

# Контроль эквивалентной дозы облучения хрусталика глаза и оценка возможности ее снижения

Проведен анализ изменений в системе радиационного контроля и организации индивидуальной защиты персонала после введения в России новых Норм радиационной безопасности, учитывающих рекомендованные в Основных нормах безопасности МАГАТЭ новые пределы доз облучения хрусталика глаза. Показано, что ввиду невозможности создания СИЗ глаз от фотонов с энергией свыше 0,1 МэВ, снижение допустимой среднегодовой эквивалентной дозы облучения хрусталика глаза до 20 мЗв приведет к необходимости ограничения допустимой среднегодовой эффективной дозы до 16–17 мЗв. Сформулирован перечень мероприятий, которые необходимо осуществить для практической реализации контроля эквивалентной дозы облучения хрусталика глаза.

**Ключевые слова:** Нормы радиационной безопасности, облучение хрусталика глаза, средства индивидуальной защиты.

В.И.Рубцов, В.Н.Клочков, А.Б.Требухин, А.Ю.Нефедов,  
Е.В.Клочкова (ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И.Бурназяна ФМБА России, г. Москва);  
К.Н.Нурлыбаев, Ю.Н.Мартынюк, Л.Л.Медведев (НПП «Доза», г. Зеленоград)

Действующими Нормами радиационной безопасности НРБ-99/2009 [1] установлен основной дозовый предел облучения хрусталика глаза, равный эквивалентной дозе 150 мЗв/год.

Согласно примечанию к таблице 3.1 НРБ-99/2009 «предел дозы при облучении кожи лица обеспечивает не превышение предела дозы на хрусталик от бета-частиц». Как показали наши расчеты, представленные в статье [2], в настоящее время на АЭС и предприятиях атомной промышленности при штатной работе оборудования специальная защита кожных покровов и хрусталика глаза персонала не нужна, за исключением отдельных немногочисленных

случаев. Соблюдение основного дозового предела по эффективной дозе гарантирует не превышение предела по эквивалентной дозе облучения хрусталика глаза.

Ситуация принципиально изменится после введения в России новых Норм радиационной безопасности, учитывающих рекомендованные в Основных нормах безопасности МАГАТЭ [3] новые пределы доз облучения хрусталика глаза персонала: эквивалентная доза в хрусталике глаза 20 мЗв в год, усредненная за пять последовательных лет (100 мЗв за 5 лет) и 50 мЗв за любой отдельный год. При этом предел дозы облучения хрусталика глаза для лиц из населения

оставлен неизменным – 15 мЗв в год.

Таким образом, МАГАТЭ рекомендованы почти равные пределы дозы облучения хрусталика глаза персонала и населения: 20 и 15 мЗв в год, соответственно. Для сравнения: основные дозовые пределы для других видов облучения персонала и населения отличаются гораздо больше: эффективная доза – 20 и 1 мЗв в год, эквивалентная доза в коже, кистях и стопах – 500 и 50 мЗв в год, соответственно. Причина этого понятна, если учесть, для предотвращения каких эффектов облучения установлены нормативы. Ограничение эффективной дозы и эквивалентной дозы облучения ко-

жи, кистей и стоп имеет целью снижение вероятности стохастических эффектов, поэтому дозовые пределы для населения установлены в 10–20 раз меньше дозовых пределов для персонала. В отличие от этого, основным эффектом облучения хрусталика глаза является радиационная катаракта – детерминированный эффект, который проявляется одинаково и у персонала, и у населения.

Предложенное МАГАТЭ изменение основного дозового предела облучения хрусталика глаза принципиально изменяет систему обеспечения радиационной безопасности персонала – соблюдение основного дозового предела по эффективной дозе уже не обеспечит соблюдения предела облучения хрусталика глаза по эквивалентной дозе.

Данные, приведенные в Публикации 74 МКРЗ [4], позволяют рассчитать отношение эквивалентной дозы в хрусталике глаза к эффективной дозе в диапазоне энергии фотонного излучения от 0,01 до 10 МэВ (табл.1). Полученные результаты показывают, что в диапазоне энергий гамма-излучения от 0,06 до 10 МэВ эквивалентная доза в хрусталике глаза численно превышает эффективную дозу примерно на 20 %, а в диапазоне менее 0,05 МэВ это превышение достигает нескольких раз и даже несколько десятков раз.

Таким образом, после уменьшения основного дозового предела облучения хрусталика глаза до 20 мЗв в год именно хрусталик глаза становится своеобразным «критическим органом», лимитирующим облучение персонала.

Для обеспечения радиационной безопасности персонала в новой системе основных дозо-

вых пределов необходимо осуществление комплекса мероприятий, включающего:

1. обеспечение персонала индивидуальными дозиметрами мягкого фотонного и бета-излучения, измеряющими эквивалентную дозу облучения хрусталика глаза;

2. обеспечение персонала средствами индивидуальной защиты глаз, позволяющими уменьшить эквивалентную дозу облучения хрусталика глаза.

**Требования к индивидуальным дозиметрам.** Как указано в Руководстве МАГАТЭ [5], для определения дозовой нагрузки на хрусталик глаза нужно измерять индивидуальный эквивалент дозы  $H_p(3)$ , т.е. эквивалент дозы на глубине 3 мм ткани. Данному требованию удовлетворяют термомюлюминесцентные дозиметры МКД (тип А) [6] – дозиметры для измерения эквивалентных доз фотонного и бета-излучения  $H_p(3)$  в хрусталике глаза.

Дозиметр МКД (тип А) представляет собой детектор ДТТ-4 диаметром 5 мм и толщиной 1 мм из фтористого лития (LiF), активированного марганцем и титаном (Mg, Ti), расположенный за фильтром толщиной 300 мг·см<sup>-2</sup>. Таким образом, конструкция дозиметра  $H_p(3)$  соответствует требованиям Руководства МАГАТЭ [5].

Вышеуказанное упрощает калибровку дозиметра: для дозиметра с тканеэквивалентным детектором, удовлетворяющего требованиям к дозиметру  $H_p(3)$ , достаточно калибровки одним типом излучения в одной точке по энергии и дозе из диапазона энергии и диапазона дозы. Поскольку доза в хрусталике глаза в основном обусловлена слабопроникающим излучением (фотонами с энергиями до 15 кэВ и

бета-частицами), в связи с трудностями калибровки дозиметров по бета-излучению допускается их калибровка по фотонному излучению источника цезий-137.

#### **Возможности применения средств индивидуальной защиты.**

*Защита от фотонного излучения.* Как следует из табл.1, для защиты хрусталика глаза от фотонного излучения недостаточно применять средства индивидуальной защиты (СИЗ), обеспечивающие только фронтальную защиту глаза (очки) – необходимо обеспечить защиту головы от изотропного облучения, т.е. нужно применять шлем. Масса защитных средств, надеваемых на голову, ограничивается по эргономическим соображениям. Установленная в различных документах максимальная масса СИЗ, создающая нагрузку на голову, отличается для СИЗ различного назначения. Так, для фильтрующих СИЗ органов дыхания ГОСТ 12.4.041-89 [7] была установлена максимальная масса, создающая нагрузка на голову не более 0,85 кг. В ГОСТ 26584-85 [8] указано, что масса шлема с комплектующими изделиями, которые одновременно устанавливаются на него, не должна превышать 1500 г.

Поскольку защитный шлем, обеспечивающий защиту хрусталика глаза, должен применяться в первую очередь при проведении ремонтных работ, отличающихся повышенной тяжестью труда, сложностью выполняемых операций, ограниченным временем, необходимо ориентироваться на меньшую из указанных значений массы СИЗ: 0,85 кг. И лишь в предельном случае масса шлема, защищающего не только от внешне-

Табл. 1. Отношение эквивалентной дозы в хрусталике глаза к эффективной дозе.

Энергия фотонного излучения, МэВ	Отношение эквивалентной дозы в хрусталике глаза к эффективной дозе	
	Для фронтального облучения	Для изотропного облучения
0,010	46,55	32,36
0,015	16,22	19,19
0,02	7,48	10,08
0,03	2,88	3,66
0,04	1,69	1,96
0,05	1,28	1,45
0,06	1,14	1,26
0,07	1,09	1,19
0,08	1,08	1,18
0,10	1,10	1,21
0,15	1,13	1,28
0,20	1,16	1,28
0,30	1,17	1,27
0,40	1,17	1,26
0,50	1,16	1,24
0,60	1,15	1,22
0,80	1,13	1,19
1	1,11	1,17
2	1,06	1,13
4	1,00	1,11
6	0,97	1,11
8	0,95	1,11
10	0,94	1,11

го облучения, но и от механического, высокотемпературного, химического и других видов вредного и опасного воздействия, может достигать 1,5 кг.

С учетом принятого ограничения массы шлема можно сформулировать требование к защитному материалу. При минимальном диаметре шлема 30 см площадь его поверхности составит около 3000 см<sup>2</sup>. Следовательно, допустимая поверхностная плотность материала шлема ( $d$ , г/см<sup>2</sup>) должна составлять 0,3 г/см<sup>2</sup>, а предельная – 0,5 г/см<sup>2</sup>. При этом лицевая часть шлема должна иметь прозрачный участок, обеспечивающий требуемые поля зрения.

Известно, что ослабление фотонного излучения при прохождении через вещество в первом приближении описывается соотношением [9]:

$$P = P_0 \exp(-\mu d),$$

где  $P_0$ ,  $P$  – мощность дозы фотонного излучения перед и за защитным материалом, соответственно;  $\mu$  – массовый коэффициент поглощения энергии фотонного излучения, см<sup>2</sup>/г.

С учетом изложенного выше можно сформулировать требование к массовому коэффициенту поглощения энергии фотонного излучения материалом шлема:

$$\mu = 1/d \ln(P_0/P).$$

При минимальном требова-

нии  $P_0/P = 2$  (коэффициент защиты – 2) и  $d = 0,3$  г/см<sup>2</sup> допустимое значение  $\mu$  составляет 2,3 см<sup>2</sup>/г. При  $d = 0,5$  г/см<sup>2</sup> предельное значение  $\mu = 1,4$  см<sup>2</sup>/г. Материалы с меньшим значением  $\mu$  не обеспечивают требуемого коэффициента защиты.

В табл.2 приведены значения массового коэффициента поглощения энергии фотонного излучения для трех веществ, которые могут использоваться в качестве поглотителя (железо, вольфрам, свинец), а также для воды, которая по своей защитной эффективности по отношению к фотонному излучению достаточно близка к полимерным материалам.

Как следует из данных, представленных в табл.2, с помощью шлема можно обеспечить двукратную защиту тканей головы человека, в том числе и хрусталика глаза, только от воздействия фотонного излучения с энергией до 0,1 МэВ. При большей энергии фотонного излучения требуется шлем недопустимо большой массы. Легкий полимерный материал, который близок по своей защитной эффективности к воде, может обеспечить защиту только от фотонов с энергией не более 0,01 МэВ. Поэтому конструктивно защитный шлем может быть изготовлен из полимерных материалов, обеспечивающих физиологическую приемлемость, но обязательно в состав полимерного материала должны быть введены поглотители из тяжелых элементов.

Таким образом, при воздействии на персонал фотонного излучения с энергией до 0,1 МэВ возможно создание защитных шлемов, обеспечивающих коэффициент защиты хрусталика глаза, равный 2 и более в зависимости от спектра фотонного излучения. При

энергии фотонного излучения более 0,1 МэВ применение средств индивидуальной защиты для снижения дозы облучения хрусталика глаза нецелесообразно.

В диапазоне энергий гамма-излучения от 0,06 до 10 МэВ эквивалентная доза в хрусталике глаза численно превышает эффективную дозу примерно на 18–20 %. Поэтому соблюдение основного дозового предела облучения хрусталика глаза 20 мЗв приведет к необходимости ограничения эффективной дозы облучения персонала на уровне примерно 17 мЗв.

*Защита от бета-излучения.* Материал, эффективно защищающий от бета-излучения, должен удовлетворять двум требованиям: эффективно поглощать энергию бета-частиц и приводить к минимальному генерированию тормозного излучения. Первому требованию в наибольшей степени удовлетворяют материалы, состоящие из легких элементов. Второму требованию также в наилучшей степени соответствуют материалы из легких элементов. Соотношение между потерями энергии  $dE/dx$  на излучение и неупругие столкновения можно оценить по формуле [10]:

$$\frac{(dE/dx)_{изл}}{(dE/dx)_{суд}} \approx \frac{eZ}{1600m_0C^2},$$

где  $e$  – энергия бета-частицы;  $m_0$  – масса покоя электрона;  $C$  – скорость света в вакууме.

При использовании защитных материалов с большим атомным номером  $Z$  увеличивается выход тормозного излучения, и коэффициент защиты падает. Оценки показывают, что выход тормозного излучения на свинце достигает 17 %, в то время как на легких ядрах он нез-

Табл.2. Массовый коэффициент поглощения энергии фотонного излучения [7].

Энергия фотонного излучения, МэВ	Массовый коэффициент поглощения энергии фотонного излучения, см <sup>2</sup> /г			
	Вода	Железо	Вольфрам	Свинец
0,01	4,84	138	90,1	123
0,03	0,152	7,21	19,7	25,1
0,06	0,031	0,95	3,04	4,10
0,08	0,026	0,408	3,16	1,90
0,1	0,025	0,217	2,24	2,23
0,2	0,030	0,048	0,514	0,625
0,3	0,032	0,034	0,205	0,259
0,6	0,033	0,028	0,059	0,072
1,25	0,030	0,025	0,029	0,032

начителен.

Для защиты хрусталика глаза от бета-излучения могут использоваться специальные очки, щитки или шлемы. По специально разработанным методикам и программам были выполнены расчеты толщины защитного полимерного материала для СИЗ от бета-излучения. Они показали, что для защиты от бета-излучения оптимальной является толщина материала 0,4–0,5 г/см<sup>2</sup> [2]. Такой материал с низким атомным номером (не более 30) обеспечивает коэффициент защиты в диапазоне от 10 до 40 в зависимости от состава бета-активных нуклидов, присутствующих в источнике излучения.

На практике поля излучения на рабочих местах персонала обычно характеризуются одновременным присутствием бета- и фотонного излучения. Для одновременной защиты хрусталика глаза от бета- и мягкого (с энергией менее 0,1 МэВ) фотонного излучения в слой полимерного материала защитного шлема необходимо введение поглощающего наполнителя из тяжелых элементов. При этом для уменьшения генерирования тормозного излучения шлем

должен быть двухслойным: наружный слой для эффективного поглощения бета-излучения с минимальным выходом тормозного излучения должен состоять из полимерного материала без тяжелых элементов толщиной 0,4–0,5 г/см<sup>2</sup>, а в качестве внутреннего слоя должен использоваться полимерный материал с наполнителями, эффективно ослабляющий фотонное излучение в указанном диапазоне энергий. Защита хрусталика глаза от фотонного излучения с энергией больше 0,1 МэВ не может быть обеспечена.

Для определения минимального количества наполнителя и оптимального вклада каждого элемента необходимо провести набор информации о спектрах фотонного излучения в диапазоне от 0,01 до 0,06 МэВ на различных производственных участках предприятия атомной промышленности и энергетики. Предварительный анализ показал, что в диапазоне энергий фотонов от 0,01 до 0,1 МэВ наиболее эффективными являются некоторые редкоземельные элементы, олово, вольфрам, барий и свинец.

При обсуждении круга проблем, которые возникнут при пе-

реходе на новые пределы доз облучения хрусталика глаза персонала, в общем плане необходимо обратить внимание на следующее:

- необходимо установление уровня введения индивидуального контроля дозы облучения хрусталика глаза персонала;
- необходимо установление места крепления дозиметра облучения хрусталика глаза персонала.

При этом возможны два варианта.

**1.** Проведение персоналом работ в полях внешнего бета- и низкоэнергетического фотонного излучений, создающих значимые уровни облучения хрусталика глаза. Как правило, это сопряжено с проведением ремонтных работ, сопровождающихся высокими уровнями радиоактивного загрязнения воздуха и поверхностей помещений. В этих условиях обязательным является применение средств индивидуальной защиты органов дыхания с лицевой частью. Местом крепления дозиметра может быть участок смотрового стекла, расположенный посередине и выше линии глаз, причем дозиметр должен крепиться с внутренней стороны смотрового стекла.

Если персонал применяет СИЗ органов дыхания типа фильтрующей полумаски, то дозиметр может крепиться к козырьку каски, ношение которой является обязательным при выполнении ремонтных работ. В конструкцию лицевых частей СИЗ органов дыхания и касок

должны быть внесены изменения.

**2.** Нахождение персонала в зоне, в которой отсутствуют значимые источники бета- и низкоэнергетического фотонного излучений, однако при отдельных видах работ могут создаваться условия, требующие введения индивидуального контроля доз облучения хрусталика глаза. Ношение дозиметра облучения хрусталика глаза в этих условиях служит дополнительным средством радиационного контроля. Поскольку в таких ситуациях персонал, как правило, не применяет СИЗ органов дыхания и защитную каску, может быть обосновано ношение дозиметра хрусталика глаза на уголке воротника спецодежды или на груди в одном блоке с дозиметром для контроля эффективной дозы. Показания дозиметра, расположенного в указанных точках, будут отличаться от показаний дозиметра, расположенного вблизи глаз, вследствие различия энергетического и пространственно-углового распределения излучений. Обоснование такого расположения дозиметра должно включать определение поправочных коэффициентов, позволяющих пересчитать показания дозиметра в эквивалентную дозу облучения хрусталика глаза, а также оценить неопределенность полученного результата.

**Выводы.** Ввиду невозможности создания СИЗ глаз от фотонов с энергией свыше 0,1 МэВ, снижение допустимой

среднегодовой эквивалентной дозы облучения хрусталика глаза до 20 мЗв приведет к необходимости ограничения допустимой среднегодовой эффективной дозы до 16–17 мЗв.

Для определения требуемого коэффициента защиты от фотонов с энергией от 0,010 до 0,1 МэВ необходимо провести набор информации о спектрах фотонного излучения в диапазоне энергий более 0,010 МэВ на различных производственных участках предприятий атомной промышленности и энергетики.

Для практической реализации контроля эквивалентной дозы облучения хрусталика глаза необходимо:

- провести исследования по оптимизации состава поглотителей для обеспечения требуемого коэффициента защиты щитка при минимальной массе и приемлемой прозрачности;
- обеспечить широкое внедрение компактных термомюни-несцентных дозиметров для контроля дозы облучения хрусталика глаза бета-излучением и фотонным излучением в диапазоне от 0,01 до 3 МэВ;
- предусмотреть места крепления дозиметра для контроля дозы облучения хрусталика глаза на лицевых частях СИЗ, а также места крепления на спецодежде при отсутствии лицевых частей;
- установить уровень введения индивидуального контроля дозы облучения хрусталика глаза персонала.

**Литература**

1. СанПин 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009.
2. Рубцов В.И., Клочков В.Н., Осанов Д.П., Чобаков И.О. Обеспечение безопасности и индивидуальной защиты персонала при проведении работ в условиях внешнего облучения. Медицина труда и промышленная экология, 2012, № 10. С. 39-44.
3. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности. Промежуточное издание. Вена: МАГАТЭ, 2011.
4. ICRP Publication 74: Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. 1997: Annals of the ICRP Volume 26/3.
5. Серия норм по безопасности, № RS-G-1.3. Оценка профессионального облучения от внешних источников ионизирующего излучения. Руководство по безопасности. Вена: МАГАТЭ, 1999.
6. <http://www.doza.ru/catalog/personal/370>.
7. ГОСТ 12.4.041-89. ССБТ. Средства индивидуальной защиты органов дыхания фильтрующие. Общие технические требования.
8. ГОСТ 26584-85. Безопасность дорожного движения. Шлемы для мотоциклистов. Технические условия.
9. Машкович В.П. Защита от ионизирующих излучений: Справочник. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1982. 296 с.
10. Дж. Спинкс, Р. Вудс. Введение в радиационную химию. М.: Атомиздат, 1967. 408 с.

## Monitoring of Dose Equivalent to the Lens of the Eye and Evaluation of the Possibility of its Reduction

V.I.Rubtsov, V.N.Klochkov, A.B.Trebukhin, A.Yu.Nefedov, E.V.Klochkova (Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Russia, Moscow);  
K.Nurlybaev, Yu.N.Martyniuk, L.L.Medvedev (SPC "Doza")

**Abstract.** This article contains analysis of changes in the system of radiation monitoring and personal protection of workers after introduction of new radiation safety norms in Russia which take into account new dose limits of lens exposure recommended in the IAEA Basic safety norms. The authors showed that because it's impossible to create personal equipment for eyes protection from photons with energy of more than 0,1 MeV, decreasing the permissible average annual equivalent dose of lens exposure to 20 mSv will cause the need to limit the permissible average annual effective dose to 16–17 mSv. The list of measures for implementing monitoring of equivalent dose of lens exposure has been defined.

**Key words:** radiation safety norms, lens exposure, personal protective equipment.

В.И.Рубцов (д.т.н., с.н.с., зав.лаб.), В.Н.Клочков (д.т.н., с.н.с., доцент, в.н.с.), А.Б.Требухин (к.т.н., в.н.с.), А.Ю.Нефедов (к.м.н., с.н.с.), Е.В.Клочкова (н.с.) – ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И.Бурназяна ФМБА России, 123182, г. Москва, ул.Живописная, д.46;  
К.Нурлыбаев (к.т.н., зам.ген.директ.), Ю.Н.Мартынюк (к.ф.-м.н., гл.констр.), Л.Л.Медведев (инж.) – НПП «Доза», 124460, г. Москва, а/я 50.

Контакты: тел.: +7 (495) 777-84-85; e-mail: kubesh@doza.ru.

тел.: +7 (499) 190-95-44; e-mail: siz-fmbc@mail.ru.