

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА НОВОВОРОНЕЖСКОЙ АТОМНОЙ СТАНЦИИ

А.А. Екидин**, В.П. Поваров*, С.В. Росновский*, Л.В. Сизова*,
М.Д. Пышкина**, А.В. Васильев**, М.Е. Васянович**,
Е.И. Назаров**, А.В. Пудовкин***, В.А. Кожемякин****

* Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская атомная станция
396071, Воронежская обл., г. Нововоронеж, Промышленная зона, Южная 1.

** ФГБУН Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН
620219, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 20

*** ФГУП «РФЯЦ ВНИИТФ им. ак. Е.И. Забабахина»
456770, Челябинская обл., г. Снежинск, ул. Васильева, 13, а/я 245

**** Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ»
Республика Беларусь, 220005, г. Минск, ул. Гикало, 5



На основании актуальных научных данных, рекомендаций международных организаций, новых приборов и методов запланированы и проведены исследования энергетического и углового распределения нейтронного излучения на рабочих местах Нововоронежской АЭС. Средние значения энергии нейтронов в обследованных помещениях находятся в широком диапазоне: 0,07 – 2,8 МэВ. Полученные экспериментальные данные позволили определить истинные значения мощности амбиентного эквивалента дозы $H(10)$, индивидуального эквивалента дозы $H_p(10)$ и обосновать поправочные коэффициенты для всех средств измерения, применяемых с целью индивидуального дозиметрического контроля и дозиметрического контроля рабочих мест. Определены поправочные коэффициенты, учитывающие различие между поверочным (калибровочным) спектром и полем, присутствующим на рабочем месте персонала. Все рабочие места разделены на четыре группы: спектры со значительной составляющей быстрых нейтронов (поправочный коэффициент 0,9); спектры со значительной составляющей как быстрых, так и тепловых нейтронов (поправочный коэффициент 0,7); спектры, преимущественно состоящие из тепловых и промежуточных нейтронов (поправочный коэффициент 0,3); рабочие места, где мощность амбиентного эквивалента дозы нейтронного излучения ниже нижнего предела допустимого измерения приборов, а также склад свежего топлива (поправочный коэффициент 1,0).

Ключевые слова: нейтронное излучение, энергия нейтронов, доза, дозиметр, фантом.

© А.А. Екидин, В.П. Поваров, С.В. Росновский, Л.В. Сизова, М.Д. Пышкина,
А.В. Васильев, М.Е. Васянович, Е.И. Назаров, А.В. Пудовкин, В.А. Кожемякин, 2023

Екидин А.А., Поваров В.П., Росновский С.В., Сизова Л.В., Пышкина М.Д., Васильев А.В., Васянович М.Е., Назаров Е.И., Пудовкин А.В., Кожемякин В.А. Совершенствование системы дозиметрического контроля нейтронного облучения персонала Нововоронежской атомной станции. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 1. – С. 82-95. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.1.07> .

ВВЕДЕНИЕ

Факторы негативного воздействия на здоровье работников атомных станций находятся под постоянным контролем, гарантирующим минимизацию отрицательных последствий. Гарантированное соблюдение пределов годового облучения часто обеспечивается на основании консервативного подхода, при котором рассматриваются наивысшие из возможного значения облучения, часто многократно превышающие реальные уровни. Обоснованное преодоление консервативных оценок возможно на основании актуальных научных данных, современных приборов и методов, позволяющих учитывать важнейшие характеристики полей излучения для адекватной оценки дозы.

Корректное определение дозы нейтронного облучения работников остается актуальной задачей для ядерной энергетике в мире. Модельные эксперименты сравнения результатов измерений индивидуальных дозиметров в полях нейтронного излучения с различным спектром распределения нейтронов по энергии показали, что относительная неопределенность таких результатов варьируется от -53 до $+10\ 500\%$. Кроме того неопределенности оценки эффективной дозы в разных геометриях облучения находятся в диапазоне от 0 до 160% [1]. При калибровке дозиметрических приборов невозможно создать все характеристики нейтронных полей, специфичных для различных рабочих мест. Результаты ряда исследований характеристик энергетического и углового распределения плотности потока нейтронного излучения на отдельных рабочих местах демонстрируют многократное отличие условно истинных значений от измеренных величин амбиентного эквивалента дозы и индивидуального эквивалента дозы [2]. Поэтому при оценке эффективной дозы облучения нейтронным излучением персонала необходимо вводить поправочные коэффициенты [3].

Результаты опубликованных исследований показали, что отличие энергии нейтронов на рабочих местах от энергий контрольного источника при калибровке или поверке приводит к необходимости введения поправочных коэффициентов, учитывающих спектр энергий нейтронов, для термомюлюминесцентных дозиметров в диапазоне $0,003 - 0,75$. Для электронных прямопоказывающих дозиметров необходимо применять поправочные коэффициенты как при облучении нейтронами низких энергий, так и в случае облучения нейтронами высоких энергий [4].

При нормальной эксплуатации АЭС ситуации облучения персонала в полях нейтронов на рабочих местах могут быть объединены в группы по идентичным источникам излучения: 1) работы в помещениях, прилегающих к активной зоне реакторной установки, включая посещаемые помещения гермообъема; 2) обращение с радиоизотопными источниками быстрых нейтронов (далее ИБН), преимущественно $PuBe$, реже Cf ; 3) работы со свежим и отработанным ядерным топливом. Различные условия рассеяния, отражения, поглощения нейтронов приводят к формированию различных спектров энергетического распределения нейтронного излучения даже для рабочих мест, относящихся к одной из выделенных групп. По этой причине целесообразно определять условно истинное значение амбиентного эквивалента дозы и индивидуального эквивалента дозы для каждого рабочего места и каждой ситуации нейтронного облучения.

Исследования характеристик нейтронных полей в помещениях любого энергоблока АЭС приводят к необходимости использовать поправочные коэффициенты, специфичные как для рабочих мест, так и для типа средства измерения [5]. На примере совершенствования системы ИДК нейтронного облучения персонала Нововоронежской АЭС

показаны комплекс выполненных исследований и способы внедрения полученных результатов в практику повседневной работы отдела радиационной безопасности.

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ

В рамках выполненных исследований идентифицировано 88 операций в 46-ти помещениях энергоблоков 3 – 7 Нововоронежской АЭС, при которых потребовалось определить дозиметрические характеристики нейтронных полей: мощность амбиентного эквивалента дозы нейтронного излучения, плотность потока нейтронов, энергетическое и угловое распределение плотности потока нейтронов. С применением гетерогенного фантома человека выполнено экспонирование разных типов индивидуальных дозиметров нейтронного излучения в производственных помещениях. Основными ситуациями при нормальной эксплуатации Нововоронежской АЭС, в которых возможно облучение работников нейтронами, являются работы внутри герметичного объема реактора, работы с оборудованием, содержащим в своем составе радионуклидные источники (боромеры с использованием $PuVe$ радионуклидного источника), работы с отработавшим ядерным топливом (далее ОЯТ).

Для измерения мощностей доз нейтронного излучения на рабочих местах применялись переносные средства измерения – дозиметры-радиометры ДКС-96 с БДМН-96, ДКС-96 с БДКН-96, МКС-АТ 1117М с БДКН-01, МКС-АТ1117М с БДКН-06 со сферой-замедлителем нейтронов 10 дюймов. Все приборы прошли поверку в поле аттестованного $PuVe$ -источника. Условно истинное значение мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) и плотность потока определены с учетом восстановленного энергетического распределения плотности потока нейтронов. Для экспонирования индивидуальных дозиметров нейтронного излучения на гетерогенном фантоме человека на всех энергоблоках НВАЭС применялись ТЛД-системы Rados, ТЛД-система Harshaw, электронные прямопоказывающие дозиметры EPD-N2.

Для определения энергии нейтронного излучения на обследованных рабочих местах применялся дозиметр-радиометр МКС-АТ1117М с блоком детектирования БДКН-06 и двенадцать полиэтиленовых сфер-замедлителей нейтронов плотностью $0,96 \text{ г/см}^3$ различного диаметра: 3; 3,5; 4; 4,5; 5; 6; 7; 8; 9; 9,5; 10; 12 дюймов (рис. 1).



Рис. 1. Мультисферный дозиметр-радиометр МКС-АТ1117М с БДКН-06 и полиэтиленовыми сферами-замедлителями

В блоке детектирования использован 3He -пропорциональный счетчик диаметром 25 мм и высотой 25 мм под давлением 1,01 МПа. Поочередное использование различных сфер-замедлителей при экспозиции блока детектирования в фиксированной точке про-

странства позволяет проводить определение дифференциальной плотности потока нейтронного излучения в 42-х энергетических группах в диапазоне энергий от 0,025 эВ до 30 МэВ с относительной расширенной неопределенностью не более 60%.

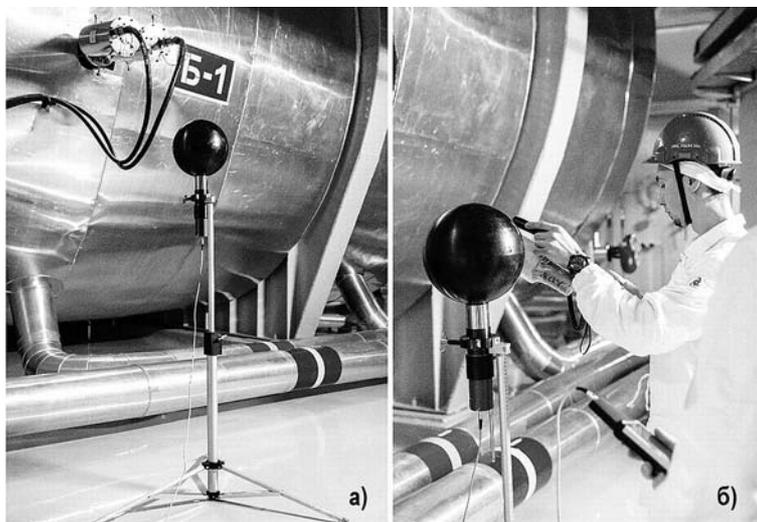


Рис. 2. Расположение детектора БДКН-06 и полиэтиленовых сфер-замедлителей нейтронов относительно источника нейтронов (ИБН): а) – способ фиксирования детектора и сфер над уровнем пола; б) – сличение значений МАЭД двух дозиметров нейтронов

Прибор предназначен для восстановления энергетического распределения плотности потока нейтронного излучения путем измерения отклика детектора тепловых нейтронов, разработан и изготовлен в УП «АТОМТЕХ» (г. Минск, Республика Беларусь) и внесен в государственный реестр средств измерений № 29551-19. Штатив в составе спектрометра позволяет фиксировать блок детектирования нейтронов на заданном уровне от поверхности, соответствующем положению грудной клетки работника в поле исследуемого источника нейтронов (рис. 2а).

Применение мультисферного дозиметра-радиометра МКС-АТ1117М для измерения характеристик нейтронного излучения включало последовательное измерение отклика БДКН-06 на замедление нейтронов каждой в отдельности сферой-замедлителем из комплекта и отклика детектора при отсутствии сфер. Полученный в каждой точке измерения набор данных об отклике БДКН-06 на трансформацию потока нейтронов сферами-замедлителями позволяет провести восстановление энергетического спектра нейтронного излучения в измеряемом пространстве [6]. Измеряемый параметр нейтронного излучения – плотность потока ($\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$). Дополнительным параметром измерения при установке сферы-замедлителя нейтронов диаметром 10 дюймов являлась мощность амбиентного эквивалента дозы (Зв/с), что позволило проводить сличение аналогичного параметра, измеренного другими типами радиометров-дозиметров нейтронов (рис. 2б).

Восстановление спектра энергетического распределения плотности потока нейтронного излучения выполнено на основе аттестованной методики, разработанной специалистами ИПЭ УрО РАН совместно с УП «АТОМТЕХ» (ФР.1.38.2020.37361). Основная идея методики определения энергетического распределения плотности потока нейтронного излучения заключается в том, что искомый спектр представляется суперпозицией спектров тепловых, промежуточных и быстрых нейтронов, описываемых соответствующими функциями с варьируемыми переменными. Путем варьирования переменных находится искомый спектр. Условием нахождения спектра является достижение минимума невязки между измеренными и рассчитанными по искомому спектру скоростями счета [7].

Энергетическое распределение плотности потока нейтронного излучения использовалось для получения основных характеристик, описывающих поле нейтронного излучения: средняя энергия по спектру, интегральная плотность потока, удельный AMBIENTный эквивалент дозы, МАЭД.

Интегральная плотность потока нейтронного излучения [8] определяется как

$$\Phi = \int_0^{\infty} \Phi_E(E) dE, \quad (1)$$

где $\Phi_E(E)$ – дифференциальная плотность потока в зависимости от энергии нейтронного излучения.

Средняя энергия, согласно [8], определяется выражением

$$E = \frac{1}{\Phi} \int_0^{\infty} E \cdot \Phi_E(E) dE, \quad (2)$$

где Φ – интегральная плотность потока; $\Phi_E(E)$ – дифференциальная плотность потока в зависимости от энергии нейтронного излучения.

Мощность AMBIENTного эквивалента дозы [8]

$$H(10) = \int_0^{\infty} h(10, E) \cdot \Phi_E(E) dE, \quad (3)$$

где $h(10, E)$ – удельный AMBIENTный эквивалент дозы в зависимости от энергии нейтронного излучения:

$$h(10) = \frac{1}{H(10)} \int_0^{\infty} h(10, E) \cdot \Phi_E(E) dE. \quad (4)$$

В работе величина МАЭД, рассчитанная по формуле (3) на основании полученных экспериментальных данных о спектре энергетического распределения плотности потока нейтронного излучения, принимается в качестве условно истинного значения МАЭД.

Поправочные коэффициенты, учитывающие различие между спектром поверочной установки и спектром на рабочем месте персонала, определяются как отношение принятого условно истинного значения МАЭД к результату измерения дозиметром-радиометром нейтронов:

$$k = H_p(10)/H(10), \quad (5)$$

где $H_p(10)$ – результат измерения дозиметром-радиометром нейтронов, мкЗв/ч; $H(10)$ – условно истинное значение индивидуального эквивалента дозы, мкЗв/ч.

Угловое распределение нейтронного излучения оценено с помощью трех типов дозиметров, размещенных на четырех сторонах фантома грудной клетки взрослого человека: спереди на груди, сзади на спине и на двух боковых сторонах, слева и справа. В каждой точке измерения фантом помещался в поле нейтронного излучения таким образом, чтобы одна из его вертикальных сторон была обращена к преимущественному направлению падения излучения. Падение излучения на такую сторону соответствовало углу падения 0° . Падение излучения на две боковые поверхности соответствовало углу падения $\pm 90^\circ$, а падение излучения на заднюю поверхность фантома соответствовало углу падения 180° . В данном эксперименте предполагалось, что человек находится на рабочем месте в одном положении, не вращается и не перемещается. В исследовании использованы индивидуальные термолюминесцентные (ТЛ) дозиметры Rados и Harshaw, электронные EPD-N2.

Индивидуальные дозиметры были поверены в поле аттестованного PuBe-источника.

Консервативно принимается, что сумма показаний дозиметров одного типа на всех вертикальных сторонах фантома представляет 100% от плотности потока в данной точке. Таким образом, предполагалось, что ТЛ-дозиметр, располагающийся на передней стороне фантома, детектирует только нейтроны, которые падают на него из переднего полупространства. Предполагалось также, что энергетическое распределение нейтронов со всех сторон фантома одинаковое, так как нет возможности определить его зависимость от направления падения.

Угловое распределение было использовано для оценки условно истинного значения мощности индивидуального эквивалента дозы (*МИЭД*) [8]:

$$H_p(10) = H_p(10,0^\circ) + H_p(10,+90^\circ) + H_p(10,-90^\circ) + H_p(10,180^\circ), \quad (6)$$

где $H_p(10,\theta^\circ)$ – мощность индивидуального эквивалента дозы для углов падения излучения θ° от 0 до 180° с шагом 90° градусов, мкЗв/ч.

Индивидуальный эквивалент дозы, создаваемый нейтронами, падающими под углом θ° к лицевой поверхности фантома, можно оценить как [8]

$$H_p(10,\theta^\circ) = \varphi(\theta^\circ)h_p(10,\theta^\circ)\cdot t, \quad (7)$$

где $\varphi(\theta^\circ)$ – интегральная плотность потока для угла падения нейтронов θ° , $\text{с}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$; $h_p(10,\theta^\circ)$ – удельный индивидуальный эквивалент дозы для угла падения нейтронов θ° , пЗв·см²; t – время облучения индивидуального дозиметра, с.

Поправочные коэффициенты, учитывающие различие между спектром поверочной установки и спектром на рабочем месте персонала, определяются как отношение принятого значения *МИЭД* к показанию индивидуального дозиметра:

$$k = [H_p(10)/D_p(10,\theta^\circ)]\cdot t_{\text{exp}}, \quad (8)$$

где $D_p(10,0^\circ)$ – показания индивидуального дозиметра в передне-задней (ПЗ) геометрии облучения, мЗв; t_{exp} – время экспозиции индивидуального дозиметра, ч; $H_p(10)$ – условно истинное значение *МИЭД*, мкЗв/ч.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Учитывая конструктивные особенности энергоблоков НВАЭС, целесообразно рассматривать полученные результаты отдельно для каждого типа РУ:

- энергоблоки 3, 4 с реакторными установками типа ВВЭР-440;
- энергоблок 5 с РУ ВВЭР-1000;
- энергоблоки 6, 7 с реакторными установками типа ВВЭР-1200.

Следует отметить, что энергоблок 3 выведен из эксплуатации, но часть его рабочих помещений используется в процессе эксплуатации энергоблока 4.

Характеристика нейтронных полей в помещениях энергоблоков 3, 4

В 32-х точках семи рабочих помещений энергоблоков 3, 4 выполнено измерение *МАЭД* нейтронного излучения различными типами радиометров-дозиметров нейтронов, что позволило провести сличение результатов и определить места максимального облучения работников при обращении с источниками нейтронного излучения. На обследованных рабочих местах в точках с максимальным значением *МАЭД* для оценки углового распределения нейтронного излучения устанавливались фантомы грудной клетки человека с размещенными индивидуальными дозиметрами различного типа. Дозиметрические измерения переносными приборами показали, что при любых операциях со свежим топливом, осмотре герметичных помещений и при отдельных операциях обслуживания боромеров *МАЭД* нейтронного излучения не превышает 0,1 мкЗв/ч (всего 12 точек в трех помещениях). Такие помещения были исключены из дальнейших исследований. На других рабочих местах обследованных помещений значения мощности дозы зависят от рас-

стояния от источника нейтронов и применяемого средства измерения. Получены следующие диапазоны значений *МАЭД*:

- осмотр, техническое обслуживание и ремонт боромеров – от $1,2 \pm 0,4$ до 700 ± 175 мкЗв/ч;
- обращение с отработавшим ядерным топливом в транспортном коридоре – от $0,6 \pm 0,1$ до 330 ± 83 мкЗв/ч;
- обращение с ОЯТ в центральном зале – от $9,6 \pm 1,9$ до 323 ± 81 мкЗв/ч.

Конструктивные различия переносных дозиметров-радиометров нейтронов в толщине и геометрии однотипного материала замедлителя на детекторе, а как следствие, систематическое отличие функции отклика на плотность потока нейтронов одной энергии приводят к разнице результатов измерения *МАЭД* в условиях отличия энергетического распределения нейтронов при калибровке или поверке приборов от энергетического спектра нейтронов на обследуемом рабочем месте. Так кратность отличий результатов измерения *МАЭД* в одной и той же точке различными средствами измерения составила при

- осмотре, техническом обслуживании и ремонте боромеров – от 0,7 до 2,6 раз;
- обращении с ОЯТ в транспортном коридоре – от 6,1 до 65,6 раз;
- обращении с ОЯТ в центральном зале – от 0,5 до 3,2 раз.

Типичные формы спектров энергий нейтронов в помещениях с боромерами, полученные в рамках выполненных исследований, представлены на рис. 3. Поля нейтронов, создаваемые боромерами, сохраняют существенную долю быстрых нейтронов даже при снижении плотности потока в сто раз (см. рис. 3). Изменения условий рассеяния нейтронов в пространстве могут приводить к отличию в доли медленной компоненты спектра.

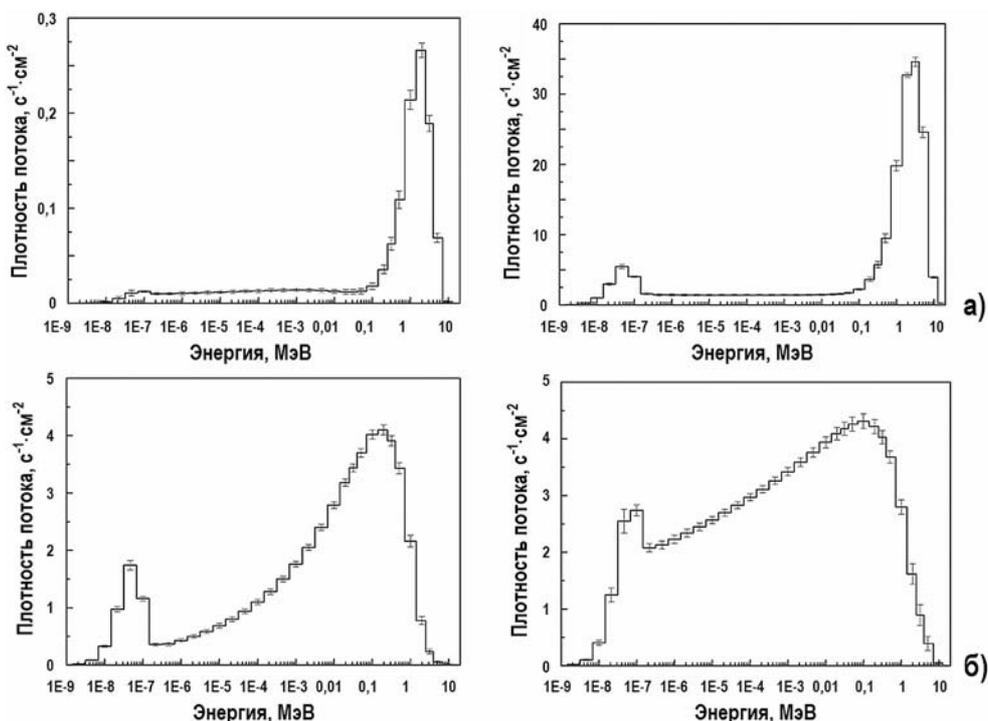


Рис. 3. Спектры энергий нейтронов: а) – создаваемый PuBe-источником в составе ИБН энергоблоков 3, 4; б) – вблизи ОЯТ в центральном зале (слева) и транспортном коридоре (справа) энергоблоков 3, 4

В общем виде кратность отличий значений *МАЭД* нейтронного облучения, полученных с использованием различных средств измерения нейтронов в одной и той же точке пространства при изменении плотности потока, но сохранении энергетического распре-

деления нейтронов, описывается логнормальной зависимостью вида

$$МАЭД_i[СИ1]/МАЭД_i[СИ2] = a \cdot \ln(МАЭД_i[СИ2]) + b, \quad (9)$$

где $МАЭД_i[СИ1]$ – мощность амбиентного эквивалента дозы нейтронного облучения в точке i , измеренная первым средством измерения; $МАЭД_i[СИ2]$ – мощность амбиентного эквивалента дозы нейтронного облучения в той же точке i , измеренная вторым средством измерения, конструктивно отличным от первого; a – коэффициент пропорциональности, специфичный для каждой пары приборов; b – константа, специфичная для каждой пары приборов. Отличие показаний $МАЭД$ нейтронного облучения различными приборами в фиксированных точках пространства при обращении с ОЯТ объясняется существенным отличием спектров энергий нейтронов ОЯТ от спектра энергий нейтронов от спонтанного деления и спектра энергий нейтронов калибровочного источника. За счет существенной модерации потока нейтронов материалом транспортно-упаковочного контейнера происходит перераспределение доли быстрых нейтронов в область промежуточных и тепловых нейтронов (см. рис. 3).

Разброс на порядок величин результатов сличения значений $МАЭД$ нейтронного облучения в фиксированных точках обследованных рабочих мест, полученный поверенными дозиметрами-радиометрами различного типа, показывает масштаб неопределенности оценки дозы без применения обоснованного поправочного коэффициента, учитывающего изменение энергетического спектра нейтронного излучения в реальных условиях измерения, зависящего от применяемого средства измерения. Расчет поправочного коэффициента для переносных приборов измерения $МАЭД$ нейтронного облучения выполнен по формуле (5). Для обоснования поправочного коэффициента использовались экспериментальные и расчетные данные об энергетическом распределении плотности потока нейтронного излучения, позволяющие получить основные характеристики, описывающие поле нейтронного излучения исследованных ситуаций облучения: средняя энергия по спектру, интегральная плотность потока, удельный амбиентный эквивалент дозы, условно истинное значение $МАЭД$. Пример результатов расчета средней энергии нейтронного поля на рабочих местах энергоблоков 3, 4 НВАЭС дан в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики нейтронных полей на рабочих местах энергоблоков 3, 4

Ситуация облучения	Средняя энергия нейтронов, МэВ
Осмотр, техническое обслуживание и ремонт боромеров	1,47
Обращение с ОЯТ в центральном зале	0,18
Обращение с ОЯТ в транспортном коридоре	0,19

Экспозиция трех типов индивидуальных дозиметров на гетерогенном фантоме грудной клетки взрослого человека позволила получить угловое распределение плотности потока нейтронного излучения рассматриваемых ситуаций облучения. Результаты экспонирования индивидуальных дозиметров показали различие нейтронных полей по преимущественному направлению плотности потока нейтронов. Как и в случае переносных средств дозиметрического контроля на рабочем месте, разные типы индивидуальных дозиметров в полях нейтронов, отличных от калибровочных, дают различные результаты индивидуального эквивалента дозы при облучении в одном и том же месте за один и тот же период экспозиции.

Однотипные системы ТЛ-дозиметров Rados и Harshaw не отличались между собой более чем на 20%. Результаты экспозиции ТЛ-дозиметров в ряде случаев отличались на порядок величин от показаний электронных прямопоказывающих индивидуальных дозиметров EPD-2N. Поправочные коэффициенты к применяемым индивидуальным и пе-

реносным дозиметрам нейтронов на рабочих местах энергоблоков 3, 4 представлены в табл. 2.

Таблица 2

Поправочные коэффициенты различных приборов на рабочих местах энергоблоков 3, 4

Ситуация облучения	Поправочный коэффициент		
	Harshaw / Rados	EPD-N2	ДКС-96 с БДКН-96
Осмотр, техническое обслуживание и ремонт ИБН (боромеров)	0,4	3,2	1,12
Обращение с ОЯТ в центральном зале	0,03	0,12	0,24
Обращение с ОЯТ в транспортном коридоре	1,0	1,0	1,0

Характеристика нейтронных полей в помещениях энергоблока 5

В 22-х точках 17-ти рабочих помещений энергоблока 5 выполнены измерения МАЭД различными типами радиометров-дозиметров нейтронов и определены места максимального облучения работников при обращении с источником нейтронов для экспериментального определения характеристик нейтронных полей. Получены следующие диапазоны значений МАЭД:

- осмотр, техническое обслуживание и ремонт ИБН – от $0,5 \pm 0,1$ до $51,0 \pm 12,8$ мкЗв/ч;
- работа с топливом во время ППР: от 17 ± 2 до 124 ± 12 мкЗв/ч;
- осмотр посещаемых помещений гермообъема на мощности РУ – от $1,4 \pm 0,1$ до 1100 ± 107 мкЗв/ч;
- обращение с нейтронными источниками ионизирующего излучения – от $2,3 \pm 0,6$ до 150 ± 15 мкЗв/ч;
- обращение с ОЯТ – от $0,5 \pm 0,1$ до $155,0 \pm 38,8$ мкЗв/ч.

Кратность отличий результатов измерения МАЭД в одной и той же точке различными средствами измерения составила:

- осмотр, техническое обслуживание и ремонт ИБН – от 1,9 до 3,4 раз;
- осмотр посещаемых помещений гермообъема на мощности РУ – от 0,6 до 13,5 раз;
- обращение с ОЯТ в транспортном коридоре – от 4,2 до 44,1 раз;
- обращение с ОЯТ в помещении хранения – от 8,6 до 9,8 раз.

Результаты расчета средней энергии нейтронного поля на рабочих местах энергоблока 5 НВАЭС представлены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики нейтронных полей на рабочих местах энергоблока 5

Ситуация облучения	Средняя энергия нейтронов, МэВ
Осмотр, техническое обслуживание и ремонт ИБН (боромеров)	0,35
Обращение с ОЯТ в помещении хранения	0,15
Обращение с ОЯТ в транспортном коридоре	0,10
В гермообъеме на мощности РУ у ГЦН	0,20
В гермообъеме на мощности РУ в центральном зале	0,20

Для оценки анизотропии нейтронного излучения индивидуальные дозиметры размещались на четырех сторонах фантома взрослого человека. Был сделан вывод о наличии на рабочих местах ненаправленного (в том числе изотропного или ротационного) поля излучения в местах за биологической защитой реактора и в местах предусмотрен-

ного выхода нейтронного излучения (возле боромеров). Экспонирование индивидуальных дозиметров на неподвижном фантоме человека ожидаемо показало преимущество плотности потока нейтронов в передне-задней геометрии облучения при осмотре ИБН и более изотропное поле при работе с контейнерами с ОЯТ. Поправочные коэффициенты к применяемым индивидуальным и переносным дозиметрам нейтронов на рабочих местах энергоблока 5 представлены в табл. 4.

Таблица 4

Поправочные коэффициенты различных приборов на рабочих местах энергоблока 5

Ситуация облучения	Поправочный коэффициент		
	Harshaw / Rados	EPD-N2	ДКС-96 с БДКН-96
Осмотр, техническое обслуживание и ремонт ИБН (боромеров)	0,4	0,9	0,6
Обращение с ОЯТ в помещении хранения	0,3	0,12	0,26
Обращение с ОЯТ в транспортном коридоре	0,3	1,6	0,82
В гермообъеме на мощности РУ у ГЦН	0,03	1,0	0,15
В гермообъеме на мощности РУ в центральном зале	0,03	0,34	0,75

Характеристика нейтронных полей в помещениях энергоблоков 6, 7

В 34 точках 29 рабочих помещений энергоблоков 6, 7 выполнено сличение результатов измерения МАЭД различными типами радиометров-дозиметров нейтронов и определены места максимального облучения работников при обращении с источником нейтронов для экспериментального определения характеристик нейтронных полей. Получены следующие диапазоны значений МАЭД:

- осмотр, техническое обслуживание ИБН – от $0,41 \pm 0,06$ до 450 ± 23 мкЗв/ч;
- осмотр посещаемых помещений гермообъема на мощности РУ – от $0,1 \pm 0,02$ до 654 ± 163 мкЗв/ч;
- работа со свежим топливом $\sim 0,2 \pm 0,1$ мкЗв/ч;

Кратность отличий результатов измерения МАЭД в одной и той же точке различными средствами измерения составили

- осмотр, техническое обслуживание и ремонт ИБН – от 0,8 до 73 раз;
- осмотр посещаемых помещений гермообъема на мощности РУ – от 0,1 до 15 раз.

Таблица 5

Характеристики нейтронных полей на рабочих местах энергоблоков 6 и 7

Ситуация облучения	Средняя энергия нейтронов, эВ
Осмотр, техническое обслуживание ИБН	1,19
В гермообъеме на мощности РУ у ГЦН	0,23
В гермообъеме на мощности РУ в центральном зале	0,47
В гермообъеме на мощности РУ в помещениях кольцевого коридора	0,09

Результаты измерения МАЭД в одной и той же точке различными средствами в помещениях хранения свежего топлива принципиально не отличались. Измерения плотности потока нейтронов в помещениях хранения свежего топлива показали очень низкие значения, что не позволило определить спектр энергий. Результаты расчета

средней энергии нейтронного поля на рабочих местах энергоблоков 6, 7 представлены в табл. 5.

Поправочные коэффициенты к применяемым индивидуальным и переносным дозиметрам нейтронов на рабочих местах энергоблоков 6, 7 представлены в табл. 6.

Таблица 6

Поправочные коэффициенты различных приборов на рабочих местах энергоблоков 6, 7

Ситуация облучения	Поправочный коэффициент		
	Harshaw / Rados	EPD-N2	ДКС-96 с БДКН-96
Осмотр, техническое обслуживание и ремонт ИБН (боромеров)	*0,4 – 1,6	*0,07 – 2,3	*0,12 – 1,75
Обращение со свежим топливом	**1,0	**1,0	**1,0
В гермообъеме на мощности РУ у ГЦН	0,03	1,0	1,62
В гермообъеме на мощности РУ в центральном зале	0,03	1,1	1,0
В гермообъеме на мощности РУ в помещениях кольцевого коридора	0,03	1,0	0,12
* Отличается в различных по геометрии и заполнению помещений расположения ИБН			
** Консервативное решение вследствие низких значений мощности дозы			

ВЫВОДЫ

В ходе исследований подтверждено объективное различие результатов измерений мощности дозы нейтронного облучения в одной и той же точке пространства, выполненных поверенными средствами измерения разной конструкции, отличающихся показателем отклика детектора нейтронов на каждый диапазон энергий. Такие различия могут достигать до 73-х крат.

Результаты экспонирования индивидуальных дозиметров на неподвижном фантоме человека подтверждают различие нейтронных полей по преимущественному направлению плотности потока нейтронов в ситуациях, сформированных разными источниками. Показано преимущество плотности потока нейтронов в ПЗ-геометрии при осмотре ИБН и более изотропное поле при работе с контейнерами с ОЯТ.

Спектры энергий нейтронов на обследованных рабочих местах энергоблоков НВАЭС, за редким исключением, не повторяют спектры поверочного (калибровочного) источника даже для операций по обслуживанию ИБН, в состав которых входят PuBe-источники.

С учетом полученных спектрометрических характеристик нейтронных полей и углового распределения плотности потока нейтронов для каждого рабочего места определены поправочные коэффициенты, учитывающие различие между поверочным (калибровочным) спектром и полем, присутствующим на рабочем месте персонала.

Выполненные исследования позволяют провести совершенствование системы индивидуального дозиметрического контроля на основе цикла улучшений: новые знания – экспериментальные исследования – внедрение результатов исследований – регламентация деятельности для снижения облучения работников – анализ полученных данных – новые знания.

Литература

1. Пышкина М.Д., Никитенко В.О., Жуковский М.В., Екидин А.А. Неопределенность результатов измерений индивидуальных дозиметров нейтронного излучения на рабочих местах. // АНРИ. – 2018. – № 4 (95). – С. 15-23. Электронный ресурс <https://www.doza.ru/anry/archive/95/15-23.pdf> (дата доступа 24.09.2022).

2. *Пышкина М.Д., Васильев А.В., Екидин А.А. и др.* Дозиметрия нейтронного излучения на рабочих местах персонала АО «Институт реакторных материалов» // Радиационная гигиена. – 2021. – Т. 14. № 2. – С. 89-99. DOI: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-2-89-99>.

3. *Алексеев А.Г., Пикалов В.А., Алексеев П.А.* Поправочные коэффициенты при измерении мощности амбиентного эквивалента дозы нейтронов. // АНРИ. – 2021. – № 4 (107). – С. 32-40. DOI: <https://doi.org/10.37414/2075-1338-2021-107-4-32-40>.

4. *Пышкина М.Д., Васильев А.В., Екидин А.А. и др.* Профессиональное облучение нейтронами на Белоярской АЭС. // АНРИ. – 2021. – № 3 (106). – С. 16-26. DOI: <https://doi.org/10.37414/2075-1338-2021-106-3-16-26>.

5. *Pyshkina M., Vasilyev A., Ekinin A., Nazarov E., Nikitenko V., Pudovkin A.* // Nuclear Engineering and Technology – 2021. – Vol. 53. – Iss. 5. – PP. 1723-1729. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.10.015>.

6. *Pyshkina M.D., Vasilyev A.V., Ekinin A.A., Zhukovsky M.V.* Development and testing of a neutron radiation spectrometer in fields of radionuclide sources. // AIP Conference Proceedings. Proceedings of the XXIII-rd International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists, AYSS 2019. American Institute of Physics Inc, 2019. – С. 070003.

7. *Pyshkina M.D., Vasilyev A.V., Ekinin A.A.* A neutron spectrum reconstruction for purposes of personnel dosimetry: modelling study. // AIP Conference Proceedings. Ser. «International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering 2020, ICCMSE 2020», 2021. – С. 040011.

8. International standard ISO 8529. – Switzerland: International Standard Organization, 2001.

Поступила в редакцию 27.09.2022 г.

Авторы

Екидин Алексей Акимович, ведущий научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук
E-mail: ekidin@mail.ru

Поваров Владимир Петрович, директор, доктор техн. наук
E-mail: [PovarovVP@nvnpp1.rosenergoatom.ru](mailto: PovarovVP@nvnpp1.rosenergoatom.ru)

Росновский Сергей Викторович, заместитель главного инженера
E-mail: rosnovskysv@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Сизова Людмила Владимировна, начальник лаборатории
E-mail: sizova@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Пышкина Мария Дмитриевна, младший научный сотрудник
E-mail: maria1pyshkina@gmail.com

Васильев Алексей Владимирович, заведующий лабораторией, канд. техн. наук
E-mail: alexey.vasiljev@gmail.com

Васянович Максим Евгеньевич, научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук
E-mail: vasyanovich_maks@mail.ru

Назаров Евгений Игоревич, младший научный сотрудник
E-mail: e.nazarov1005@gmail.com

Пудовкин Антон Викторович, заместитель начальника отдела
E-mail: pudovshit@mail.ru

Кожемякин Валерий Александрович, директор, канд. техн. наук
E-mail: director@atomtex.com

IMPROVEMENT OF THE SYSTEM FOR MONITORING OF THE NEUTRON RADIATION EXPOSURE FOR PERSONNEL OF THE NOVovorONEZH NUCLEAR POWER PLANT

Ekidin A.A.**, Povarov V.P.*, Rosnovskiy S.V.*, Sizova L.V.*,
Pyshkina M.D.**, Vasilyev A.V.**, Vasyanovich M.E.**, Nazarov E.I.**,
Pudovkin A.V.***, Kozhemyakin V.A.****

* Branch of «Concern Rosenergoatom», Novovoronezh NPP

1 Yuzhnaya Str. Industrial zone, 396071 Novovoronezh, Voronezh Reg., Russia

** Institute of Industrial Ecology of Ural Branch of RAS

20 S. Kovalevskoy Str., 620219 Ekanerinburg, Russia

*** All-Russian Scientific Research Institute of Technical Physics n.a. Acad. E.I. Zababakhin

13 Vasilyeva Str., PBox 245, 456770 Snezhinsk, Chelyabinsk Reg., Russia

**** ATOMTEKh Research and Production Unitary Enterprise

5 Gikalo Str., 220005 Minsk, Belarus Republic

ABSTRACT

Based on current scientific data, recommendations of international organizations, and novel instruments and techniques, studies have been planned and undertaken for the energy and angular distribution of neutron radiation in the Novovoronezh NPP's workrooms. The average values of the neutron energy within the surveyed rooms are in a broad range of 0.07 to 2.8 MeV. The obtained experimental data made it possible to determine the actual values of the ambient dose equivalent rate, $H(10)$ and the individual dose equivalent, $H_p(10)$, as well as to justify the correction factors for all measuring tools used for personal radiation monitoring and for radiation monitoring in workrooms. Correction factors have been determined that take into account the difference between the verification (calibration) spectrum and the field that occurs in the personnel workrooms. All workrooms are divided into 4 groups: spectra with a major fast neutron component (correction factor of 0.9); spectra with a major component of both fast and thermal neutrons (correction factor of 0.7); spectra consisting predominantly of thermal and intermediate neutrons (correction factor of 0.3); workrooms with the neutron radiation AEDR below the lower limit of the permissible instrument measurement; and the fresh fuel storage facility (correction factor of 1.0).

Key words: neutron radiation, neutron energy, exposure dose, dosimeter, phantom.

Ekidin A.A., Povarov V.P., Rosnovskiy S.V., Sizova L.V., Pyshkina M.D., Vasilyev A.V., Vasyanovich M.E., Nazarov E.I., Pudovkin A.V., Kozhemyakin V.A. Improvement of the System for Monitoring of the Neutron Radiation Exposure for Personnel of the Novovoronezh Nuclear Power Plant. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2023, no. 1, pp. 82-95; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.1.07> (in Russian).

REFERENCES

1. Pyshkina M.D., Nikitenko V.O., Zhukovskiy M.V., Ekidin A.A. The Uncertainties of Neutron Personal Dosimeter Readings in Workplace Fields. *ANRI*. 2018, no. 4 (95), pp. 15-23. Available at: <https://www.doza.ru/anry/archive/95/15-23.pdf> (accessed Sep. 24, 2022) (in Russian).
2. Pyshkina M.D., Vasilyev A.V., Ekidin A.A., Nazarov E.I., Romanova M.A., Gurinovich V.I., Komar D.I., Kozhemyakin V.A. Neutron Dosimetry at Workplaces of Institute of Nuclear

Materials JC. *Radiatsionnaya Gigiena*. 2021, no. 14 (2), pp. 89-99; DOI: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-2-89-99> (in Russian).

3. Alekseev A.G., Pikalov V.A., Alekseev P.A. Correction Coefficients for Measuring the Ambient Dose Equivalent Rate of Neutrons. *ANRI*. 2021, no. 4 (107), pp. 32-40; DOI: <https://doi.org/10.37414/2075-1338-2021-107-4-32-40> (in Russian).

4. Pyshkina M.D., Vasilyev A.V., Ekin A.A., Nazarov E.I., Pudovkin A.V., Nikitenko V.O., Gurinovich V.I., Komar D.I., Kozhemyakin V.A. Occupational Exposure to Neutrons at the Beloyarsk NPP. *ANRI*. 2021, no. 3 (106), pp. 16-26; DOI: <https://doi.org/10.37414/2075-1338-2021-106-3-16-26> (in Russian).

5. Pyshkina M., Vasilyev A., Ekin A., Nazarov E., Nikitenko V., Pudovkin A. *Nuclear Engineering and Technology*. 2021, v. 53, iss. 5, pp. 1723-1729; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.10.015>.

6. Pyshkina M.D., Vasilyev A.V., Ekin A.A., Zhukovsky M.V. Development and Testing of a Neutron Radiation Spectrometer in Fields of Radionuclide Sources. *AIP Conference Proceedings. Proceedings of the XXIII-rd International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists, AYSS 2019*. American Institute of Physics Inc, 2019. P. 070003.

7. Pyshkina M.D., Vasilyev A.V., Ekin A.A. A Neutron Spectrum Reconstruction for Purposes of Personnel Dosimetry: Modelling Study. *AIP Conference Proceedings. Ser. "International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering 2020, ICCMSE 2020"*, 2021. P. 040011.

8. *International Standard ISO 8529*. Switzerland, International Standard Organization, 2001.

Authors

Ekin Aleksey Akimovich, Leading Researcher, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: ekin@mail.ru

Povarov Vladimir Petrovich, Director, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: PovarovVP@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Rosnovskiy Sergey Viktorovich, Deputy Chief Engineer

E-mail: rosnovskysv@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Sizova Lyudmila Vladimirovna, Head of Laboratory

E-mail: sizova@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Pyshkina Mariya Dmitrievna, Junior Researcher

E-mail: maria1pyshkina@gmail.com

Vasilyev Aleksey Vladimirovich, Head of Laboratory, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: alexey.vasiljev@gmail.com

Vasyanovich Maksim Evgenievich, Researcher, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: vasyanovich_maks@mail.ru

Nazarov Evgeniy Igorevich, Junior Researcher

E-mail: e.nazarov1005@gmail.com

Pudovkin Anton Viktorovich, Deputy Head of Department

E-mail: pudovshit@mail.ru

Kozhemyakin Valery Aleksandrovich, Director, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: director@atomtex.com