

А. С. Казимиров, Л. М. Мартынюк,
Г. Ф. Казимилова, С. М. Иевлев,
Е. В. Чорный

ООО Научно-производственное предприятие
«Атомкомплексприбор»

Системы и приборы для контроля радиационной безопасности АЭС

Представлены результаты серии выполненных за последние 10 лет НПП «Атомкомплексприбор» совместно с ведущими институтами НАН Украины научно-методических исследований и научно-технических разработок, послуживших основой при создании научно-производственной базы для внедрения в Украине, а также экспорта в другие страны современных интеллектуальных и высоконадежных программно-аппаратурных комплексов и систем, которые обеспечивают контроль радиоактивности в окружающей среде и технологический радиационный контроль на АЭС. Рассмотрены перспективы развития отечественного ядерно-физического приборостроения.

Ключевые слова: радиационная безопасность АЭС, ядерно-физическое приборостроение, спектрометрия, контроль радионуклидов в объектах окружающей среды

О. С. Казимиров, Л. Б. Мартинюк, Г. П. Казимилова, С. М. Иевлев, Е. В. Чорный

Системи та прилади для контролю радіаційної безпеки АЕС

Подано результати серії виконаних за останні 10 років НВП «Атомкомплексприлад» спільно з провідними інститутами НАН України науково-методичних досліджень та науково-технічних розробок, що створили підґрунтя для створення науково-виробничої бази щодо впровадження в Україні та експорту в інші країни сучасних інтелектуальних та високонадійних програмно-апаратурних комплексів та систем, які забезпечують контроль радіоактивності в довкіллі та технологічний радіаційний контроль на АЕС. Розглянуто перспективи розвитку вітчизняного ядерно-фізичного приладобудування.

Ключові слова: радіаційна безпека АЕС, ядерно-фізичне приладобудування, спектрометрія, контроль радіонуклідів в об'єктах навколишнього середовища.

© А. С. Казимиров, Л. М. Мартынюк, Г. Ф. Казимилова, С. М. Иевлев, Е. В. Чорный, 2010

НПП «Атомкомплексприбор» (НПП «АКП») разработал и последовательно внедряет целостный подход к радиационному контролю АЭС [1]. Технически этот подход реализуется с помощью спектрометрии гамма- и других излучений в радиационном контроле АЭС — целостности защитных барьеров; контроля изотопного состава технологических сред; характеристики радиоактивных отходов; нуклидного состава и уровней загрязнения выбросов и сбросов, а также в контроле радиационного загрязнения объектов внешней среды и человека как главного объекта радиационной защиты.

Из основного направления деятельности, связанного со спектрометрией излучений, сформировалось направление, связанное с контролем выполнения требований нормативных документов в области радиационной безопасности. Оно состоит в реализации этих требований программными средствами, входящими в состав поставляемых технических средств. Хорошим примером такого подхода является созданная и внедренная автоматизированная система радиационного контроля Хмельницкой АЭС. Сходная философия внедрения нормативных требований используется и в создаваемом устройстве контроля глубины выгорания отработавшего ядерного топлива.

В данной работе изложены результаты выполненных разработок и на основе приведенного материала делаются выводы о стратегических направлениях дальнейшего развития ядерного приборостроения.

Спектрометрия гамма-излучения в контроле безопасности энергоблоков

Контроль целостности защитных барьеров. Спектрометрический комплекс «СТПК-01» предназначен для обеспечения дискретно-непрерывного оперативного контроля удельной активности радионуклидов йода (^{131}I — ^{135}I) в широком диапазоне значений в теплоносителе первого контура ядерного реактора ВВЭР-1000, а также периодического контроля удельной активности ряда реперных радионуклидов с помощью гамма-спектрометрии высокого разрешения.

Программное обеспечение комплекса позволяет определять радиоактивные благородные газы (РБГ) и внедрять методы контроля герметичности оболочек ТВЭЛОВ, основанные на измерении активности РБГ.

Нашей организацией совместно с Запорожской АЭС проведено сравнение результатов измерений объемной активности теплоносителя, выполненных СТПК-01 и лабораторным методом за несколько месяцев. При этом установлено, что минимально-детектируемые активности при определении реперных изотопов приблизительно равны, а результаты измерений, в основном, различаются в пределах погрешностей измерений.

Программно-технический комплекс «Азот-16-ПГ» определения протечек в парогенераторах (ПГ) предназначен для непрерывного контроля за величиной протечки теплоносителя из первого контура во второй методом регистрации гамма-излучения изотопа ^{16}N в остром пару.

Комплекс обеспечивает: непрерывный контроль активности ^{16}N в остром пару; определение величины протечек в ПГ (кг/ч); идентификацию ПГ, с течью; сигнализацию об отклонении контролируемых параметров от допустимых уровней. Программное обеспечение имеет алгоритм расчета величины протечек теплоносителя первого контура в воду ПГ для АЭС с реактором ВВЭР-1000 по активности ^{16}N .

Комплекс может функционировать как независимо от других систем радиационного контроля (СРК), так и в их составе. В нем используется блок детектирования с оригинальной системой термостабилизации (точность стабилизации $\pm 2^\circ\text{C}$), способной поддерживать внутри блока стабильную температуру в диапазоне от 25 до 30 $^\circ\text{C}$.

Результаты контроля выводятся на щит РК. Предусмотрены изменение периодичности контроля протечек в зависимости от их величины (с 1 ч. до 200 с.) и сигнализация об превышении эксплуатационных пределов безопасности, что позволяет персоналу оперативно принимать решения.

Комплекс введен в промышленную эксплуатацию на Хмельницкой АЭС. Введению в промышленную эксплуатацию предшествовали детальные испытания, включавшие опытно-промышленную эксплуатацию на Хмельницкой и дополнительные испытания на Ровенской АЭС. Выполнение дополнительных испытаний было инициировано НАЭК «Энергоатом» в связи с тем, что на Хмельницкой АЭС не наблюдались протечки парогенератора, определяемые лабораторным методом.

В результате проведения испытаний на реальных протечках установлено, что погрешность определения находится в пределах 36% (для $P = 0,95$), что соответствует требованиям ТУ. Данные, полученные ПТК, имеют существенно меньший разброс значений и показывают более плавное изменение измеряемой величины протечки, что обусловлено непрерывностью измерений. Доверительные интервалы лабораторного контроля протечек перекрываются для всех значений протечек, полученных с использованием ИК ПТК. На рис. 1 показана сходимость значений протечки, полученных лабораторным методом ($G_{\text{ПГ}}$) и с помощью «Азот-16-ПГ» (GN).

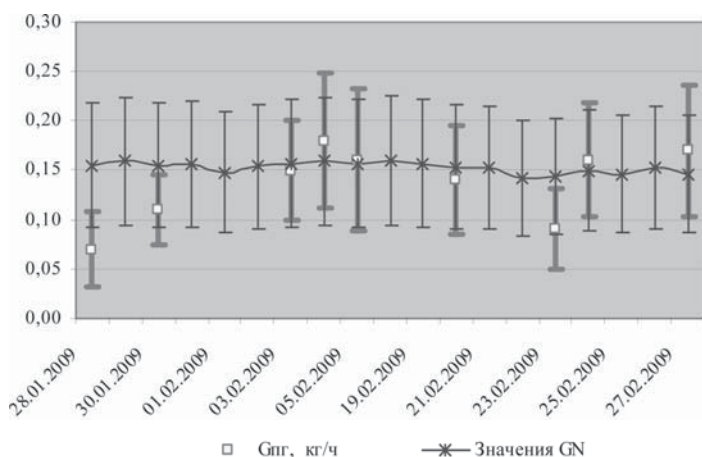


Рис. 1. Сходимость значений протечки, полученных лабораторным методом ($G_{\text{ПГ}}$) и с помощью «Азот-16-ПГ» (GN)

В настоящее время нашими специалистами прорабатывается возможность проведения контроля протечек ПГ на переходных режимах реакторной установки.

Спектрометрический контроль изотопного состава технологических сред

Устройство УДЖГ-А06Р предназначено для измерения суммарной объемной активности гамма-излучающих нуклидов в жидкости технологических контуров АЭС по их

гамма-излучению. Применяется в составе измерительного канала аппаратуры контроля радиационной безопасности на АЭС. Возможны различные модификации устройств детектирования типа УДЖГ для разных диапазонов измерения объемной активности жидкости.

Характеризация радиоактивных отходов

Передвижная установка СЕГ-001м «АКП-С»-ТРО предназначена для определения активности радионуклидов: в несортированных ТРО в первичной упаковке (мешках) в местах образования РАО; несортированных ТРО, помещенных в металлические емкости различных форм и размеров в местах сбора; в ТРО 1- и 2-й групп в контейнерах перед отправкой в хранилища.

Установка определяет изотопный состав гамма-излучающих радионуклидов, активность которых превышает $1\pm 2\%$ суммарной активности измеряемых ТРО.

Оригинальный методический подход к измерениям РАО и алгоритмы обработки, которые заложены в программном обеспечении, позволяют определять активность и изотопный состав РАО, в том числе и несортированных ТРО в упаковках и контейнерах любой формы без проведения пробоотбора. Калибровка выполняется по авторскому методу, реализованному в программном обеспечении. Установка оснащена системой ультразвукового дальномера с лазерным «прицеливанием», дозиметром.

Контроль загрязнения объектов внешней среды

Производство НПП «АКП» обеспечивает решение всего спектра задач по контролю радионуклидов в объектах окружающей среды, сельскохозяйственной продукции, продуктах питания, строительных материалах, металлоломе и т. д.

Серия спектрометров энергии гамма-излучения СЕГ-001 «АКП-С» с блоками детектирования NaI(Tl):

СЕГ-001 «АКП-С»-63. Размер блока детектирования (БД) 63×63 мм. Один из наиболее популярных спектрометров из числа выпускаемых предприятием, особенно при использовании в комбинированном варианте с бета-спектрометром.

СЕГ-001 «АКП-С»-150. Размер БД 150×100 мм. Пассивная низкофоновая защита детектора (свинец толщиной 100 мм) обеспечивает низкий собственный фон установки.

СЕГ-001м «АКП-С». Предназначен для определения качественного и количественного состава гамма-излучающих радионуклидов в полевых и лабораторных условиях, поиска радиоактивных источников и аномалий, гамма-съемки местности, каротажа скважин. Может использоваться в жестких внешних условиях — при аварийной ситуации; оснащается переносной треногой с регулируемой высотой установки детектора над поверхностью грунта.

СЕГ-001nc «АКП-С». Предназначен для гамма-спектрометрии в сухих и заполненных водой скважинах. Глубина погружения блока детектирования до 50 м, при комплектации специальным блоком детектирования сохраняет спектрометрические характеристики в полях до 1 Р/ч; может комплектоваться несколькими блоками детектирования с различными характеристиками; возможно подключение существующих геофизических датчиков.

Прибор радиометрический спектрометрический (ПРС). Предназначен для обнаружения, локализация и идентификации делящихся и радиоактивных материалов (ДРМ) по их гамма-излучению; определения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения, предположительного изотопного состава ДРМ и вида радионуклида; измерения спектров гамма-излучения. ПРС имеет два основных режима работы — «ПОИСК» и «ИДЕНТИФИКАЦИЯ» для использования в лабораториях радиологического контроля на АЭС и других радиологических службах контроля. Основные характеристики: мощность дозы — 1,5 имп/нЗв/ч; энергетический диапазон регистрации рентгеновского и гамма-излучения — от 0,04 до 3,0 МэВ; порог срабатывания устанавливается автоматически, с учетом рекомендаций МАГАТЭ [2].

Серия спектрометров энергии бета-излучения СЕБ-01, в которых используются блоки детектирования на основе полистирола с добавкой терфинила:

СЕБ-01-70. Допускает использование методов концентрирования (пробоподготовку), что существенно повышает чувствительность измерений; возможность раздельного определения ^{90}Sr и ^{90}Y , что позволяет проводить измерения счетных образцов сразу после радиохимического выделения ^{90}Sr ; экспресс-контроль счетных образцов на не превышение допустимых уровней.

СЕБ-01-150. Позволяет контролировать одновременно концентрацию ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{40}K в измеряемом образце без использования методов концентрирования проб. Используется для контроля содержания ^{90}Sr в дебаланных водах Южно-Украинской АЭС.

Комбинированные спектрометры энергии бета-гамма излучений СЕ-БГ-01-«АКП» модификаций СЕ-БГ-01 «АКП»-70-63; СЕ-БГ-01 «АКП»-150-63; СЕ-БГ-01 «АКП»-150-150 предназначены для определения качественного и количественного состава радионуклидов в пробах и применяются для определения удельной активности широкого набора радионуклидов (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K и др.). Используются для комплексного решения всех основных задач радиационного контроля согласно действующим нормативным документам.

Полупроводниковые спектрометры:

СЕТ-002 «АКП-П». Выполнен на основе детектора из особо чистого германия, предназначен для идентификации радионуклидов в сложной смеси изотопов в счетном образце, определения их удельной активности или относительного содержания по спектру внешнего гамма-излучения.

СЭА-13 «АКП». Предназначен для измерения активности альфа-излучающих радионуклидов кремниевыми детекторами в счетных образцах различных объектов после их химической подготовки по соответствующим методикам.

Контроль радиационного загрязнения человека

Спектрометры излучения человека серии «СИЧ-АКП»: «СИЧ-АКП»-1, «СИЧ-АКП»-2; «СИЧ-АКП»-3. Предназначены для определения содержания гамма-излучающих радионуклидов в теле человека и расчета ингаляционной составляющей внутреннего облучения человека. Применяются как средство индивидуального контроля персонала на АЭС и для мониторинга. Выпускаются различной модификации, в зависимости от потребностей Заказчика. Позволяют регистрировать ^{131}I , ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{60}Co , ^{54}Mn и другие радионуклиды, определять содержание

гамма-излучающих радионуклидов как во всем теле человека, так и в отдельных органах.

Программное обеспечение поддерживает большое количество форм протоколов; представляет возможность создания отчетов по формам Заказчика; информационная система управления базами данных позволяет рассчитывать годовое поступление радионуклидов и дозовые нагрузки по трем моделям; применение многодетекторной системы уменьшает зависимость регистрации излучения от перераспределения радионуклидов в теле пациента и обеспечивает заданное значение минимально детектируемой активности.

Автоматизированная система учета доз персонала Хмельницкой АЭС (АС УДКПП). Система является логически завершенным комплексом аппаратных и программных средств, реализующих требования нормативных документов на уровне организации и проведения рутинного радиационного контроля персонала АЭС, и обеспечивает:

учет доз внешнего облучения персонала, контроль не превышения установленных уровней;

учет величин внутреннего содержания радиоактивных веществ (РВ) в организме, оценку доз облучения от него;

учет и контроль посещения персоналом зоны строгого режима (ЗСР), перемещения внутри ЗСР;

анализ и оптимизацию дозовых нагрузок в соответствии с принципом ALARA;

передачу данных в локальную вычислительную сеть (ЛВС) Хмельницкой АЭС.

Информационная структура системы обеспечивает: централизованное хранение данных для накопления и ретроспективного анализа имеющейся информации за весь период эксплуатации АС УДКПП;

работу автоматизированного рабочего места (АРМ), в том числе подсистемы хранения данных, достаточных для обеспечения текущего контроля;

сетевое взаимодействие компонентов системы и внешних источников/потребителей информации.

Технически АС УДКПП представляет собой информационно-вычислительную систему, состоящую из четырех уровней, на которых происходят:

накопление информации по всему спектру хранимых данных за весь период эксплуатации АС УДКПП; дублирование хранимой информации на сменные носители данных; выдача данных в ЛВС Хмельницкой АЭС в соответствии с утвержденным перечнем;

ввод и обработка данных операторами подсистем АС УДКПП, получение отчетов;

считывание информации с технических средств четвертого уровня, физическое ограничение доступа персонала в ЗСР;

накопление первичной информации о дозовых нагрузках.

Внедрение данной системы позволило, с одной стороны, ужесточить дозиметрический контроль и обеспечить безусловное выполнение требований действующих документов, с другой — облегчить работу персонала служб АЭС, сняв с них часть рутинных задач по ведению дозиметрического контроля и обеспечив полную интеграцию данных, необходимых для ведения индивидуального дозиметрического контроля (результатов ИДК, измерений СИЧ, данных медицинских обследований и т. д.). Наличие такого мощного информационного инструмента позволяет проводить разумное планирование работ, реально внедрять принцип ALARA в практику АЭС.

Контроль глубины выгорания отработавшего ядерного топлива

Использование глубины выгорания ядерного топлива в качестве параметра ядерной безопасности позволяет одновременно повысить безопасность обращения с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) и получить реальную экономическую выгоду. Для ОЯТ реакторов ВВЭР-1000 наиболее рационально использовать нейтронный метод определения глубины выгорания. В настоящее время для его реализации на Запорожской АЭС используется аппаратура, предоставленная МАГАТЭ. Ее использование является временной мерой. Для нормальной эксплуатации АЭС необходима штатная аппаратура, соответствующая нормативным требованиям, введенная в промышленную эксплуатацию в установленном порядке.

В настоящее время на стадии разработки находятся конструкторская документация и программное обеспечение передвижной установки для контроля глубины выгорания, создаваемой совместно НПП «АКП» и Институтом проблем безопасности АЭС НАН Украины. Макетный образец устройства прошел успешные испытания на Запорожской АЭС, подтвердившие правильность выбранных технических решений по выполнению измерений.

Разработан сценарий работы установки. Результатом выполнения измерений должны быть проект решения о допустимости загрузки сборки в контейнер и заполненный в соответствии с установленным на Запорожской АЭС порядком протокол загрузки контейнера для сухого хранилища.

Выводы

Накопленный опыт создания систем и комплексов радиационного контроля показывает, что основным путем является все большее комплексирование систем радиационного контроля. Логика развития такова, что персоналу АЭС необходима информация в законченном виде, готовая для обоснования принятия решений.

Нами уже выполнены первые работы в этом направлении. Примером может быть автоматизированная система ИДК, созданная для Хмельницкой АЭС. Эта система интегрирует показания разнотипных дозиметрических,

спектрометрических приборов и другую разнообразную информацию и представляет готовый инструмент принятия управленческих решений. Данная система может быть примером реагирования на существующее состояние радиационной обстановки.

На наш взгляд, на очереди создание систем предупреждения потенциальных отклонений, основывающаяся на системной информации о состоянии барьеров безопасности. Представленные разработки могут являться элементами такой перспективной системы, а уже опробованные подходы могут быть использованы для интегрирования процессов выполнения измерений в систему принятия решений персоналом АЭС.

Перспективы дальнейшего развития ядерного приборостроения мы видим в максимальном удовлетворении потребностей заказчиков. Современное развитие средств вычислительной техники позволяет создавать системы, которые могут решать некоторые задачи в законченном виде.

Мы считаем, что именно такие системы, сочетающие в себе современные аппаратные средства с инструментами накопления и анализа информации будут востребованы конечными пользователями. Комплексирование таких интеллектуальных систем с системами управления знаниями позволит выйти на новый уровень технического обеспечения радиационной безопасности.

Список литературы

1. *Казимиров А. С.* Системный подход к контролю радиационной безопасности на АЭС / А. С. Казимиров, Г. Ф. Казимилова, С. М. Иевлев и др. // Сб. трудов 6-й междунар. науч.-техн. конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» / Концерн «РосЭнергоАтом», ОАО «Электрогорский науч.-исслед. центр по безопасности атомных электростанций». — М., 2008. — С. 403–406.
2. *IAEA-TECDOC-1312/R.* Обнаружение радиоактивных материалов на границе.

Надійшла до редакції 11.06.2010.