

ОБОСНОВАНИЕ ПОРЯДКА КОНТРОЛЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ДОЗ В ХРУСТАЛИКЕ ГЛАЗА ОТ ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ АТОМНОГО СУДОСТРОЕНИЯ И СУДОРЕМОНТА

Хазагеров С.М.¹, Шаяхметова А.А.¹, Арефьева Д.В.¹, Иванова Т.А.¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие научно-исследовательский институт промышленной и морской медицины Федерального медико-биологического агентства, Санкт-Петербург, e-mail: niipmm@fmbamail.ru

Разработан порядок выполнения радиационного (исследовательского) контроля, необходимого для получения исходных данных в обеспечение расчётного способа установления соотношения эквивалентной дозы в хрусталике глаза к эффективной дозе, при облучении органов и тканей фотонами, имеющими энергию излучения в диапазоне от 60,0 до 662,0 кэВ. Для определения индивидуальных доз облучения персонала предприятий атомного судостроения и судоремонта использовался метод термолуминесцентной дозиметрии. Основным средством обеспечения адекватного измерения дозы внешнего облучения хрусталика глаза, максимально приближенной к $H_r(3)$, являлся специально разработанный на основании результатов патентного исследования антропоморфный органотропный тканеэквивалентный фантом головы, обеспечивающий накопление (регистрацию) дозы внешнего облучения термолуминесцентными детекторами, позиционируемых в месте расположения хрусталиков. Результаты апробации фантома головы в лабораторных условиях позволили разработать порядок выполнения радиационного (исследовательского) контроля, необходимого для получения исходных данных в обеспечение расчётного способа, адаптированного к организации рутинного радиационного контроля в условиях предприятия атомного судостроения и судоремонта. Порядок выполнения радиационного (исследовательского) контроля был оформлен в виде методики радиационного контроля фотонного излучения в производственных условиях. Результаты апробации методики в условиях предприятия атомного судостроения и судоремонта позволили разработать первую редакцию методических указаний по методам контроля и учёта эквивалентной дозы в хрусталике глаза и коже на предприятиях атомного судостроения и судоремонта. Использование методических указаний обеспечит реализацию нового поколения стандартов безопасности, разрабатываемых МАГАТЭ.

Ключевые слова: стандарты безопасности МАГАТЭ, предприятие атомного судостроения и судоремонта; персонал группы А; низкоэнергетическое фотонное излучение и бета – излучение, внешнее облучение хрусталика глаза, способы и средства индивидуального дозиметрического контроля.

JUSTIFICATION OF THE ORDER OF CONTROL OF INDIVIDUAL EQUIVALENT DOSES IN THE EYE CRYSTALLINE LENS FROM PHOTON RADIATION UNDER PRODUCTION CONDITIONS AT THE ENTERPRISES OF NUCLEAR SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR

Hazagerov S. M.¹, Shayakhmetova A.A.¹, Arefyeva D. V.¹, Ivanova T.A.¹

¹Federal state unitary enterprise research institute of industrial and sea medicine Federal Medical Biological Agency, St. Petersburg, e-mail: niipmm@fmbamail.ru

The order of performance of the radiation (research) control necessary for receiving basic data in providing a settlement way of establishment of a ratio of an equivalent dose in an eye crystalline lens to an effective dose is developed, at radiation of bodies and fabrics by the photons having energy of radiation in the range from 60,0 to 662,0 keV. For definition of individual doses of radiation of the personnel of the enterprises of nuclear shipbuilding and ship repair the method of thermoluminescent dosimetry was used. The main instrument for ensuring of adequate measurement of the dose of external radiation of a crystalline lens of an eye which is most approached to $H_r(3)$ was the anthropomorphous organotropny tkaneekvivalentny phantom of the head which is specially developed on the basis of results of patent research providing accumulation (registration) of a dose of external radiation with thermoluminescent detectors, the crystalline lenses positioned in the location. Results of approbation of the phantom of the head in vitro allowed to develop an order of performance of the radiation (research) control necessary for receiving basic data in providing the settlement way adapted for the organization of routine radiation control in the conditions of the enterprise of nuclear shipbuilding and ship repair. The order of performance of radiation (research) control was issued in the form of a technique of radiation control of photon radiation under production conditions. Results of approbation of a technique in the

conditions of the enterprise of nuclear shipbuilding and ship repair allowed to develop the first edition of methodical instructions on control methods and the accounting of an equivalent dose in a crystalline lens of an eye and skin at the enterprises of nuclear shipbuilding and ship repair. Use of methodical instructions will provide realization of new generation of the standards of safety developed by IAEA.

Keywords: standards of safety of IAEA, enterprise of nuclear shipbuilding and ship repair; personnel of group A; low-energy photon radiation and a beta – the radiation, external radiation of a crystalline lens of an eye, ways and means of an individual radiation control.

Технологии радиационно опасных работ, выполняемых на конкретных предприятиях атомного судостроения и судоремонта (ПАСС), существенно различаются. Так, например, на ОАО «ЦС «Звездочка» и его филиалах основной объем работ приходится на ремонт, модернизацию и утилизацию атомных объектов морской техники, включая технологические операции по обращению с облученным ядерным топливом [1]. При этом создаются условия, существенно изменяющие такую важную характеристику поля ионизирующего излучения, как энергия излучения, в частности, фотонное излучение, проходя через конструкционные материалы и биологическую защиту, претерпевает многократное рассеивание. Для рассеянного фотонного излучения характерна большая доля фотонов с низкими энергиями излучения.

При рутинном радиационном контроле (РК) в производственных условиях ПАСС, эквивалентная доза в хрусталике глаза от низкоэнергетического фотонного излучения и бета - излучения не регистрируется, а приписывается на основе показаний индивидуального дозиметра Hp(10). Такой подход обоснован тем соображением, что в соответствии с НРБ 99-2009 [6], эквивалентная доза за год в хрусталике глаза для персонала группы А составляет 150 мЗв, при этом эффективная доза должна быть менее 20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год.

Результаты проведенного анализа [5] показывают, что ситуация может принципиально измениться после введения в Российской Федерации новых норм радиационной безопасности, учитывающих рекомендации МАГАТЭ. В соответствии с новым поколением стандартов безопасности, разрабатываемых МАГАТЭ, предложено изменить подход к нормированию эквивалентной дозы в хрусталике глаза (снижение предела эквивалентной дозы в хрусталике глаза до 20 мЗв в год для персонала группы А). В случае внедрения данного норматива в Российской Федерации это потребует дополнительного исследования способов и средств защиты хрусталика глаза от низкоэнергетического фотонного излучения и бета - излучения, как органа, лимитирующим облучение персонала.

Одним из направлений работ в этой области является разработка способов и средств установления соотношения измеренных значений индивидуального эквивалента дозы внешнего облучения хрусталика глаза (Hp(3)) и индивидуального эквивалента дозы внешнего облучения (Hp(10)) от низкоэнергетического фотонного излучения и бета –

излучения, что позволит обеспечить исследования способов и средств защиты хрусталика глаза необходимыми исходными данными.

Цель исследований

Для установления соотношения $H_p(3)$ и $H_p(10)$ необходимо исследовать закономерности формирования индивидуальных доз облучения персонала в производственных условиях ПАСС. Адаптация организации исследований и практики рутинного РК в производственных условиях ПАСС возможна в формате исследовательского контроля индивидуальных доз облучения персонала.

С целью адаптации организации исследований и практики рутинного РК в производственных условиях ПАСС, возникает необходимость разработки порядка получения исходных данных для установления соотношения $H_p(3)$ и $H_p(10)$ при выполнении исследовательского контроля.

Задачи исследований

Основной задачей начального этапа разработки порядка получения исходных данных была апробация основных положений разработанной методологии исследовательского контроля в обеспечение исследований зависимости показаний дозиметров $H_p(3)$ и $H_p(10)$ от энергии фотонного излучения в лабораторных условиях и в производственных условиях ПАСС.

На заключительном этапе основной задачей была разработка предложений по порядку получения исходных данных в ходе исследовательского контроля индивидуальных доз облучения персонала в производственных условиях ПАСС.

Материалы и методы

При выполнении экспериментальной части исследований в лабораторных условиях и в производственных условиях ПАСС использовались специально разработанные методики и программы [2, 3, 4]. Для определения индивидуальных доз облучения персонала использовался метод термолюминесцентной дозиметрии [7].

В ходе выполнений исследований в перечне исходных данных рассматривались величины, указанные в графе 1 таблицы 1.

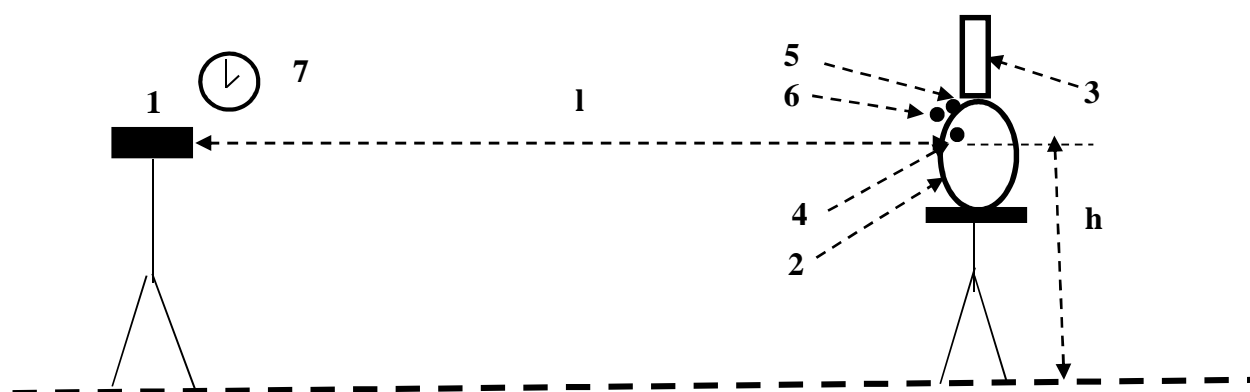
В лабораторных и производственных условиях основным средством обеспечения измерения дозы внешнего облучения хрусталика глаза, максимально приближенной к $H_p(3)$, являлся специально разработанный на основании результатов патентного исследования антропоморфный органотропный тканеэквивалентный фантом головы человека (далее - фантом). Фантом имитирует мягкие (кожа, подкожная жировая клетчатка, мышцы и др.) и костную ткань, глазное яблоко и вещество головного мозга при взаимодействии с ионизирующим излучением.

Измеряемые величины и средства измерения

Измеряемая величина, единицы измерения	Средство измерения
Мощность амбиентного эквивалента дозы фотонного излучения, $\dot{H}_p^*(10)$, мЗв/ч	Дозиметр-спектрометр МКС-АТ6102А
Плотность потока фотонов, $\varphi(E\gamma)$, част./мин см ²	
Энергия фотонного излучения, $E\gamma$, эВ	
Плотность потока бета-частиц, $\varphi(E\beta)$, част./мин см ²	Дозиметр – радиометр ДКС-96
Индивидуальный эквивалент дозы внешнего облучения кожи, $H_p(0,07)$, мЗв	Установка дозиметрическая термolumинесцентная ДВГ-02ТМ с комплектом индивидуальных термolumинесцентных дозиметров МКД (тип Б)
Индивидуальный эквивалент дозы внешнего облучения хрусталика глаза, $H_p(3)$, мЗв	Установка дозиметрическая термolumинесцентная ДВГ-02ТМ с комплектом индивидуальных термolumинесцентных дозиметров МКД (тип А)
Фантомный эквивалент дозы внешнего облучения хрусталика глаза. $H_p(3)$, мЗв	Установка дозиметрическая термolumинесцентная ДВГ-02ТМ с комплектом термolumинесцентных дозиметров установленных на место хрусталиков глаз
Индивидуальный эквивалент дозы внешнего облучения, $H_p(10)$, мЗв	Установка дозиметрическая термolumинесцентная ДВГ-02ТМ с комплектом индивидуальных термolumинесцентных дозиметров DTU-1 или ДТЛ-02
Амбиентный эквивалент дозы внешнего облучения, $H_p(10)$, мЗв	Установка дозиметрическая термolumинесцентная ДВГ-02ТМ с комплектом амбиентных термolumинесцентных дозиметров

Назначение фантома заключается в воспроизведении поля ионизирующего излучения от внешних и внутренних источников, образующегося в голове человека, находящегося в зоне действия ионизирующего излучения, с накоплением (регистрацией) дозы внешнего облучения термолюминесцентными детекторами, позиционируемыми в месте расположения хрусталиков (фантомный эквивалент дозы внешнего облучения хрусталика глаза, Нр(3)_Ф).

Использование фантома в совокупности с другими средствами измерений позволяет обеспечить исследования искомой закономерности необходимыми исходными данными (рисунок 1).



- 1 Источник ионизирующего излучения;
- 2 Фантом;
- 3 Спектрометр МКС-АТ6102А с коллиматором;
- 4 Термолюминесцентный дозиметр на основе LiF, активированного Mg и Ti;
- 5 Индивидуальный термолюминесцентный дозиметр МКД (тип А);
- 6 Индивидуальный термолюминесцентный дозиметр DTU-1 (ДТЛ-02);
- 7 Хронометр;
- 1 Расстояние от источника ионизирующего излучения до фантома, см;
- h Расстояние от подстилающей поверхности до уровня глаз фантома, см

Рис. 1. Схема эксперимента в условиях лаборатории

В ходе лабораторных экспериментов в качестве контрольных источников ионизирующего излучения использовались ^{241}Am с активностью 50 МБк (энергия излучения равна 60 кэВ) и ^{137}Cs с активностью 120 МБк (энергия излучения равна 662 кэВ).

Результаты и обсуждение

В ходе разработки основных положений методологии исследовательского контроля, были выполнены экспериментальные работы, в ходе которых исследовалась зависимость показаний дозиметров Нр(3) и Нр(10) от энергии фотонного излучения.

Для измерения Нр(3) и Нр(10) (таблица 2) в лабораторных условиях фантом был использован согласно схеме, представленной на рисунке 1.

Таблица 2

Результаты измерений и моделирования

Показатель	Значение, мЗв
При использовании контрольного источника ^{241}Am	
Измеренный индивидуальный эквивалент дозы внешнего облучения Нр(10)	0,00053
Измеренный фантомный эквивалент дозы внешнего облучения хрусталика глаза Нр(3) _ф	0,00090
Расчетный эквивалент дозы в хрусталике глаза Нр(3)	0,00108
При использовании контрольного источника ^{137}Cs	
Измеренный индивидуальный эквивалент дозы внешнего облучения Нр(10)	0,012
Измеренный фантомный эквивалент дозы внешнего облучения хрусталика глаза Нр(3) _ф	0,015
Расчетный эквивалент дозы в хрусталике глаза Нр(3)	0,018

Соблюдение метрологических требований к проведению измерений обеспечивалось методикой [2].

В ходе выполнения лабораторного эксперимента также проводилось моделирование полей с использованием контрольных источников ионизирующего излучения.

Модельное распределение плотности потока фотонов от контрольного источника ионизирующего излучения включало в себя следующие процедуры:

- регистрацию на определённом расстоянии аппаратного спектра от данного контрольного источника с помощью спектрометра МКС-АТ6102А;
- составление расчетных матриц на основании аппаратного спектра (данные энергетического распределения аппаратного спектра от источника, данные энергетического распределения аппаратного спектра фона и соотношение средней энергии фотонов с номером диапазона каналов);
- составление матрицы исходных данных для моделирования на основании данных о средних значениях энергии фотонов и скорости счета фотонов;
- расчёт поглощенной дозы в хрусталике глаза на основании, рассчитанного согласно программы для имитационного моделирования систем детектирования и регистрации

ионизирующих излучений МСС 3D (свидетельство о метрологической аттестации программного обеспечения № С-2101-001 от 27.11.2007 г.), энергетического спектра для данного виртуального источника и смоделированного рассеяния излучения в глазном яблоке;

- расчёт эквивалентной дозы в хрусталике глаза на основании коэффициента качества для фотонного излучения (таблица 2).

Для обработки экспериментальных данных использовалась методика [3].

В ходе эксперимента в производственных условиях ПАСС (СРЗ «Нерпа» - филиал ОАО «ЦС «Звездочка») фантом располагался непосредственно на рабочем месте (плавучая техническая базы «Лепсе») и оборудовался средствами измерений, обозначенными на рисунке 1 позициями 4, 5 и 6.

На основании результатов измерений (таблица 3), можно сделать предварительный вывод о различии устанавливаемых отношений (значений измеренных доз) и целесообразности использования, апробированных в ходе лабораторного эксперимента, принципов моделирования и верификации результатов расчета (эквивалентной дозы в хрусталике глаза), для разработки порядка получения экспериментальных данных при выполнении исследовательского контроля.

Таблица 3

Результаты измерений доз в разных условиях

Условия выполнения измерений	Место расположения дозиметра	Отношение значений измеренных доз ¹⁾			
		$\frac{H_p(3)_ф}{H_p(3)_{ид}}$	$\frac{H_p(3)_ф}{H_p(10)}$	$\frac{H_p(3)_{ид}}{H_p(10)}$	$\frac{H_p(3)_{ид}}{H_p(10)}$
Лаборатория	Фантом	-	1,698 ²⁾ 1,250 ³⁾	-	-
Производство ⁴⁾	Фантом	0,768	1,035	1,198	
Производство ⁴⁾	Персонал				2,600

Примечания

1 $H_p(3)_ф$ - фантомный эквивалент дозы внешнего облучения хрусталика глаза; $H_p(3)_{ид}$ - индивидуальный эквивалент дозы внешнего облучения хрусталика глаза; $H_p(10)$ - индивидуальный эквивалент дозы внешнего облучения.

2 Контрольный источник ионизирующего излучения радионуклид ²⁴¹Am.

3 Контрольный источник ионизирующего излучения радионуклид ¹³⁷Cs.

4 Смесь радионуклидов, включая ¹³⁷Cs.

Результаты апробации методики РК фотонного излучения в производственных условиях ПАСС (СРЗ «Нерпа» - филиал ОАО «ЦС «Звездочка») [2] легли в основу первой редакции методических указаний по методам контроля и учёта эквивалентной дозы в хрусталике

глаза и коже на ПАСС. Согласно методических указаний объектом РК является поле фотонного излучения. На рабочих местах персонала с помощью средств, указанных в графе 2 таблицы 1, выполняются измерения следующих величин:

- мощность амбиентного эквивалента дозы фотонного излучения, $\dot{H}_R^*(10)$;
- плотность потока фотонов;
- плотность потока бета-частиц;
- энергия фотонного излучения;
- амбиентный эквивалент дозы внешнего облучения, $H_R(10)$;
- индивидуальный эквивалент дозы внешнего облучения кожи обследуемых работников, $H_R(0,07)$;
- индивидуальный эквивалент дозы внешнего облучения хрусталика глаза, $H_R(3)$;
- индивидуальный эквивалент дозы внешнего облучения, $H_R(10)$;
- фантомный эквивалент дозы внешнего облучения хрусталика глаза, $H_R(3)_ф$.

Апробация первой редакции методических указаний в производственных условиях ПАСС, обеспечит необходимый объем информации для оформления заключительной редакции методических указаний, определяющих, адаптированный к производственным условиям, порядок получения исходных данных, необходимый для определения эквивалентных доз в хрусталике глаза и коже персонала ПАСС.

Заключение

При выполнении радиационно опасных работ на ПАСС возникают условия, при которых возможно повышенное облучение хрусталика глаза. Это связано с особенностями энергетического спектра фотонного излучения, создающего радиационные поля на рабочих местах при проведении работ на атомных объектах морской техники.

Переход на новые значения предела эквивалентной дозы в хрусталике глаза, рекомендуемые МАГАТЭ, требует проведения дополнительных исследований, направленных на изучение закономерностей формирования $H_R(3)$ в производственных условиях на ПАСС.

Порядок получения экспериментальных данных, изложенный в методических указаниях, позволяет осуществить исследовательский контроль, необходимый для выявления закономерностей формирования индивидуальных доз облучения персонала.

Полученные результаты исследований позволят обосновать состав организационных и технических мероприятий по оптимизации радиационной защиты при проведении радиационно опасных работ на ПАСС, и обеспечат реализацию нового поколения стандартов безопасности, разрабатываемых МАГАТЭ.

Список литературы

1. Обоснование путей повышения эффективности защиты персонала предприятий атомного судостроения и судоремонта от воздействия производственных факторов радиационной природы и совершенствования системы обеспечения безопасности водолазных работ в условиях воздействия ионизирующих излучений. Оценка производственных факторов, определяющих условия труда персонала на предприятиях атомного судостроения и судоремонта [Текст]: отчет о НИР (заключительный)/ ФГУП НИИПММ; рук. Натха С.В.; исполн.: Жерновой В.Ф [и др.]. – Санкт-Петербург, 2012 – 121 с.
2. Методика радиационного контроля фотонного излучения в производственных условиях [Текст]: ФГУП НИИПММ; рук. Натха С.В.; исполн.: Кожухова Н.А. [и др.]. – Санкт-Петербург, 2014 – 27 с.
3. Методика обработки результатов измерений плотности потока и энергии фотонного излучения [Текст]: ФГУП НИИПММ; рук. Натха С.В.; исполн.: Кожухова Н.А. [и др.]. – Санкт-Петербург, 2014 – 16 с.
4. Программа измерений радиационных полей при выполнении работ на предприятиях атомного судостроения и судоремонта [Текст]: ФГУП НИИ-ПММ; рук. Натха С.В.; исполн.: Кожухова Н.А. [и др.]. – Санкт-Петербург, 2014 – 18 с.
5. Рубцов В.И. [и др.] Контроль эквивалентной дозы облучения хрусталика глаза и оценка возможности ее снижения // АНРИ. – 2013. - № 3 - С. 32-37
6. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. Санитарные правила и нормативы (СанПин 2.6.1.2523-09): утв. и введены в действие от 07.07.09 г. - М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. – 100 с.
7. Контроль эквивалентных доз фотонного и бета-излучения в коже и хрусталике глаза (МУ 2.6.1.56-02.) - М., 2002: ГУП ГНЦ ИБФ: утв. и введены в действие ДБЧС Минатома России и Федеральным Управлением «Медбиозкстрем» при Минздраве России 14.11.2002 г. – 28 с.

Рецензенты:

Петраш В.В., д.б.н., академик РАЕ, заведующий лабораторией биофизических исследований Федерального государственного унитарного предприятия научно-исследовательский институт промышленной и морской медицины Федерального медико-биологического агентства (ФГУП НИИ ПММ ФМБА России), г. Санкт-Петербург;

Сулин А.Б., д.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории гигиенической оценки и контроля средств обеспечения безопасности воздушной среды промышленных объектов Федерального государственного унитарного предприятия научно-исследовательский

институт промышленной и морской медицины Федерального медико-биологического агентства (ФГУП НИИ ПММ ФМБА России), г. Санкт-Петербург.