

Детекторы ионизирующих излучений



Михаил Коржик,
заведующий лабораторией
экспериментальной физики
высоких энергий Института
ядерных проблем БГУ, доктор
физико-математических наук,
профессор



Александр Лобко,
заместитель директора
по научной работе
Института ядерных проблем
БГУ, доктор физико-
математических наук,
доцент



Сергей Максименко,
директор Института
ядерных проблем
БГУ, доктор физико-
математических наук,
профессор



Виталий Мечинский,
ведущий научный
сотрудник лаборатории
экспериментальной
физики высоких энергий
Института ядерных проблем
БГУ, кандидат физико-
математических наук

Вступление Республики Беларусь в не столь многочисленный и привилегированный клуб стран, активно использующих ядерную энергетику для производства экологически чистой электроэнергии, является не только свидетельством технологической зрелости национальной экономики, но также рождает ряд новых и, что важно, обязательных для решения проблем. Среди них следует выделить подготовку квалифицированных кадров как для БелАЭС, так и для организации контроля радиационной обстановки на станции, вблизи нее и на территории всей страны, а также обеспечение безопасности хранения и экс-

плуатации ядерного топлива (ЯТ) и отработанного ядерного топлива (ОЯТ) [1].

В БССР был накоплен существенный опыт в решении указанной проблемы, когда велась активная работа по созданию малогабаритных ядерных установок [2, 3], которые стали прообразом современных модульных ядерных реакторов. Совместные усилия отечественных вузов и ведущих российских университетов вносят существенный вклад в решение задачи подготовки кадров для атомной отрасли. К сожалению, возникает новая проблема, существенным образом влияющая на стабильное и безопасное развитие ядерной энергетики, – техническое оснащение системы ядер-

ного и радиационного контроля и мониторинга, связанная с прекращением поставок в Беларусь и Россию многих импортных компонентов для создания (а также ремонта и обслуживания) современной детектирующей аппаратуры.

Важно отметить, что сложившаяся ситуация затрагивает не только АЭС, но и другие отрасли, использующие радиационные технологии, к примеру ядерную медицину, которая сейчас бурно развивается. В связи с этим импортозамещение на предприятиях и в организациях, разрабатывающих и производящих аппаратуру для ядерного и радиационного контроля, – первоочередная задача.

В типичном водо-водяном энергетическом реакторе (ВВЭР) на урановом топливе ежегодно образуется около 20 т ОЯТ, в котором содержится около 1 т урана-235 и -238, до 10 кг плутония и суммарно несколько килограммов продуктов деления: цезия-137, технеция-90, стронция-90, иода-129, самария-151, а также актинидов: нептуния-237, америция-241, -243 и кюрия-242, -244. Как ЯТ, так и ОЯТ являются источниками ионизирующего излучения, поэтому их состояние, состав и связанные с этим риски должны оцениваться с помощью специализированного измерительного оборудования с одновременным мониторингом радиационной обстановки на территории атомной станции и вокруг нее.

Излучение образуется при радиоактивном распаде, ядерных превращениях, торможении заряженных частиц в веществе и при их взаимодействии со средой. По природе оно может быть электромагнитным (ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма-излучение) или представлять собой поток частиц различной природы – нейтронов, нейтрино, протонов, электронов и ядер. В живой ткани ионизация приводит к гибели клеток, может вызвать заболевания различной степени тяжести, а в некоторых случаях – летальный исход.

Наиболее важный составной элемент ядерно-физической измерительной аппаратуры – детекторный материал, принцип действия которого основан на обнаружении эффекта ионизации в рабочей среде. Электромагнитное излучение взаимодействует непосредственно с электронами атомов рабочей среды, а при высоких энергиях – и с ядрами за счет процессов торможения, фотопоглощения, рассеяния, образова-

ния электронно-позитронных пар и ядерных реакций. Нейтральные и заряженные частицы создают вторичное излучение, которое и регистрируется в его материале.

Детекторные материалы условно разделяются на два типа:

- *для ионизационных измерителей с прямым преобразованием энергии ионизирующего излучения в электрический заряд. К ним относятся газы для газонаполненных детекторов, на основе которых создаются ионизационные камеры, газоразрядные и пропорциональные счетчики, а также полупроводники и многочисленные детекторы на их основе;*

- *сцинтилляционные, основанные на эффекте преобразования неравновесных носителей, возникших при ионизации, в ансамбль возбужденных люминесцентных центров. В таких детекторах применяется люминесценция рабочего вещества с последующим преобразованием энергии световых фотонов в электрический сигнал фотоприемников. К ним также примыкает группа детекторных материалов, работающих на эффекте Вавилова-Черенкова. Агрегатные состояния данных веществ разнообразны: жидкое, газообразное и твердое, причем последняя группа включает кристаллические, аморфные, полимерные и композитные.*

Лишь немногим более столетия назад вольфрамат кальция (CaWO_4) уже использовался для наблюдения рентгеновского излучения. Вплоть до конца Второй мировой войны научное сообщество обходилось применением нескольких детекторных материалов, среди

которых были вольфрамат кальция и сульфид цинка. Интенсивное развитие атомных проектов в поствоенный период стимулировало совершенствование техники регистрации ионизирующих излучений. За сравнительно короткое время были открыты все основные классы детекторных материалов и начато их широкое освоение. Доминирующими стали сцинтилляционные материалы, в частности кристаллы щелочно-галогидных соединений и полимерные материалы в виде прозрачных пластиков, которые до сих пор сохраняют ведущие позиции. Исследование неорганических кристаллических материалов на основе фторидных и кислородных неорганических соединений получило мощный стимул в связи с поиском и созданием лазерных сред в 60-х гг. прошлого века. Тогда работы в данной области были практически побочной линией при поиске новых лазерных материалов. Лишь с открытием М. Вебером тригерманата висмута [4], его широким внедрением в медицинскую диагностику и эксперименты по физике частиц и высоких энергий более 40 лет назад, стало очевидным, что сцинтилляционные детекторы весьма перспективны.

Отличительная особенность методик детектирования на основе сцинтилляционных материалов – недостижимый для других способов диапазон размеров исследуемых объектов, возможность разделения процессов во времени и определения их внутренней структуры: от физики частиц и высоких энергий до неразрушающего контроля и медицинской диагностики. С помощью детекторов ионизирующего излучения измеряются параметры объектов от частей Вселен-

ной и их эволюции до элементарных частиц и квантов различных взаимодействий.

Белорусские ученые также внесли существенный вклад в создание детекторных материалов. Открытие в НИИ ядерных проблем БГУ сцинтилляционного материала вольфрамата свинца $PbWO_4$ [5, 6], разработка технологии его синтеза и широкое внедрение в экспериментальную физику стали вехой в развитии техники детектирования ионизирующего излучения. Достигнутые результаты создают научно-технический базис современной детектирующей аппаратуры для системы контроля ядерной и радиационной безопасности без (или с минимальным присутствием) импортных комплектующих.

Радиационный контроль использования и перемещения делящихся ядерных материалов

Основу средств контроля вблизи ядерных энергетических объектов составляют установки радиационного мониторинга. Их многочисленные применения обуславливаются относительной дешевизной

крупногабаритных щелочно-галогидных сцинтилляционных материалов, широко производимых на протяжении десятков лет. Однако до сих пор технология их выпуска не является идеальной, поэтому наблюдается постепенный переход к многослойным (композиционным) или матричным детекторам, состоящим из набора небольших элементов.

Специфика обращения с делящимися ядерными материалами как одной из самых опасных для здоровья человека субстанцией предопределила высокий уровень не только регламентации правил в сфере безопасности, но и средств детектирования для предотвращения несанкционированного перемещения, а также контроля их разрешенного использования.

Регистрация и анализ ионизирующего излучения в радиационных мониторах осуществляется методом сравнения излучения контролируемого объекта с уровнем фона в месте нахождения монитора без непосредственного измерения численного значения какой-либо нормированной характеристики.

Обнаружение монитором ядерных материалов и радиоактивных веществ выдается в виде сигналов, не содержащих значений физиче-

ских величин, но подтверждающих, что излучение контролируемого объекта превышает пределы некоторого порога по отношению к внешнему радиационному фону. Такие приборы позволяют беспрепятственно и эффективно осматривать людей, транспорт, багаж, помещения. Широко применяются комбинированные способы обнаружения, например одновременное использование в мониторах детекторов γ - и нейтронного излучения. Радиационные мониторы, в том числе гамма-спектрометры, являются одними из основных технических средств учета и контроля ядерных материалов. На *рис. 1* приведено изображение одного из современных мониторов γ - и нейтронного излучения, разработанного в Институте ядерных проблем БГУ, со сцинтилляционным материалом $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}:Ce$, серийно выпускаемым в России.

За последнее десятилетие существенно расширен перечень материалов, уже используемых в гамма-спектрометрах и мониторах, а также тех, что предстоит исследовать. Наряду с $LaBr_3:Ce$ отметим ряд новых галоидных материалов, активированных ионами европия (*таблица*), обладающих высоким выходом света сцинтилляций. Они прекрасно подходят для спектрометрии слабых потоков гамма-излучения, однако являются чрезвычайно гигроскопичными, что сдерживает освоение технологии их производства и применения.

Гораздо меньшую номенклатуру имеют пластмассовые сцинтилляторы, с помощью которых благодаря их значительным размерам, достигающим нескольких метров, успешно обнаруживают замаскированные и запрещенные к перемещению ядерные материалы.

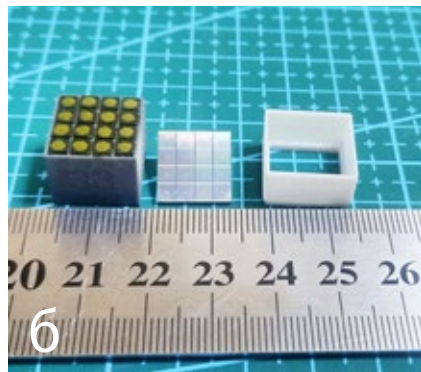
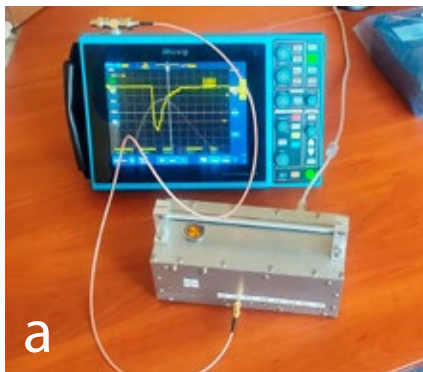


Рис. 1. Радиационный монитор γ - и нейтронного излучения (а) и его детекторный элемент (б)

Таблица. Материалы, перспективные для спектрометрии гамма-излучения

Кристалл	ρ г/см ³	Максимум высвечивания	Световыход LY	Разрешение R, %	Константа затухания сцинтилляции	Гигро- скопичность
		λ , нм	ph/Mev	Cs ¹³⁷	τ , нс	
SrI ₂ :Eu	4,55	435	115'000	2,6	1,500	Сильная
Ba ₂ CsI ₅ :Eu	4,9	435	102'000	2,55	383; 1,500	Средняя
SrCsI ₃ :Eu	4,25	458	73'000	3,9	2,200	Средняя
BaBrI:Eu	5,2	413	97'000	3,4	500	Низкая
NaI:Tl	3,67	415	44'000	5,6	230	Сильная

Таким образом, внедрение новых материалов в детекторы, предназначенные для обнаружения запрещенных к проносу и провозу ядерных материалов, имеет серьезные перспективы. Хотя технологическая база для их получения в Беларуси отсутствует, существуют надежные кооперационные связи с Российской Федерацией, обладающей одним из самых высоких производственных потенциалов в данной области. Отечественным производителям, освоившим выпуск мониторингового и спектрометрического оборудования, целесообразно использовать новые поколения галоидных материалов.

Для контроля и измерения уровня загрязнений источниками γ -квантов подходят многочисленные детекторы на основе вышеперечисленных кристаллов-сцинтилляторов. Однако в случае загрязнений радиоактивными источниками электронов и позитронов (бета-загрязнения) важно отделять сигналы детекторов частиц от бета-частиц и гамма-квантов. До последнего времени бета-загрязнения контролировались с помощью газоразрядных счетчиков, имеющих существенные недостатки.

Одно из предложенных технических решений – переход к композитным детекторным материалам (АТОМТЕХ, Беларусь) с развитой детекторной поверхностью (рис. 2).

Мониторинг активной зоны ядерных реакторов

Горение ядерного топлива в реакторе производит вторичные изотопы, многие из которых бета-активны и распадаются с испусканием электрона и электронного антинейтрино. Идущий из реактора нейтринный поток огромен, поэтому даже при малом сечении взаимодействия рабочего вещества детектора с нейтрино (антинейтрино) можно регистрировать их сотнями в сутки и отслеживать работу реактора практически в режиме реального времени.

Для измерения реакторных антинейтрино, как правило, используется реакция обратного бета-распада на протонах в рабочем веществе детектора. Пионерные работы в этом направлении были выполнены в Курчатовском институте П.Е. Сливаком и

Л.А. Микаэляном в середине прошлого столетия [7]. Были сделаны первые шаги по развитию методов дистанционного определения композиционного состава топлива в активной зоне реактора в реальном времени.

Установка по нейтринометрии реактора решает сразу несколько задач: позволяет вести мониторинг того, как именно выгорает ядерное топливо, и наблюдать за нейтринным потоком для прослеживания эволюции его изотопного состава в процессе горения. Это поможет выявить, вырабатывается ли при этом плутоний и сколько его остается в выгружаемом сырье по окончании цикла работы. Мониторинг обеспечит наблюдательным организациям, например Международному агентству по атомной энергии (МАГАТЭ), контроль соблюдения требований по нераспространению ядерного оружия. Нейтринометрия выполняет и томографию

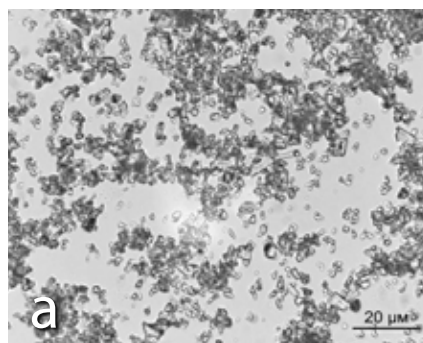


Рис. 2. Частицы сцинтиллятора Li₂CaSiO₄:Eu (а) и его же слой после упорядочения гранулометрического состава под облучением УФ-лампы (б)

ядерного реактора, восстанавливая пространственную картину выгорания топлива в реакторе с достаточно крупной активной зоной.

Таким образом, весьма перспективной является разработка детектора реакторных антинейтрино индустриального типа, который может стать прототипом серийных моделей. Антинейтринный детектор устанавливается на расстоянии десятков метров от активной зоны. Он технологически не связан с реактором, со службами контроля и управления и может обеспечить дистанционный независимый мониторинг реактора ядерных энергетических установок. Детектор будет работать в режиме «черного ящика» и выдавать информацию, которую невозможно фальсифицировать, в удаленный центр. Развитие этого прикладного направления нейтринной физики имеет большое значение для МАГАТЭ как гаранта нераспространения делящихся материалов. Задача ближайшего будущего – создание более компактных и имеющих улучшенные параметры нейтринных приборов для постоянного мониторинга реакторов АЭС России и Беларуси и возможного тиражирования этой технологии в других странах.

Обслуживание потребностей ядерного энергетического сектора – не единственная, хотя и весьма важная область, где используются детекторные материалы для измерения ионизирующего излучения. Они также применяются в медицинской диагностике и терапии, экспериментальной физике, при неразрушающем контроле грузов (в том числе таможенных), в радиационной дефектоскопии при исследовании природных объектов и пищевых продуктов, при измерениях в косми-

ческом пространстве, каротаже скважин, в радиационной тензометрии, в спектрометрии и активационном анализе материалов, в электронной микроскопии и структурном анализе материалов, при обеззараживании и стерилизации, обработке посевного материала и т.д.

Областями, где роль ядерно-физических методов измерения неуклонно будет возрастать, являются: поиск полезных ископаемых и подземная навигация средств разведки в области месторождений углеводородов; учет состояния потоков ионизирующего излучения вблизи планеты для уточнения прогноза погоды; промышленная интроскопия, в том числе нейтронная радиография, и т.д.

Исследования в области детекторных материалов, особенно сцинтилляционных, тесно переплетаются с разработкой других люминесцентных материалов и улучшением их свойств. Результаты, которые будут получены, помогут в создании устройств светодиодного, лазерного освещения, новых технологий маркировки с

помощью красителей; биомаркеров для люминесцентной интроскопии в медицине и медицинских исследованиях; новых технологий лучевой и корпускулярной терапии.

Диагностическая техника, радиофармпрепараты, технологии визуализации – лишь часть перечня, ставшего привычным для потребителя. Вопросы развития данного списка давно акцентированы не только на вертикальном росте новейших форм, но и горизонтальном, связанном с дальнейшим внедрением имеющих продукты на более слаборазвитые рынки. Для этого ведутся работы, ориентированные на снижение стоимости источников излучения и оборудования, повышение их доступности, безопасности и экологичности, достижение оптимальных параметров облучения и т.д. Развитие наукоемких радиационных технологий шестого технологического уклада – несомненно, перспективное направление, способное объединить потенциал и опыт ученых и инженеров Республики Беларусь. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. А.В. Балихин. О состоянии и перспективах развития методов переработки отработавшего ядерного топлива // Комплексное использование минерального сырья. 2018. №1. С. 71–87.
2. Красин А.К. Ядерная энергетика и пути ее развития / А.К. Красин. – Минск, 1981.
3. Красин А.К. Мирное использование ядерной энергии / А.К. Красин. – Минск, 1982.
4. M.J. Weber. Inorganic scintillators: today and tomorrow // Journal of Luminescence. 2022. Vol. 100, Iss. 1–4. P. 35–45.
5. V.G. Baryshevsky. Single crystals of tungsten compounds as promising materials for the total absorption detectors of the e.m. calorimeters / V.G. Baryshevsky, M.V. Korzhik, V.I. Moroz [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A. 1992. Vol. 322, issue 2. P. 231–234.
6. Качанов В.А. Кристаллы вольфрамата свинца – основа электромагнитной калориметрии. В глубь материи: физика XXI века глазами создателей экспериментального комплекса на Большом адронном коллайдере в Женеве / В.А. Качанов, М.В. Коржик, А.Н. Анненков. – М., 2009.
7. К исследованию феномена советской физики 1950–1960-х гг. Социокультурные и междисциплинарные аспекты; сост. и ред. В.П. Визгин [и др.]. – СПб., 2014.