы.

Далее нужно рассчитать необходимую толщину защиты. Расчет стационарной защиты рентгеновского кабинета при проектировании основан на определении требуемой кратности ослабления K физической величины, – мощности поглощенной дозы в воздухе $\dot{D}(0)$ рентгеновского излучения в данной точке в отсутствие защиты до такого значения проектной мощности дозы $\dot{D}_{np}$ за защитой, которая обеспечивает неперевышение ДМЭД, – биофизической (неизмеряемой) величины:

$$K = \frac{\dot{D}(0)}{\dot{D}_{np}} \sim 10^3 \cdot \frac{C^E \cdot R \cdot W \cdot N}{ДМЭД \cdot 30 \cdot r^2}, \text{ отн. ед.}, \quad (3)$$

где: $C^E = 1$ Зв/Гр – коэффициент перехода от кермы (поглощенной дозы) в воздухе к эффективной дозе;

R – радиационный выход рентгеновского аппарата, мГр $\times$ м²/(мА $\times$ мин);

W – номинальная рабочая нагрузка рентгеновского аппарата, (мА·мин)/нед;

N – коэффициент направленности излучения, отн. ед.;

ДМЭД – допустимая мощность эффективной дозы, мкЗв/ч;

30 – значение нормированного времени работы в неделю персонала группы А при односменной работе (30-часовая рабочая неделя), ч/нед;

r – расстояние от фокуса рентгеновской трубки до точки расчета, м;

10^3 – множитель для перевода мГр в мкГр,

Произведение $C^E \cdot \frac{R \cdot W \cdot N}{30 \cdot r^2}$ определяет значение средней за рабочее время мощности эффективной дозы с учетом номинальной рабочей нагрузки рентгеновского аппарата в отсутствие защиты, а ДМЭД – допустимую среднюю за рабочее время мощность эффективной дозы за защитой.

Перейдем к рассмотрению вопроса интерпретации результатов измерений, проводимых в рамках РК, т.е. выполняемых на контролируемом объекте с целью определения степени соблюдения принципов РБ требованиям нормативов. Необходимо на основании результатов мгновенного измерения мощности дозы рассчитать приведенное к стандартной нагрузке аппарата среднее значение мощности дозы для различных категорий облучаемых лиц с учетом параметров, определяющих время их пребывания в помещениях различного назначения для сравнения со значениями ДМЭД.

Так как в настоящее время подавляющее большинство приборов производят измерения мощности амбиентного эквивалента дозы $\dot{H}^*(10)_{изм}$, то ниже приводимые формулы даны для этой величины. Рассчитаем приведенное с учетом недельной рабочей нагрузки рентгеновского аппарата значение амбиентного эквивалента дозы $\dot{H}^*(10)_{пр}$ за неделю:

$$\dot{H}^*(10)_{пр} = \frac{\dot{H}^*(10)_{изм}}{I_{изм}} \cdot W \left[\frac{\text{мкЗв}}{\text{час} \cdot \text{мА}} \cdot \frac{\text{мА} \cdot \text{мин}}{\text{нед}} \right] = \frac{\dot{H}^*(10)_{изм}}{I_{изм}} \cdot \frac{W}{60} \left[\frac{\text{мкЗв}}{\text{нед}} \right], \quad (4)$$

а с учетом годовой нагрузки аппарата:

$$\dot{H}^*(10)_{пр} = \frac{\dot{H}^*(10)_{изм}}{I_{изм}} \cdot \frac{W \cdot 50}{60} \left[\frac{\text{мкЗв}}{\text{нед}} \cdot \frac{\text{нед}}{\text{год}} \right] = 0,83 \cdot \frac{\dot{H}^*(10)_{изм}}{I_{изм}} \cdot W \left[\frac{\text{мкЗв}}{\text{год}} \right], \quad (5)$$

Формулу для расчета значения приведенной мощности амбиентного эквивалента дозы в помещениях и на территориях различного назначения для различных категорий облучаемых лиц получим делением выражения (5) на их возможную продолжительность пребывания там в течение года $t_c \cdot n \cdot T$:

$$\dot{H}^*(10)_{пр} = 0,83 \cdot \frac{\dot{H}^*(10)_{изм}}{I_{изм}} \cdot \frac{W}{t_c \cdot n \cdot T} \left[\frac{\text{мкЗв}}{\text{год}} \cdot \frac{\text{год}}{\text{час}} = \frac{\text{мкЗв}}{\text{час}} \right], \quad (6)$$

Причем в частном случае для персонала группы А она совпадает с формулой из СанПин 2.6.1.1192-03:

$$\dot{H}^*(10)_{пр} = 0,83 \cdot \frac{\dot{H}^*(10)_{изм}}{I_{изм}} \cdot \frac{W}{t_c \cdot n \cdot T} = 0,83 \cdot \frac{\dot{H}^*(10)_{изм}}{I_{изм}} \cdot \frac{W}{1500 \cdot 1 \cdot 1} = \frac{\dot{H}^*(10)_{изм} \cdot W}{I_{изм} \cdot 1800}, \quad (7)$$

Нижеприведенная формула (8) аналогична, только оперирует измеренным значением амбиентного эквивалента дозы, а не его мощности:

$$\dot{H}^*(10)_{пр} = \frac{\dot{H}^*(10)_{изм}}{Q_{изм}} \cdot \frac{W}{t_c \cdot n \cdot T} = \frac{\dot{H}^*(10)_{изм}}{I_{изм} \cdot t} \cdot \frac{W}{t_c \cdot n \cdot T} \left[\frac{\text{мкЗв}}{\text{мА} \cdot \text{с}} \cdot \frac{\text{мА} \cdot \text{мин} \cdot \text{год}}{\text{нед} \cdot \text{час}} \right] = \frac{\dot{H}^*(10)_{изм}}{I_{изм} \cdot t} \cdot \frac{W}{t_c \cdot n \cdot T} \left[\frac{\text{мкЗв}}{\text{час}} \right], \quad (8)$$

Формулы (5–8) приведены для амбиентного эквивалента дозы, являющегося консервативной оценкой эффективной дозы рентгеновского излучения. Чтобы оценить степень этой консервативности, на рисунке 2 приведены результаты расчетов отношения амбиентного эквивалента дозы к эффективной дозе ($H^*(10)/E(AP)$) для ряда спектров рентгеновского излучения, используемых в медицинских исследованиях. Среднее значение этого отношения в диапазоне напряжений на рентгеновской трубке от 50 до 140 кВ для передне-задней геометрии облучения составляет 1,7. Для спектров, связанных с маммографией, это отношение возрастает до значения 5,6. Таким образом, если результат измерений $H^*(10)$ за защитой существенно меньше значения ДМЭД, то условия облучения в данном помещении удовлетворяют требованиям РБ. Если же измеренные значения близки к значениям ДМЭД или даже немного больше, то для обоснования существующей защиты помещения можно использовать тот факт, что измеренное значение $H^*(10)$ завышает оценку эффективной дозы.

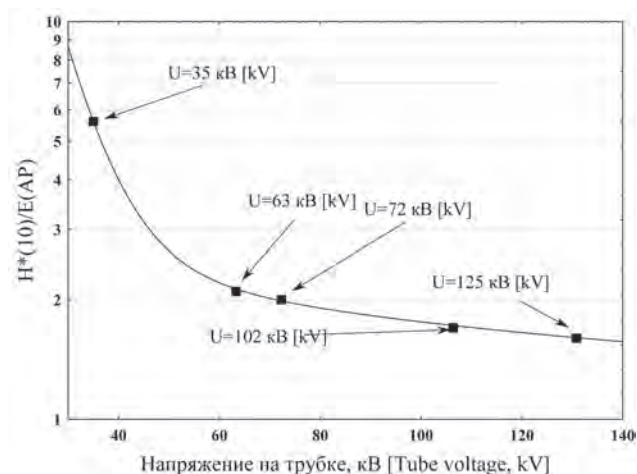


Рис. 2. Отношение амбиентного эквивалента дозы к эффективной дозе для ряда спектров рентгеновского излучения, используемых в медицинских диагностических исследованиях

[Fig. 2. Ambient dose equivalent to effective dose ratio for a range of X-ray spectra for medical imaging]

Анализ различий между существующей и предлагаемой методикой радиационного контроля полей рентгеновского излучения при его использовании в медицине

В этом разделе представлено сравнение процедур и результатов РК на рабочих местах и в смежных помещениях, согласно действующей методике и методике, предлагаемой в настоящем исследовании. В качестве исходных данных для сравнения использовали результаты реальных протоколов измерений в ряде медицинских организаций г. Москвы.

Радиационный контроль на рабочих местах персонала в процедурной комнате

Согласно СанПин 2.6.1.1192-03, измерения поглощенной дозы в воздухе в процедурной комнате проводятся в 4 точках: на уровне головы, на уровне груди, на уровне таза и на уровне ног. Далее на основании результатов этих измерений рассчитывается значение мощности эффективной дозы следующим образом:

$$\dot{E} = 0,5 \cdot \left[0,15 \cdot \overset{160}{D_{np}} + 0,3 \cdot \overset{120}{D_{np}} + 0,5 \cdot \overset{80}{D_{np}} + 0,05 \cdot \overset{30}{D_{np}} \right], \text{ мкЗв/ч} \quad (9)$$

где $\dot{E}$ – мощность эффективной дозы, мкЗв/ч; $\overset{160}{D_{np}}, \overset{120}{D_{np}}, \overset{80}{D_{np}}, \overset{30}{D_{np}}$ – значения мощностей поглощенной дозы в воздухе, приведенные к рабочей нагрузке аппарата, измеренные на уровне головы (160 см), груди (120 см), таза (80 см) и ног (30 см), мкГр/ч; 0,5 – коэффициент перехода от поглощенной дозы в воздухе к эффективной дозе, мкЗв/мкГр.

В дальнейшем (п. 15 Приложения 11 СанПин 2.6.1.1192-03) значение мощности эффективной дозы, оцененное по формуле (9), предлагается сравнивать с регламентированными значениями мощности поглощенной дозы в воздухе в помещениях различного назначения (табл. 4.2). На наш взгляд, это неправильно, т.к. значение мощности эффективной дозы сравнивается со значением мощности поглощенной дозы в воздухе. То есть с данными таблицы 4.2 нужно сравнивать приведенное значение поглощенной дозы в воздухе, а не эффективной дозы. Правда, тогда встает вопрос, какое из 4 измеренных значений использовать. По-видимому, учитывая существенную неравномерность поля излучения на рабочих местах в процедурной комнате, нужно использовать значение взвешенного среднего из 4 измеренных значений мощности поглощенной дозы:

$$\overset{взв}{D_{np}} = \left[0,15 \cdot \overset{160}{D_{np}} + 0,3 \cdot \overset{120}{D_{np}} + 0,5 \cdot \overset{80}{D_{np}} + 0,05 \cdot \overset{30}{D_{np}} \right], \text{ мкГр/ч} \quad (10)$$

Использование максимального значения из 4 измеренных значений мощности поглощенной дозы вряд ли оправдано, т.к. это будет сильно искажать окончательный результат из-за значительного градиента мощности дозы на рабочих местах персонала, особенно при использовании защитного фартука.

В отличие от действующей методики РК, мы предлагаем проводить измерения амбиентного эквивалента дозы на двух уровнях от пола, на уровне головы – шеи (часть тела, не защищенная фартуком) и середины торса (часть тела, защищенная фартуком). После чего мощность эффективной дозы на рабочем месте оценивается следующим образом:

$$\dot{E} = 0,1 \cdot \dot{H}^*(10)_{np}^{160} + \frac{0,9 \cdot \dot{H}^*(10)_{np}^{100}}{k_{фарт.}} \quad (11)$$

где $\dot{E}$ – мощность эффективной дозы, мкЗв/ч; $\dot{H}^*(10)_{np}^{160}$ и $\dot{H}^*(10)_{np}^{100}$ – значения мощности амбиентного эквивалента дозы, приведенные к стандартной рабочей нагрузке рент-

геновского аппарата на основе измеренных значений на уровне 160 см и 100 см от пола; $k_{фарт.}$ – коэффициент ослабления рентгеновского излучения защитным фартуком.

То есть теперь, во-первых, в качестве результатов измерений предлагается использовать значение мощности амбиентного эквивалента дозы – величину, которую измеряют подавляющее число современных приборов. Во-вторых, предлагается учитывать использование персоналом защитного фартука, что никак не было отражено в действующей методике при интерпретации результатов РК. Влияние на результат измерения ослабления рентгеновского излучения защитным фартуком можно учесть различными способами (в порядке приоритета):

- производить измерения за защитным фартуком;
- использовать значения $k_{фарт.}$ из протоколов испытаний средств индивидуальной защиты;
- использовать справочные данные для значений $k_{фарт.}$ на основе значений свинцовых эквивалентов.

Нами были проанализированы результаты измерений в протоколах РК рабочих мест персонала для действующих рентгеновских кабинетов в медицинских организациях г. Москвы. На основании результатов измерений, представленных в этих протоколах, мы попытались сравнить выводы, которые можно сделать о соответствии условий работы персонала группы А, согласно действующей и предлагаемой здесь методикам РК. Так как исходные результаты измерений в медицинских организациях соответствовали мощности амбиентного эквивалента дозы, то для применения их в рамках действующей методики РК (СанПин 2.6.1.1192-03) они были пересчитаны в значения поглощенной дозы в воздухе делением на коэффициент 1,5, являющийся средним значением отношения амбиентной и поглощенной доз в воздухе в диапазоне напряжений на трубке от 50 до 140 кВ. Этот коэффициент был рассчитан нами на основании данных о реальных спектрах рентгеновского излучения, как падающих на защиту, так и прошедших через нее [9, 10] (рис. 3).

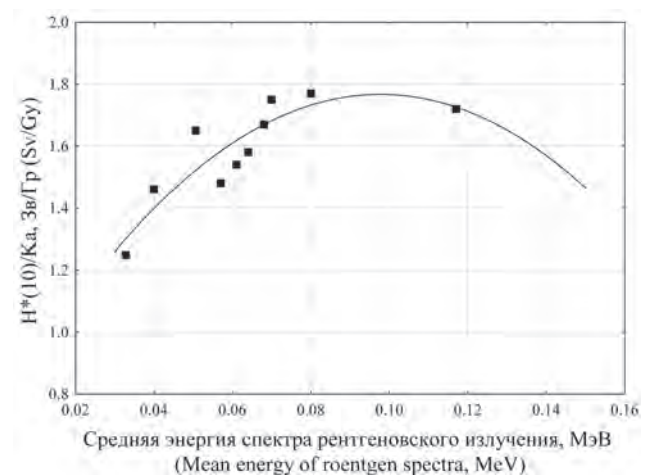


Рис. 3. Отношение амбиентного эквивалента дозы к поглощенной дозе в воздухе для ряда спектров рентгеновского излучения, используемых в медицинских диагностических исследованиях

[Fig. 3. Ambient dose equivalent to absorbed dose in air ratio for a range of X-ray spectra for medical imaging]

Далее в рамках действующей методики РК рассчитывалось значение $\dot{D}_{np}$ (формула (10)), которое сравнивалось со значением ДМД. Кроме того, пересчет результатов РК по действующей методике осуществлялся второй раз с учетом того, что работник носит защитный фартук, и снова эти результаты сравнивались со значением ДМД. В рамках предлагаемой методики РК рассчитывалось значение $\dot{E}$ (формула (11)), которое сравнивалось со значением ДМЭД.

Сравнение результатов РК на рабочих местах персонала (в процедурной рентгенохирургического или ангиографического кабинета), выполненное согласно действующей и предлагаемой методикам, представлено в таблице 1. Для оценки соответствия условий труда требованиям радиационной защиты персонала значения $\dot{D}_{np}$ (мкГр/ч) и $\dot{E}$ (мкЗв/ч), полученные на основании измерений на рабочих местах, следует сравнить со значениями ДМД или ДМЭД соответственно. Оказалось, что значения $\dot{D}_{np}$, рассчитанные по действующей методике для условий труда без защитного фартука, во всех случаях существенно превышают значение ДМД = 13 мкГр/ч. То есть условия труда медицинского персонала, работающего в процедурной без защитного фартука, не соответствуют требованиям РБ в рамках действующей методики. Однако при наличии защитного фартука уже в 2/3 случаев значения $\dot{D}_{np}$ меньше ДМД. Согласно предлагаемой ме-

тодике РК, в 3 случаях из 12 наблюдалось превышение ДМЭД = 13 мкЗв/ч. Тем не менее, т.к. в качестве оценки эффективной дозы в предлагаемой методике используется амбиентный эквивалент дозы, который в среднем переоценивает значения эффективной дозы в диапазоне напряжений на рентгеновской трубке от 50 до 140 kV в 1,7 раза, а в реальности не было превышения более чем в 1,5 раза, то, согласно предлагаемой методике РК, для всех использованных примеров можно говорить о соответствии условий труда персонала требованиям РБ.

Радиационный контроль в смежных помещениях

Выше были получены выражения для расчета приведенных значений измеренных за защитой мощностей доз, которые соответствуют разному относительному времени пребывания разных категорий лиц в соответствующих помещениях.

Формулы для расчета приведенных значений мощностей доз в рамках действующего $\dot{H}^*(10)_{np}^{нов}$ и предлагаемого $\dot{H}^*(10)_{np}^{см}$ подходов (если в обоих случаях измеряется амбиентный эквивалент дозы) выглядят следующим образом:

$$\dot{H}^*(10)_{np}^{см} = 0,83 \cdot \frac{\dot{H}^*(10)_{изм}}{I_{изм}} \cdot \frac{W}{1500} \left[\frac{\text{мкГр}}{\text{час}} \right] \quad (12)$$

$$\dot{H}^*(10)_{np}^{нов} = 0,83 \cdot \frac{\dot{H}^*(10)_{изм}}{I_{изм}} \cdot \frac{W}{t_c \cdot n \cdot T} \left[\frac{\text{мкЗв}}{\text{час}} \right] \quad (13)$$

Таблица 1
Сравнение мощностей эффективной дозы на рабочих местах персонала для рассмотренных рентгеновских аппаратов
[Table 1
Comparison of effective dose rates at staff workplaces for the examined X-ray units]

Рентгеновский аппарат [X-ray unit]	Тип аппарата [Type of X-ray unit]	Рабочее место [Work place]	$\dot{D}_{np}$ (мкГр/ч) [Kerma rate in air (μGy/h)] согласно СанПиН [according to the SanPiN 2.6.1.1192-03]	$\dot{E}$ (мкЗв/ч) [Effective dose rate (μSv/h)] согласно предлагаемой методике РК [according to the proposed method]	ДМД/ДМЭД [Permissible kerma rate/ Permissible effective dose rate]
OEC Fluorostar Compact	С-Дуга [C-arm]	1	¹⁾ 59,6/ ²⁾ 13,2	11,5	13 мкГр/ч/ 13 мкЗв/ч [13 μGy/h/ 13 μSv/h]
		2	67,3/13,7	13,6	
OEC 9900 Elite	С-Дуга [C-arm]	1	28/4,9	5,8	
		2	31,2/6,8	6,7	
OEC 9900 Elite	С-Дуга [C-arm]	1	60,5/12,3	12,5	
		2	92,4/16,8	18,5	
Carmex	С-Дуга [C-arm]	1	68,7/13,3	12,7	
		2	29/13	6,0	
Infinix VC-i	Ангиограф [Angio X-ray unit]	1	36/10,3	8,3	
		2	62,1/17,3	13,9	
OEC Elite 9900	С-Дуга [C-arm]	1	63,2/16,3	13,0	
		2	25,2/5,5	5,9	

¹⁾Значение, рассчитанное без учета средств индивидуальной защиты; ²⁾Значение, рассчитанное с учетом средств индивидуальной защиты [¹⁾value calculated without considering the personal protective equipment; ²⁾value calculated considering the personal protective equipment].

Таблица 2

Численные различия предлагаемого и действующего подходов в расчетах приведенных значений мощностей доз на основании измеренных значений

[Table 2]

Numerical differences between the proposed and current approaches in calculating the reduced values of dose rates based on measured values]

$t_c \cdot n \cdot T$, час/год [hours per year]	Помещение, территория [Rooms, territory]	$\dot{H}^*(10)_{np}^{нов}$ / $\dot{H}^*(10)_{np}^{ст}$
1500	Помещения постоянного пребывания персонала группы А (процедурная, комната управления, комната приготовления бария, фотолaborатория, кабинет врача-рентгенолога, предоперационная и др.) [Rooms of the constant stay of the staff belonging to the group A (room for X-ray examinations, control room, room for the preparation of the barium media, photolaboratory, radiologist's office, pre-operating room, etc.)]	$\frac{1500}{1500} = 1$
2000	Помещения, смежные по вертикали и горизонтали с процедурной рентгеновского кабинета, имеющие постоянные рабочие места персонала группы Б [Rooms adjacent vertically and horizontally with X-ray examination room with the constant workplaces of the staff belonging to the group B]	$\frac{1500}{2000} = 0.75$
500	Помещения, смежные по вертикали и горизонтали с процедурной рентгеновского кабинета без постоянных рабочих мест персонала группы Б (холл, гардероб, лестничная площадка, коридор, комната отдыха, уборная, кладовая и другие) [Rooms adjacent vertically and horizontally with X-ray examination room without constant workplaces of the staff belonging to the group B (hall, wardrobe, water closet, stairs, corridor, storage rooms, etc.)]	$\frac{1500}{500} = 3$
120	Помещения эпизодического пребывания персонала группы Б (технический этаж, подвал, чердак и др.) [Rooms of the episodic stay of the staff belonging to the group B (technical floor, cellar, attic, etc.)]	$\frac{1500}{120} = 12.5$
750	Палаты стационара, смежные по вертикали и горизонтали с процедурной рентгеновского кабинета [Patient wards adjacent vertically and horizontally with X-ray examination room]	$\frac{1500}{750} = 2$
360	Территория, прилегающая к наружным стенам процедурной рентгеновского кабинета [Territory adjacent to the outer walls of the X-ray examination room]	$\frac{1500}{360} = 4.2$
3000	Жилые и служебные помещения зданий, расположенных на территории, прилегающей к наружным стенам процедурной рентгеновского кабинета, жилые помещения, смежные со стоматологическим кабинетом или процедурной рентгеновского стоматологического кабинета. [Residential and administrative rooms of the dwellings located on the territory adjacent to the outer walls of the X-ray examination room, living rooms adjacent to the dental X-ray room or dental X-ray examination room]	$\frac{1500}{3000} = 0.5$

Численные различия этих двух подходов в расчетах приведенных значений мощностей доз на основании измеренных значений представлены в таблице 2.

Эти различия отражают тот факт, что учитывается возможное относительное время пребывания отдельных категорий лиц в соответствующих помещениях во время работы рентгеновского аппарата, а не используется одно и то же значение (для персонала группы А), как в действующей методике РК. При этом предлагаемый подход полностью совпадает с действующим в случае персонала группы А. Для других категорий облучаемых лиц и помещений, согласно предлагаемому подходу к интерпретации результатов измерений, возможно как увеличение, так и уменьшение приведенных значений мощностей доз по отношению к результатам, получаемым в рамках действующего подхода. То есть возможно как ослабление,

так и ужесточение требований к толщине конструкций стационарной защиты.

Расчет защиты в случае размещения в кабинете нескольких рентгеновских аппаратов

В заключение обсудим ситуацию, связанную с расчетом защиты при размещении нескольких рентгеновских аппаратов в одной процедурной. В действующем СанПин 2.6.1.1 192-03 говорится, что «расчет защиты для двух или более рентгеновских аппаратов, установленных в одной процедурной, должен проводиться для аппарата с наибольшими номинальными значениями анодного напряжения и рабочей нагрузки», то есть остальные аппараты не учитываются. Однако если посмотреть на формулу 4.1 из СанПин 2.6.1.1 192-03, то из нее следует, что значение кратности ослабления защиты (коэффициент К) зависит

от значения рабочей нагрузки рентгеновского аппарата W и что если одновременная работа нескольких аппаратов запрещена, то попеременная нет.

В новом подходе предлагается учитывать наличие в процедурной нескольких аппаратов следующим образом: «Расчет защиты для двух или более медицинских рентгеновских аппаратов одного или различного назначения, установленных в одной процедурной, проводится с учетом рабочей нагрузки всех аппаратов по формуле:

$$K = \frac{C^E \cdot 10^3}{DMЭД \cdot 30} \cdot \sum_i \frac{R_i \cdot W_i \cdot N_i}{r_i^2} \quad (14)$$

Необходимая толщина защитных ограждений определяется по значению свинцового эквивалента, соответствующего наибольшему номинальному анодному напряжению из всех аппаратов».

Чтобы пояснить, приведет ли предложенный алгоритм к существенному увеличению толщины защиты, проиллюстрируем это следующим примером. Пусть в рентгеновском кабинете находится рентгеновский аппарат общего назначения. Расчет необходимой толщины защиты прямого излучения этого аппарата для помещений постоянного пребывания персонала группы А на расстоянии 3 м от фокуса трубки ($U=100\text{кВ}$, $W=1000\text{ мА-мин/нед.}$) дает значение 2,11 мм Pb. Добавим в этот кабинет стоматологический аппарат с параметрами $U=75\text{кВ}$, $W=200\text{ мА-мин/нед.}$ Расчет коэффициента ослабления для того же расстояния 3 м для 2 аппаратов по формуле (14) приводит к значению толщины защиты 2,16 мм Pb. Таким образом, увеличение толщины защиты за счет работы второго аппарата с меньшим напряжением на аноде трубки составит всего лишь 0,05 мм Pb. Добавление в рентгеновский кабинет в качестве второго аппарата такого же, как и первый, приведет к увеличению толщины защиты на 0,25 мм Pb.

Заключение

В статье представлен анализ недостатков существующей методики РК:

- некорректный учет категории облучаемых лиц, отличных от персонала группы А, при интерпретации результатов измерений мощности дозы рентгеновского излучения для оценки адекватности физической защиты помещения;
- неучет использования средств индивидуальной защиты (защитные фартуки, передники) при интерпретации результатов измерений на рабочих местах персонала группы А в процедурной;

– некорректный учет наличия нескольких рентгеновских аппаратов в процедурной при расчете толщины стационарной защиты

Предлагаются пути устранения указанных недостатков.

В рамках нового подхода предложен способ учета использования работниками индивидуальных средств защиты при интерпретации результатов измерений для оценки условий РБ в процедурной. Оценены возможный консерватизм в оценке нормируемых величин (эффективная доза) с помощью измерений амбиентного эквивалента дозы для типичных спектров диагностического рентгеновского излучения и влияние предлагаемых изменений в методике РК на требования к толщине конструкций стационарной защиты помещений.

Литература

1. Публикация 103 МКРЗ. Рекомендации Международной Комиссии по Радиационной защите от 2007 г.: пер. с англ. / под общ. ред. М.Ф. Киселева. Н.К. Шандалы. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана». 2009. 312 с.
2. Кутыков В.А. Современная система дозиметрических величин // АНРИ. 2000. № 1(20). С. 4-17.
3. ICRP. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. ICRP Publication 116, Ann. ICRP. 2010. 40(2-5).
4. Васильев В.Н., Лебедев Л.А., Сидорин В.П., Ставицкий Р.В. Спектры излучения рентгеновских установок. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1990. 144 с.
5. NCRP. National Council on Radiation Protection and Measurements. Structural Shielding Design for Medical X-Ray Imaging Facilities. NCRP Report No. 147 (National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, Maryland). 2004.
6. Colin J. Martin. Radiation shielding for diagnostic radiology // Radiation Protection Dosimetry. 2015. Vol. 165. No 1-4. P. 376-81.
7. Dixon R.L. and Simpkin D.J. Primary Shielding Barriers for Diagnostic X-ray Facilities: A New Model // Health Physics. 1998. No 74. P. 181-189.
8. Голиков В.Ю., Водоватов А.В. Оценка значений рабочей нагрузки рентгеновских аппаратов при проведении рентгенологических процедур общего назначения // Радиационная гигиена. 2015. Т. 8, № 2. С. 6-10.
9. IAEA. Implementation of the international Code of Practice on dosimetry in diagnostic radiology. (TRS 457): Review of test results (Vienna; International Atomic Energy Agency). 2011.
10. Santos J.S., Mariano L., Tomal A., and Costa P.R. Evaluation of conversion coefficients relating air-kerma to $H^*(10)$ using primary and transmitted x-ray spectra in the diagnostic radiology energy range. Journal of Radiological Protection. 2016. Vol. 36. P. 117-132.

Поступила: 22.02.2021 г.

Голиков Владислав Юрьевич – старший научный сотрудник, лаборатория радиационной гигиены медицинских организаций, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: sg235@rambler.ru

Водоватов Александр Валерьевич – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией радиационной гигиены медицинских организаций, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева; доцент, кафедра общей гигиены, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Голиков В.Ю., Водоватов А.В. Критический анализ и предложения по совершенствованию существующей системы радиационного контроля в рентгеновских кабинетах // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 2. С. 39–47. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-2-39-47

Critical analysis and suggestions to improve the existing system of radiation control in X-ray rooms

Vladislav Yu. Golikov¹, Aleksandr V. Vodovатов^{1,2}

¹ Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

² Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint-Petersburg, Russia

This paper demonstrates the shortcomings of the existing method of radiation control in the X-ray rooms and the interpretation of the results of the measurements to assess the compliance of the working conditions of various groups of exposed individuals with radiation safety requirements. A new method of interpretation of the measurement results is proposed, considering the relative time spent by certain categories of exposed persons in the corresponding rooms during the use of the X-ray units, as well as the use of personal protective equipment (lead aprons). The interpretation of the measurement results in the treatment room according to the new approach has demonstrated the compliance of the working conditions to the Norms and Rules of radiation safety, provided that the worker is wearing a protective apron. The proposed approach to the interpretation of the results of the measurements in adjacent rooms leads to both reduced and stricter requirements for the stationary shielding. The paper includes a special focus on the incorrect calculation of stationary shielding for the installation of several X-ray units in one X-ray room within the framework of the current approach.

Key words: radiation protection, radiation control, X-ray room, medical staff, ambient dose equivalent.

References

1. International Commission on Radiological Protection. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. «Alana»; 2009. 312 p. (In Russian)
2. Kutkov VA. Modern system of dosimetric quantities. *ANRI* = *ANRI*. 2000; 1(20): 4-17. (In Russian)
3. ICRP, 2010. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. ICRP Publication 116, Ann. ICRP 40(2-5).
4. Vasilev VN, Lebedev LA, Sidorin VP, Stavitsky RV. X-ray radiation spectra. Reference Book. Moscow: Energoatomizdat; 1990. 144 p. (In Russian)
5. NCRP (2004). National Council on Radiation Protection and Measurements. Structural Shielding Design for Medical X-Ray Imaging Facilities. NCRP Report No. 147 (National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, Maryland).
6. Colin J Martin. Radiation shielding for diagnostic radiology. *Radiation Protection Dosimetry*. 2015;165(1-4): 376-81.
7. Dixon RL and Simpkin DJ. Primary Shielding Barriers for Diagnostic X-ray Facilities: A New Model. *Health Physics*. 1998;74: 181-189.
8. Golikov VYu, Vodovатов AV. Estimation of an X-ray machine's workload during routine radiological examinations // *Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene*. 2015; 8(2): 6-10. (In Russian)
9. IAEA 2011. Implementation of the international Code of Practice on dosimetry in diagnostic radiology. (TRS 457): Review of test results (Vienna; International Atomic Energy Agency)
10. Santos JS, Mariano L, Tomal A, Costa PR. Evaluation of conversion coefficients relating air-kerma to H*(10) using primary and transmitted x-ray spectra in the diagnostic radiology energy range. *Journal of Radiological Protection*. 2016; 36: 117-132.

Received: February 22, 2021

For correspondence: Vladislav Yu. Golikov – Senior Researcher of the Medical Protection Laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: sg235@rambler.ru)

Aleksandr V. Vodovатов – Ph.D., Head of Protection Laboratory, Leading Researcher, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev; docent, Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint-Petersburg, Russia

For citation: Golikov V.Yu., Vodovатов A.V. Critical analysis and suggestions to improve the existing system of radiation control in X-ray rooms. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No. 2. P. 39-47. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-2-39-47

Vladislav Yu. Golikov

Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev

Address for correspondence: Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: sg235@rambler.ru