

Профессиональное облучение нейтронами на Белоярской АЭС

Проведены исследования энергетического распределения нейтронного излучения на рабочих местах Белоярской АЭС. На 1 и 2 энергоблоках профессиональное нейтронное облучение происходит при операциях по загрузке отработавшего ядерного топлива в спецвагоны. На энергоблоках 3 и 4 операции, сопровождающиеся нейтронным облучением, можно разделить на 3 группы: (1) работы в помещениях, прилегающих к активной зоне реакторной установки; (2) манипуляции с радиоизотопными источниками нейтронов; (3) работы со свежим и отработанным ядерным топливом. На основе полученных данных об энергетическом распределении плотности потока нейтронного излучения были определены условно истинные значения мощности амбиентного эквивалента дозы $H^*(10)$, индивидуального эквивалента дозы $H_p(10)$ и интегральной плотности потока нейтронного излучения на отдельных рабочих местах. Для каждой группы рабочих мест определены удельные значения амбиентного эквивалента дозы, лежащие в диапазоне от 12 до 295 пЗв·см². Поправочные коэффициенты, учитывающие различие в спектрах на поверочной установке и на рабочих местах персонала, для индивидуальных термолуминесцентных дозиметров варьируются от 0,003 до 0,75. Электронные прямопоказывающие дозиметры переоценивают дозу до 6,2 раз в «мягких» спектрах и занижают дозу до 7,7 раз в «жестких» спектрах.

М.Д.Пышкина^{1,2},
А.В.Васильев¹, А.А.Екидин¹,
Е.И.Назаров¹, А.В.Пудовкин³,
В.О.Никитенко⁴,
В.И.Гуринович⁵, Д.И.Комар⁵,
В.А.Кожемякин⁵

¹ Институт промышленной экологии УрО РАН,
г. Екатеринбург

² Уральский федеральный университет,
г. Екатеринбург

³ Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский
институт технической физики им.
Е.И. Забабахина, г. Снежинск

⁴ Белоярская АЭС, г. Екатеринбург

⁵ Научно-производственное унитарное предприятие
«АТОМТЕХ», г. Минск, Республика Беларусь

Ключевые слова:

нейтронное излучение, профессиональное облучение, спектры.

Энергетические распределения плотности потока нейтронного излучения на рабочих местах объектов использования атомной энергии имеют различную форму и лежат в широком диапазоне энергий, от 0,025 эВ до 20 МэВ [1]. При нейтронном облучении, когда спектры нейтронов на рабочем месте персонала в значительной степени отличаются от поперечного спектра, индивидуальные дозиметры нейтронного излучения дают некорректные оценки эффективной дозы облучения нейтронами [2]. Для достоверного измерения индивидуального эквивалента дозы могут применяться три подхода:

- создание «идеального» индивидуального дозиметра нейтронов;
- создание опорных полей нейтронов, идентичных полям на рабочих местах;
- применение поправочных коэффициентов к индивидуальным дозиметрам на конкретных рабочих местах.

В первом случае требуется, чтобы энергетическая зависимость чувствительности индивидуального дозиметра по форме соответствовала удельному индивидуальному эквиваленту дозы. Второй подход подразумевает использование для проверки индивидуальных дозиметров

специально созданных опорных полей, имитирующих по форме энергетическое распределение плотности потока нейтронного излучения на рабочих местах персонала. Третий подход основан на проведении измерений энергетического распределения плотности потока нейтронного излучения непосредственно на рабочем месте персонала с последующим определением поправочного коэффициента к его индивидуальному дозиметру. Несмотря на то, что все три подхода разрабатываются, наибольшее распространение получил третий подход [3-8].

Исследования на отдельных рабочих местах Белоярской АЭС проведены с целью совершенствования системы индивидуального дозиметрического контроля нейтронного облучения путем обоснования поправочных коэффициентов для показаний индивидуальных нейтронных дозиметров. В результате комплексных измерений дозиметрических и радиометрических характеристик нейтронных полей получены нейтронные спектры, уточнен вклад нейтронного излучения в профессиональное облучение работников БАЭС. Измерения энергетического распределения плотности потока нейтронов никогда не проводились в посещаемых помещениях реак-

торных установок типа БН, поэтому результаты такого исследования, несомненно, представляют значительный интерес для целей радиационной безопасности действующих и проектируемых реакторов-размножителей.

Материалы и методы

Ситуации нейтронного облучения работников Белоярской АЭС специфичны для различных энергоблоков. На остановленных не менее 30 лет назад энергоблоках 1 и 2 в настоящее время проводятся операции по освобождению бассейнов выдержки и вывозу отработавшего ядерного топлива на переработку. Поэтому профессиональное облучение нейтронами происходит во время загрузки отработавшего ядерного топлива в спецвагоны.

Уникальные энергоблоки 3 и 4 с реакторными установками типа БН в качестве ядерного топлива могут использовать оксид урана или его смесь с оксидом плутония (МОХ-топливо). Ядерная реакция в таких реакторах проходит под действием быстрых нейтронов. Для целей радиационной безопасности форма спектра нейтронов за биологической защитой в местах возможного пребывания персонала может быть рассчитана с помощью метода Монте-Карло, но все же требует

экспериментальной проверки, потому что неоднородности в биологической защите формируют локальные области с отличающимися характеристиками нейтронных полей. Персонал также подвергается воздействию нейтронного излучения во время калибровки нейтронных детекторов контроля состояния реакторной установки. Процедуры проверки качества пусковых источников нейтронов сопровождаются дополнительным облучением работников. Воздействие нейтронов на персонал происходит на рабочих местах, где происходит обращение со свежим или отработанным ядерным топливом. Свежее топливо может рассматриваться в качестве источника нейтронов, если содержит не только природный, но и регенерированный уран с накопленными актиноидами или плутоний, подвергающийся самопроиз-



Рис.1. Расположение термолуминесцентных и электронных прямопоказывающих дозиметров на фантоме.

вольному делению с испусканием нейтронов.

На этапе планирования проведен отбор только тех рабочих мест для исследований, где ожидаемая эффективная мощность дозы нейтронного излучения превышала 1 мЗв в год. В каждой рассмотренной ситуации проводился комплекс измерений для определения характеристик нейтронных полей:

- мощности амбиентного эквивалента дозы нейтронного излучения;
- мощности индивидуального эквивалента дозы;
- скоростей счета нейтронного излучения, получаемых детектором, помещенным последовательно в полиэтиленовые сферы различного диаметра.

Для измерения амбиентного эквивалента дозы нейтронного излучения приме-

нялся дозиметр-радиометр МКС-АТ1117М с блоком детектирования БДКН-03 (счетчик He-3 в полиэтиленовом замедлителе) [9].

Измерение индивидуального эквивалента дозы выполнялось индивидуальными нейтронными дозиметрами двух типов:

- термолуминесцентные дозиметры *Harshaw 7666/8814* и *Harshaw 6776/8806* [10];
- электронные прямопоказывающие дозиметры *MGP DMC 2000GN* [11].

При проведении измерений на рабочих местах индивидуальные нейтронные дозиметры размещались на гетерогенном фантоме (рис.1).

Измерения нейтронных спектров проводились с помощью дозиметра-радиометра МКС-АТ1117М с блоком детектирования БДКН-06 [12] и набором полиэтиле-

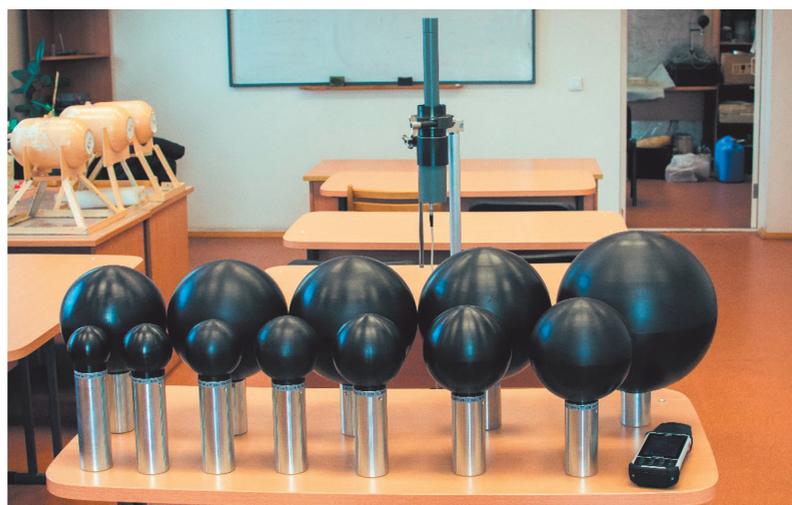


Рис.2. Дозиметр-радиометр МКС-АТ1117М с блоком детектирования БДКН-06 и набором полиэтиленовых сфер-замедлителей.



Рис.3. Размещение блока детектирования БДКН-06: в хранилище свежих тепловыделяющих сборок (фото слева) и за биологической защитой реактора в помещении барабана свежих сборок (фото справа).

новых сфер-замедлителей (рис.2) по аттестованной методике, разработанной совместно специалистами ИПЭ УрО РАН и УП «АТОМ-ТЕХ», номер в реестре Н ФР.1.38.2020.37361.

Для измерения плотности потока нейтронов блок детектирования БДКН-06 размещался так, чтобы максимально имитировать местоположение

человека, работающего в обследуемой зоне. Некоторые примеры размещения детектора нейтронов и полиэтиленовой сферы для измерения спектров приведены на рис.3.

Разработка и испытания многосферного дозиметра-радиометра обсуждались в статье [13]. Скорости счета, полученные с помощью дозиметра-радиометра, использова-

лись для расчета нейтронных спектров. В этой работе был использован один из самых популярных алгоритмов восстановления нейтронного спектра. Этот алгоритм основан на изменении параметров, включенных в описание спектра. Более подробную информацию об этом алгоритме можно найти в исследовании [14].

Табл.1. Рабочие места Белоярской АЭС, где должен быть представлен мониторинг нейтронов.

N	Тип и место работы	Средняя плотность потока энергии нейтронов, МэВ	Удельный амбиентный эквивалент дозы, пЗв·см ²
1.	Блоки 1,2. Работы с транспортно-упаковочным комплексом внутри вагона	0,6	210
2.	Блок 3. Барабан свежих топливных сборок	0,00001	12
3.	Блок 3. Хранилище источников	2,1	295
4.	Блок 3. Работы с транспортно-упаковочным комплексом внутри железнодорожного вагона	0,4	157
5.	Блок 4. Барабан свежих сборок	0,09	27
6.	Блок 4. Защитный колпак реактора	0,00002	12
7.	Блок 4. Работы с источником ²⁵² Cf в реакторном зале	1,3	258
8.	Блок 4. Хранилище свежих тепловыделяющих сборок (МОХ топливо)	0,9	222
9.	Блок 4. Хранилище свежих тепловыделяющих сборок (Pu сборки)	1,3	227

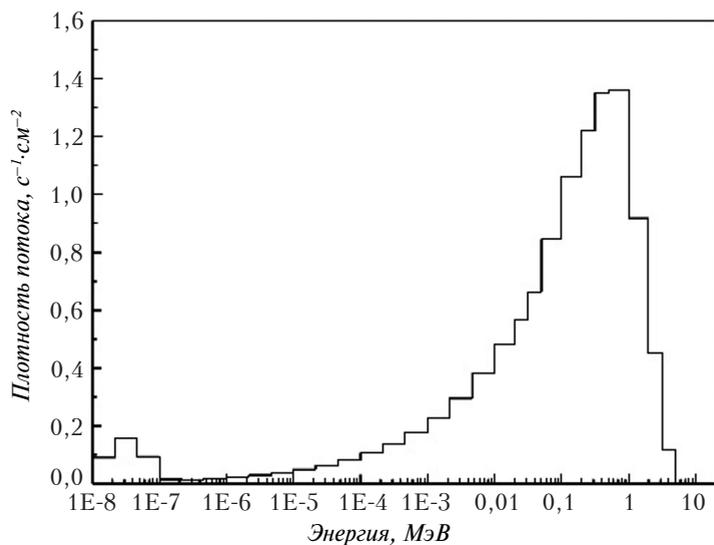


Рис.4. Нейтронные спектры рабочих мест: 1, 2 энергоблок. Работы с транспортно-упаковочным контейнером внутри вагона.

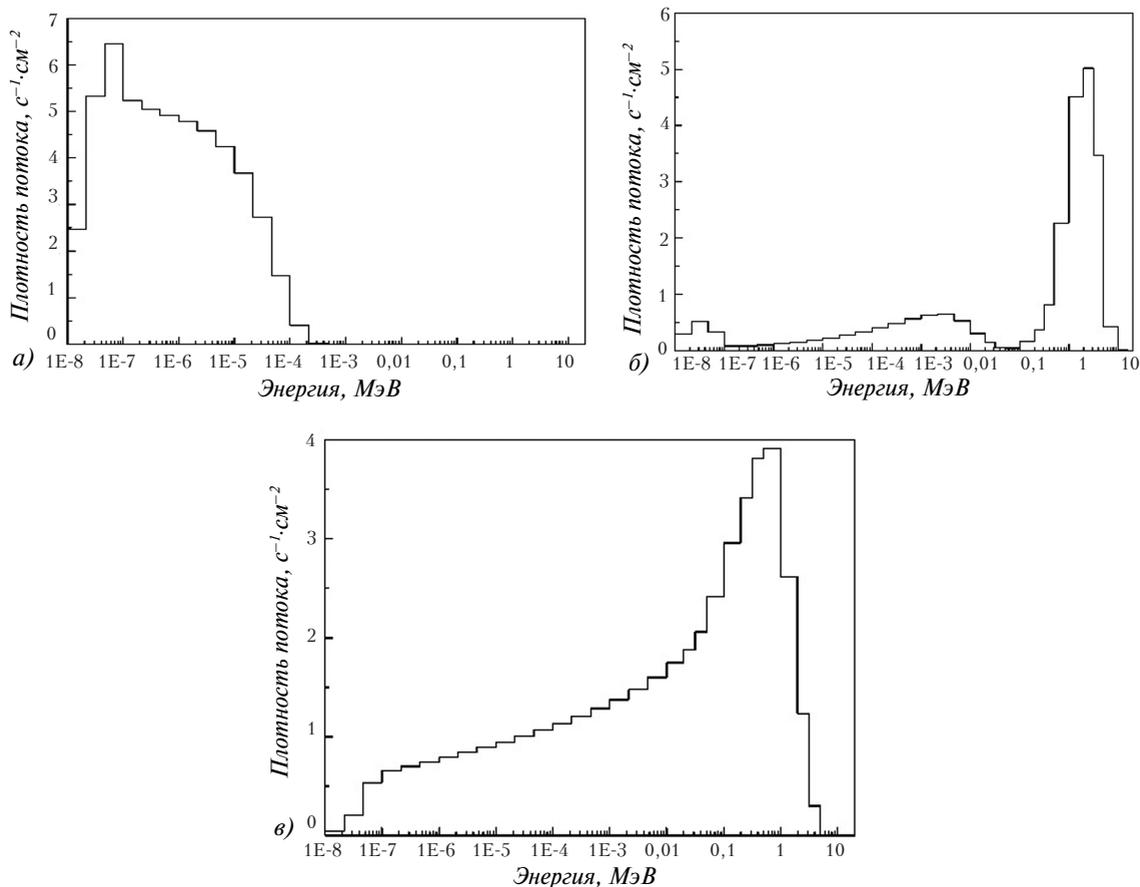


Рис.5. Нейтронные спектры рабочих мест, 3 энергоблок: а) барабан свежих топливных сборок; б) хранилище источников; в) работы с транспортно-упаковочным комплексом внутри железнодорожного вагона.

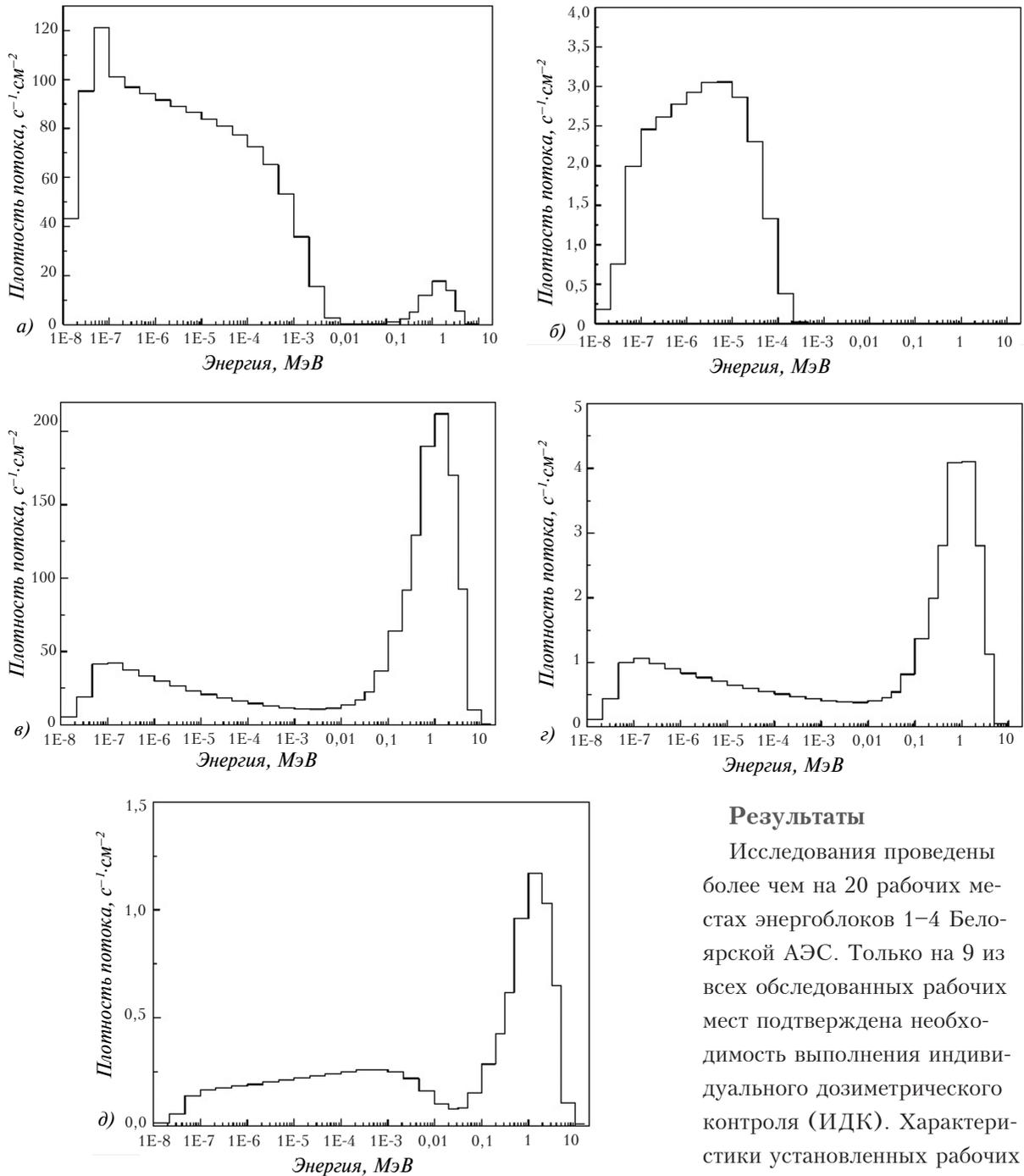


Рис.6. Нейтронные спектры рабочих мест, 4 энергоблок: а) барабан свежих сборок; б) защитный колпак реактора; в) работы с источником ^{252}Cf в реакторном зале; г) хранилище свежих тепловыделяющих сборок (МОХ топливо); д) хранилище свежих тепловыделяющих сборок (Pu сборки).

Результаты

Исследования проведены более чем на 20 рабочих местах энергоблоков 1–4 Белоярской АЭС. Только на 9 из всех обследованных рабочих мест подтверждена необходимость выполнения индивидуального дозиметрического контроля (ИДК). Характеристики установленных рабочих мест с превышением критерия введения ИДК нейтронного облучения приведены в табл.1.

Видно, что на энергоблоках 1, 2 ИДК должен проводиться для любых работ внутри спецвагона с транспортным

Табл.2. Мощность дозы персональных нейтронных дозиметров (Harshaw 6777/8814, Harshaw 6776/8806, DMC 2000GN), дозиметр-радиометр (МКС-АТ1117М с блоком детектирования БДКН-03) и реальная величина.

N	Тип и место работы	Мощность дозы, мкЗв/ч				Условно истинное значение ИЭД (АЭД)
		Harshaw-8806	Harshaw-8814	DMC 2000GN	МКС-АТ1117М с БДКН-03	
1.	Блоки 1, 2. Работы с транспортно-упаковочным комплексом внутри вагона	29	35	1,6	2,9	9,9 (8,4)
2.	Блок 3. Барабан свежих топливных сборок	306	513	6,5	2,0	1,6 (2,3)
3.	Блок 3. Хранилище источников	47	37	27	32	27 (25)
4.	Блок 3. Работы с транспортно-упаковочным комплексом внутри железнодорожного вагона	46	77	2,4	3,7	14 (12)
5.	Блок 4. Барабан свежих топливных сборок	4040	6091	177	120	134 (136)
6.	Блок 4. Защитный колпак реактора	241	295	6,3	2,0	0,8 (1,1)
7.	Блок 4. Работы с источником ^{252}Cf в реакторном зале	2517	4174	1600	2550	1486 (1333)
8.	Блок 4. Хранилище свежих тепловыделяющих сборок (МОХ топливо)	-	-	-	20	28 (25)
9.	Блок 4. Хранилище свежих тепловыделяющих сборок (Pu сборки)	-	-	-	2,6	8,2 (7,4)

Табл.3. Поправочные коэффициенты различных приборов на рабочих местах Белоярской АЭС.

N	Тип и место работы	Поправочный коэффициент			
		Harshaw-8806	Harshaw-8814	DMC 2000GN	МКС-АТ1117М с БДКН-03
1.	Блоки 1, 2. Работы с транспортно-упаковочным комплексом внутри вагона	0,34	0,28	6,2	2,9
2.	Блок 3. Барабан свежих топливных сборок	0,005	0,003	0,25	1,13
3.	Блок 3. Хранилище источников	0,58	0,75	1,03	0,78
4.	Блок 3. Работы с транспортно-упаковочным комплексом внутри железнодорожного вагона	0,31	0,19	6,0	3,3
5.	Блок 4. Барабан свежих топливных сборок	0,033	0,022	0,76	1,13
6.	Блок 4. Защитный колпак реактора	0,003	0,003	0,13	0,57
7.	Блок 4. Работы с источником ^{252}Cf в реакторном зале	0,59	0,36	0,93	0,52
8.	Блок 4. Хранилище свежих тепловыделяющих сборок (МОХ топливо)	-	-	-	1,27
9.	Блок 4. Хранилище свежих тепловыделяющих сборок (Pu сборки)	-	-	-	2,9

Выводы

Проведен анализ нейтронных полей на рабочих местах на территории Белоярской АЭС. Было выделено около 20 рабочих мест и видов работ, но только в 9 из них мощность дозы нейтронного излучения превышала 0,5 мкЗв/ч. На основании полученных результатов все рабочие места можно разделить на две группы: рабочие места, где облучение работников происходит в полях преимущественно быстрых нейтронов, и рабочие места в полях нейтронов с промежуточной и тепловой энергией. Вторая ситуация чаще всего реализуется в по-

мещениях, прилегающих к реакторному залу, т. к. нейтроны, образованные в активной зоне реактора, проходят через биологическую защиту (толстая бетонная стена), теряя свою энергию при многократном рассеянии.

В целях совершенствования системы индивидуального дозиметрического контроля были определены поправочные коэффициенты для различных типов используемых индивидуальных дозиметров и дозиметра-радиометра. Зависимость поправочных коэффициентов от энергии была рассчитана для оценки поправочных коэф-

фициентов в тех случаях, когда невозможно получить данные с помощью прямых измерений. Хорошо видно, что в области низких энергий термолюминесцентные нейтронные персональные дозиметры переоценивают условно истинную величину индивидуального эквивалента дозы более чем в 100 раз, а электронные прямопоказывающие индивидуальные дозиметры от 0,16 до 7,7 раз. Как и ожидалось, в области высоких энергий нейтронов поправочные коэффициенты для персональных дозиметров стремятся к 1,0.

Благодарность

Авторы выражают благодарность сотрудникам Белоярской АЭС, которые помогли во время измерений. Авторы выражают благодарность ООО «Альфа-Х91» за предоставленные средства измерения для выполнения исследований

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации (грант N МК-4027.2021.4).

Литература

1. Compendium of neutron spectra and detector responses for radiation protection purposes: supplement to technical reports series no. 403. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2001.
2. Пышкина М.Д., Никитенко В.О., Жуковский М.В. и др. Неопределенность результатов измерений индивидуальных дозиметров нейтронного излучения на рабочих местах // АНРИ. 2018. N 4(95). 2018. С. 15-23.
3. T. Bolognese-Milsztajn, D. Bartlett, M. Boschung, M. Coeck, G. Curzio, F. d'Errico, A. Fiechtner, V. Giusti, V. Gressier, J. Kyllonen, V. Lacoste, L. Lindborg, M. Luszik-Bhadra, C. Molinos, G. Pelcot, M. Reginatto, H. Schuhmacher, R. Tanner, F. Vanhavere, D. Derdau, «Individual neutron monitoring in workplaces with mixed neutron/photon radiation», *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 110, Issue 1-4, pp. 753–758. URL: <https://doi.org/10.1093/rpd/nch220> (дата обращения: 15.02.2021).
4. F. d'Errico, D. Bartlett, T. Bolognese-Milsztajn, M. Boschung, M. Coeck, G. Curzio, A. Fiechtner, J.-E. Kyllonen, V. Lacoste, L. Lindborg, M. Luszik-Bhadra, M. Reginatto, H. Schuhmacher, R. Tanner, F. Vanhavere, «Evaluation of individual dosimetry in mixed neutron and photon radiation fields (EVIDOS). Part I: scope and methods of the project», *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 125, Issue 1-4, pp. 275-280. URL: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncm169> (дата обращения: 15.02.2021).

5. H. Schuhmacher, D. Bartlett, T. Bolognese-Milsztajn, M. Boschung, M. Coeck, G. Curzio, F. d'Errico, A. Fiechtner, J.-E. Kyllonen, V. Lacoste, L. Lindborg, M. Luszik-Bhadra, M. Reginatto, R. Tanner, F. Vanhavere, «Evaluation of individual dosimetry in mixed neutron and photon radiation fields (EVIDOS). Part II: conclusions and recommendations», *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 125, Issue 1-4, pp. 281-284. URL: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncm167> (дата обращения: 15.02.2021).
6. M. Luszik-Bhadra, T. Bolognese-Milsztajn, M. Boschung, M. Coeck, G. Curzio, F. d'Errico, A. Fiechtner, V. Lacoste, L. Lindborg, M. Reginatto, H. Schuhmacher, R. Tanner, F. Vanhavere, «Direction distributions of neutrons and reference values of the personal dose equivalent in workplace fields», *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 125, Issue 1-4, pp. 364-368. URL: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncm189> (дата обращения: 15.02.2021).
7. M. Luszik-Bhadra, V. Lacoste, M. Reginatto, A. Zimbal, «Energy and direction distribution of neutrons in workplace fields: implication of the results from the EVIDOS project for the set-up of simulated workplace fields», *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 126, Issue 1-4, pp. 151-154. URL: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncm032> (дата обращения: 15.02.2021).
8. Hyeonseo Park, Jungho Kim & Kil-Oung Choi, «Neutron Spectrum Measurement at the Workplace of Nuclear Power Plant with Bonner Sphere Spectrometer», *Journal of Nuclear Science and Technology*, 45:sup5, pp. 298-301.
9. AT1117M Radiation Monitor (Neutron Dosimeter). URL: https://atomtex.com/sites/default/files/datasheets/at1117m_neutron_dosimeter_bdkn-03_1.pdf (дата обращения 15.02.2021).
10. Thermo Scientific Harshaw TLD Materials and Dosimeters. URL: <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/LSG/Catalogs/Dosimetry-Materials-Brochure.pdf> (дата обращения 15.02.2021).
11. DMC 2000 GN Personal Electronic Dosimeter. URL: https://mirion.s3.amazonaws.com/cms4_mirion/files/pdf/spec-sheets/dmc-2000-gn-neutron-dosimeter.pdf?1523762742 (дата обращения 15.02.2021).
12. AT1117M Radiation Monitor. URL: https://atomtex.com/sites/default/files/datasheets/at1117m_all_options_0.pdf (дата обращения 15.02.2021).
13. М. Pyshkina, А. Vasilyev, А. Ekinin, М. Zhukovsky, «Development and testing of a neutron radiation spectrometer in fields of radionuclide sources: AIP Conference Proceeding».
14. R. Bedogni, C. Domingo, A. Esposito, F. Fernández, «FRUIT: An operational tool for multisphere neutron spectrometry in workplaces», *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, no. 580, pp. 1301-1309. 10.1016/j.nima.2007.07.033.

Occupational Exposure to Neutrons at the Beloyarsk NPP

Pyshkina Mariia^{1,2}, Vasiliev Aleksey¹, Ekidin Aleksey¹, Nazarov Evgeniy¹, Pudovkin Anton³, Nikitenko Vitaliy⁴, Gurinovich Vladimir⁵, Komar Damian⁵, Kozhemyakin Valery⁵

¹ Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

² Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

³ Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Technical Physics named after E.I. Zababakhina, Snezhinsk, Russia

⁴ Beloyarsk NPP, Yekaterinburg, Russia

⁵ Scientific Production Unitary Enterprise «ATOMTEX», Minsk, Belarus

Abstract. Studies of the energy distribution of neutron radiation at the workplaces of the Beloyarsk NPP were carried out. At 1 and 2 power units, occupational exposure of neutron irradiation occurs during operations for loading spent nuclear fuel into special railway carriage. At power units 3 and 4, operations accompanied by neutron irradiation can be divided into 3 groups: (1) work in rooms adjacent to the reactor core; (2) manipulation of radioisotope neutron sources; (3) work with fresh and spent nuclear fuel. Based on the data obtained on the energy distribution of the neutron radiation flux density, the ‘true’ values of the ambient dose equivalent rate $H^*(10)$, the individual dose equivalent rate $H_p(10)$ and the integral neutron radiation flux density at individual workplaces were determined. For each group of workplaces, Fluence-to-ambient dose equivalent conversion coefficients are determined, which lie in the range from 12 to 295 pSv·cm². Correction factors for individual thermoluminescent dosimeters, taking into

Key words: neutron radiation, occupational exposure, spectra.

М.Д.Пышкина (м.н.с.)^{1,2}, А.В.Васильев (к.т.н., зав.лаб.)¹, А.А.Екидин (к.ф.н., доц., в.н.с.)¹, Е.И.Назаров (м.н.с.)¹, А.В.Пудовкин (вед.инж.)³, В.О.Никитенко (рук.гр.)⁴, В.И.Гуринович (гл.констр.пр.)⁵, Д.И.Комар (инж.)⁵, В.А.Кожемякин (к.т.н., с.н.с., директор)⁵

¹ Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург.

² Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург.

³ Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. Е.И. Забабахина, г. Снежинск.

⁴ Белоярская АЭС, г. Екатеринбург.

⁵ Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ», г. Минск, Республика Беларусь.

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