

Модель профессионального облучения работников, выполняющих контроль сварных соединений

В.Ю. Голиков, С.Ю. Бажин, Е.Н. Шлеенкова, В.Ю. Богатырёва

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

Разработана модель профессионального облучения гамма-дефектоскопистов, работающих с переносными дефектоскопами в полевых условиях. Исходными данными для разработки и верификации модели служили результаты измерений характеристик поля гамма-излучения на рабочих местах дефектоскопистов и данные индивидуального дозиметрического контроля. Соотношения между измеряемыми ($H^(10)$, $H_r(10)$) и нормируемыми (эффективная доза) величинами (коэффициенты перехода) определялись с помощью расчетов и фантомных экспериментов, моделирующих три основные операции полного производственного цикла работ: транспортировка дефектоскопа к месту просвечивания изделия, установка дефектоскопа для выполнения просвечивания и операция просвечивания изделия. В результате исследования было установлено, что более 90% дозового вклада в показания индивидуального дозиметра обусловлено установкой дефектоскопа в рабочее положение и просвечиванием изделия. Значения коэффициентов перехода для этих операций в виде отношения значений эффективной дозы и показаний дозиметров ($H_r(10)$), расположенных на теле работника на уровне груди (стандартное место) и уровне живота мало отличаются для обоих положений индивидуальных дозиметров. Использование максимального значения коэффициента перехода 0,8 Зв/Зв, соответствующего операции просвечивания изделия, будет обеспечивать консерватизм оценки эффективной дозы для всего производственного цикла не более чем на 15% и 25% для дозиметров, расположенных на уровне груди и живота, соответственно.*

Ключевые слова: гамма-излучение, дефектоскопия, эффективная доза, индивидуальный эквивалент дозы.

Введение

Регулярный мониторинг индивидуального облучения работников с применением принципов обоснования, оптимизации и ограничения дозы является неотъемлемой частью любой программы радиационной защиты, представленной, как в отечественном¹, так и международном [1] законодательстве.

Рекомендации МКРЗ [2] предлагают подходы к минимизации радиационного риска путем установления системы ограничения дозы, граничных доз и референтных уровней. Основными принципами здесь являются:

- Два принципа, связанных с источниками ионизирующего излучения (ИИИ) и применимые во всех ситуациях облучения: (1) принцип обоснования - любое решение, которое изменяет ситуацию радиационного облучения должно приносить больше пользы, чем вреда и (2) принцип оптимизации защиты - вероятность облучения, количество облученных лиц и значения их индивидуальных доз должны

поддерживаться на разумно достижимом низком уровне (принцип ALARA), принимая во внимание экономические и социальные факторы.

- Один принцип, применяемый к индивидууму в ситуациях планируемого облучения: принцип применения пределов дозы - общая доза любого индивидуума от источников в ситуациях планируемого облучения не должна превышать соответствующие пределы, рекомендованные МКРЗ.

Целью индивидуального дозиметрического контроля (ИДК) профессионального облучения является достоверное определение доз облучения персонала для демонстрации соответствия условий труда требованиям законодательства и подтверждения того, что радиационная безопасность персонала обеспечена должным образом, а техногенный источник излучения находится под контролем. В контролируемых условиях обращения с ИИИ результатом контроля доз профессионального облучения является консервативная оценка значений нормируемых величин облу-

¹Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 № 47. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 14 августа 2009, регистрационный № 14534 [Norms of radiation safety (NRB-99/2009). Sanitary rules and norms SanPiN 2.6.1.2523-09. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 07.07.2009 №. 47. Registered with the Ministry of justice of the Russian Federation on August 14, 2009, registration №. 14534. (In Russ.)]

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

чения персонала.

Нормируемые величины, эквивалентная и эффективная дозы, служащие основой для принятия мер радиационной защиты персонала [1–3], на практике не измеряемы. Поэтому их необходимо определять на основании других измеряемых величин, называемых операционными [4–6]. При контроле полей излучения на рабочих местах персонала для оценки эффективной дозы (ЭД) используют мощность амбиентного эквивалента дозы $H^*(10)$, а измерения проводят в воздухе в отсутствии работника. Для контроля индивидуального облучения используют индивидуальные дозиметры, располагаемые на поверхности тела работника, а в качестве оценки ЭД – индивидуальный эквивалент дозы $H_p(10)$. Интерпретация результатов измерений $H^*(10)$ и $H_p(10)$ для оценки ЭД должна основываться на количественных соотношениях (коэффициентах перехода (КП)) между операционными и нормируемыми величинами, которые зависят от типа поля излучения, его энергетического спектра, геометрии облучения работника, а в случае индивидуального дозиметрического контроля – и места расположения дозиметра на теле.

Ранее мы оценивали значения КП расчетным путем [7]. Моделируемые условия облучения соответствовали как равномерному облучению тела работника (плоскопараллельный источник) с различных направлений (спереди, сзади и сбоку), так и резко неравномерному (точечный источник на различных расстояниях от тела) в полях фотонного излучения с энергией от 0,04 до 2 МэВ. Коэффициенты перехода рассчитывались для ряда положений индивидуального дозиметра на поверхности торса расчетной модели тела взрослого человека MIRD-5. Было продемонстрировано, что для однородных в пространстве полей излучения, направлений падения излучения спереди и сбоку (слева), т. е. с той стороны, где расположен индивидуальный дозиметр на теле работника (слева в нагрудном кармане одежды), отношение $ЭД/H_p(10)$ меньше единицы во всем диапазоне рассматриваемых энергий фотонного излучения. То есть, $H_p(10)$ является консервативной оценкой ЭД. При падении излучения сзади и расположении индивидуального дозиметра спереди слева в нагрудном кармане одежды во всем диапазоне рассматриваемых энергий фотонного излучения отношение $ЭД/H_p(10)$ существенно больше (для энергий < 0,1 МэВ) или близко к единице, т.е. $H_p(10)$ не является консервативной оценкой ЭД. Кроме того, на примере модели профессионального облучения персонала отделений ядерной медицины было продемонстрировано, что оптимальное (репрезентативное) расположение индивидуального дозиметра на поверхности тела работника позволяет адекватно оценивать по его показаниям значение ЭД даже при существенно изменяющихся геометриях облучения во время полного производственного цикла обращения с источником ионизирующего излучения.

В работах [8, 9] было показано, что дефектоскописты, работающие в полевых условиях с переносными гамма-дефектоскопами, являются наиболее облучаемой группой персонала с годовыми значениями $H_p(10)$, достигающими 10 мЗв. При этом, интерпретация значений $H_p(10)$ в терминах ЭД далеко не очевидна, так как весь производственный цикл можно представить как суперпозицию трех операций (геометрий облучения), резко отличающихся по отношению к взаимному расположению ИИИ и работника, и, соответственно, имеющих различные значения КП от $H_p(10)$ к ЭД.

Так как, в конце цикла измерений мы имеем одно интегральное значение $H_p(10)$, и дозовые вклады в него от отдельных операций мы не знаем, то возникает вопрос, какое значение КП использовать для получения оценки ЭД. Использование максимального значения КП может привести к оценке ЭД, превышающей значение предела дозы, тем более при таких уровнях облучения дефектоскопистов, как было указано выше, со всеми вытекающими последствиями. Лучшим выходом из этой ситуации является построение модели профессионального облучения этой группы персонала, как и в случае персонала отделений ядерной медицины, с определением места ношения индивидуального дозиметра, где значения КП при выполнении отдельных операций полного технологического цикла будут иметь приемлемые различия.

Цель исследования - построение модели профессионального облучения работников, осуществляющих контроль сварных соединений с помощью переносных дефектоскопов с источниками гамма-излучения.

Материалы и методы

Весь технологический цикл проведения полевых гамма-дефектоскопических работ подразделяли на следующие операции, различающиеся геометрией относительного расположения работника и источника излучения [9]:

1. *Транспортировка гамма-дефектоскопа к месту проведения работ.* ИИИ расположен в радиационной головке дефектоскопа в положении хранения и, при переноске вручную к месту работы дефектоскопа, находится на уровне бедер работника сбоку спереди или сбоку сзади (см. рис. 1).

2. *Подготовка гамма-дефектоскопа к работе.* ИИИ расположен в радиационной головке дефектоскопа в положении хранения и находится на уровне живота работника спереди (см. рис. 2).

3. *Просвечивание изделия.* Перемещение работника к пульта управления, выведение ИИИ в рабочее положение из положения хранения, проведение просвечивания и возврат источника в положение хранения. В этом случае работник, в основном, облучается от удаленного источника, не находящегося в положении хранения.



Рис. 1. Транспортировка гамма-дефектоскопа к месту проведения работ
[Fig. 1. Transportation of the gamma flaw detector to the work site]



Рис. 2. Подготовка гамма-дефектоскопа к работе
[Fig.2. Preparing the gamma flaw detector for operation]

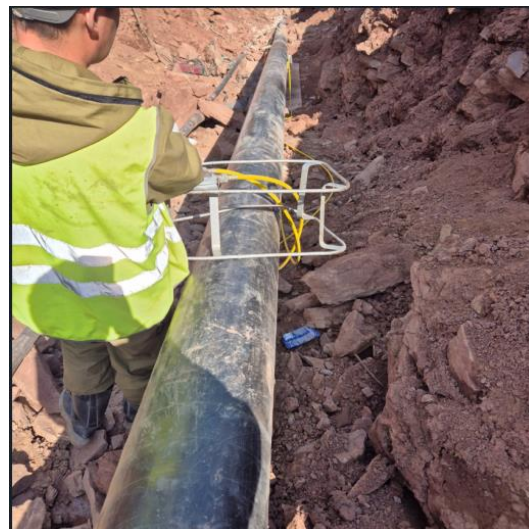


Рис. 3. Просвечивание изделия
[Fig. 3. Radioscopy of pipes]

При построении модели профессионального облучения работников, осуществляющих контроль сварных соединений, с помощью переносных дефектоскопов с источниками гамма-излучения мы использовали результаты измерений характеристик поля гамма-излучения и индивидуальных доз у этих работников, представленных в работе [9]. В этой работе индивидуальные дозы измерялись у 15 дефектоскопистов в течение 26 дней, работавших с гамма-дефектоскопами «Гаммарид-192/120» с радионуклидным источником ^{192}Ir активностью $\sim 1,8$ ТБк на дату начала измерений. Среднее измеренное значение индивидуального эквивалента дозы $H_p(10)$ с помощью индивидуального дозиметра, располагавшегося в стандартном месте (слева в нагрудном кармане спецодежды) за период измерений составило $0,95$ мЗв. Значение мощности амбиентной дозы $H^*(10)$ на расстоянии 10 см от поверхности радиационной головки дефектоскопа с источником в положении хранения составляло $54,3$ мкЗв/час. Измеренное значение $H^*(10)$ на расстоянии 20 м от работника при выполнении просвечивания изделия (рис. 3) составляло 15 мкЗв/час и, согласно выполненному хронометражу, операция просвечивания занимала в среднем 1 час в течение рабочего дня или $26,9$ часа за 26 дней измерений.

Значения КП от измеряемых величин $H^*(10)$ и $H_p(10)$ к значению ЭД оценивали расчетным путем с использованием компьютерной программы «РАДОФАН» [7, 10]. Эта программа позволяет вычислять как ЭД, так и отношение $\text{ЭД}/H_p(10)$ в ряде точек, расположенных на глубине 10 мм под поверхностью торса расчетной модели MIRD-5 тела человека различного возраста [11, 12] или отношение $\text{ЭД}/H^*(10)$ в полях фотонного излучения.

Однако, с помощью этой программы нельзя было моделировать облучение работника источником, находящимся в радиационной головке дефектоскопа в положении хранения, т.е. за защитой. Так как в этом случае спектрально угловые характеристики поля излучения могли отличаться от таковых в случае поля излучения для точечного источника без защиты, необходимо было оценить насколько эти изменения могут повлиять на значения КП от измеряемых величин $H^*(10)$ и $H_p(10)$ к значению ЭД. Эта информация

была получена с помощью фантомных экспериментов с использованием цилиндрического закрытого радионуклидного источника ^{137}Cs (диаметром 8 мм и высотой 12 мм) активностью 208 мКи, находящегося в цилиндрической защите (диаметром 150 мм и высотой 200 мм) из стали с толщиной стенок 25 мм и физического фантома Alderson Rando [13], аналогичного по своим антропометрическим характеристикам расчетной модели. Моделировались условия облучения, соответствующие подготовке дефектоскопа к просвечиванию. В этом случае источник в цилиндрической защите располагался на расстоянии 20 см от передней поверхности фантома на уровне его 22 слоя (живота). Измерения, техника выполнения которых была неоднократно описана нами ранее [14–16], выполнялись с помощью термолюминесцентных детекторов с пределом детектирования дозы ~ 20 мкГр. Погрешность определения доз не превышала $\pm 10\%$ при доверительной вероятности 95% .

Результаты и обсуждение

Результаты фантомных экспериментов представлены в таблице 1. Во второй колонке таблицы представлены значения мощностей поглощенных доз в «органах» фантома Alderson Rando, соответствующих облучению от источника ^{137}Cs активностью 208 мКи, помещенного в защиту, имитирующую головку дефектоскопа. В третьей колонке таблицы представлены значения мощностей поглощенных доз в «органах» фантома Alderson Rando, соответствующих облучению от источника ^{137}Cs без защиты с активностью $A_{\text{эфф}} = 32$ мКи (см. ниже), а в четвертой колонке - результаты расчетов мощностей средних поглощенных органов доз от источника ^{137}Cs без защиты с активностью $A_{\text{эфф}} = 32$ мКи с помощью программы «РАДОФАН» в расчетной модели MIRD-5.

Анализ этих данных показывает, что распределение поглощенных доз по телу работника в случае источника, помещенного в защитный контейнер, мало отличается от распределения, обусловленного излучением точечного источника без защиты с эффективной активностью $A_{\text{эфф}}$, расположенного на том же расстоянии от поверхности тела,

Таблица 1

Значения мощностей поглощенных доз в «органах» фантома Alderson Rando и «органах» расчетной модели MIRD-5 при моделировании облучения от источника ^{137}Cs , находящегося в защите и без нее спереди на расстоянии 20 см от поверхности модели

[Table 1]

Values of absorbed dose rates in the "organs" of the Alderson Rando phantom and in the "organs" of the MIRD-5 computational model when simulating irradiation from ^{137}Cs source in shield and without it in front at a distance of 20 cm from the model surface]

Орган/ткань [Organ/Tissue]	Мощность поглощенной дозы в органе, мГр/час [Absorbed dose rate in the organ, mGy/h]		
	В фантомном эксперименте [In phantom experiment]		Расчет (РАДОФАН) [Calculation]
	Источник в защите [Source in shield]	Источник без защиты [Source without shield]	
Красный костный мозг [Red bone marrow]	0,35	0,38	0,44
Молочная железа [Breast]	1,04	1,35	1,40
Толстая кишка [Colon]	0,68	0,69	0,64
Легкие [Lungs]	0,50	0,50	0,67
Желудок [Stomach]	1,00	1,07	1,24
Мочевой пузырь [Urinary bladder]	0,53	0,50	0,55
Печень [Liver]	0,69	0,85	0,98
Пищевод [Oesophagus]	0,37	0,41	0,47
Щитовидная железа [Thyroid]	0,59	0,61	0,55
Поверхность кости [Bone surface]	0,35	0,38	0,38
Гонады [Gonads]	0,45	0,40	0,47
Кожа [Skin]	0,59	0,57	0,55
Остальные органы [Other]	0,59	0,58	0,64
ЭД [Effective dose]	0,59	0,62	0,72
ЭД/ $H_p(10)$, отн.ед. [$E/H_p(10)$]	0,45	0,44	0,52

по крайней мере, для расстояний больше 20 см. Значение $A_{эфф}$ можно определить по формуле:

$$A_{эфф} = \frac{10 \cdot P_{100}}{\Gamma}, \text{Ки}$$

где: P_{100} – мощность поглощенной дозы в воздухе, измеренная на расстоянии 100 см от оси контейнера с источником, мГр/час; Γ – гамма-постоянная радионуклида источника (мГр см²)/(мКи час). В нашем случае: $P_{100} = 90$ мГр/час; $\Gamma_{137} = 28,4$ (мГр см²)/(мКи час).

Наиболее интересное в контексте настоящей работы значение отношения $ЭД/H_p(10)$ при размещении источника в защитном контейнере, согласно результатам фантомного эксперимента, практически не отличается от такового в случае источника без контейнера, что позволяет в дальнейшем использовать расчетную программу «РАДОФАН» для оценки значений КП. Кроме того, сами абсолютные расчетные значения поглощенных доз в органах в большинстве случаев не отличаются более чем на 10% от аналогичных значений, полученных в эксперименте (см. колонки 3 и 4 табл. 1), что также предполагает возможность исполь-

зования расчетных методов, вместо трудоемких фантомных экспериментов при разработке модели профессионального облучения дефектоскопистов.

Перейдем к построению модели профессионального облучения дефектоскопистов, работающих с гамма-дефектоскопами «Гаммарид-192/120» с радионуклидным источником ^{192}Ir .

В таблице 2 представлены расчетные значения КП от показаний индивидуальных дозиметров, расположенных на торсе расчетной модели на высотах z от земли 122 см (уровень живота) и 136 см (уровень груди), к значению эффективной дозы E_{60} (согласно Публикации № 60 МКРЗ). Там же представлены значения КП от дозы в воздухе на высоте 100 см от уровня земли в отсутствии фантома к значению эффективной дозы E_{60} (см. рис. 4).

Из данных, представленных в работе [9], следует, что операция «просвечивание» за период измерений 26 дней дает следующий вклад в показания дозиметра, расположенного на груди, 15 мкЗв/час · 26,9 часа = 0,40 мЗв. Тогда вклад в показания дозиметра на груди за время измерений от двух других операций (переноска и установка дефектоскопа в рабочее положение) составит 0,95 мЗв – 0,40 мЗв = 0,55 мЗв.

Таблица 2

Расчетные значения КП (Зв/Зв) от измеряемых величин $H^*(10)$ и $H_p(10)$ к E_{60} при моделировании облучения дефектоскопистов, работающих с переносными дефектоскопами с источником ^{192}Ir

[Table 2

Calculated values of conversion factors (Sv/Sv) from the measured values $H^*(10)$ and $H_p(10)$ to E_{60} when simulating irradiation of the flaw detector operators working with portable flaw detectors with ^{192}Ir source]

Геометрия облучения [Geometry of exposure]	$\mathcal{E}D_{60}/H_p^{122}(10)$ $E_{60}/H_p^{122}(10)$	$\mathcal{E}D_{60}/H_p^{136}(10)$ $E_{60}/H_p^{136}(10)$	$\mathcal{E}D_{60}/H_{100}^*(10)$ $E_{60}/H_{100}^*(10)$
Спереди, источник в режиме хранения, на расстоянии 20 см от поверхности тела [Front, source in storage mode, at a distance of 20 cm from the body surface]	0,40	0,50	1,0
Сбоку, источник в режиме хранения, на расстоянии 20 см от поверхности тела [On the side, source in storage mode, at a distance of 20 cm from the body surface]	1,0/15	¹⁾ 1,7/40	0,40
Спереди, источник в режиме просвечивания на расстоянии 20 м от поверхности тела [Front, source in radioscopy mode at a distance of 20 m from the body surface]	0,80	0,80	0,80

¹⁾ Цифра слева от черты соответствует ситуации переноски дефектоскопа с той же стороны, где на теле размещен индивидуальный дозиметр, а цифра справа от черты - ситуации переноски дефектоскопа с противоположной стороны

[The number to the left of the line corresponds to the situation of carrying the flaw detector on the same side where the individual dosimeter is placed on the body, and the number to the right of the line corresponds to the situation of carrying the flaw detector from the opposite side]

Оценим соотношение значений мощностей $\mathcal{E}D_{60}$, соответствующих трем условиям облучения дефектоскопистов (производственным операциям, см. табл. 2), с помощью измерений характеристик поля излучения, представленных в работе [9].

Геометрия облучения: спереди, дефектоскоп на расстоянии 20 см от поверхности тела на высоте 120 см от земли, источник в режиме хранения. Измеренное значение мощности амбиентной дозы на расстоянии 10 см от поверхности дефектоскопа или на расстоянии 15,5 см от его

оси, где располагался источник в положении хранения составляло 54,3 мкЗв/час. Дефектоскоп располагался на высоте 120 см над землей, а его источник на расстоянии (10,0 см + 25,5 см) = 35,5 см от вертикальной оси расчетной модели. Путем несложных вычислений можно показать, что расстояние от источника до точки на высоте 100 см на вертикальной оси расчетной модели будет составлять 40,75 см. Тогда мощность амбиентной дозы в точке на высоте 100 см на вертикальной оси расчетной модели будет составлять 54,3 мкЗв/час $(15,5/40,75)^2 = 7,9$ мкЗв/час. С учетом значения КП из табл. 2 мощность $\mathcal{E}D_{60} = 7,9$ мкЗв/час $1,0 = 7,9$ мкЗв/час.

Геометрия облучения: сбоку, дефектоскоп на расстоянии 20 см от поверхности тела и на высоте 60 см от земли, источник в режиме хранения. Путем несложных вычислений можно показать, что расстояние от источника до точки на высоте 100 см на вертикальной оси расчетной модели будет составлять 60,6 см. Тогда мощность амбиентной дозы в точке на высоте 100 см на вертикальной оси расчетной модели будет составлять 54,3 мкЗв/час $(15,5/60,6)^2 = 3,6$ мкЗв/час. С учетом значения КП из табл. 2 мощность $\mathcal{E}D_{60} = 3,6$ мкЗв/час $0,4 = 1,4$ мкЗв/час.

Геометрия облучения: спереди, источник в режиме просвечивания на расстоянии 20 м от поверхности тела работника. Измеренная мощность амбиентной дозы в месте нахождения работника составляла 15,0 мкЗв/час. С учетом значения КП из табл. 2 мощность $\mathcal{E}D_{60} = 15,0$ мкЗв/час $0,8 = 12$ мкЗв/час.

Из результатов хронометража мы знаем, что время проведения операции просвечивания за рабочую смену составляло 1 час. Остальные две операции производственного цикла не хронометрировались, поэтому попытаемся грубо оценить времена, затрачиваемые на переноску и установку дефектоскопа за рабочую смену для оценки дозовых вкладов каждой из трех операций производственного цикла в показания индивидуального дозиметра. Суммарное среднее значение дозового вклада операций пере-

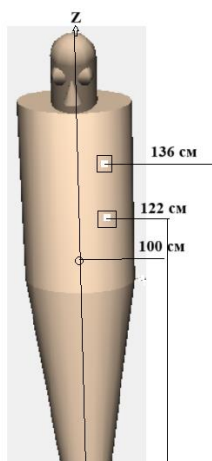


Рис. 4. Расположение индивидуальных дозиметров на теле работника и точки измерения мощности дозы в воздухе, где нормируется рассчитанное значение эффективной дозы

[Fig. 4. The location of individual dosimeters on the worker's body and the point of measuring the dose rate in the air, where the calculated value of the effective dose is normalized]

носки и установки дефектоскопа за рабочую смену в значение $H_p^{136}(10)$ составляло 550 мкЗв за 26 дней или 21,2 мкЗв/день. При этом вклад в значение $H_p^{136}(10)$ от операции установки дефектоскопа составлял $\Delta D_{60} / (\Delta D_{60} / H_p^{136}(10)) = 7,9 \text{ мкЗв/час} / 0,5 = 15,8 \text{ мкЗв/час}$, а переноски дефектоскопа $\Delta D_{60} / (\Delta D_{60} / H_p^{136}(10)) = 1,4 \text{ мкЗв/час} / 1,7 = 0,8 \text{ мкЗв/час}$.

Можно записать следующее уравнение с неизвестными временами выполнения этих операций x и y : $15,8 \text{ (мкЗв/час)} \cdot x \text{ (час/день)} + 0,8 \text{ (мкЗв/час)} \cdot y \text{ (час/день)} = 21,2 \text{ мкЗв/день}$. Если предположить, что время установки дефектоскопа в рабочее положение того же порядка, что и просвечивание изделия, т.е. $\sim 1 - 1,3 \text{ часа/день}$ ($3 - 4 \text{ мин/шов}$), то тогда на переноску дефектоскопа должно тратиться около 3 час/день. То есть, время, связанное с непосредственным выполнением работ производственного цикла, составляет $\sim 5 - 6 \text{ часов}$ за рабочую смену, что вполне разумно. Тогда дозовый вклад каждой операции в показания $H_p^{136}(10)$ будет составлять: просвечивание – 41%, установка дефектоскопа – 52% и переноска дефектоскопа – 7%.

Из данных, приведенных в табл. 2 следует, что значения КП в виде $\Delta D_{60} / H_p^{122}(10)$ и $\Delta D_{60} / H_p^{136}(10)$ мало отличаются для операций, обеспечивающих более 90% дозового вклада в показания дозиметра. Поэтому, во-первых, не играет большой роли место расположения дозиметра, на уровне груди или на уровне живота, и, во-вторых, можно использовать максимальное значение КП для двух основных операций производственного цикла, а именно 0,8 Зв/Зв, соответствующее операции просвечивания изделия. В этом случае консерватизм в оценке ΔD_{60} с помощью показаний дозиметров, расположенных на уровне груди или живота, не превысит 15% – 25%, соответственно.

Эти же значения КП можно применять и при работе с радионуклидами ^{60}Co , ^{137}Cs или ^{75}Se . Дополнительная погрешность не превысит 20%.

Заключение

Разработана модель профессионального облучения гамма-дефектоскопистов, работающих с переносными дефектоскопами в полевых условиях. Исходными данными для разработки и верификации модели служили результаты измерений характеристик поля гамма-излучения на рабочих местах дефектоскопистов и данные индивидуального дозиметрического контроля. Соотношения между измеряемыми ($H^*(10)$, $H_p(10)$) и нормируемыми (эффективная доза) величинами (коэффициенты перехода) определялись с помощью расчетов и фантомных экспериментов, моделирующих три основные операции полного производственного цикла работ: транспортировка дефектоскопа к месту просвечивания изделия, установка дефектоскопа для выполнения просвечивания и операция просвечивания изделия. В результате исследования было установлено, что более 90% дозового вклада в показания индивидуального дозиметра обусловлено установкой дефектоскопа в рабочее положение и просвечиванием изделия. Значения коэффициентов перехода для этих операций в виде отношения значений эффективной дозы и показаний дозиметров ($H_p(10)$), расположенных на теле работника на уровне груди (стандартное место) и уровне живота мало отличаются для обоих положений индивидуальных дозиметров. Использование максимального значения КП 0,8 Зв/Зв, соответству-

ющего операции просвечивания изделия, будет обеспечивать консерватизм оценки эффективной дозы для всего производственного цикла не более чем на 15% – 25% для дозиметров, расположенных на уровне груди или живота, соответственно.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Голиков В.Ю. осуществлял общее научное руководство исследованием, разработал дизайн исследования, определил цели и задачи, выполнил анализ данных, отредактировал и предоставил окончательный вариант рукописи для публикации в журнал.

Бажин С.Ю. провел литературный поиск, выполнил измерения индивидуальных эквивалентов доз, выполнил анализ данных, отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Шлеенкова Е.Н. выполнила измерения индивидуальных эквивалентов доз.

Богатырёва В.Ю. выполнила измерения индивидуальных эквивалентов доз.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

1. BSS. International Atomic Energy Agency, Radiation protection and safety of radiation sources: International Basic Safety Standards. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3. IAEA, 2014.
2. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 // Annals of the ICRP. 2007. Vol. 37, No (2-4).
3. International Commission on Radiological Protection. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60 // Annals of the ICRP. 1990. Vol. 21, No 1-3. P. 1-201.
4. ICRU. Measurement of dose equivalents from external radiation sources, Part 2. ICRU Report 43. ICRU Publications: Bethesda, MD. 1988.
5. ICRU. Quantities and units in radiation protection dosimetry. ICRU Report ICRU Publications: Bethesda, MD. ICRU, 1997. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD. 1993b.
6. ICRU. Fundamental quantities and units for ionizing radiation. ICRU Report 60. ICRU Publications: Bethesda, MD. 1988.
7. Голиков В.Ю. Коэффициенты перехода от индивидуального эквивалента дозы $H_p(10)$ к эффективной дозе в полях фотонного излучения и их использование при разработке моделей профессионального облучения // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 69-76. DOI: 10.21514/1998-42.
8. Бажин С.Ю., Шлеенкова Е.Н., Богатырёва В.Ю., Ильин В.А. Сравнение эффективных доз персонала, выполняющего дефектоскопию в стационарных и в нестационарных условиях // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 4. С. 64-69. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-64-69.
9. Бажин С.Ю., Шлеенкова Е.Н., Богатырёва В.Ю. Консервативная оценка доз внешнего облучения персонала при проведении радионуклидной дефектоскопии // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 2. С. 76-85. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-17-2-76-85.
10. Голиков В.Ю. Метод и компьютерная программа расчета доз фотонного излучения в фантомах тела человека // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2. С. 55-65.
11. Snyder W.S., Ford M.R., Warner G.G., Watson G.G. Revision of MIRD Pamphlet No 5 Entitled 'Estimates of absorbed fractions for monoenergetic photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom' ORNL4979. Tennessee: Oak Ridge National Laboratory, 1974.
12. Han E.Y., Bolch W.E., Eckerman K.F. Revisions to the ORNL

- series of adult and pediatric computational phantoms for use with the MIRD schema // Health Physics. 2006. Vol. 90, No 4. P. 337–356.
13. Alderson S.W., Lanza L.H., Rollins M., Spira I. An instrumented phantom system for analog computation of treatment plans // American Journal of Roentgenology. 1962. No. 87. P. 185.
 14. Golikov V.Yu., Nikitin V.V. Estimation of mean organ doses and effective dose equivalent from Rando Phantom measurements // Health Physics. 1989. Vol. 56, No 1. P. 111–115.
 15. Golikov V., Wallström E., Wöhni T. et al. Evaluation of conversion coefficients from measurable to risk quantities for external exposure over contaminated soil by use of physical human phantoms // Radiation Environmental Biophysics. 2007. Vol. 46, No 4. P. 375–382.
 16. Golikov V., Barkovsky A., Wallström E., Cederblad Å. A comparative study of organ doses assessment for patients undergoing conventional X-ray examinations: phantom experiments vs. calculations // Radiation Protection Dosimetry. 2018. Vol. 178, No 2. P. 223–234.

Поступила: 15.07.2024

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

ORCID: 0009-0003-5494-2300

Бажин Степан Юрьевич – заведующий лабораторией радиационного контроля, старший научный сотрудник, 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

ORCID: 0000-0003-1778-4334

Шлеенкова Екатерина Николаевна – младший научный сотрудник лаборатории радиационного контроля 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

ORCID: 0009-0006-6391-1639

Богатырёва Виктория Юрьевна – младший научный сотрудник лаборатории радиационного контроля, 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

ORCID: 0009-0003-6863-5192

Для цитирования: Голиков В.Ю., Бажин С.Ю., Шлеенкова Е.Н., Богатырёва В.Ю. Модель профессионального облучения работников, выполняющих контроль сварных соединений // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 3. С. 125–132. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-17-3-125-132

Model of occupational exposure of workers performing inspection of welded joints

Vladislav Yu. Golikov, Stepan Yu. Bazhin, Ekaterina N. Shleenkova, Victoria Yu. Bogatyreva

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

A model of occupational exposure to gamma flaw detector operators working with portable flaw detectors in the field has been developed. The initial data for the development and verification of the model were the results of measurements of the characteristics of the gamma radiation field at the workplaces of flaw detectors and data from individual dosimetric monitoring. The relationships between the measured ($H^(10)$, $H_p(10)$) and protection (effective dose) quantities (conversion coefficients) were determined using calculations and phantom experiments simulating three main operations of the full production cycle: transportation of the flaw detector to the place of X-raying of the product, installation of a flaw detector to perform x-raying and X-raying of the product. As a result of the study, it was found that more than 90% of the dose contribution to the readings of an individual dosimeter is due to the installation of the flaw detector in the working position and X-raying of the product. The values of the conversion coefficients for these operations in the form of the ratio of the effective dose values and the readings of dosimeters ($H_p(10)$) located on the worker's body at chest level (standard place) and abdominal level differ little for both positions of individual dosimeters. The use of maximum conversion coefficient value of 0.8 Sv/Sv corresponding to the operation of X-raying of the product will ensure conservatism in the assessment of the effective dose for the entire production cycle by no more than 15% and 25% for dosimeters located at the chest level and abdominal level, respectively.*

Key words: gamma radiation, flaw detection, effective dose, individual dose equivalent.

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

Authors' personal contribution

Golikov V.Yu. provided general scientific supervision of the study, developed the study design, defined goals and objectives, performed data analysis, edited and submitted the final version of the manuscript for publication in the journal.

Bazhin S.Yu. Conducted a literature search, performed measurements of individual dose equivalents, performed data analysis and edited an intermediate version of the manuscript.

Shleenkova E.N. performed measurements of individual dose equivalents.

Bogatyreva V.Yu. performed measurements of individual dose equivalents.

Conflict of interests

The authors declare that they have no conflicts of interest when conducting the study and preparing this paper.

References

1. BSS. International Atomic Energy Agency, Radiation protection and safety of radiation sources: International Basic Safety Standards. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3, IAEA. 2014.
2. ICRP 2007 The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP*. 2007;37 (2-4).
3. International Commission on Radiological Protection. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. *Annals of the ICRP* 1990;21(1-3): 1-201.
4. ICRU. Measurement of dose equivalents from external radiation sources, Part 2. ICRU Report 43. ICRU Publications: Bethesda, MD. 1988
5. ICRU. Quantities and units in radiation protection dosimetry. ICRU Report ICRU Publications: Bethesda, MD. ICRU, 1997. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD. 1993b.
6. ICRU. Fundamental quantities and units for ionizing radiation. ICRU Report 60. ICRU Publications: Bethesda, MD. 1998.
7. Golikov Vy. The conversion coefficients from Hp(10) to effective dose in the fields of photon radiation and their use in the development of occupational exposure models. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(4): 69-76 (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-69-76.
8. Bazhin SYu, Shleenkova EN, Bogatyreva VYu, Ilyin VA. Comparison of effective doses for personnel performing flaw detection in stationary conditions and in situ. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(4): 64-69 (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-64-69.
9. Bazhin SYu, Shleenkova EN, Bogatyreva VYu. Conservative assessment of external radiation dose for staff in the event of radionuclide flaw detection. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(2): 76-85 (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2023-17-2-76-85.
10. Golikov VYu. Method and software for photon dose calculation in phantoms of human body. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2): 55-65 (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426x-2019-12-2-55-65.
11. Snyder WS, Ford MR, Warner GG, Watson GG. Revision of MIRD Pamphlet No 5 Entitled 'Estimates of absorbed fractions for monoenergetic photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom' ORNL4979. Tennessee: Oak Ridge National Laboratory; 1974.
12. Han EY, Bolch WE, Eckerman KF. Revisions to the ORNL series of adult and pediatric computational phantoms for use with the MIRD schema. *Health Physics*. 2006;90(4): 337-356.
13. Alderson SW, Lanzl LH, Rollins M, Spira I. An instrumented phantom system for analog computation of treatment plans. *American Journal of Roentgenology*. 1962;87: 185.
14. Golikov VYu, Nikitin W. Estimation of mean organ doses and effective dose equivalent from Rando Phantom measurements. *Health Physics*. 1989;56(1): 111-115.
15. Golikov V, Wallström E, Wöhni T Tanaka K, Endo S, Hoshi M. Evaluation of conversion coefficients from measurable to risk quantities for external exposure over contaminated soil by use of physical human phantoms. *Radiation Environmental Biophysics*. 2007;46(4): 375-382.
16. Golikov V, Barkovsky A, Wallström E, Cederblad Å. A comparative study of organ doses assessment for patients undergoing conventional X-ray examinations: phantom experiments vs. calculations. *Radiation Protection Dosimetry*. 2018;178(2): 223-234.

Received: July 15, 2024

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 Wellbeing (Mira Str., 8, Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: sg235@rambler.ru)

ORCID: 0009-0003-5494-2300

Stepan Yu. Bazhin – Head of the Laboratory of Radiation Control, Senior Researcher, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0003-1778-4334

Ekaterina N. Shleenkova – Junior Researcher of the Laboratory of Radiation Control, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0009-0006-6391-1639

Victoria Yu. Bogatyreva – Junior Researcher of the Laboratory of Radiation Control, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0009-0003-6863-5192

For citation: Golikov V.Yu., Bazhin S.Yu., Shleenkova E.N., Bogatyreva V.Yu. Model of occupational exposure of workers performing inspection of welded joints. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 3, P. 125-132. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-125-132