

не позначається на загальному рівні вібрації – параметрі, що аналізується при моніторингу стану технічного обладнання.

Список використаних джерел

1. Лоскутов А. Ю. Введение в синергетику / А. Ю. Лоскутов, А. С. Михайлов. – М.: Наука, 1990. – 305 с.
2. Шустер Г. Детерминированный хаос / Г. Шустер. – М.: Мир, 1990. – 312 с.
3. Шустер Г. Детерминированный хаос: Введение Пер. с англ. / Г. Шустер. – М.: Мир, 1988. – 367 с.

4. Кузев И. Р. Новый подход к первичному анализу вибрационных сигналов роторных агрегатов с применением теории детерминированного хаоса / И. Р. Кузев, Д. С. Солодовников // Материалы второго научно-технического семинара «Обеспечение промышленной безопасности производственных объектов топливно-энергетического комплекса», Уфа: Изд-во УГНТУ, 1999. – 238 с.

5. Малинецкий Г. Г. Современные проблемы нелинейной динамики. / Г. Г. Малинецкий, А. Б. Потапов. – М.: Эдиториал УРСС, 2000. – 336 с.

Надійшла до редакції 15.05.2014

В. Ю. Кучерук, д.т.н., О. В. Грабовский, к.т.н., М. С. Павловская

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРИИ ДЕТЕРМИНИРОВАННОГО ХАОСА ПРИ ОБРАБОТКЕ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

В статье проиллюстрировано элементы теории детерминированного хаоса, используя которые, возможно добиться повышения достоверности определения информационных параметров виброакустического сигнала.

Ключевые слова: аттрактор, вибродиагностика, процедура вложения, уровень вибрации, теория детерминированного хаоса, теория самоорганизации (синергетика), фазовая траектория.

V. Kucheruk, DSc., O. Grabovsky, PhD., M. Pavlovskaya

USE DETERMINISTIC CHAOS THEORY VIBROAKUSTIC SIGNAL PROCESSING

The paper illustrates the elements of the theory of deterministic chaos by which we can achieve improve the reliability of determining the parameters of signal information.

Keywords: attractor, vibration, embedding procedure, the level of vibration theory of deterministic chaos theory of self-organization (synergetics) phase trajectory.

УДК 531:535

О. В. Банзак, к.т.н., И. С. Захариев, Н. С. Даниленко

Одесская государственная академия технического регулирования и качества, г. Одесса

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ РАДИАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

В статье рассмотрены основные методы разработки программно-технических комплексов радиационно-технологического контроля состояния физических барьеров безопасности на основе единого подхода в составе систем радиационного контроля АЭС. Определено, что для нормального функционирования блока детектирования и амплитудного анализатора система должна включать устройство питания и управления, обеспечивающее подачу на указанные устройства требуемых напряжений питания и синхронизации их работы. В соответствии со сформулированными требованиями к системе построена ее структурная схема.

Ключевые слова: радиационно-технологический контроль, барьер безопасности, спектры гамма-излучения.

Вступлення. Процедура закрытия Чернобыльской АЭС вновь высветила первоочередную важность определения параметров ядерного топлива (ЯТ), выгружаемого из активной зоны (АЗ) реактора. Это, в первую очередь, выгорание (эквивалентный термин - глубина выгорания), изотопный состав ядерных материалов и продуктов деления, данные о состоянии оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) и др. При этом следует отметить, что всесторонний анализ указанных параметров важен на всех этапах жизненного цикла ЯТ на АЭС и станции в целом в независимости от типа реакторной установки. Знание глубины выгорания и изотопного состава необходимы при определении стратегии переработки или захоронения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), а без данных о состоянии оболочки ТВЭЛ просто невозможна дальнейшая эксплуатация тепловыделяющей сборки (ТВС). Сейчас не все из перечисленных параметров определяются путем измерений непосредственно на АЭС или определяются расчетными и качественными методами, что противоречит нормативным требованиям по ядерной безопасности.

Особенность перегрузки эксплуатирующихся реакторов ВВЭР состоит в том, что перегрузка осуществляется при полной остановке реактора и снятии его крышки. Такая процедура перегрузки, с точки зрения увеличения коэффициента использования установленной мощности, требует особого подхода к проведению измерений параметров ЯТ.

Анализ влияния методов контроля герметичности оболочки (КГО) ТВЭЛ на экономичность и безопасность эксплуатации АЭС показал, что для станций с ВВЭР наиболее перспективным является совмещение процедуры проведения КГО с перегрузкой АЗ реактора [1]. Отмечалось, что могут быть реализованы методы КГО, основанные на анализе акустического спектра истекающих через микротрещину продуктов деления из отработавшей ТВС в бассейн перегрузки [2]. С другой стороны, контроль изотопного состава ОЯТ необходим при отгрузке ТВС на длительное хранение в сухое хранилище [3].

Учитывая изложенное, можно сделать вывод о необходимости создания системы экспрессного анализа распределения продуктов деления ядерного топлива. Такая система должна использовать методы неразрушающего контроля и хорошо сочетаться с существующей технологией проведения транспортно-технологических операций (ТТО).

Этим методам посвящено большое количество работ [4-7], но в них, как правило, не отра-

жается, что в эксплуатации используется ЯТ с разным начальным обогащением, а также новые перспективные виды топлива. Кроме того, эти методы не вписываются в существующую технологию ТТО и не пригодны для экспресс-анализа.

Разработка программно-технических комплексов радиационно-технологического контроля (ПТК РТК) состояния физических барьеров безопасности на основе единого подхода в составе систем радиационного контроля АЭС является важной и актуальной задачей. Однако в настоящее время отсутствует единый подход к реализации на АЭС комплекса взаимосвязанных принципов и методов радиационно-технологического контроля состояния физических барьеров безопасности при работе реакторной установки в нормальных режимах эксплуатации. Очевидно, что для реализации новых принципов РТК нужны новые блоки детектирования, с более высокими метрологическими и эксплуатационными показателями. Существенный прорыв в направлении улучшения метрологических и эксплуатационных характеристик детекторов может быть получен только на основе применения новых материалов, в частности, широкозонных полупроводников, таких как CdZnTe.

Основная часть. В качестве основного принципа построения ПТК РТК физических барьеров безопасности выбрано измерение спектров собственного гамма-излучения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), других технологических сред.

Такой выбор обусловлен существенно большей информативностью измерений гамма-излучения. Например, методология, основанная на измерениях спектров собственного гамма-излучения отработавшей ТВС, позволяет определить выгорание, время выдержки и начальное обогащение контролируемой ОТВС без использования дополнительной информации. Данные, получаемые при измерении суммарной скорости счета нейтронов, не позволяют оценить выгорание ОЯТ без использования дополнительной информации о времени выдержки и начальном обогащении [1].

Поскольку внедрение новых ПТК РТК не должно приводить к снижению эффективности эксплуатации блока, операции по контролю состояния защитных барьеров должны быть согласованы с технологией производства электроэнергии и ремонта оборудования, с временным графиком процесса перегрузки ЯТ. Поэтому основным критерием при построении структуры ПТК РТК должна быть выбрана ее работоспособность в режиме реального времени. За время

выполнения технологической операции, время характерное для изменения какого-либо параметра в процессе работы на мощности ПТК РТК должен обеспечить измерение собственного гамма-излучения ОТВС, других технологических сред, провести амплитудный анализ импульсов счета, осуществить обработку спектра собственного гамма-излучения, рассчитать характеристики состояния защитного барьера и занести их в базу данных. Работу ПТК РТК в таком режиме будем называть далее работой в режиме реального времени. При этом соблюдается основной принцип построения систем реального времени - темп поступления входных данных в систему (характеристик собственного гамма-излучения топливной сборки, теплоносителя и оборудования первого контура, газов в гермоболочке) должен соответствовать темпу формирования выходных данных системы (характеристик состояния ОЯТ) [2].

Основные требования к ПТК РТК в реальном времени на основании сформулированного критерия реального времени можно разделить на следующие группы [2, 3]:

- качество измерений. Измерения должны обеспечить получение такого объема информации, при котором дополнительные временные затраты для определения всех контролируемых параметров будут минимальны;

- массогабаритные требования. Механическая конструкция основных элементов системы должна обеспечить хорошую совместимость с существующим технологическим оборудованием, элементами РУ машины перегрузочной при обеспечении выполнения требований безопасности при проведении перегрузки ЯТ, не вносить ограничений на проведение ТТО с ОЯТ;

- условия эксплуатации. Конструкция основных элементов ПТК РТК системы должна обеспечить выполнение измерений излучения в реальных условиях эксплуатации энергоблока АЭС. При этом должен обеспечиваться дифференциальный подход, при котором реализуется учет реальных условий эксплуатации каждого элемента системы;

- надежность. Так как неверное функционирование системы (ложное срабатывание системы, либо не выявление факта нарушения состояния защитных барьеров) может привести к существенным экономическим потерям (снижение мощности блока, дополнительные затраты времени на ремонт оборудования), потеря времени ввиду неработоспособности системы должна быть минимальной. Надежность системы должна соответствовать надежности оборудования систем важных для безопасности;

- удобство обслуживания и эксплуатации.

Эта группа требований непосредственно связана с обеспечением надежности системы и обеспечением эффективности системы на всех этапах ее жизненного цикла.

Кроме того, на основании приведенных требований можно сделать вывод, что с точки зрения совмещения технологических операций контроля состояния ОЯТ и его перегрузки наиболее целесообразным представляется размещение детекторов на рабочей штанге перегрузочной машины [2]. При этом детекторы размещаются в специально разработанном конструктиве, закрепляемом на наружной секции рабочей штанги (РШ), который схематически показан на рис. 1. Ограничения на размер конструктива (соответственно и на размеры детекторов) накладываются зоной обслуживания ПМ и размерами наружной секции РШ и они равняются - наружный диаметр 465 мм и внутренний диаметр 405 мм. Указанные размеры получены на основании конструкторской документации на перегрузочную машину [2]. Установленный на рабочей штанге конструктив позволяет совместить функции защиты и коллиматора и состоит из следующих компонентов:

- нижнего основания из нержавеющей стали толщиной 25-30 мм с профилированным вырезом;

- сегментированные пластины из вольфрама с установленными (вмонтированными) в них полупроводниковыми CdZnTe-детекторами и герметичными разъемами;

- верхнего основания из нержавеющей стали толщиной 15-20 мм с профилированным вырезом;

- бандажных соединений (болты из нержавеющей стали длиной 350-400 мм).

Предлагаемый конструктив также обеспечивает однозначное и четко воспроизводимое позиционирование детекторов относительно контролируемой ТВС для всех серий регистрации гамма-излучения. Конструктив позволяет разместить несколько детекторов на расстоянии 22,5 см от оси контролируемой ТВС.

Возможны другие варианты изготовления предлагаемого конструктива, которые будут отражены в комплекте конструкторской документации на систему. При этом условия взаимного расположения детекторов и ТВС принципиально изменяться не будут [4].

Основным элементом системы, регистрирующим гамма-излучение, является набор детекторов гамма-излучения.

Детектор является определяющим элементом при построении системы в целом, так как он обуславливает выполнение таких требований как качество измерений, массогабаритные пара-

метры. Одной очень важной особенностью всех CdZnTe-детекторов, обусловленной различием в подвижности носителей заряда, является форма импульса, а именно - короткий фронт. Фронт импульса на выходе CdZnTe-детектора существенно короче, чем фронт импульса полупроводникового детектора на основе германия, и тем более, чем фронт импульса на выходе сцинтилляционного детектора.

Эта особенность предопределяет особые требования к многоканальному амплитудному анализатору (МАИ) как на уровне встроенных в анализатор аналоговых входных цепей, так и на уровне производительности АЦП. Для использования в составе системы контроля выгорания ОЯТ необходимо использовать МАИ, в которых производителем предусмотрена работа с CdZnTe-детекторами, реализована работа с постоянной времени формирования входных цепей 1 мкс или 0,5 мкс, а собственная частота АЦП не менее 80 МГц. Использование МАИ ориентированных на обработку импульсов других детекторов, как минимум, требует использования специальных спектрометрических усилителей-формирователей сигнала. Очевидно, что увели-

чение количества применяемых узлов и модулей при создании системы отрицательно отражается на выполнении таких требований как надежность, массогабаритные параметры, удобство обслуживания и эксплуатации.

В настоящее время уже начали серийно производиться МАИ, поддерживающие работу CdZnTe-детекторов. При этом большая часть анализаторов изготавливается в носимом исполнении, максимально используя возможности CdZnTe-детекторов для полевых измерений. Так как в большинстве такие анализаторы разработаны в последние годы, в них реализованы самые в передовые схемотехнические решения, и они существенно превосходят анализаторы, построенные по традиционной схеме. Среди носимых анализаторов наибольшее распространение получил МСА-166 производства GBS (Германия). В нем предусмотрено автономное питание от аккумуляторов и связь с ЭВМ при помощи интерфейса RS-232, эксплуатация без ЭВМ не предусматривается. Анализатор МСА-166 был использован при изготовлении макета системы, подтвердив свои высокие параметры.

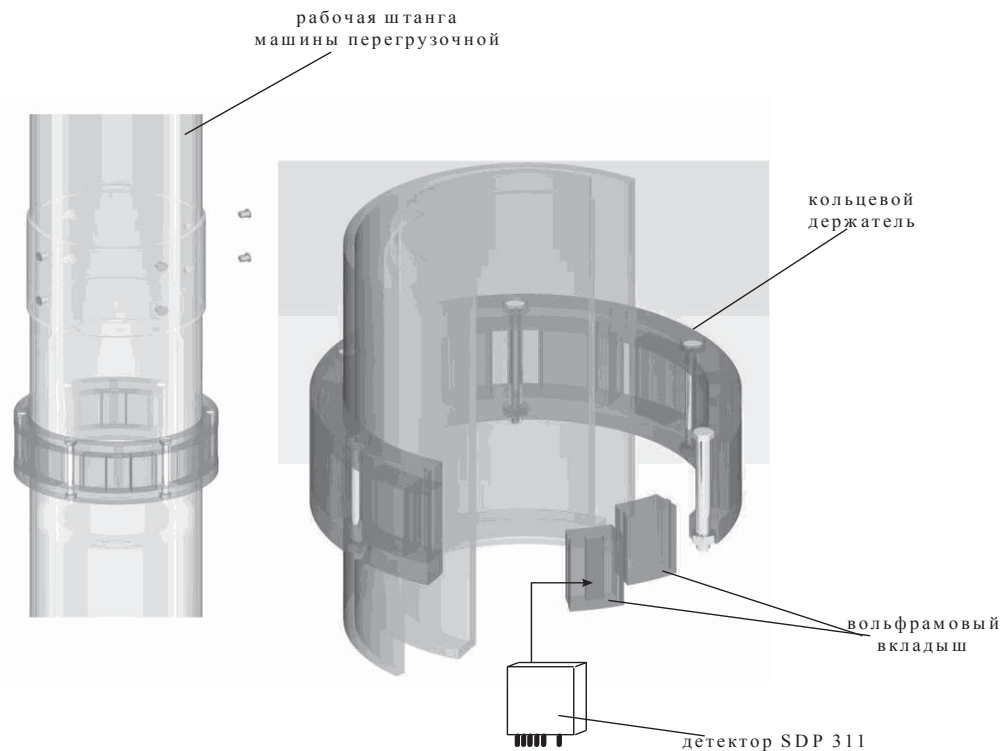


Рисунок 1 - Размещение детекторов на рабочей штанге перегрузочной машины

Однако применение анализатора в носимом исполнении для создания промышленного образца системы является не оптимальным, так как при этом плохо выполняются эксплуатационные требования, требования удобства обслу-

живания и эксплуатации, снижается надежность конструкции при многодетекторных измерениях.

Система из n детекторов, образующая блок детектирования, должна осуществить регистра-

цию собственного гамма-излучения ОЯТ в процессе извлечения топливной кассеты и преобразовать его в электрические сигналы для последующей передачи на амплитудный анализатор.

Многоканальный амплитудный анализатор должен осуществлять функции накопления, обработки и последующей передачи на вычислительную и управляющую ЭВМ информации о распределении импульсов счета от детекторов по амплитудам, т.е. первичного (необработанного) гамма-спектра.

Далее необходимо осуществить: поиск в полученных спектрах пиков полного поглощения; определение площади пиков; определение интенсивности излучения в пике полного поглощения; собственно расчет выгорания ОЯТ

контролируемой ТВС и ведение базы данных. Эти функции возлагаются на управляющую ЭВМ системы определения глубины выгорания. При необходимости управляющий компьютер должен передать требуемые данные о состоянии ядерного топлива в АСУ ТП АЭС в стандартном протоколе.

Для нормального функционирования блока детектирования и амплитудного анализатора система должна включать устройство питания и управления, обеспечивающее подачу на указанные устройства требуемых напряжений питания и синхронизации их работы.

В соответствии со сформулированными требованиями к системе построена ее структурная схема, приведенная на рис. 2.

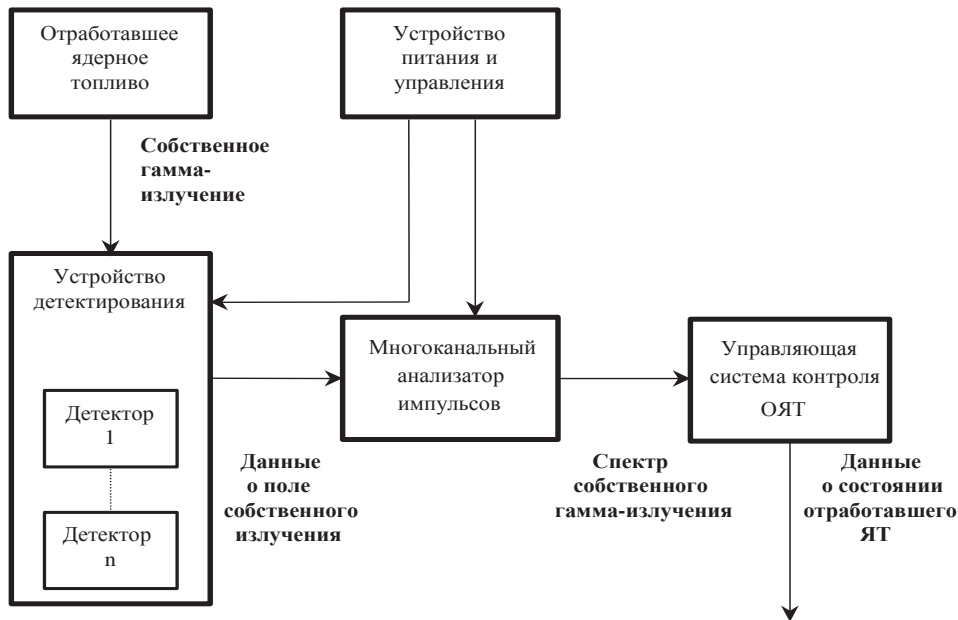


Рисунок 2 - Структурная схема системы контроля состояния отработавшего ядерного топлива в реальном времени

При этом реализуется распределенная архитектура построения системы. Устройство детектирования размещается в непосредственной близости от объекта контроля - ядерного топлива (рис. 1). Многоканальный амплитудный анализатор (анализаторы), устройство питания и управления размещаются в специальном конструктиве на перегрузочной машине в центральном зале реакторного отделения. В помещении системы управления машиной перегрузочной в обстройке реакторного отделения размещается ЭВМ обеспечивающая обработку измерительной информации. Связь между ПМ и помещением пультовой осуществляется при помощи передачи цифровой информации по витой

паре аналогично передаче сигналов датчиков ПМ в СУМП.

При такой компоновке в максимальной степени обеспечивается выполнение всех перечисленных требований. Например, только часть оборудования установленная на ПМ должна отвечать требованиям IP55, и только устройство детектирования требованиям IP68. Основным элементом системы, регистрирующим собственное гамма-излучение ТВС, является набор детекторов гамма-излучения.

Детектор является определяющим элементом при построении системы в целом, так как он обуславливает выполнение таких требований как качество измерений (энергетическое разре-

шение детектора должно позволять проводить идентификацию пиков полного поглощения гамма-излучения ПД). Массогабаритные параметры (диаметр детектора) не должны превышать 10 мм или иметь эквивалентные размеры в другом варианте исполнения. Надежность эксплуатации в реальных условиях на АЭС должна обеспечивать выполнение требований IP68 при размещении блоков детектирования под водой. Энергетическое разрешение детектора должно быть не хуже 9 кэВ при регистрации гамма-излучения с энергией 661,6 кэВ при входной нагрузке 15000 имп./с. Детектор должен обеспечивать сохранение спектрометрических свойств при входной нагрузке до 200000 имп./с, при этом

энергетическое разрешение детектора должно быть не хуже 30 кэВ.

Проведенный анализ опыта разработки макета системы и применения детекторов позволил сделать вывод о том, что система контроля состояния ОЯТ должна базироваться на CdZnTe-детекторах.

Как уже отмечалось, на основе детекторов SDP310/LC/20S был создан и испытан на ЗАЭС макет системы контроля выгорания ОЯТ в реальном времени. Типичные гамма-спектры полученные при различных значениях выгорания, обогашения и времени выдержки приведены на рис. 3-6.

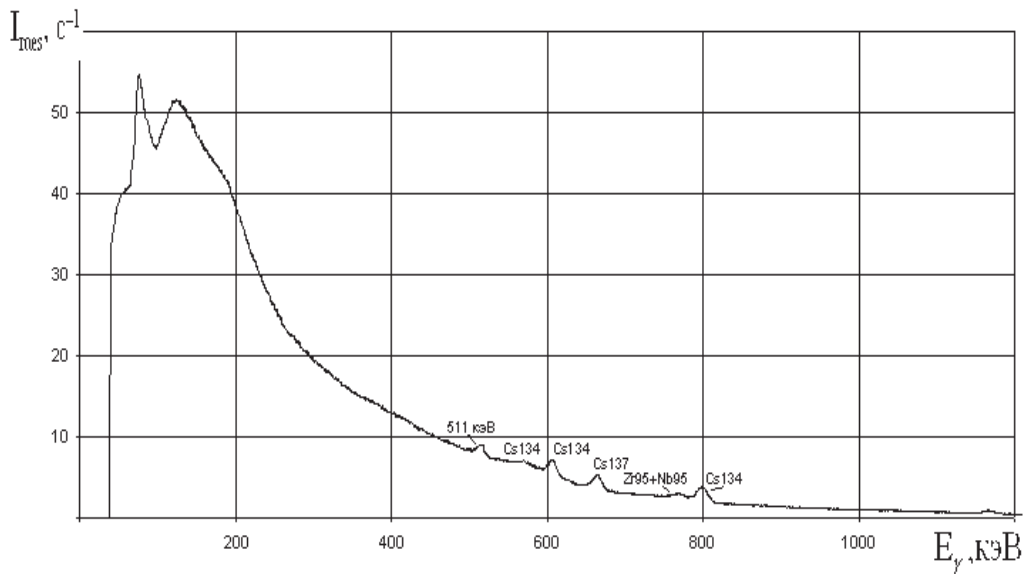


Рисунок 3 - Спектр излучения ОТВС E 2957 с выгоранием 37,23 МВт-сут/кг и выдержкой 11 месяцев

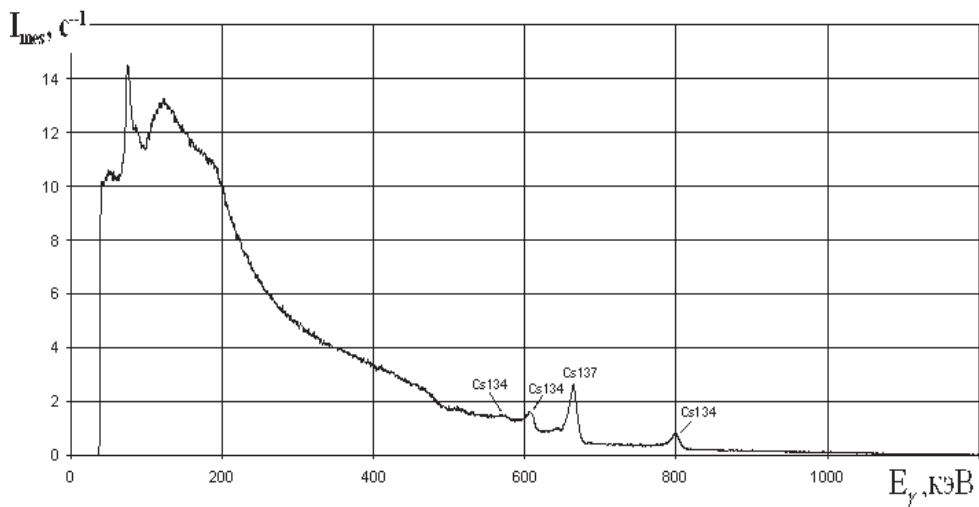


Рисунок 4 - Спектр излучения ОТВС E0906 с выгоранием 43,41 МВт-сут/кг и выдержкой 5,8 лет

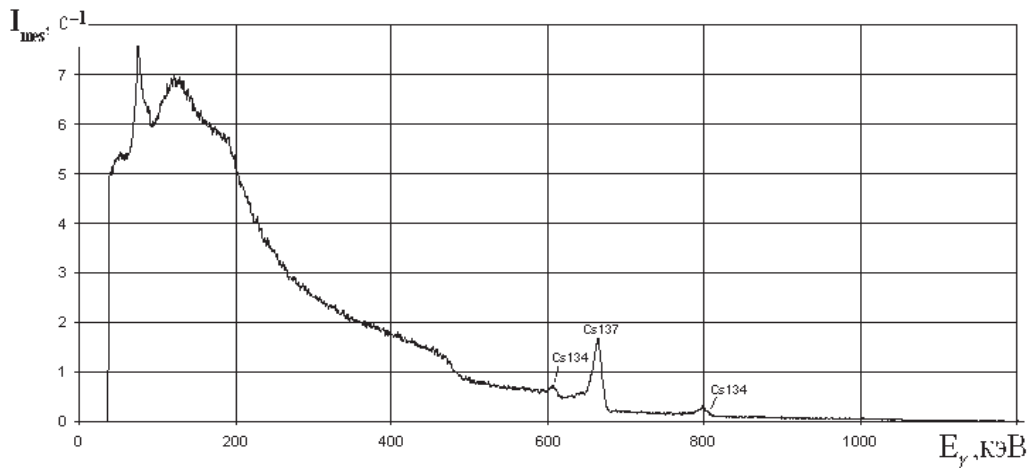


Рисунок 5 - Спектр излучения ОТВС ГВ 2278 с выгоранием 30,58 МВт·сут/кг и выдержкой 8,05 лет

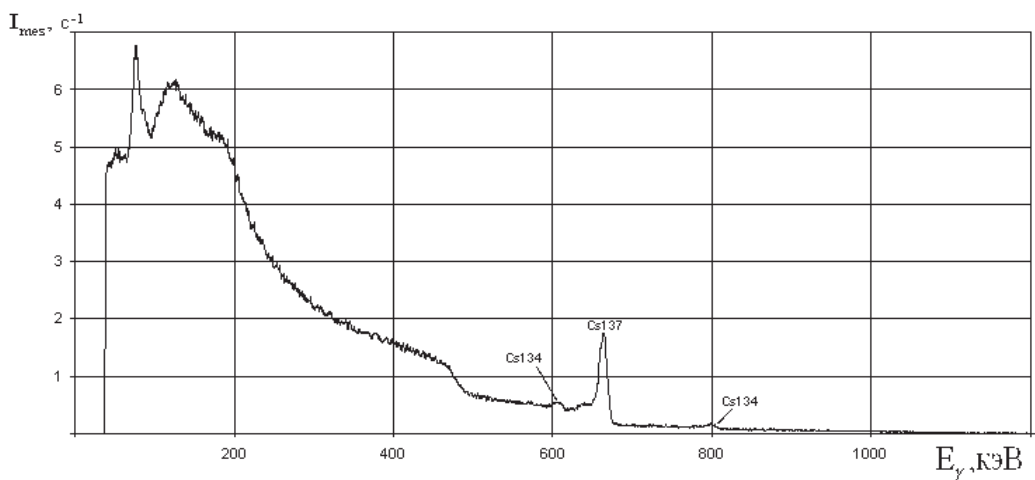


Рисунок 6 - Спектр излучения ОТВС Г 0352 с выгоранием 31,67 МВт·сут/кг и выдержкой 11,15 лет

Вывод

Таким образом, экспериментальные исследования подтвердили выбор детекторов типа SDP310/LC/20S (SDP311/LC/20S) фирмы Ritec.

С точки зрения выбора количества детекторов, необходимых для решения конкретной технико-экономической задачи, связанной с контролем выгорания, представляет интерес ответ на вопрос, какую часть (зону) ТВС контролирует один детектор. Для этого были количественно проанализированы коэффициенты вкладов отдельных твэлов в интенсивность на детекторе. Анализ производился для углов, соответствующих серединам граней ТВС и ее ребрам для различных изотопов ПД.

Таким образом, методы, основанные на измерении спектров собственного гамма-излучения ОЯТ, можно использовать для построения измерительных систем определения выгорания и контроля герметичности оболочек твэлов в процессе извлечения ТВС из активной зоны реактора.

Список использованных источников

1. VVER-1000 SFAT — specification of an industrial prototype; Tiitta A., Dvoyeglazov A. M., Iievlev S. M., Tarvainen M., Nikkinen M. - STUK-YTO-TR 161. – Helsinki 2000. – 41 p.
2. Маслов О. В. Автоматизированная система контроля распределения продуктов деления в ТВС ВВЭР-1000 при проведении перегрузки ядерного топлива / О. В. Маслов, С. Г. Олейник // Вторая рос. междунар. конф. "Учет, контроль и физ. защита ядерн. материалов", Обнинск, 22-26 мая, 2000. – С. 3-7.
3. Олейник С. Г. Метрологическое обеспечение определения выгорания, времени выдержки и обогащения облученного ядерного топлива при проведении измерений в реальном времени / С. Г. Олейник, О. В. Маслов, С. В. Сергеев, М. В. Максимов // Ядерные измерительно-информационные технологии. – 2004. – № 3(11). – С. 72 – 79.

4. Банзак О. В. Полупроводниковые детекторы нового поколения для радиационного контроля и дозиметрии ионизирующих излучений / О. В. Банзак, О. В. Маслов, В. А. Мокрицкий. – Одесса: Изд-во «ВМВ», 2013. – 220 с.: ил.

5. Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials. D. Reilly, N. Ensslin, H. Smith, Jr., and S. Kreiner, eds.; Office of Nuclear Regulatory Research, US Nuclear Regulatory Commission. - Washington, DC, 1991 - NUREG/CR-5550.

6. Nondestructive Assay Methods for Irradiated Nuclear Fuels: Report / Los Alamos National La-

boratory; S.T. Hsue, T.W. Crane, W.L. Talbert Jr., John C. Lee - LA-6923-MS - January 1978.

7. Determination of Curie Content and 134/137Cesium Ratios by Gamma Spectroscopy of High Burnup Plutonium-Aluminum Fuel Assemblies: Report / Pacific Northwest National Laboratory; Haggard, D.L.; Tanner, J.E. - PNNL - 11609 - Jun 1997.

Поступила в редакцію 15.05.2014

Рецензент: д.т.н., проф. Мокрицький В. А., Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса.

О. В. Банзак, к.т.н., І. С. Захарієв, М. С. Даниленко

РОЗРОБКА ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ РАДІАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО КОНТРОЛЮ

У статті розглянуті основні методи розробки програмно-технічних комплексів радіаційно-технологічного контролю стану фізичних бар'єрів безпеки на основі єдиного підходу в складі систем радіаційного контролю АЕС. Визначено, що для нормального функціонування блоку детектування й амплітудного аналізатора система повинна включати пристрій живлення та керування, що забезпечує подачу на зазначені пристрої необхідних напруг живлення та синхронізації їхньої роботи. У відповідності зі сформульованими вимогами до системи побудована її структурна схема.

Ключові слова: радіаційно-технологічний контроль, бар'єр безпеки, спектри гамма-випромінювання.

O. V. Banzak, PhD, I. S. Zahariev, N. S. Danilenko

DEVELOPMENT OF PROGRAM-TECHNICAL COMPLEXES OF THE RADIATING-TECHNOLOGICAL CONTROL

In clause the basic methods of development program-technical complexes of the radio-technical control conditions of physical barriers safety on the basis of the uniform approach in structure of systems radiating control of the atomic power station are considered. It is certain that for normal functioning the block of detecting and the peak analyzer the system should include the device of a feed and the management, providing submission on the specified devices of demanded pressure of a feed and synchronization of their work. In conformity with the formulated requirements to system its block diagram is constructed.

Keywords: radiating-technological control, barrier of safety, spectra scale-radiation.