

ВЛИЯНИЕ УГЛОВОЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЗАВИСИМОСТЕЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ДОЗИМЕТРОВ НА ОЦЕНКУ ОБЛУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА

И. С. Спиридонова^{1,2}, М. Д. Пышкина², А. В. Васильев², А. А. Екидин²

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

² Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Исследованы энергетические и угловые зависимости чувствительности индивидуальных нейтронных дозиметров. Изучение геометрии облучения производилось путем моделирования, воспроизводящего полную картину взаимодействия нейтронного поля с фантомом. За счет информации об энергетической и угловой зависимостях чувствительности могут быть получены наиболее точные оценки эффективной дозы при воздействии нейтронного излучения. В работе представлены результаты расчета энергетических и угловых зависимостей чувствительности индивидуальных термolumинесцентных дозиметров нейтронов Harshaw 6776 и ДВГН-01. На основе полученных данных об откликах индивидуальных дозиметров была предложена методика оценки принятого значения эффективной дозы.

Ключевые слова: индивидуальный дозиметр; индивидуальный дозиметрический контроль; энергетическая зависимость чувствительности; угловая зависимость чувствительности; методы оценки эффективной дозы.

1. Введение

Персонал объектов использования атомной энергии и предприятий атомной промышленности потенциально подвержен облучению нейтронным излучением. На этих объектах для оценки получаемых работниками доз облучения проводится дозиметрический контроль рабочего места (ДКРМ) и/или индивидуальный дозиметрический контроль (ИДК) в зависимости от потребностей [1]. Индивидуальный контроль проводится дозиметрами различных типов, отличающихся способами детектирования излучения, ситуациями их использования. На сегодняшний день наиболее широко применяемыми на территории РФ индивидуальными дозиметрами нейтронного излучения являются термolumинесцентные дозиметры Harshaw 6776 и ДВГН-01.

Используемые индивидуальные дозиметры не дают адекватной оценки значений попадающего в них излучения. Показания отличаются от эффективной дозы индивидуального дозиметра (ИД) при рассмотрении различных геометрий. В технических же паспортах ИД обозначены показания только для передне-задней (ПЗ) геометрии, для других направлений излучения показания указаны либо для определенных значений энергии, либо не указаны вовсе. Кроме того, отличие энергетической зависимости чувствительности (ЭЗЧ) индивидуальных дозиметров от ЭЗЧ дозиметрических характеристик приводит к значительным отличиям показаний индивидуальных дозиметров от дозиметрических характеристик поля в точке измерений [2]. При неизвестном энергетическом спектре измеряемого нейтронного потока это может приводить к непредсказуемому увеличению погрешностей. Важный фактор, влияющий на достоверность измерения – это угол падения нейтронного излучения на корпус индивидуального дозиметра, так как из-за несовершенства конструкции индивидуальные дозиметры обладают угловой зависимостью чувствительности, регистрируя большее количество нейтронов при нормальном их падении по сравнению с падением под углом [3]. Отсюда вытекает важность изучения

энергетических и угловых зависимостей чувствительности индивидуальных нейтронных дозиметров.

Цель выполненных исследований – получить энергетические и угловые зависимости чувствительности индивидуальных нейтронных термолюминесцентных дозиметров (ТЛД) Harshaw 6776 и ДВГН-01 и разработать методику оценки истинного значения эффективной дозы с учетом полученных энергетических и угловых зависимостей чувствительности.

Задачи исследования:

- создание моделей дозиметров в программе для моделирования;
- проведение моделирования облучения созданных индивидуальных дозиметров;
- получение энергетических зависимостей чувствительности для различных углов падения излучения;
- получение угловых зависимостей чувствительности для энергий различных величин;
- разработка методики оценки истинного значения эффективной дозы с учетом полученных энергетических и угловых зависимостей чувствительности.

2. Материалы и методы

Для получения энергетических и угловых зависимостей чувствительности термолюминесцентных индивидуальных дозиметров нейтронов использовалось ПО FLUKA [4] на основе метода Монте-Карло.

Основа разработки методики оценки принятого значения эффективной дозы – учет вклада падающего излучения не только на переднюю, но и на боковые и заднюю поверхности тела человека.

Исследуемая модель представляла собой сферу, изолированную от внешних воздействий слоем «черного тела». Внутри изолированной сферы расположен фантом, представленный параллелепипедом 30 x 30 x 15 см. Материал фантома соответствует составу мягких тканей, которые, согласно МКРЕ, включают 4 компонента: Н – 10 %, С – 11 %, N – 3 % и О – 76 % [5].

Модели индивидуальных дозиметров Harshaw 6776 и ДВГН-01 составлялись в соответствии с данными из технических паспортов [6–7]. В каждом из исследуемых дозиметров используются четыре кристалла $\varnothing 0,5 \times 0,15$ см, два из которых ${}^6\text{LiF}(\text{Mg}, \text{Ti})$, а два – ${}^7\text{LiF}(\text{Mg}, \text{Ti})$, детектирующие гамма-нейтронное и гамма-излучение соответственно.

Для построения ЭЗЧ Harshaw 6776 и ДВГН-01 моделировалось облучение фантома плоскопараллельным пучком нейтронного излучения в диапазоне энергий от 10^{-1} до 10^{-12} ГэВ. Диапазон энергий включает в себя тепловые и быстрые нейтроны, чтобы проводимые исследования можно было соотносить с существующими условиями не только на реакторных, но и на ускорительных установках, используемых в атомной промышленности. Размер пучка 40 x 40 см был выбран для полного перекрытия фантома. Рассматривались направления пучка в горизонтальной плоскости под углами от 0 до 180° с интервалом в 30° , где положение 0° – направление пучка излучения по нормали к передней плоскости фантома, на которой расположен индивидуальный дозиметр. Так как диапазон углов от 180 до 360° является симметричным выбранному диапазону, то можно говорить о том, что диапазон углов падения излучения от 0 до 180° соответствует всей боковой геометрии исследуемого фантома. Энергетическая зависимость чувствительности рассчитывалась на основе среднего значения пяти смоделированных измерений, необходимых для снижения величины статистической ошибки. Знание угловой зависимости чувствительности индивидуальных дозиметров дает возможность определять значение эффективной дозы облучения за счет учета углового распределения плотности потока [8]. Представим, что фантом размещается в поле нейтронного излучения так, что на переднюю его плоскость падает преимущественное

количество излучения (рис 1.). Количество излучения, падающего со всех сторон, обозначим: $ap - 0^\circ$, $pa - 180^\circ$, $l - (-90^\circ)$, $r - (+90^\circ)$. В сумме все количество излучения со всех сторон даст единицу: $ap + pa + l + r = 1$.

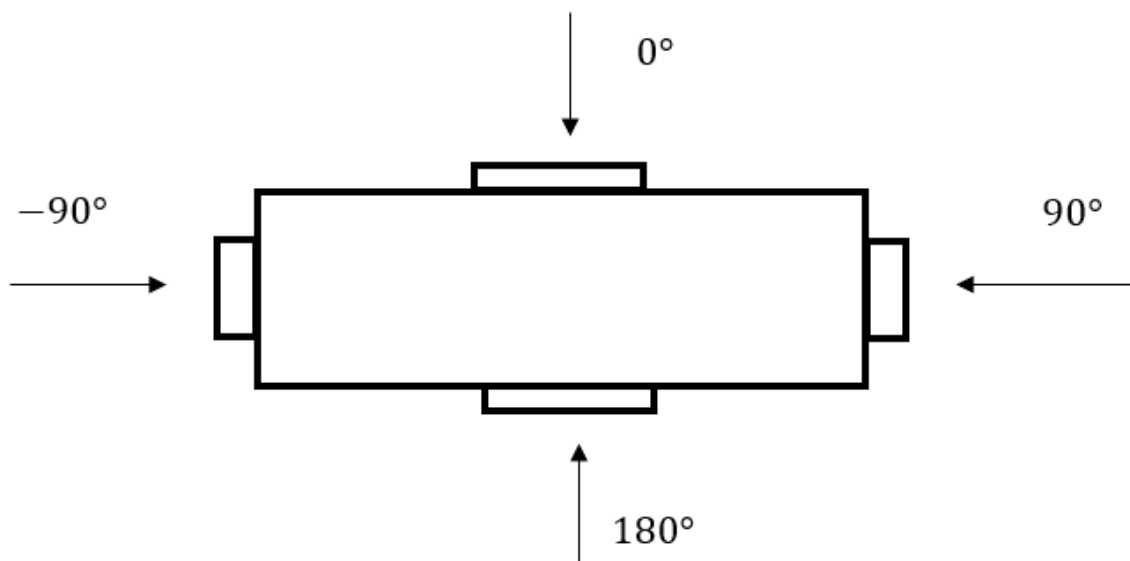


Рис. 1. Направления падающего излучения

Также необходима информация об энергетическом распределении плотности потока в данной точке. Такая информация может быть получена с помощью многосферного спектрометра. Тогда результаты измерения индивидуальной дозы с помощью дозиметра можно выразить:

$$\begin{cases} M(0^\circ) = [h_p(10, 0^\circ) \times ap + h_p(10, 90^\circ) \times (l + r) + h_p(10, 180^\circ) \times pa] \times \varphi; \\ M(-90^\circ) = [h_p(10, 0^\circ) \times l + h_p(10, 90^\circ) \times (ap + pa) + h_p(10, 180^\circ) \times r] \times \varphi; \\ M(180^\circ) = [h_p(10, 0^\circ) \times pa + h_p(10, 90^\circ) \times (l + r) + h_p(10, 180^\circ) \times ap] \times \varphi; \\ M(90^\circ) = [h_p(10, 0^\circ) \times r + h_p(10, 90^\circ) \times (ap + pa) + h_p(10, 180^\circ) \times l] \times \varphi, \end{cases} \quad (1)$$

где φ – интегральная плотность потока

$$h_p(10, 0^\circ) = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \frac{h_p(10, 0^\circ, E) S(E) dE}{\varphi}; \quad (2)$$

$$h_p(10, 90^\circ) = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \frac{h_p(10, 90^\circ, E) S(E) dE}{\varphi}; \quad (3)$$

$$h_p(10, 180^\circ) = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \frac{h_p(10, 180^\circ, E) S(E) dE}{\varphi}, \quad (4)$$

где $S(E)$ – спектр нейтронного излучения;

$h_p(10, 0^\circ, E)$ – энергетическая зависимость чувствительности дозиметра при падении излучения под углом 0° на дозиметр;

$h_p(10, 90^\circ, E)$ – энергетическая зависимость чувствительности дозиметра при падении излучения под углом 90° на дозиметр;

$h_p(10, 180^\circ, E)$ – энергетическая зависимость чувствительности дозиметра при падении излучения под углом 180° на дозиметр.

Для нахождения коэффициентов ap , pa , l , r , используемых в системе уравнений, были использованы экспериментальные данные измерений индивидуальным дозиметром Harshaw при облучении нейтронным излучением на 5-м блоке Нововоронежской АЭС [9]. Для нахождения значения энергетической зависимости

чувствительности плотность потока при определенной энергии падающего излучения умножалась на отклик дозиметра, полученный путем моделирования. Энергетическая зависимость чувствительности всего спектра была получена отношением сумм ЭЗЧ для каждой из различных энергий падающего излучения к плотности потока всего спектра излучений.

3. Результаты

Полученные результаты представляют собой четыре графика (рис. 2–5), на двух из которых представлены энергетические зависимости чувствительности для различных углов падения излучения, на двух других – угловые зависимости чувствительности для энергий различных величин для дозиметров Harshaw 6776 и ДВГН-01 соответственно.

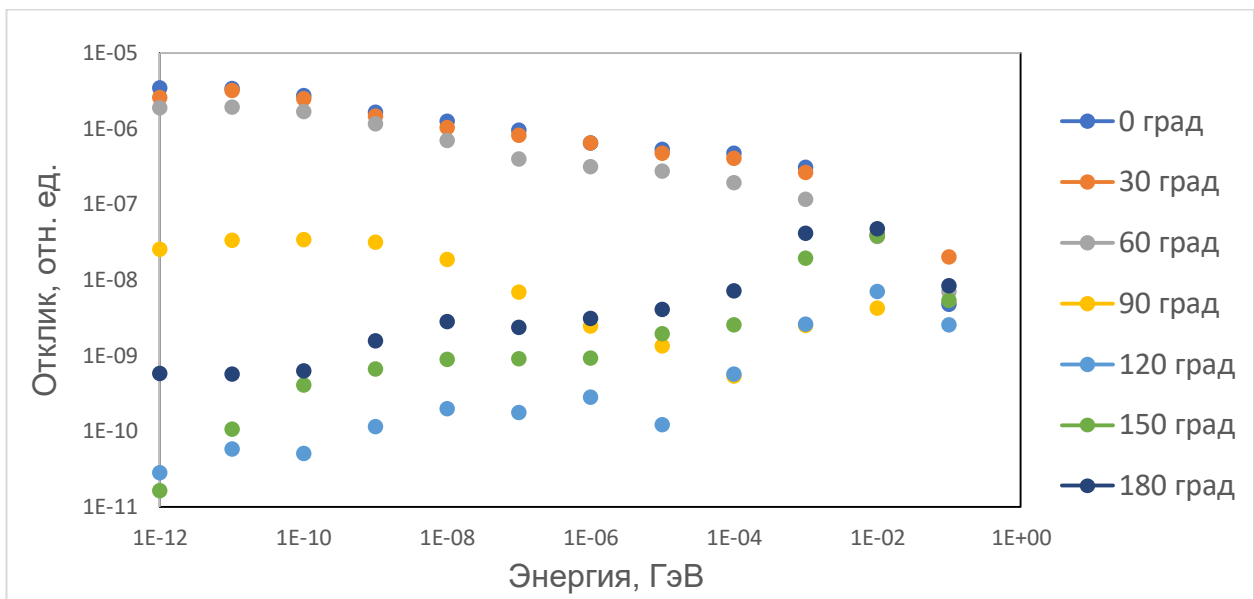


Рис. 2 Полученные энергетические зависимости чувствительности для дозиметра Harshaw 6776 для различных углов падения излучения

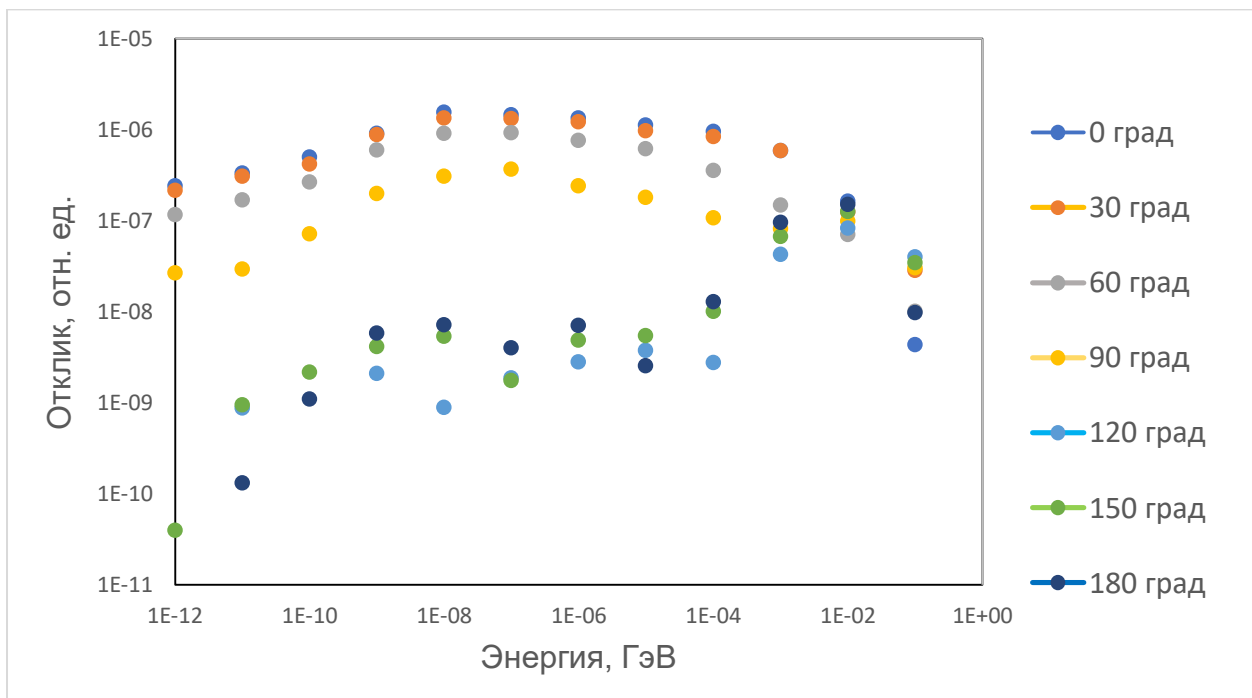


Рис. 3 Полученные энергетические зависимости чувствительности для дозиметра ДВГН-01 для различных углов падения излучения

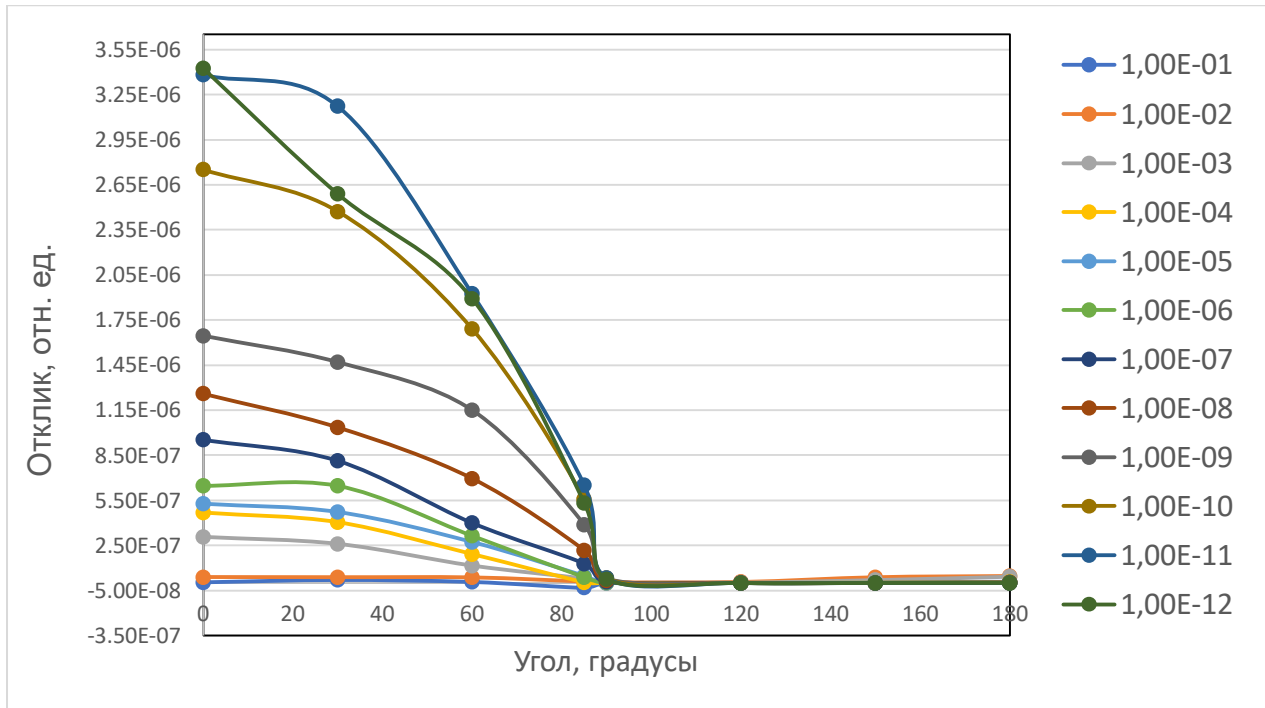


Рис. 4. Полученные угловые зависимости чувствительности для дозиметра Harshaw 6776 для различных величин энергий

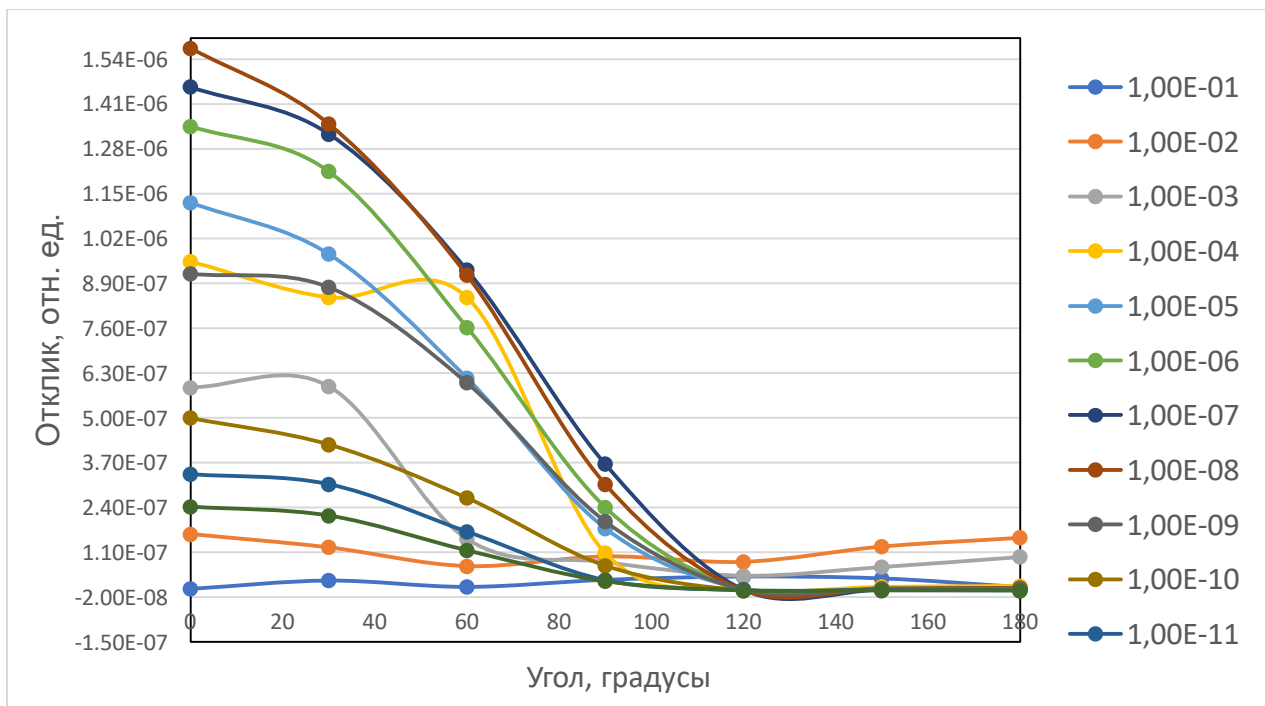


Рис. 5. Полученные угловые зависимости чувствительности для дозиметра ДВГН-01 для различных величин энергий

Получено, что для дозиметров при увеличении энергии падающего излучения на углах до 90 градусов отклик дозиметра падает, на углах от 90 градусов – возрастает.

Рассматривая угловые зависимости можно заметить, что отклик дозиметра падает, достигая минимального значения при 90 градусах для Harshaw 6776 и при 120 градусах для ДВГН-01.

Благодаря известным полученным дозам нейтронов при расположениях дозиметра в геометриях: ПЗ, ЗП, ПЛ, ЛП рассчитаны коэффициенты a_p , a_r , l , g так, чтобы рассчитанная доза нейтронов соответствовала дозе нейтронов, полученных экспериментальным способом (табл. 1).

Таблица 1. Коэффициенты, рассчитанные для дозиметра Harshaw 6776

Коефф. Помещение	a_p	a_r	l	g
X-501	0,406328265	0,171149156	0,207016152	0,215506426
T-207	0,316310129	0,204082138	0,193042204	0,286565529
BC-435	0,436639969	0,181780173	0,148177050	0,233402808
529-1	0,520908026	0,089333750	0,197989900	0,191768324
533	0,506961045	0,094146648	0,099705784	0,299186523
414	0,286966232	0,139147644	0,232629468	0,341256656
A-502.4	0,216228056	0,298457755	0,323824114	0,161490075
A-601	0,258321325	0,242917041	0,218886449	0,279875186

Таким образом, найдены коэффициенты a_p , a_r , l , g для дозиметра Harshaw 6776 (табл. 1), используемые в системе уравнений для расчета индивидуальной дозы облучения нейтронным излучением. Теперь для расчета индивидуальной дозы различных геометрий по данной методике, используя найденные коэффициенты, необходимо знать только плотность потока падающего нейтронного излучения.

По экспериментальным данным, полученным в ходе исследований на Нововоронежской АЭС [9], известны значения доз излучения для различных геометрий. Можно провести расчет доз по предложенной методике и сравнить полученные значения (табл. 2).

Таблица 2. Сравнение известных и рассчитанных по предложенной методике условно истинных значений доз для различных помещений

Помещение	Рассматриваемая геометрия	Условно истинное значение E , мкЗв	Условно истинное значение E , мкЗв, рассчитанное по предложенной методике
X-501	ПЗ	7,35	7,88
	ЗП	2,23	2,13
	ПЛ	1,42	1,41
	ЛП	1,46	1,35
	Суммарная полученная доза	12,47	12,77
T-207	ПЗ	4,00	3,24
	ЗП	1,10	1,30
	ПЛ	0,74	1,04
	ЛП	0,73	0,70
	Суммарная полученная доза	6,90	6,28
BC-435	ПЗ	129,00	138,53
	ЗП	38,43	38,85
	ПЛ	32,27	30,81
	ЛП	22,52	19,56
	Суммарная полученная доза	221,80	227,75

Окончание табл. 2

Помещение	Рассматриваемая геометрия	Условно истинное значение E, мкЗв	Условно истинное значение E, мкЗв, рассчитанное по предложенной методике
529-1	ПЗ	38,00	39,28
	ЗП	4,84	4,49
	ПЛ	6,59	5,91
	ЛП	5,72	6,11
	Суммарная полученная доза	55,20	55,80
533	ПЗ	37,00	28,75
	ЗП	2,15	3,57
	ПЛ	3,65	6,90
	ЛП	2,92	2,30
	Суммарная полученная доза	46,10	41,52
414	ПЗ	22,00	11,59
	ЗП	1,80	3,75
	ПЛ	3,11	5,67
	ЛП	3,25	3,86
	Суммарная полученная доза	30,40	24,87
А-502.4	ПЗ	38,00	32,45
	ЗП	4,84	30,69
	ПЛ	6,59	9,48
	ЛП	5,72	19,01
	Суммарная полученная доза	55,20	91,62
А-601	ПЗ	6,00	5,41
	ЗП	2,96	3,41
	ПЛ	2,38	2,15
	ЛП	1,54	1,68
	Суммарная полученная доза	12,70	12,65

На основании сходимости полученных расчетных и экспериментальных значений можно отметить, что предложенная методика оценки истинного значения эффективной дозы учитывает угловую зависимость чувствительности дозиметра и, соответственно, дозы нейтронов, получаемые в различных геометриях облучения.

4. Выводы

1. Получены значения откликов дозиметров для различных углов падения излучения. Поведение ЭЗЧ дозиметра Harshaw 6776 на 90 градусах связано с тем, что диаметр кристалла дозиметра больше, чем его ширина ($\varnothing 0,5 \times 0,15$ см), что способствует появлению погрешности измерений.

2. Получены угловые зависимости чувствительности для различных величин энергий излучения, падающего на дозиметры. Отклик дозиметра падает, достигая минимального значения при 90 градусах для Harshaw 6776 и при 120 градусах для ДВГН-01.

3. На основе данных об откликах дозиметров была предложена методика оценки истинного значения эффективной дозы. Ее особенность состоит в том, что используемые формулы учитывают вклад в дозу, полученную в различных геометриях облучения.
4. Различие в оцененной дозе по разным методикам объясняется разной оценкой углового распределения плотности потока нейтронного излучения.
5. Разная оценка углового распределения плотности потока обусловлена тем, что в старой методике предполагалось, что дозиметры детектируют излучение только при падении излучения перпендикулярно плоскости дозиметра. Новая методика учитывает угловую зависимость чувствительности дозиметра.
6. Оценка углового распределения плотности потока нейтронного излучения по старой методике может проводиться, когда спектр имеет большой вклад быстрых нейтронов.
7. Новая методика применима для любых полей, т. к. учитывает и энергетическую и угловую зависимости чувствительности.
8. Данную методику в дальнейшем можно развить до учета вклада многих углов боковой поверхности на основе полученных угловых зависимостей чувствительности исследуемых дозиметров.

5. Список литературы

1. *Хлопцев, А. Ф.* Лекции по радиационной безопасности : учебное пособие / А. Ф. Хлопцев. – Витебск : Изд-во Витебского гос. ун-та, 2005. – 149 с.
2. *Дрейзин, В. Э.* Подбор и оптимизация состава детекторов для многодетекторного спектрометра нейтронного излучения / В. Э. Дрейзин, Д. И. Логвинов, А. А. Гримов // АНРИ. – 2011. – Т. 65, № 2. – С. 16–24.
3. *Veinot, K. G.* Response of Harshaw neutron thermoluminescence dosimeters in terms of the revised ICRP/ICRU recommendations / K. G. Veinot, N. E. Hertel // Radiation Protection Dosimetry. – 2005. – Vol. 113, № 4. – P. 442–448.
4. The Fluka Code: Developments and Challenges for High Energy and Medical Applications / T. T. Bohlen, F. Cerutti, M. P. W. Chin [et al.] // Nuclear Data Sheets. – 2014. – Vol. 120. – P. 211–214.
5. Occupational radiation protection : general safety guide GSG-7 / IAEA. Vienna : International Atomic Energy Agency, 2018. – 335 p.
6. *Hajek, M.* A SOLUTION FOR NEUTRON PERSONAL DOSIMETRY IN THE ABSENCE OF WORKPLACE SPECTROMETRY / M. Hajek // Radiation Protection Dosimetry. – 2015. – P. 1–4.
7. Индивидуальный дозиметр смешанного излучения ДВГН-01: разработка и исследование характеристик / А. В. Санников, В. Н. Лебедев, В. Н. Кустарев [и др.] // АНРИ. – 2005. – № 3(42). – С. 50–59. – EDN HWICMX.
8. *Пышкина, М. Д.* Совершенствование системы индивидуального дозиметрического контроля нейтронного излучения на объектах использования атомной энергии : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 2.4.9 / М. Д. Пышкина ; [Место защиты: Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина]. – Екатеринбург, 2022. – 154 с. – Библиогр.: с. 132–145 (109 назв.).
9. Совершенствование системы дозиметрического контроля нейтронного облучения персонала Нововоронежской атомной станции / А. А. Екидин, В. П. Поваров, С. В. Росновский [и др.] // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 1. – С. 82–95. – DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.1.07>.

Сведения об авторах:

Спиридонова Ирина Сергеевна, инженер-исследователь радиационной лаборатории Института промышленной экологии УрО РАН.

Пышкина Мария Дмитриевна, к. т. н., м. н. с. радиационной лаборатории Института промышленной экологии УрО РАН.

Васильев Алексей Владимирович, к. т. н., заведующий радиационной лабораторией Института промышленной экологии УрО РАН, Екатеринбург, Россия.

Екидин Алексей Акимович, к. ф.-м. н., доцент, ведущий научный сотрудник Института промышленной экологии УрО РАН, Екатеринбург, Россия.

INFLUENCE OF THE ANGULAR AND ENERGY SENSITIVITY DEPENDENCES OF THE INDIVIDUAL DOSEMETERS FOR THE PERSONAL IRRADIATION ASSESSMENT

I. S. Spiridonova^{1,2}, M. D. Pyshkina², A. V. Vasylyev², A. A. Ekinin²

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

² Institute of Industrial Ecology, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

The energy and angular sensitivity dependences of the individual neutron dosimeters are investigated. The irradiation geometry study was carried out by modeling, reproducing the full picture of the interaction of the neutron field with the phantom. Due to information on the energy and angular sensitivity dependences, the most accurate estimates of the effective dose under the influence of neutron radiation can be obtained. The paper presents the results of calculating the energy and angular sensitivity dependences of individual neutron thermoluminescent dosimeters Harshaw 6776 and DVGN-01. Based on the data obtained on the individual dosimeters responses, a method for evaluating the accepted value of the effective dose was proposed.

Key words: individual dosimeter; personal radiation monitoring; energy dependence of the sensitivity; angular dependence of the sensitivity; effective dose assessment methods.

References

1. Hlopcev, A. F. Lekcii po radiacionnoj bezopasnosti : uchebnoe posobie / A. F. Hlopcev. – Vitebsk : Izd-vo Vitebskogo gos. un-ta, 2005. – 149 p. [In Russian].
2. Dreyzin, V. E. The selection and optimization composition of detectors for multidetector spectrometer of neutron radiation / V. E. Dreyzin, D. I. Logvinov, A. A. Grimov // ANRY. – 2011. – V. 65, № 2. – P. 16–24.
3. Veinot, K. G. Response of Harshaw neutron thermoluminescence dosimeters in terms of the revised ICRP/ICRU recommendations / K. G. Veinot, N. E. Hertel // Radiation Protection Dosimetry. – 2005. – Vol. 113, № 4. – P. 442–448.
4. The Fluka Code: Developments and Challenges for High Energy and Medical Applications / T. T. Bohlen, F. Cerutti, M. P. W. Chin [et al.] // Nuclear Data Sheets. – 2014. – Vol. 120. – P. 211–214.
5. Occupational radiation protection : general safety guide GSG-7 / IAEA. Vienna : International Atomic Energy Agency, 2018. – 335 p.
6. Hajek, M. A SOLUTION FOR NEUTRON PERSONAL DOSIMETRY IN THE ABSENCE OF WORKPLACE SPECTROMETRY / M. Hajek // Radiation Protection Dosimetry. – 2015. – P. 1–4.
7. DVGN-01 individual mixed radiation dosimeter: development and research of characteristics / A. V. Sanniikov, V. N. Lebedev, V. N. Kustarev [et al.] // ANRY. – 2005. – № 3(42). – P. 50–59. – EDN HWICMX.
8. Pyshkina, M. D. Sovershenstvovanie sistemy individual'nogo dozimetricheskogo kontrolya nejtronnogo izlucheniya na ob'ektah ispol'zovaniya atomnoj energii : dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk : 2.4.9 / M. D. Pyshkina ; [Mesto zashchity: Ural'skij federal'nyj universitet im. pervogo Prezidenta Rossii B. N. El'cina]. – Ekaterinburg, 2022...: p. 132–145 (109 назв.). [In Russian].
9. Improvement of the System of Dosimetric Control of Neutron Exposure of Staff of Novovoronezh Nuclear Power Plant / A. A. Ekinin, V. P. Povarov, S. V. Rosnocskiy [et al.] // Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika. – 2023. – № 1. – P. 82–95. – DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.1.07>.