

Измерение амбиентного и направленного эквивалентов доз на рабочих местах персонала АО «ИРМ» и Белоярской АЭС

Исследованы показания дозиметра RAM ION в полях гамма- и бета-излучений известных источников. Проведено исследование рабочих мест персонала ОА «Институт реакторных материалов» и Белоярской атомной электростанции с целью определения необходимости введения индивидуального контроля доз облучения кожи и хрусталика глаза в связи с ожидаемым снижением годового предела эквивалентной дозы облучения хрусталика глаза для персонала группы А в 7,5 раз. Отношение $H'(3, \Omega) / H^*(10)$ на рабочих местах персонала АО «ИРМ» варьируется в диапазоне от 1,0 до 1,9; на БАЭС от 1,0 до 3,6. Показано, что введение индивидуального дозиметрического контроля облучения хрусталика глаза персонала будет необходимо для выполнения определенных операций, таких как работа с оснасткой в центральном зале, работы в шахте мойки оборудования, извлеченного из реактора, работы с открытыми источниками, в том числе с технологическими жидкостями и др.

Ключевые слова: амбиентный эквивалент дозы, направленный эквивалент дозы, рабочие места, фотонное излучение, бета-излучение.

М.Д.Пышкина¹,
М.В.Жуковский², А.А.Екидин²,
В.О.Никитенко¹, Е.И.Назаров¹,
К.И.Ильин³

¹Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

²Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург

³Институт реакторных материалов, г. Заречный Свердловской обл.

Новые пределы эквивалентных доз для персонала группы А, введенные Международным агентством по атомной энергетике [1], для хрусталика глаза составляют 20 мЗв в год, т. е. за пять последовательных лет суммарная доза не должна превышать 100 мЗв. За любой отдельный год предел дозы составляет 50 мЗв. При этом предел дозы для населения оставлен неизменным – 15 мЗв в год. Для обеспечения радиационной безопасности персонала в новой системе основных дозовых пределов необходимо осуществление комплекса мероприятий, включающего обеспечение персонала индивидуальными дозиметрами мягкого фотонного и бета-излучения, измеряющими эквивалентную дозу облучения хрусталика глаза и обеспе-

Табл.1. Основные характеристики дозиметров группового контроля.

Наименование	Регистрируемое излучение	Диапазон энергий	Детектор
ДКР-АТ1103М [11]	фотоны	5–160 кэВ	Сцинтиллятор NaI
RAM ION [12]	фотоны, электроны	20 кэВ – 10 МэВ	Ионизационная камера

чение персонала средствами индивидуальной защиты глаз, позволяющими уменьшить эквивалентную дозу облучения хрусталика глаза. В условиях снижения предела дозы на хрусталик глаза персонала в общем случае будет необходимо установить уровень введения индивидуального контроля дозы облучения и место крепления индивидуального дозиметра. Данные вопросы были рассмотрены в работах [2-3].

Значительные уровни облучения хрусталика глаза создаются в случае аварийного выброса радионуклидов из реактора, а также при проведении ремонтных работ на вскрытом технологическом оборудовании первого контура реактора: в составе загрязнения в этих условиях могут присутствовать нуклиды с большим выходом жесткого бета-излучения (например, $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$, $^{106}\text{Ru}+^{106}\text{Rh}$, $^{144}\text{Ce}+^{144}\text{Pr}$ и др.).

Приборы индивидуального контроля облучения кожи и хрусталика глаза представлены достаточно широко. Известны как отечественные [4-5], так и зарубежные производители [6-8]. В основном для индивидуального

контроля облучения кожи и хрусталика глаза применяют термолюминесцентные детекторы и детекторы на основе оптико-стимулированной люминесценции. Наиболее популярными являются индивидуальные термолюминесцентные дозиметры с детекторами LiF.

На сегодняшний день существует лишь несколько дозиметров для контроля облучения кожи и хрусталика глаза на рабочих местах персонала, измеряющих направленный эквивалент дозы. Отсутствие приборов этой категории было обусловлено наличием достаточно высокого основного предела доз как на кожу, так и на хрусталик глаза. Полагалось, что при не превышении основного предела дозы облучения всего тела персонала в 20 мЗв основные пределы доз облучения кожи и хрусталика глаза также не будут превышены, а значит, существующего дозиметрического контроля на рабочих местах, представленного приборами для измерения амбиентного эквивалента дозы $H^*(10)$, вполне достаточно. Согласно [9] индивидуальный дозиметрический контроль вводится по результатам дозиметрического контроля рабочих мест.

На сегодняшний день уровень введения ИДК и основной предел годовой эквивалентной дозы облучения хрусталика глаза составляют 20 и 150 мЗв соответственно [10]. Таким образом, при снижении основного предела дозы облучения хрусталика глаза в 7,5 раз, следует ожидать также пропорциональное уменьшение уровней введения ИДК до 1–3 мЗв. Исходя из выше изложенного, можно предположить увеличение спроса на приборы для измерения направленного эквивалента дозы $H'(3, \Omega)$ и $H'(0,07, \Omega)$. Основные параметры таких дозиметров приведены в табл.1.

Прибором для целей дозиметрии бета- и фотонного излучений является RAM ION – дозиметр на основе открытой цилиндрической ионизационной камеры производства компании Rotem Industries Ltd, позволяющий проводить измерения в смешанных полях фотонного и бета-излучений [12]. RAM ION может быть использован как основной прибор для определения необходимости введения индивидуального дозиметрического контроля на предприятиях, либо с помощью него для конкретных рабочих мест

Табл.2. Результаты тестирования дозиметра в поле фотонного излучения источника ^{137}Cs и ^{241}Am .

Источник	E_γ , кэВ	$H'(0,07,\Omega)/H^*(10)$	$H'(3,\Omega)/H^*(10)$	$H^*(10)_{\text{ДКС}}$, мкЗв/ч
Cs-137	662	0,95	0,95	106
		0,99	1,01	208
Am-241	59,5	0,95	1,02	2,8
		1,01	1,01	5,1

могут определяться коэффициенты перехода от $H^*(10)$ к $H'(3,\Omega)$ и $H'(0,07,\Omega)$ в тех случаях, когда это является целесообразным.

Исследование результатов измерений дозиметра RAM ION в полях фотонного излучения

Тестирование дозиметров в полях фотонного излучения проводилось на территории метрологической службы АО «Институт реакторных материалов» (АО «ИРМ») на поверочной установке гамма-излучения, состоящей из набора источников ^{137}Cs с различной активностью и перемещающегося вдоль линейки столика. Показания дозиметров исследовались при мощности дозы, рассчитанной исходя из активности источника и расстояния между источником и дозиметром. Кроме того, проводилось тестирование дозиметра RAM ION в поле фотонного излучения низкой энергии ^{241}Am источника ($E_\gamma = 59,5$ кэВ). Дополнительно проводились измерения мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы $H^*(10)$ при помощи стандартного дозиме-

тра ДКС-АТ1121. Показания дозиметра RAM ION и дозиметра ДКС-АТ1121 при измерении AMBIENTНОГО эквивалента дозы $H^*(10)$ совпадали в пределах погрешности приборов. Результаты тестирования дозиметра в поле фотонного излучения источника ^{137}Cs и ^{241}Am представлены в табл.2.

Из табл.2 видно, что разница в результатах измерений AMBIENTНОГО и направленных эквивалентов доз как для ^{137}Cs источника, так и для ^{241}Am источника не превышает 5%. Пределы допускаемых основных относительных погрешностей измерений $H^*(10)$, $H'(3,\Omega)$ и $H'(0,07,\Omega)$ дозиметра лежат в диапазоне $\pm 15\%$, $\pm 20\%$ и $\pm 30\%$ соответственно, и в данном случае измерения статистически значимо не отличаются. Поэтому при наличии фотонного излучения с энергией $E_\gamma \geq 60$ кэВ доза облучения хрусталика глаза и кожи может оцениваться с помощью AMBIENTНОГО эквивалента дозы. При анализе зависимости AMBIENTНОГО эквивалента дозы на единичный флюенс от энергии падающих фотонов можно убедиться, что

значимые различия в результатах измерений $H^*(10)$, $H'(3,\Omega)$ и $H'(0,07,\Omega)$ могут наблюдаться только в диапазоне энергий до 20 кэВ [13].

Исследование результатов измерений дозиметра RAM ION в поле бета-излучения

Для исследования неопределенностей показаний дозиметра RAM ION в поле бета-излучения использовался ^{90}Sr - ^{90}Y источник с активностью 70900 Бк на дату проведения эксперимента. Условно истинные значения эквивалентных доз на кожу и хрусталик глаза вычислялись с помощью программного продукта Varskin 6.1 [14], широко применяемого в профессиональной среде и предназначенного для вычисления поглощенных доз бета- и фотонного излучения в кожном покрове и хрусталике глаза. Программный продукт предоставляет возможность учитывать реальную геометрию облучения. Схема проведения измерений направленного эквивалента дозы дозиметром RAM ION в поле бета-излучения представлена на рис.1. Результаты измере-

Табл.3. Результаты измерений и расчетов $H'(0,07,\Omega)$ и $H'(3,\Omega)$.

Расстояние, см	$H'(0,07,\Omega)_{изм},$ мкЗв	$H'(0,07,\Omega)_{расч},$ мкЗв	$H'(0,07,\Omega)_{изм} /$ $H'(0,07,\Omega)_{расч}$	$H'(3,\Omega)_{изм},$ мкЗв	$H'(3,\Omega)_{расч},$ мкЗв	$H'(3,\Omega)_{изм} /$ $H'(3,\Omega)_{расч}$
7	73,2	56,6	1,29	13,4	21,2	0,63
10	41,6	36,5	1,14	7,98	13,9	0,57
13	27,1	25,3	1,07	5,46	9,74	0,56
15	20,6	20,4	1,01	4,05	7,89	0,51

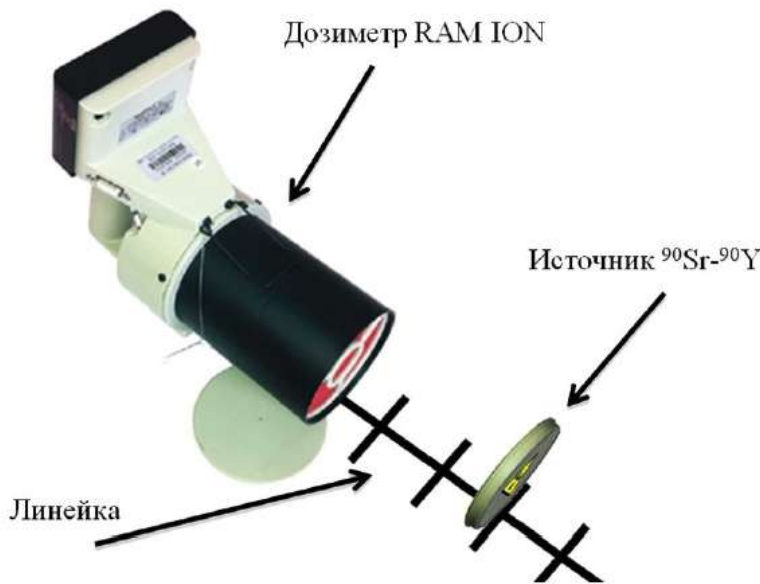


Рис.1. Взаимное расположение источника и дозиметра.

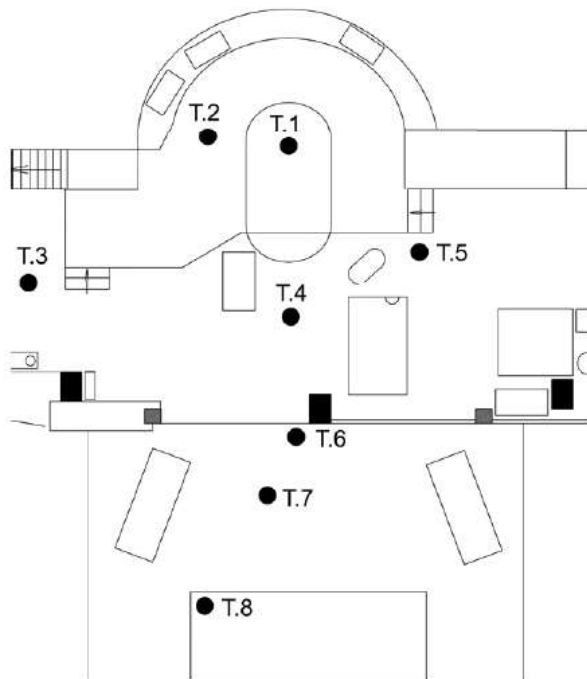


Рис.2. Точки проведения измерений МНЭД и МАЭД в центральном зале реактора АО «ИРМ».

ний и расчетов в программном продукте Varskin 6.1 представлены в табл.3.

При проведении измерений расстояние отсчитывалось от источника до торца детектора, а при проведении расчетов, согласно процедуре калибровки дозиметра, от источника до геометрического центра ионизационной камеры (5 см от входного окна). Результаты, представленные в табл.3, показывают хорошую сходимость между результатами измерений и расчетов.

Исследование мощностей доз амбиентного и направленного эквивалентов доз на рабочих местах персонала радиационно-опасных объектов

Проведены исследования рабочих мест на радиационно-опасных объектах с целью оптимизации радиационного контроля облучения кожи и хрусталиков глаз персонала. Измерения были выполнены на территории АО «ИРМ» и Белоярской атомной станции (БАЭС) г. Заречный с помощью дозиметра направ-

ленного эквивалента дозы RAM ION [15] и дозиметра ДКС-АТ1121. Были выбраны такие рабочие места, где возможно облучение мягким гамма-, рентгеновским или бета-излучением за счет специфики работы: работа с открытыми источниками, наличие массивной биологической защиты и др.

На территории АО «ИРМ» проводилось исследование рабочих мест дежурного инженера управления реактора и персонала в центральном зале реактора. Измерения проводились через 6 часов после остановки реактора (измерения № 1–8), а также во время эксплуатации реакторной установки в штатном режиме (измерения № 9–11). Точки исследования в центральном

зале реактора представлены на рис.2. Результаты измерений амбиентного и направленного эквивалентов дозы на рабочих местах АО «ИРМ» представлены в табл.4. Также, сравнения результатов измерений амбиентного эквивалента дозы $H^*(10)$ проводились приборами, находящимися в эксплуатации на АО «ИРМ». Анализ измерений показал, что при измерении амбиентного эквивалента дозы $H^*(10)$ приборы RAM ION и ДКС-АТ1121 имеют хорошую сходимость в пределах неопределенности измерений.

На территории БАЭС были исследованы рабочие места персонала остановленных 1, 2 энергоблоков (реакторы типа АМБ) и эксплуатируемого 3 энергоблока (реактор БН-600).

В табл.5 приведены отношения направленных эквивалентов доз $H'(0,07,\Omega)$, $H'(3,\Omega)$ к амбиентному эквиваленту дозы $H^*(10)$, измеренные прибором RAM ION на Белоярской атомной станции.

Анализ данных результатов показывает, что эквивалентная доза в коже с установленным годовым пределом в 500 мЗв практически не может быть превышена при условии не превышения предела по эффективной дозе. Что касается годового предела эквивалентной дозы для хрусталика глаза, то в случае принятия нового норматива в 20 мЗв, для ряда выполняемых работ потребуется контроль радиационной обстановки по направленному эквиваленту дозы $H'(3,\Omega)$.

Табл.4. Результаты измерений амбиентного и направленного эквивалентов дозы на рабочих местах АО «ИРМ».

№ п/п	Место измерения	RAM ION		$H^*(10)_{\text{ДКС-АТ1121}} / H^*(10)_{\text{RAM ION}}$
		$H'(0,07,\Omega) / H^*(10)$	$H'(3,\Omega) / H^*(10)$	
1	Центральный зал реактора (отверстие над активной зоной (АЗ), закрытое оргстеклом), т.1	1,1	1,1	-
2	Крышка реактора (отверстие над АЗ, без заграждений), т.1	1,4	1,3	-
3	Центральный зал реактора (верхняя защитная плита), т.2	1,6	1,3	-
4	Центральный зал реактора (крышка горячей камеры), т.3	1,6	1,4	-
5	Центральный зал реактора, т.4	1,4	1,2	-
6	Центральный зал реактора, т.5	1,4	1,2	-
7	Пультовая 0 см от стекла, т.6	1,1	1,3	0,6
8	Пультовая 40 см от стекла, т.7	1,3	1,2	-
9	Пультовая 0 см от стекла, т.6	1,0	1,0	0,9
10	Пультовая 40 см от стекла, т.7	1,0	1,1	0,8
11	Рабочее место дежурного инженера управления реактором, т.8	0,9 (1,0)	0,6 (1,0)	0,6
12	Технологическая жидкость	1,6	1,5	1,1
13	Вытяжной шкаф	3,8	1,9	1,2

Табл. 5. Результаты измерений амбиентного и направленного эквивалентов дозы на рабочих местах БАЭС.

№ п/п	Энергоблок	Система, оборудование	$H'(0,07,\Omega)/H^*(10)$	$H'(3,\Omega)/H^*(10)$
1	3	Помещения и оборудование системы очистки вод бассейна выдержки	1,15	1,02÷1,09
2	3	Шахта мойки крупного оборудования, извлеченного из реактора	2,67	1,83
3	3	Гнезда высвечивания оборудования, извлеченного из реактора	2,18	1,05
4	3	Система сбора трапных вод	1,82	1,18
5	3	Помещение перегрузки защитной камеры	1,16	1,08
6	3	Оборудование и оснастка помещения перегрузки защитной камеры	1,24÷2,00	1,07÷1,20
7	1, 2	Помещение бассейна выдержки (БВ)	1,37÷1,38	1,05÷1,18
8	1, 2	Манипулятор в БВ	5,32	1,15
9	1, 2	Радиоактивные отходы в БВ	3,05	1,15
10	1, 2	Оснастка в центральном зале (ЦЗ)	8÷10	2,80÷3,55
11	1, 2	Погружной насос очистки вод БВ на стенде в ЦЗ	3,05	1,50
12	1, 2	Демонтированное оборудование (в т. ч. фрагменты стержней системы управления защитой) в помещении системы дозиметрического контроля рабочего места	1,25÷1,62	1,00÷1,14
13	1, 2	Коридор (отм. -7,50)	1,31÷2,42	1,00÷1,19
14	1, 2	Отработавшие вентиляционные фильтры	1,23÷2,43	1,08÷1,33
15	1, 2	Помещения системы водоочистки	1,06÷1,26	1,00÷1,14

К таким работам могут относиться: обращение с радиоактивными отходами, демонтаж реакторного оборудования при снятии энергоблоков с эксплуатации, дезактивация и ремонт заменяемого крупногабаритного реакторного оборудования, работы, связанные с обращением с отработанными тепловыделяющими сборками и часть других работ. Если характер выполняемых на рабочем месте операций либо использование средств индивидуальной защиты исключают неравномерное (локальное) облучение органа или ткани, когда отношение численных значений эквивалентной дозы облучения органа или ткани к эффек-

тивной дозе внешнего облучения не превосходит $3/2$, то за значение эквивалентной дозы облучения соответствующего органа или ткани допускается принять значение индивидуальной эффективной дозы внешнего облучения [9]. Следовательно, введение индивидуального дозиметрического контроля облучения хрусталика глаза является, в основном, мерой необязательной и необходима только при выполнении специфических работ, таких как мойка оборудования, извлеченного из реактора, и работ в ЦЗ. Соответственно, персонал при выполнении данных работ должен быть обеспечен индивидуальными дозиметрами

для контроля эквивалентной дозы в хрусталике глаза.

Вывод

Исследованы показания дозиметра RAM ION в полях гамма- и бета-излучения известных источников и на рабочих местах радиационно-опасных объектов. Показана хорошая сходимость результатов измерений дозиметра RAM ION с условно истинным значением $H^*(10)$ в пределах допускаемой основной относительной погрешности измерения. Расхождение результатов измерений $H^*(10)$, $H'(3,\Omega)$ и $H'(0,07,\Omega)$ при энергиях фотонного излучения 59,5 и 662 кэВ лежит в диапазоне

5% и не является значимым. Значимые различия AMBIENT-ного и направленных эквивалентов доз могут наблюдаться только в диапазоне до 20 кЭВ фотонного излучения.

Проведено исследование рабочих мест персонала ОА «ИРМ» и БАЭС с целью определения необходимости введения индивидуального контроля доз облучения кожи и хрусталика глаза в связи со снижением годового предела эквивалентной дозы облучения хрусталика глаза для персонала в 7,5 раз. Отношение $H'(3, \Omega) / H^*(10)$ на рабочих местах персонала АО «ИРМ» варьируется в диапазоне от 1,0 до 1,9, на БАЭС от 1,0 до 3,55. Если характер выполняемых на рабочем

месте операций либо использование средств индивидуальной защиты исключают неравномерное (локальное) облучение органа или ткани (когда отношение численных значений эквивалентной дозы облучения органа или ткани к эффективной дозе внешнего облучения не превосходит $3/2$), то в качестве величины эквивалентной дозы облучения соответствующего органа или ткани может быть допущено принятие значения индивидуальной эффективной дозы внешнего облучения. Отношение $H'(3, \Omega) / H^*(10)$, равное или превышающее 1,5, наблюдается в 6 точках из 28 измеренных (~20%). Необходимо введение индивидуального дозиметрического

контроля облучения хрусталика глаза персонала для выполнения определенных операций, таких как работа с оснасткой в ЦЗ, работы в шахте мойки оборудования, извлеченного из реактора, работы с открытыми источниками, в том числе с технологическими жидкостями и др. Наличие отношений $H'(3, \Omega) / H^*(10)$, превышающих 1,5, связано со спецификой работы и может быть обусловлено присутствием бета-излучающих радионуклидов, таких как ^{24}Na , $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$, $^{106}\text{Ru}+^{106}\text{Rh}$, $^{144}\text{Ce}+^{144}\text{Pr}$ и др. в технологических средах и в отложениях на оборудовании.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума УрО РАН 18-11-2-2.

Литература

1. Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Atomic Energy Agency, International Labour Organisation, OECD Nuclear Energy Agency, Pan American Health Organization, World Health Organization. International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. IAEA, Safety Series no. 115, 2014.
2. Рубцов В.И., Клочков В.Н., Осанов Д.П., Чибиков И.О. Обеспечение безопасности и индивидуальной защиты персонала при проведении работ в условиях внешнего облучения // Медицина труда и промышленная экология. 2012. № 10.
3. Рубцов В.И. и др. Контроль эквивалентной дозы облучения хрусталика глаза и оценка возможности ее снижения // АНРИ. 2013. № 3(74). С. 32-37.
4. Дозиметры-радиометры ДКС-96. Руководство по эксплуатации. URL: http://www.doza.ru/docs/radiation_control/mkd.pdf (дата обращения: 20.11.2018).
5. Алексеев А.Г., Карпов Н.А. Исследование термолуминесцентных дозиметров ДТГ-4 и ТЛД-1011(Т) для использования в дозиметрии в пучках легких ионов // АНРИ. 2010. № 1(60). С. 51-56.
6. Thermo Scientific Harshaw TLD Materials and Dosimeters. URL: <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/LSG/Catalogs/Dosimetry-Materials-Brochure.pdf> (дата обращения: 14.04.2019)
7. Eye-D – the best solution for eye lens dosimetry. URL: <http://www.radcard.pl/Ulotka.pdf> (дата обращения: 20.11.2018).
8. Eye lens dosimeter. URL: <http://dosimetre.irsn.fr/en-us/Documents/Product%20files/DOSIRIS%20EN%20WEB.pdf> (дата обращения: 20.11.2018).

9. МУ 2.6.5.028-2016. Определение индивидуальных эффективных и эквивалентных доз и организация контроля профессионального облучения в условиях планируемого облучения. Общие требования. Введ. 18.05.2016. М., 2016. 108 с.
10. МУ 2.6.5.026-2016. Дозиметрический контроль внешнего профессионального облучения. Общие требования. Введ. 18.05.2016. М., 2016. 52 с.
11. Технические характеристики ДКР-АТ1103. URL: <http://atomtex.com/sites/default/files/datasheets/dkr-at1103m.pdf> (дата обращения: 20.11.2018).
12. Нурлыбаев К., Мартынюк Ю.Н., Гинзбург Д. Аппаратурное, метрологическое и методическое обеспечение измерений направленных эквивалентов доз // АНРИ. 2017. № 2. С. 25-31.
13. ICRP, 2010. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. ICRP Publication 116, Ann. ICRP 40(2-5).
14. Varskin 5: A computer code for for skin contamination dosimetry. URL: https://ramp.nrc-gateway.gov/system/files/c4c730667a2b8c16e714b9eb98d97b9a/NUREG_6918_User_Guide.pdf (дата обращения: 20.11.2018).
15. Гинзбург Д. Ионизационная камера для измерений в полях импульсного фотонного излучения // АНРИ. 2017. № 2(89). С. 18-24.

Measurment of Ambient and Direct Dose Equivalent at Workplaces in JC "IRM" and Beloyarskaya NPP

Pyshkina Mariia¹, Zhukovsky Mikhail², Ekidin Aleksey², Nikitenko Vitaliy¹, Nazarov Evgeniy¹, Ilyin Kirill³.

¹Ural federal university named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, Yekaterinburg, Russia;

²Institute of Industrial ecology UB RAS, Yekaterinburg, Russia;

³JC Institute of Reactor Materials, Zarechniy, Russia.

Abstract. Testing RAM ION in the field of gamma radiation was performed. No difference between measured values of $H'(0.07, \Omega)$, $H'(3, \Omega)$ and $H^*(10)$ both for ^{137}Cs and ^{241}Am sources was obtained. The uncertainties of RAM ION readings in the gamma radiation field were in the range from -4% up to -10% . It means it does not have any statistical difference and is in measurement uncertainty. In case of testing RAM ION in the field of the beta radiation, the 'real' value of $H'(d, \Omega)$ was calculated with Varskin 6.1. Ambient and directional dose equivalent were measured at about 30 workplaces, including reactor hall, room with spent fuel pool and other special technical rooms for working with equipment extracted from a reactor. Results showed that most part of obtained ratios $H'(3, \Omega)/H^*(10)$ is in the range from 1.0 up to 1.5. It means in case of isotropic exposure and non-changing conditions $H'(3, \Omega)$ might be estimated by $H^*(10)$ and proportional factor. When the ratio is greater than 1.5, individual monitoring should be introduced.

Key words: ambient dose equivalent, direct dose equivalent, workplaces, photon radiation, beta-radiation.

М.Д.Пышкина¹ (асп.), М.В.Жуковский² (профессор, д.т.н., дирек.), А.А.Екидин² (к.ф.-м.н., доц., в.н.с.), В.О.Никитенко¹ (студ.), Е.И.Назаров¹ (студ.), К.И.Ильин³ (к.т.н., дирек.)

¹Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург;

²Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург;

³Институт реакторных материалов, г. Заречный Свердловской обл.

Контакты: тел.: +7 (912) 667-71-69; mail: Maria1pyshkina@gmail.com.