

О.А. Кочетков<sup>1</sup>, Е.Ю. Тарасова<sup>2</sup>, С.М. Шинкарев<sup>1</sup>, Е.А. Румянцев<sup>2</sup>

## СЛИЧЕНИЕ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ФОТОННОГО И НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЙ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В ОРГАНИЗАЦИЯХ ГОСКОРПОРАЦИИ «РОСАТОМ» ДЛЯ КОНТРОЛЯ В СИТУАЦИИ ПЛАНИРУЕМОГО ОБЛУЧЕНИЯ

<sup>1</sup> Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва

<sup>2</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики Госкорпорации «Росатом», Саров

Контактное лицо: Сергей Михайлович Шинкарев, e-mail: sshinkarev@mail.ru

### РЕФЕРАТ

**Цель:** На примере рассмотрения и обсуждения результатов сличительных испытаний дозиметрических систем гамма- и нейтронного излучений, используемых в организациях Госкорпорации «Росатом», оценить текущее состояние достоверности мониторинга планируемого облучения персонала с использованием рассмотренных дозиметрических систем в полях смешанного гамма-нейтронного излучения и сформулировать рекомендации по корректирующим действиям для обеспечения единого подхода к проведению индивидуального дозиметрического контроля (ИДК) внешнего облучения.

**Результаты:** Все средства измерений индивидуального эквивалента дозы фотонного и нейтронного излучений, представленные в сличительных испытаниях, соответствуют современным требованиям к системам ИДК. Все средства измерения подтвердили свои измерительные возможности, показали удовлетворительное качество результатов измерений и отсутствие систематического сдвига в результатах измерений. Анализ результатов измерения индивидуального эквивалента дозы (ИЭД) нейтронного излучения показал, что в представленных средствах измерения ИЭД выявлены проблемы, влияющие на качество получаемых результатов. Источниками проблем могут быть следующие факторы:

- отсутствие знаний о реальных характеристиках полей излучения (спектральные характеристики, направленность излучения и т.п.) на рабочих местах;
- недостаточное исследование возможностей используемого метода регистрации нейтронного излучения в реальных условиях (технические и метрологические характеристики и особенности используемых индивидуальных дозиметров);
- неучет взвешивающих коэффициентов для нейтронов различных энергий при проведении поверки средств измерений и при измерении в реальных условиях.

**Выводы:** Необходимо организовать и провести исследования метрологических характеристик используемого средства измерений для условий, характерных для конкретного радиационного объекта. После проведения этих экспериментальных исследований рекомендуется провести апробацию методики с анализом соответствия показателей точности требованиям соответствующих методических указаний.

Для решения проблемы отсутствия знаний о реальных характеристиках полей излучения службам радиационной безопасности организаций рекомендуется организовать и провести исследования, направленные на изучение указанных характеристик радиометрическими и спектрометрическими методами, экспериментальное моделирование процесса облучения персонала с использованием антропоморфных фантомов и определение поправочных коэффициентов для используемых индивидуальных дозиметров.

**Ключевые слова:** смешанное гамма-нейтронное излучение, дозиметры, индивидуальный дозиметрический контроль, сличительные испытания

**Для цитирования:** Кочетков О.А., Тарасова Е.Ю., Шинкарев С.М., Румянцев Е.А. Сличение дозиметрических систем фотонного и нейтронного излучений, используемых в организациях Госкорпорации «Росатом» для контроля в ситуации планируемого облучения // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2023. Т. 68. № 6. С. 118–124. DOI:10.33266/1024-6177-2023-68-6-118-124

DOI:10.33266/1024-6177-2023-68-6-118-124

О.А. Kochetkov<sup>1</sup>, E.Yu. Tarasova<sup>2</sup>, S.M. Shinkarev<sup>1</sup>, E.A. Rumyantsev<sup>2</sup>

## Comparison of Photon and Neutron Radiation Dosimetric Systems Used in Organizations of Rosatom State Corporation for Control in A Planned Exposure Situation

<sup>1</sup> A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

<sup>2</sup> The Federal Unitary State Enterprise – “Russian federal nuclear center – VNIIEF”, Sarov, Russia

Contact person: S.M. Shinkarev, e-mail: sshinkarev@mail.ru

### ABSTRACT

**Purpose:** Using the example of reviewing and discussing the results of comparison tests of dosimetric systems of gamma and neutron radiation used in organizations of the State Corporation “Rosatom”, to assess the current state of reliability of monitoring the planned exposure of workers in fields of mixed gamma-neutron radiation using the considered dosimetric systems in order to produce recommendations for corrective actions to ensure a unified approach to conduct individual dosimetric control of external exposure.

**Results:** All measuring instruments for individual dose equivalent of photon and neutron radiation, presented in comparison tests, comply with up-to-date requirements for individual dosimetric control systems. All measuring instruments confirmed their measuring capabilities, showed satisfactory quality of measurement results and the absence of a systematic bias in the measurement results. Analysis of the results of measuring the individual dose equivalent of neutron radiation showed that problems affecting the quality of the results obtained were identified in the considered instruments of measuring personal dose equivalent. The following factors might be the sources of problems:

- lack of knowledge about the real characteristics of radiation fields (spectral characteristics, radiation direction, etc.) at workplaces;
- insufficient research of the method used for measuring neutron radiation under real conditions (technical and metrological characteristics and features of the individual dosimeters used);
- failure to take into account the weighing coefficients for neutrons of various energies when measuring instruments are calibrated and when real measurements are conducted.

**Conclusion:** It is necessary to organize and conduct investigations of the metrological characteristics of the measuring instrument that are used under conditions typical for a specific radiation object. After finishing these experimental studies, it is recommended to test the methodology with an analysis of the compliance of the accuracy indicators with the requirements of the relevant guidelines. In order to solve the problem of a lack of knowledge about the real characteristics of radiation fields, radiation safety services of organizations are recommended to organize and conduct research aimed at studying such characteristics using radiometric and spectrometric methods, experimental modeling of the process of personnel exposure using anthropomorphic phantoms and determining correction factors for the individual dosimeters used.

**Keywords:** mixed gamma-neutron radiation, dosimeters, individual dosimetric control, comparison tests

**For citation:** Kochetkov OA, Tarasova EYu, Shinkarev SM, Rumyantsev EA. Comparison of Photon and Neutron Radiation Dosimetric Systems Used in Organizations of Rosatom State Corporation for Control in A Planned Exposure Situation. Medical Radiology and Radiation Safety. 2023;68(6):118–124. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2023-68-6-118-124

## Введение

Одной из основных задач служб радиационной безопасности Госкорпорации «Росатом» является обеспечение контроля дозы внешнего и внутреннего облучения персонала на рабочих местах. В статье рассматриваются вопросы, относящиеся к контролю индивидуальной дозы внешнего облучения.

В 2016–2017 гг. были организованы и проведены сличительные испытания систем индивидуального дозиметрического контроля (ИДК) фотонного и нейтронного излучений, используемых в организациях Госкорпорации «Росатом» для мониторинга уровня облучения персонала в ситуации планируемого облучения. Эти сличения направлены на проверку достоверности измерения индивидуального эквивалента дозы (ИЭД) фотонного и нейтронного излучений. Сличения проводились с использованием фантомно-дозиметрического комплекса, в полях фотонного, нейтронного и смешанного гамма-нейтронного излучений. В сличительных испытаниях систем принимали участие специалисты ВНИИЭФ Госкорпорации «Росатом» и ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России.

Цель настоящей статьи – на примере рассмотрения и обсуждения результатов сличительных испытаний дозиметрических систем гамма- и нейтронного излучений, используемых в организациях Госкорпорации «Росатом», оценить текущее состояние достоверности мониторинга планируемого облучения персонала в полях смешанного гамма-нейтронного излучения с использованием рассмотренных дозиметрических систем и сформулировать рекомендации по корректирующим действиям для обеспечения единого подхода к проведению ИДК внешнего облучения. Следует подчеркнуть, что организация и проведение как сличительных испытаний средств измерений, так и межлабораторных сличительных испытаний – весьма актуальны для контроля определения эффективной дозы фотонного и нейтронного излучений в рамках комплекса мероприятий, направленных на обеспечение действенного ИДК персонала в полях смешанного гамма-нейтронного излучения. Такие сличения являются наиболее рациональным инструментом, позволяющим оценить достоверность результатов измерений ИЭД фотонного и нейтронного излучений, получаемых в каждой организации, и дающим наглядное представление о реальной точности применяемых в организациях методов (методик) ИДК.

## Методические подходы к проведению сличительных испытаний

Исследования проводились в соответствии с утвержденной программой сличительных испытаний в полях

фотонного, нейтронного и смешанного гамма-нейтронного излучений с использованием фантомно-дозиметрического комплекса (ФДК) [1]. ФДК предназначен для:

- проведения исследований на облучательных и моделирующих установках дозиметрических систем новых типов, предназначенных для контроля профессионального облучения, в ситуациях планируемого и аварийного облучения;
- подтверждения заявленных дозиметрических характеристик интегральных детекторов, используемых в качестве индивидуальных;
- проведения практической проверки адекватности стандартизованных методов измерений, используемых для целей индивидуальной и аварийной дозиметрии;
- проведения межлабораторных исследований в области обеспечения дозиметрического контроля персонала;
- проведения исследований уровней облучения персонала на рабочих местах.

В работе использовался антропоморфный гетерогенный фантом взрослого человека (рис. 1) [2].



Рис. 1. Внешний вид антропоморфного гетерогенного фантома взрослого человека (Модель Ref.701)

Fig. 1. Appearance of an anthropomorphic heterogeneous phantom of an adult (Model Ref.701)

Для оценки нормируемых дозиметрических величин необходимо учитывать радиочувствительность различных органов и/или тканей, а также биологическую эффективность вида излучения. Рекомендуются МКРЗ нормируемые величины для пределов дозы не являются точечными и не подходят для калибровки приборов при измерении индивидуальной дозы и мониторинга. Для этой цели МКРЗ определила еще один класс величин – операционные дозиметрические величины, которые являются точечными и определяются через измерение физических характеристик поля ионизирующего излучения. В качестве операционных величин для внешнего облучения в докладе 19 МКРЗ [3] были рекомендованы термины «поглощенная доза» и «эквивалент дозы». Операционные величины являются измеряемыми. Это означает, что используемое средство измерений – в том числе индивидуальный дозиметр, должен пройти процедуру калибровки в эталонном (опорном) поле излучения.

Калибровка состоит в установлении соотношений между показаниями индивидуального дозиметра и соответствующим условно истинным значением измеряемой величины для всего диапазона энергий фотонного или нейтронного излучения. Стандартные условия калибровки приведены в методике поверки средства измерения, утверждаемой при испытаниях с целью утверждения типа. Эти условия включают эталонное излучение, определенный диапазон внешних условий и определенную ориентацию детектора прибора к излучению. В качестве эталонного излучения для дозиметров фотонного излучения используется поле излучения  $^{137}\text{Cs}$ , а в качестве эталонного поля для дозиметров нейтронного излучения используется поле излучения  $^{239}\text{Pu-Be}(\alpha, n)$  – источника. Калибровка индивидуальных дозиметров осуществляется в единицах операционной величины – индивидуального эквивалента дозы.

В данных сличительных испытаниях в качестве принятых опорных (эталонных) значений эквивалента дозы принимались расчетные величины индивидуального эквивалента дозы, полученные на следующих аттестованных установках – ВНИИЭФ:

- установка поверочная дозиметрическая гамма-излучения типа УПГД-2М-Д зав. № 01 с источником  $\gamma$ -излучения  $^{137}\text{Cs}$ , обеспечивает облучение объектов с основной относительной погрешностью  $\pm 1,6\%$  при доверительной вероятности 0,95;
- установка УКПН-1М, зав. № 43 с  $^{239}\text{Pu-Be}$  источником нейтронного излучения со средней энергией 5,14 МэВ (источник нейтронов ИБН-24 № 052; активность источника  $1,2 \times 10^{11}$  Бк), обеспечивает облучение объектов флюенсом нейтронов с погрешностью не более  $\pm 9,0\%$  при доверительной вероятности 0,95;
- комплекс моделирующих опорных полей нейтронов исследовательской ядерной установки (ИЯУ) БР-1М, обеспечивает облучение объектов флюенсом нейтронов с погрешностью не более 5,0 % при доверительной вероятности 0,95.

Метрологические характеристики поверочных дозиметрических установок подтверждены действующими свидетельствами о поверке, а метрологические и спектральные характеристики опорных полей нейтронов приведены в [4].

Для оценки результатов измерений ИЭД были приняты подходы, изложенные в «Положении об организации и проведении межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаний в организациях Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» [5], рекомендациях по международной

стандартизации РМГ 103–2010 «Проверка квалификации испытательных (измерительных) лабораторий, осуществляющих испытания веществ, материалов, и объектов окружающей среды (по составу и физико-химическим свойствам) посредством межлабораторных сравнительных испытаний» [6] и правилах по межгосударственной стандартизации ПМГ-96–2009 «Результаты и характеристики качества измерений. Формы представления» [7]. Были выбраны следующие критерии оценки результатов измерений:

- оценка метрологических характеристик результатов измерений;
- оценка измерительных возможностей методов измерений;
- оценка качества результатов измерений;
- оценка наличия систематического сдвига.

### Сличительные испытания

#### *Сличительные испытания средств измерений индивидуального эквивалента дозы фотонного излучения*

Сличение средств измерений (СИ) индивидуального эквивалента дозы фотонного излучения (далее – система ИДК) проводилось в поле гамма-нейтронного излучения, сформированного источником фотонного излучения аттестованной поверочной дозиметрической установки гамма-излучения типа УПГД-2М-Д с источником  $\gamma$ -излучения  $^{137}\text{Cs}$  и источником нейтронного излучения на основе  $\text{Pu-}\alpha\text{-Be}$ . Устанавливались три эталонных уровня фотонного облучения дозами 5, 15 и 30 мЗв соответственно. При этом доза нейтронного излучения была одна и та же, равная 5 мЗв. Каждая система ИДК фотонного излучения на каждом эталонном уровне облучения была представлена двумя дозиметрами. Еще по два дозиметра каждой дозиметрической системы не подвергались облучению и использовались в качестве фоновых для оценки вклада в дозу естественного радиационного фона за период времени, отсчитываемый от момента подготовки дозиметров к облучению до момента измерений.

В сличении приняли участие следующие СИ индивидуального эквивалента дозы фотонного излучения, входящие в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений:

- АКИДК-301 (с дозиметрами ДВГН-01 на основе фторида лития);
- АКИДК-201 (с дозиметрами ДТЛ-01 на основе фторида лития);
- ДВГ-02ТМ (с дозиметрами ДПГ-03 на основе оксида алюминия);
- HARSHAW-6600 Plus (с дозиметрами типа 8814 на основе фторида лития).

Физико-технические характеристики дозиметрических систем для измерения ИЭД фотонного излучения, установленные в соответствующих описаниях на средства измерений, приведены в табл. 1. Все дозиметры фотонного излучения, представленные к сличению, удовлетворяли следующим требованиям: носимая кассета с детекторами с эквивалентной толщиной материала корпуса 1 г/см<sup>2</sup> биологической ткани; измеряемая величина – индивидуальный эквивалент дозы фотонного излучения.

Графический анализ результатов измерений ИЭД фотонного излучения системами ИДК АКИДК-301 (с дозиметрами ДВГН-01), АКИДК-201 (с дозиметрами ДТЛ-01) и ДВГ-02ТМ (с дозиметрами ДПГ-03), для трех уровней эталонной дозы фотонного излучения

Таблица 1

**Физико-технические характеристики дозиметрических систем для измерения ИЭД фотонного излучения**  
**Physical and technical characteristics of dosimetric systems for measuring the personal dose equivalent for photon**

Характеристика	АКИДК-301 (с дозиметрами ДВГН-01)	АКИДК-201 (с дозиметрами ДТЛ-01)	ДВГ-02ТМ (с дозиметрами ДПГ-03)	HARSHAW-6600 Plus (с дозиметрами типа 8814)
Энергетический диапазон, МэВ	0,015–10,0	0,015–10,0	0,08–6,0	0,03–6
Диапазон измерения индивидуального эквивалента дозы фотонного излучения, мЗв	0,05– $1 \times 10^4$	0,05– $1 \times 10^4$	0,02–500	0,1– $1 \times 10^3$
Основная погрешность измерения индивидуального эквивалента дозы фотонного излучения, %	$\pm 15$	$\pm 15$	$\pm 15$	$\pm 15$
Относительная погрешность измерения за счет энергетической зависимости чувствительности дозиметров, %	$\pm 15$	$\pm 30$	$\pm 30$	–
Относительная погрешность измерения за счет анизотропии чувствительности дозиметров, %	$\pm 15$	$\pm 15$	$\pm 15$	–

(5, 15 и 30 мЗв) и постоянном уровне нейтронного излучения равном 5 мЗв, приведен на рис. 2–4.

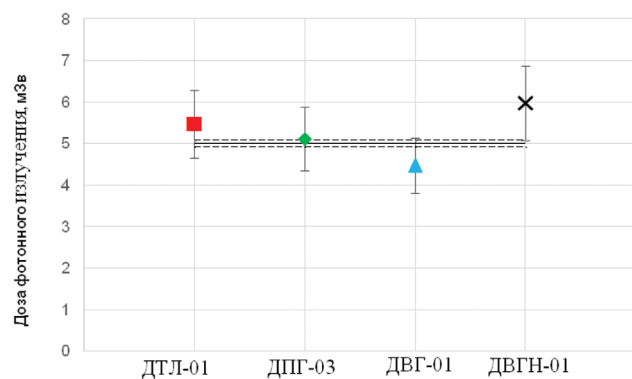


Рис. 2. Результаты измерения ИЭД фотонного излучения (эталонная доза 5 мЗв)

Fig. 2. Results of measurement of the personal dose equivalent for photons (reference dose 5 mSv)

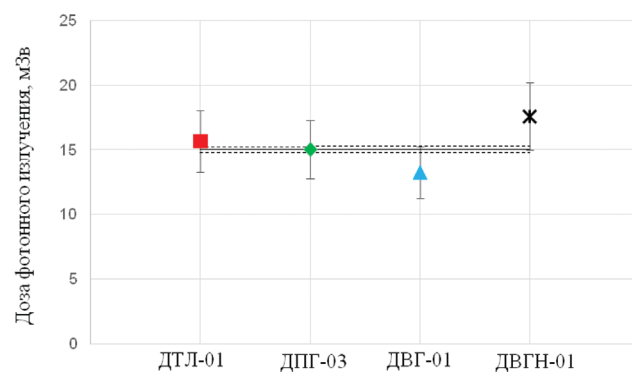


Рис. 3. Результаты измерения ИЭД фотонного излучения (эталонная доза 15 мЗв)

Fig. 3. Results of measurement of the personal dose equivalent for photons (reference dose 15 mSv)

Графический анализ результатов измерения ИЭД фотонного излучения дозиметрической системой HARSHAW-6600 Plus (с дозиметрами типа 8814), облученных тремя уровнями эталонной дозы фотонного излучения (5, 20 и 50 мЗв), на той же дозиметрической установке гамма-излучения УПГД-2М-Д с источником  $\gamma$ -излучения  $^{137}\text{Cs}$  при постоянном уровне

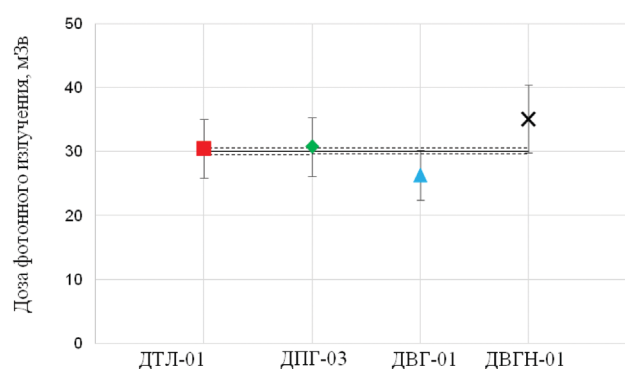


Рис. 4. Результаты измерения ИЭД фотонного излучения (эталонная доза 30 мЗв)

Fig. 4. Results of measurement of the personal dose equivalent for photons (reference dose 30 mSv)

нейтронного излучения, равном 5 мЗв, приведен на рис. 5. На рис. 2–5 показаны заявленные значения основной погрешности измерения ИЭД фотонного излучения для 95 %-го доверительного интервала оценки результата измерения.

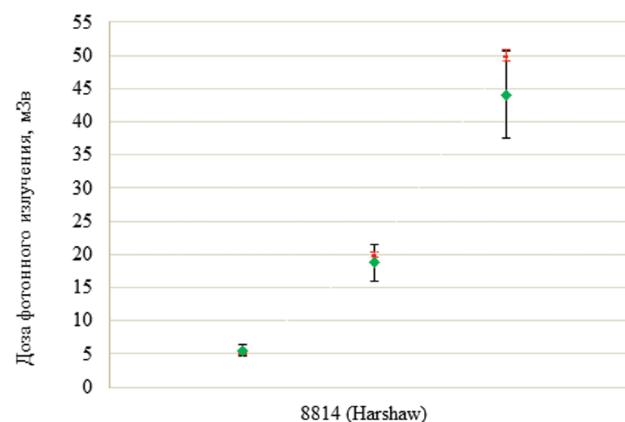


Рис. 5. Результаты измерения ИЭД фотонного излучения дозиметрической системой HARSHAW-6600 Plus с дозиметрами типа 8814 (эталонная доза 5, 20, 50 мЗв)

Fig. 5. Results of measurement of the personal dose equivalent for photons using the HARSHAW-6600 Plus dosimetric system with type 8814 dosimeters (reference dose 5, 20, 50 mSv)



Таблица 2

**Физико-технические характеристики дозиметрических систем для измерения ИЭД нейтронного излучения**  
**Physical and technical characteristics of dosimetric systems for measuring the personal dose equivalent for neutron**

Характеристика	ДВГН-М	EPD N2	ДВС-02Д	Кордон-2
Энергетический диапазон, МэВ	$4 \times 10^{-7} - 10$	$2,5 \times 10^{-8} - 15$	$2,5 \times 10^{-8} - 20$	$4 \times 10^{-7} - 15$
Диапазон измерения индивидуальной эквивалентной дозы нейтронного излучения, мЗв	$0,1 - 1 \times 10^2$	$1 \times 10^{-3} - 1,6 \times 10^4$	$0,02 - 1,5 \times 10^7$	$0,02 - 7 \times 10^3$
Основная погрешность измерения ИЭД нейтронного излучения, %	$\pm 25$	$\pm 35$	от $\pm 20$	+250/-90 при ИЭД – 0,05 мЗв; $\pm 60$ при ИЭД – 0,5 мЗв; $\pm 30$ при ИЭД более 5 мЗв
Относительная погрешность измерения за счет энергетической зависимости чувствительности, %	$\pm 40$	–	-50, +80	$\pm 30$
Относительная погрешность измерения за счет анизотропии чувствительности, %	$\pm 15$	$\pm 30$ в диапазоне энергий от 20 кэВ до 6 МэВ	$\pm 30$	$\pm 15$

### Сличительные испытания средств измерений индивидуального эквивалента дозы нейтронного излучения

Сличение средств измерений индивидуального эквивалента дозы нейтронного излучения проводилось на двух установках с различающимися спектрами нейтронного излучения. На установке УКПН-1М с  $^{239}\text{Pu}-\alpha\text{-Be}$  источником нейтронного излучения со средней энергией 5,14 МэВ (источник нейтронов ИБН-24 с активностью  $1,2 \times 10^{11}$  Бк) обеспечивалось облучение объектов флюенсом нейтронов с погрешностью не более  $\pm 9,0\%$  при доверительной вероятности 0,95. Облучение проводилось при двух эталонных уровнях ИЭД нейтронного облучения 4,5 и 10 мЗв. При этом соотношение доз нейтронного к фотонному излучению составляло 10:1 в поле смешанного гамма-нейтронного излучения.

На комплексе моделирующих опорных полей нейтронов реактора БР-1М (рис. 6) проводилось одно облучение со средним полным флюенсом облучения  $6,34 \times 10^7$  н/см<sup>2</sup> с основной относительной погрешностью определения флюенса нейтронов  $\pm 5\%$ , что соответствует уровню ИЭД нейтронного облучения 11,6 мЗв для энергии 0,5 МэВ в передне-задней геометрии облучения.

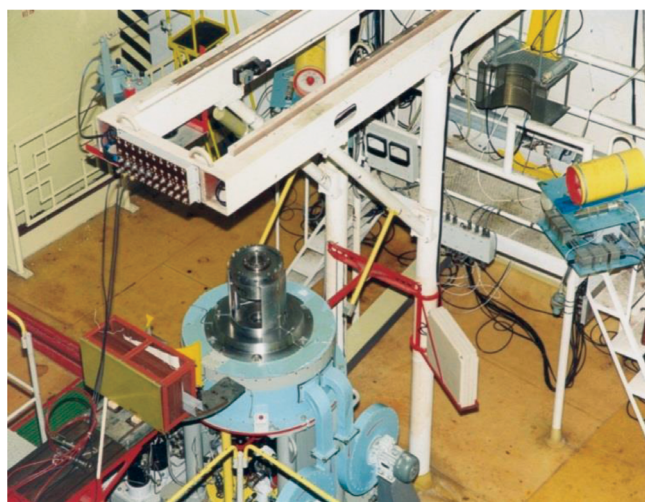


Рис. 6. Моделирующая установка на базе ИЯУ БР-1М

Fig. 6. Simulation installation based on the BR-1M nuclear research facility

В сличении участвовали следующие средства измерения ИЭД дозы нейтронного облучения:

- ДВГН-М (термолюминесцентный детектор на основе фторида лития);

- Кордон-2 (на основе трекового детектора);
- EPD N2 (на основе полупроводникового детектора);
- ДВС-02Д (на основе полупроводникового детектора).

Физико-технические характеристики дозиметрических систем для измерения нейтронного излучения, установленные в соответствующих описаниях на средства измерения, приведены в табл. 2. Все дозиметры ИЭД нейтронного облучения, представленные к сличению, удовлетворяли следующим требованиям: носимая кассета с детекторами с эквивалентной толщиной материала корпуса 1 г/см<sup>2</sup> биологической ткани; измеряемая величина – индивидуальный эквивалент дозы нейтронного излучения; диапазон измерения (0,1–1000) мЗв; энергетический диапазон до 5,0 МэВ.

Графический анализ результатов измерения ИЭД нейтронного облучения, выполненных с использованием дозиметров ДВГН-М, Кордон-2, EPD N2 и ДВС-02Д, с эталонной дозой для двух уровней ИЭД (4,5 и 10 мЗв) приведен на рис. 7. Облучение при этих двух эталонных дозах проводилось на установке УКПН-1М с  $^{239}\text{Pu}-\alpha\text{-Be}$  источником нейтронного излучения со средней энергией 5,14 МэВ.

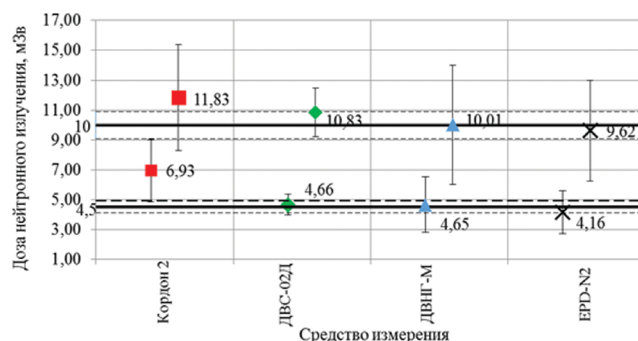


Рис. 7. Результаты измерения ИЭД нейтронного излучения при облучении нейтронами с энергией 5,14 МэВ (эталонная доза 4,5 и 10 мЗв)

Fig. 7. Results of measurement of the personal dose equivalent for neutron with an energy of 5.14 MeV (reference dose 4.5 and 10 mSv)

Третье облучение для упомянутых выше систем ИДК нейтронного излучения проводилось при эталонном ИЭД 11,6 мЗв на комплексе моделирующих опорных полей нейтронов реактора БР-1М со средней энергией нейтронного излучения 0,5 МэВ (рис. 8). При подготовке к облучению на комплексе моделирующих опорных полей нейтронов, для части дозиметров ДВГН-М дополнительно к стандартным условиям калибровки ( $^{239}\text{Pu}-\alpha\text{-Be}$  источник

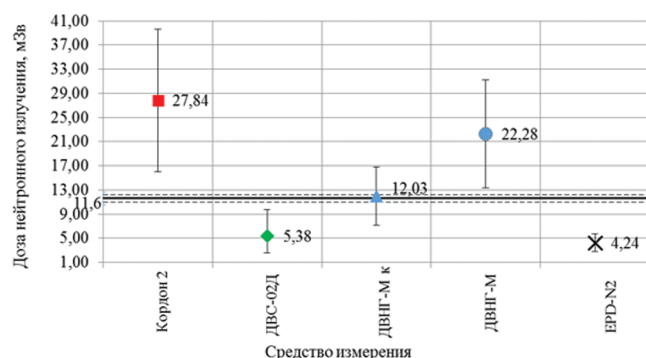


Рис. 8. Результаты измерения ИЭД нейтронного излучения при облучении нейтронами с энергией 0,5 МэВ (эталонная доза 11,6 мЗв)  
Fig. 8. Results of measurement of the personal dose equivalent for neutron with an energy of 0.5 MeV (reference dose 11.6 mSv)

эталонного нейтронного излучения в виде коллимированного равномерного пучка нейтронов, падающего на детектор средства измерения перпендикулярно его плоскости), была проведена калибровка в опорном поле нейтронного излучения спектра деления. На рис. 8 дозиметры с дополнительной калибровкой обозначены как ДВНГ-М<sub>к</sub>.

Аналогично фотонному излучению, на рис. 7–8 показаны заявленные значения основной погрешности измерения ИЭД нейтронного излучения для 95 % доверительного интервала оценки результата измерения.

### Обсуждение

В соответствии с требованиями [7], методики радиационного контроля должны содержать составляющие неопределенности (бюджет неопределенностей) измерений. Неопределенность измерения – это параметр, связанный с результатом измерения, который характеризует дисперсию значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине. Неопределенность оценки значений эффективной дозы по показаниям индивидуального дозиметра имеет несколько составляющих: предел основной и дополнительных погрешностей измерения индивидуального эквивалента дозы, погрешность определения поправочных коэффициентов, погрешность перехода от индивидуального эквивалента дозы к эффективной дозе, погрешности, обусловленные влиянием сопутствующего излучения и др.

Анализ итогов сличительных испытаний средств измерений ИЭД фотонного излучения (рис. 2–5) показал, что все представленные СИ показали удовлетворительные результаты измерений ИЭД фотонного излучения, а именно: все средства измерений подтвердили свои измерительные возможности<sup>1</sup>, показали удовлетворительное качество результатов измерений и отсутствие систематического сдвига в результатах измерений.

По итогам анализа результатов измерения ИЭД нейтронного излучения показано, что такие средства измерений, как Кордон-2, ДВНГ-М и EPD-N2 (методы регистрации – трековый, полупроводниковый альбедный и термолюминесцентный альбедный), не подтвердили свои измерительные возможности. Также исследования показали (на примере СИ ДВНГ-М<sub>к</sub>), что предварительная калибровка индивидуальных дозиметров в поле нейтронного излучения с более мягким спектром (средняя энергия ~ 1 МэВ вместо 5,12 МэВ) позволяет получать более достоверную дозиметрическую информацию.

<sup>1</sup> Измерительными возможностями метода измерения ИЭД будем считать способность испытуемого средства измерений выдавать целевую информацию (результат измерения) с требуемой точностью.

Анализ результатов измерения ИЭД нейтронного излучения показывает, что в используемых средствах измерений выявлены проблемы, влияющие на качество получаемых результатов. Источниками проблем могут быть следующие факторы:

- отсутствие знаний о реальных характеристиках полей излучения (спектральные характеристики, направленность излучения и т.п.) на рабочих местах;
- недостаточное исследование возможностей используемого метода регистрации нейтронного излучения в реальных условиях применения СИ.

С учетом вышеизложенного актуальной проблемой является совершенствование приборного и методического обеспечения ИДК персонала в реальных условиях работ с источниками нейтронного излучения, прежде всего, для объективной оценки эффективной дозы профессионального облучения.

### Заключение

Проведенные сличительные испытания средств измерения индивидуального эквивалента дозы фотонного и нейтронного излучения в смешанных полях гамма-нейтронного излучения, используемых для контроля существующего облучения персонала, позволяют констатировать следующие выводы:

1. Все средства измерений индивидуального эквивалента дозы фотонного и нейтронного излучений, представленные в сличительных испытаниях, соответствуют современным требованиям к системам ИДК (носимая кассета с детекторами с эквивалентной толщиной материала корпуса 1 г/см<sup>2</sup> биологической ткани; измеряемая величина – индивидуальный эквивалент дозы).
2. Все средства измерения подтвердили свои измерительные возможности, показали удовлетворительное качество результатов измерений и отсутствие систематического сдвига в результатах измерений.
3. Анализ результатов измерения индивидуального эквивалента дозы нейтронного излучения показал, что в представленных средствах измерения ИЭД выявлены проблемы, влияющие на качество получаемых результатов. Источниками проблем могут быть следующие факторы:
  - отсутствие знаний о реальных характеристиках полей излучения (спектральные характеристики, направленность излучения и т.п.) на рабочих местах;
  - недостаточное исследование измерительных возможностей используемого метода регистрации нейтронного излучения в реальных условиях применения СИ (технические и метрологические характеристики и особенности используемых индивидуальных дозиметров);
  - неучет взвешивающих коэффициентов для нейтронов различных энергий при проведении поверки средств измерений и при измерении в реальных условиях.

По итогам анализа полученных результатов сличения систем ИДК фотонного и нейтронного излучения можно сформулировать следующие рекомендации по совершенствованию дозиметрического контроля персонала в полях гамма-нейтронного излучения, направленные на решение выявленных проблем.

Необходимо организовать и провести исследования метрологических характеристик используемого средства измерений для условий, характерных для конкретного радиационного объекта. После проведения экспериментальных исследований метрологических характеристик

выбранного средства измерений и разработки методики измерений в соответствии с требованиями [8], рекомендуется провести апробацию методики с анализом соответствия показателей точности требованиям методических указаний МУ 2.6.5.026-2016 [9], МУ 2.6.5.028-2016 [10] и МУ 2.6.5.052-2017 [11].

Для решения проблемы отсутствия знаний о реальных характеристиках полей излучения службам радиа-

ционной безопасности организаций рекомендуется организовать и провести исследования, направленные на изучение указанных характеристик радиометрическими и спектрометрическими методами, экспериментальное моделирование процесса облучения персонала с использованием антропоморфных фантомов и определение поправочных коэффициентов для используемых индивидуальных дозиметров.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Фантомно-дозиметрический комплекс: Руководство по эксплуатации. Саров, 2015.
2. Набор дозиметрических фантомов АТОМ. Ref.701 – 706. Паспорт. НПП “Доза”.
3. International Commission on Radiation Units and Measurements. ICRU Report 19. Radiation Quantities and Units, 1971
4. Севастьянов В.Д., Кошелев А.С., Маслов Г.Н. Характеристики полей нейтронов: Справочник. НПО ВНИИФТРИ. 2007. 653 с.
5. Положение об организации и проведении межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаний в организациях Государственной корпорации по атомной энергии “Росатом”.
6. РМГ 103-2010. Проверка квалификации испытательных (измерительных) лабораторий, осуществляющих испытание веществ, материалов, и объектов окружающей среды (по составу и физико-химическим свойствам) посредством межлабораторных сравнительных испытаний.
7. ПМГ-96-2009. Результаты и характеристики качества измерений. Формы представления.
8. МИ 2453-2015. Методики радиационного контроля. Общие требования.
9. МУ 2.6.5.026-2016. Дозиметрический контроль внешнего профессионального облучения. Общие требования.
10. МУ 2.6.5.028-2016 “Определение индивидуальных эффективных и эквивалентных доз и организация контроля профессионального облучения в контролируемых условиях обращения с источниками излучения. Общие требования.
11. МУ 2.6.5.052-2017. Дозиметрия. Определение индивидуальной эффективной дозы нейтронного излучения.

#### REFERENCES

1. Phantom Dosimetry Complex: Operation Manual. Sarov Publ., 2015.
2. Set of Dosimetric Phantoms ATOM. Ref.701 - 706. Passport. NPP “Dose”.
3. International Commission on Radiation Units and Measurements. ICRU Report 19. Radiation Quantities and Units, 1971.
4. Sevastyanov V.D., Koshelev A.S., Maslov G.N. Characteristics of Neutron Fields: Handbook. NPO VNIIFTRI, 2007. 653 p.
5. Regulations on the Organization and Conduct of Interlaboratory Comparison Tests in Organizations of the State Atomic Energy Corporation Rosatom.
6. RMG 103-2010. Verification of the Qualifications of Testing (Measuring) Laboratories that Carry Out Testing of Substances, Materials, and Environmental Objects (in Terms of Composition and Physical and Chemical Properties) Through Interlaboratory Comparative Tests.
7. PMG-96-2009. Results and Quality Characteristics of Measurements. Forms of Presentation.
8. MI 2453-2015. Radiation Monitoring Techniques. General Requirements.
9. MU 2.6.5.026-2016. Dosimetric Monitoring of External Occupational Exposure. General Requirements.
10. MU 2.6.5.028-2016. Determination of Individual Effective and Equivalent Doses and Organization of Occupational Exposure Control under Controlled Conditions for Handling Radiation Sources. General Requirements.
11. MU 2.6.5.052-2017. Dosimetry. Determination of the Individual Effective Dose of Neutron Radiation.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Участие авторов.** Статья подготовлена с равным участием авторов.

**Поступила:** 20.07.2023. Принята к публикации: 27.08.2023.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Financing.** The study had no sponsorship.

**Contribution.** Article was prepared with equal participation of the authors.

**Article received:** 20.07.2023. Accepted for publication: 27.08.2023.