

## **СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УЧЕТА ИНДИВИДУАЛЬНЫХ РАЗОВЫХ НАГРУЗОК НА РАБОЧИХ МЕСТАХ ПРИ РАБОТЕ С ИСТОЧНИКАМИ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

*Юрачко К.Г.*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Давыдов М.В. – канд. техн. наук*

В докладе рассматриваются современные тенденции использования источников нейтронного излучения в промышленности, ядерной медицине, атомной энергетике и научных исследованиях. Особое внимание уделено формированию нейтронных полей на АЭС, методам их мониторинга и дозиметрического контроля. Анализируются факторы, влияющие на точность оценки индивидуальных доз облучения персонала, включая геометрию облучения, спектральный состав нейтронов и миграцию работников между разными объектами. Обсуждаются подходы к верификации расчётных кодов, применение спектрометрической аппаратуры и внедрение 3D-картирования полей. Результаты работы показывают необходимость перехода к более сложным методам контроля, учитывающим пространственную неоднородность полей и индивидуальные условия облучения, что особенно важно для обеспечения радиационной безопасности при продлении срока эксплуатации энергоблоков, использовании смешанного топлива и проведении планово-предупредительных ремонтов.

Обеспечение радиационной безопасности персонала, работающего с источниками нейтронного излучения, остается одной из самых сложных задач радиационной физики и гигиены. Это связано как с расширением сфер применения нейтронных источников в промышленности, энергетике и медицине, так и с усложнением самих условий труда. Нейтронное излучение обладает высокой проникающей способностью и переменной биологической эффективностью, что делает его дозиметрию значительно более сложной задачей по сравнению с контролем гамма-излучения. В современных условиях, характеризующихся внедрением новых ядерных технологий, автоматизация учета индивидуальных доз становится не просто вопросом удобства, а требованием безопасности [1].

Ядерная медицина в современном мире переходит от системной лучевой терапии к микролучевой и таргетной хирургии на клеточном уровне. Развитие нейтрон-захватной терапии (НЗТ) позволяет эффективно лечить инфильтративные опухоли. В основе НЗТ лежит использование ядерных реакций, происходящих непосредственно внутри пациента. Когда ткани, предварительно насыщенные специальным препаратом с определенным изотопом, облучаются потоком тепловых нейтронов, ядра изотопа захватывают нейтрон и мгновенно распадаются. Наиболее проработанный метод – бор-нейтрон-захватная терапия (БНЗТ) с использованием изотопа бор-10. Введенный в кровь препарат, избирательно накапливается в раковых клетках, после чего опухоль облучается пучком эпитепловых нейтронов. В результате ядерной реакции выделяются альфа-частица и ядро лития с пробегом в пределах одной клетки (5–9 мкм), что позволяет разрушать поражённые клетки, не затрагивая здоровые ткани [2]. Кроме того, генераторы нейтронов и исследовательские реакторы используются для производства медицинских изотопов (технеций-99m, йод-131, лютеций-177). Компактные ускорительные источники непосредственно при клиниках решают проблему логистики короткоживущих препаратов, обеспечивая бесперебойную работу ПЭТ (позитронно-эмиссионных томографов) и ОФЭКТ-сканеров (одnofотонных эмиссионных компьютерных томографов) для ранней диагностики рака и кардиологических заболеваний.

Применение нейтронного излучения в промышленности основано на его способности глубоко проникать сквозь плотные материалы и взаимодействовать с легкими ядрами. В нефтегазовой отрасли нейтронный каротаж позволяет определять пористость пластов и границы залегающих нефти и газа. Нейтронная дефектоскопия, в отличие от рентгена, эффективно выявляет скрытую коррозию и проверяет целостность деталей сквозь металл [3].

Научную базу этих технологий обеспечивают исследовательские реакторы и ускорители. В атомной энергетике одним из главных направлений стало замыкание топливного цикла через увеличение доли МОКС-топлива из переработанного ядерного топлива, что снижает объем отходов и зависимость от добычи урана природного [4]. Одновременно ведётся работа по продлению сроков эксплуатации действующих энергоблоков до 60-80 лет.

Нейтронное поле на АЭС с реакторами ВВЭР характеризуется пространственной неоднородностью. Внутри гермообъёма спектр нейтронов охватывает более десяти порядков по энергии: от быстрых (около 2 МэВ) до тепловых (0,025 эВ). Основная специфика полей связана с процессами рассеяния и замедления: нейтроны проходят через биологическую защиту из бетона и стали, их спектр «смягчается», и в рабочих зонах преобладают промежуточные и эпитепловые нейтроны. Для новых блоков ВВЭР-1200 характерны изменения в теплоизоляции и геометрии каналов ионизационных камер, что влияет на локальные искажения поля. Через технологические проходки и зазоры возможны «утечки» быстрых нейтронов, что требует особого внимания при расчёте дозовых нагрузок на персонал. Современный мониторинг нейтронных полей на АЭС перешёл к комплексному

3D-картированию и созданию «цифрового двойника» радиационной обстановки. Для проектирования защиты используются программы на основе метода Монте-Карло (MCNP, MCU) и детерминистические методы; верификация расчётов с измерениями считается успешной при расхождении между расчетом и экспериментом не более 15-20%. Использование современных трековых детекторов и многосферных спектрометров Боннера позволяет построить детальные карты эквивалентной дозы. Это критически важно для оптимизации маршрутов персонала и минимизации коллективной дозы облучения во время планово-предупредительных ремонтов. Внедряются системы оперативного мониторинга, использующие оптоволоконные датчики и сцинтилляторы, устойчивые к высоким гамма-полям, что позволяет получать данные в режиме реального времени даже в труднодоступных зонах [5].

Показания индивидуального дозиметра часто не соответствуют реальной эффективной дозе, так как датчик расположен на поверхности тела, а поле нейтронов может быть изотропным или направленным со спины. При работе спиной к источнику тело экранирует прибор, занижая показания в несколько раз при продолжающемся облучении внутренних органов. Перемещения в тесном пространстве создают динамическую геометрию, которую простой прибор не учитывает. Кроме того, отражённые от стен нейтроны (альbedo) вносят дополнительный вклад, зависящий от расположения человека. Для компенсации погрешностей, вызванных «ходом с энергией» и геометрией облучения, в практику вводятся рабочие (площадочные) коэффициенты. На конкретном рабочем месте проводятся эталонные измерения с помощью спектрометров. Полученный реальный спектр сравнивается с показаниями стандартных индивидуальных дозиметров. Отношение реальной дозы к показаниям прибора и становится коэффициентом  $K$ . Эффективная доза рассчитывается как:

$$E = H_p(10) \cdot K(10), \quad (1)$$

где  $H_p(10)$  – индивидуальный эквивалент дозы.

Для каждой зоны АЭС коэффициенты различаются, что требует от службы радиационной безопасности ведения сложных справочных таблиц. Контроль доз осложняется при миграции персонала, особенно в периоды планово-предупредительных ремонтов, когда привлекаются тысячи сотрудников подрядных организаций. Если специалист работал на нескольких АЭС, возникает риск фрагментации данных: информация о накопленной дозе должна оперативно передаваться между предприятиями, чтобы не допустить превышения годового лимита. Кроме того, разовая нагрузка при критических операциях требует отдельного учёта для анализа безопасности конкретных технологических операций [6].

Таким образом, возникает необходимость в разработке системы автоматизированного учёта индивидуальных нагрузок на рабочих местах для персонала, работающего на нескольких рабочих местах с различными параметрами нейтронного излучения. Данная система должна обеспечивать контроль дозовой нагрузки на персонал с учетом результатов аттестации рабочих мест по параметрам поля нейтронного излучения и фактическим временем пребывания на них.

#### **Список использованных источников:**

1. Балонов, М. И. *Научные основы радиационной защиты в современной медицине: в 2 т.* / М. И. Балонов, В. Ю. Голиков, А. В. Водоватов [и др.]; под ред. М. И. Балонина. – СПб.: НИИРГ им. проф. П. В. Рамзаева, 2019. – Т. 1: Лучевая диагностика. – 320 с.
2. Тактаев, С. Ю. *Бор-нейтронозахватная терапия* / С. Ю. Тактаев, В. В. Кантышев. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2016. – 216 с.
3. Пресняков, А. Ю. *Рентгеновская и нейтронная радиография и томография в научных исследованиях и промышленности* / А. Ю. Пресняков, В. И. Микеров, О. А. Герасимчук, Д. И. Юрков // *Успехи физических наук.* – 2024. – Т. 194, № 6. – С. 583–594.
4. Кравченко, Г. А. *Получение МОКС-топлива как один из этапов замыкания ядерного топливного цикла* / Г. А. Кравченко, С. В. Рассамгин, С. В. Русанов, И. Ю. Косарев // *Космические аппараты и технологии.* – 2014. – № 1 (7). – С. 15–20.
5. Пышкина, М. Д. *Дозиметрия нейтронного излучения на рабочих местах персонала АО «Институт реакторных материалов»* / М. Д. Пышкина, А. В. Васильев, А. А. Екидин, Е. И. Назаров, М. А. Романова, В. И. Гуринович, Д. И. Комар, В. А. Кожемякин // *Радиационная гигиена.* – 2021. – Т. 14, № 2. – С. 89–99.
6. *Основы обеспечения безопасности АЭС: учебное пособие для студентов вузов* / В. Г. Асмолов, В. Н. Блинков, В. П. Поваров, О. Г. Черников; Министерство науки и высшего образования РФ, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». – Москва, 2025. – 300 с.