УДК 531:535

О. В. Банзак, д.т.н., доц., **Г. В. Банзак**, к.т.н., доц.

Одесская государственная академия технического регулирования и качества, г. Одесса

ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС РАДИАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ОБЪЕКТОВ АЭС НА ОСНОВЕ CdZnTe-ДЕТЕКТОРОВ

В статье впервые разработаны программно-технические комплексы радиационно-технологического контроля (ПТК РТК) состояния защитных барьеров. Они основаны на измерении спектров собственного гамма-излучения технологических сред АЭС в режиме реального времени. Один из комплексов предназначен для контроля протечек парогенератора по активности ^{16}N для каждой петли теплоносителя. В состав комплекса входят несколько CdZnTe-детекторов, что позволило увеличить надежность всей системы и ее чувствительность. Предложена концепция построения комплекса и состав технических средств.

Ключевые слова: *радиационно-технологический контроль, дозиметрия, блок детектирования, ионизирующие излучения*

Вступление. Ключевая проблема ядерной энергетики – радиационная безопасность – решается путем обеспечения надежности защитных барьеров объектов технологического процесса функционирования АЭС: твэлов, тепловыделяющих сборок (ТВС), контуров передачи теплоносителя и др.

Методы томографического анализа объектов различной физической природы, т.е. восстановления физической структуры объекта по физическим полям, измеренным вне объекта, как правило, на замкнутой поверхности, зародились в 70-х годах 20 в. в связи с построением рентгеновских томографических изображений [1]. В 80 гг. томографические методы широко применялись уже в промышленности для дефектоскопии [2]. В большинстве разработанных к настоящему времени методов, как правило, используется активная томография, предполагающая наличие источника излучения, проходящего через обследуемый объект, и приемника (или группы приемников), регистрирующего прошедшее через объект излучение. Для анализа состояния ядерного топлива (ЯТ), в частности, тепловыделяющих сборок, целесообразно использовать пассивную эмиссионную томографию, основанную на регистрации собственного гамма-излучения продуктов деления (ПД) ЯТ с последующим определением их активности внутри исследуемой ТВС.

Собственно задачам пассивной эмиссионной томографии ЯТ посвящено довольно ограниченное количество работ. Все они выполнены в Uppsala University (Department of Radiation Sciences, Uppsala, Sweden). В частности, в наиболее обстоятельной пионерской работе, как и в последующих работах шведских исследователей, ставилась задача обосновать теоретически пассивную эмиссионную томографию ТВС реактора BWR производства ABB Atom, Sweden квадратной формы, содержащего 8x8 = 64 круглых твэла [3, 4]. Целью этих работ являлось установление отсутствия в ТВС одного или более твэлов, поскольку задача томографии ЯТ решалась в рамках программы по обеспечению нераспространения ядерных материалов.

Предлагаемые авторами [5] способ и устройство дают возможность применения одновременного контроля активности водной и газовой проб, а также увеличения эффективности процесса отбора, позволяют идентифицировать твэлы с дефектами типа «контакт топлива с теплоносителем» и «газовая неплотность» за счет избирательного контроля продуктов деления методами гамма-спектрометрии. Эффективность применения последних, а с ними и всей системы контроля герметичности оболочек, обеспечивается использованием созданных в работе [5] CdZnTe-детекторов.

Внедрение новых программно-технических комплексов радиационно-технологического контроля не должно приводить к снижению эффективности эксплуатации блока, поэтому операции по контролю состояния объектов требуют согласования с технологией производства электроэнергии и ремонта оборудования, с временным графиком других процессов в режиме реального времени, критерии которого показаны ранее. За время, в течение которого проходит технологическая операция (время, характерное для изменения какого-либо параметра в процессе работы АЭС), ПТК РТК должен обеспечить измерение спектра гамма-излучения технологических сред, провести амплитудный анализ импульсов счета, осуществить обработку спектра, рассчитать ха-

рактеристики состояния объекта и занести их в базу данных. Работу ПТК РТК в режиме реального времени при этом характеризуют темп поступления входных данных в систему (характеристик собственного гамма-излучения топливной сборки, теплоносителя и оборудования первого контура, газов в гермоболочке), который должен соответствовать темпу формирования выходных данных системы [5, 6].

Целью данной работы является создание программно-технических комплексов радиационно-технологического контроля на основе радиационных датчиков нового поколения, что открывает ранее неизвестные возможности в решении задач анализа ядерного топлива, повышения точности и эффективности контроля технологических параметров и состояния защитных барьеров в АЭС, создание средств для инспекций МАГАТЭ.

Основная часть. Принцип построения ПТК РТК физических барьеров безопасности базируется на измерении спектров собственного гамма-излучения технологических сред АЭС.

Механическая конструкция базовых элементов системы должна обеспечить хорошую совместимость с существующим технологическим оборудованием, элементами РУ перегрузочной машины, соблюдение требований безопасности при проведении ТТО.

Неверное функционирование этой системы (ложное срабатывание, не выявление факта нарушения состояния объекта) может привести к существенным экономическим потерям (снижение мощности блока, дополнительные затраты времени на ремонт оборудования), поэтому потеря времени ввиду неработоспособности системы должна быть минимальной.

Надежность системы обязана соответствовать надежности оборудования и систем, важных для безопасности.

В этой работе, следуя принципу общности подхода, на основании сформулированного критерия реального времени разработана структура двух видов ПТК РТК, предназначенных для определения протечек парогенератора по активности ^{16}N (ИРГ) и контроля отработавших тепловыделяющих сборок.

Опираясь на приведенные требования можно сделать вывод, что, с точки зрения повышения надежности, ПТК РТК должен состоять из независимых подсистем. Например, устройство, которое определяет протечки парогенератора по активности ^{16}N состоит из оборудования для каждой петли циркуляции теплоносителя.

При этом каждое устройство контроля протечек парогенератора содержит в своем составе несколько детекторов на основе CdZnTe-датчиков, позволяющих увеличить надежность работы, и за счет современных корреляционных методов анализа повысить чувствительность системы, оценить тепловую мощность реактора. Каждое устройство детектирования должно осуществить регистрацию гамма-излучения теплоносителя и преобразовать его в электрические сигналы для последующей передачи на амплитудный анализатор импульсов.

Многоканальный амплитудный анализатор импульсов должен выполнять функции накопления первичного (необработанного) гамма-спектра. Затем в спектрах, которые получили, проводят идентификацию пиков полного поглощения, а по ее результатам – собственно расчет течи и ведение базы данных. Эти функции возлагаются на ЭВМ, входящую в состав устройства определения протечек парогенератора. При необходимости управляющий компьютер должен передать требуемые данные о состоянии парогенератора в автоматизированной системе управления технологическими процессами АЭС в стандартном протоколе.

Кроме того, система должна включать обязательные блоки питания и управления, соответствующие обобщенной структурной схеме и общим требованиям к системам контроля на АЭС.

Функциональное описание комплекса.

Концепция построения данного программно-технического комплекса радиационно-технологического контроля в реальном времени основана на следующих основных принципах [7, 8]:

– распределенные многодетекторные измерения с возможностью выделения групп измерительных каналов для резервирования;

– распределенный вычислительный комплекс с дублированием результатов измерения;

– отказоустойчивые средства вычислительной техники на основе промышленных компьютеров;

– объединение подсистем через локальную сеть на базе HDSL-технологии, позволяющей получать высокоскоростной цифровой доступ по витой паре;

– диагностика технических и программных средств;

– системность, открытость, совместимость, стандартизация, унификация и эффективность.

– определения характеристик гамма-излучения теплоносителя, пара;

– обработки полученной информации;

– программного обеспечения (управление анализаторами, обработка спектров, связь между ЭВМ, представление полученной информации).

На основании изложенной концепции и об-

щего подхода к созданию системы, предложен состав технических средств ПТК РТК парогенератора (рис. 1).

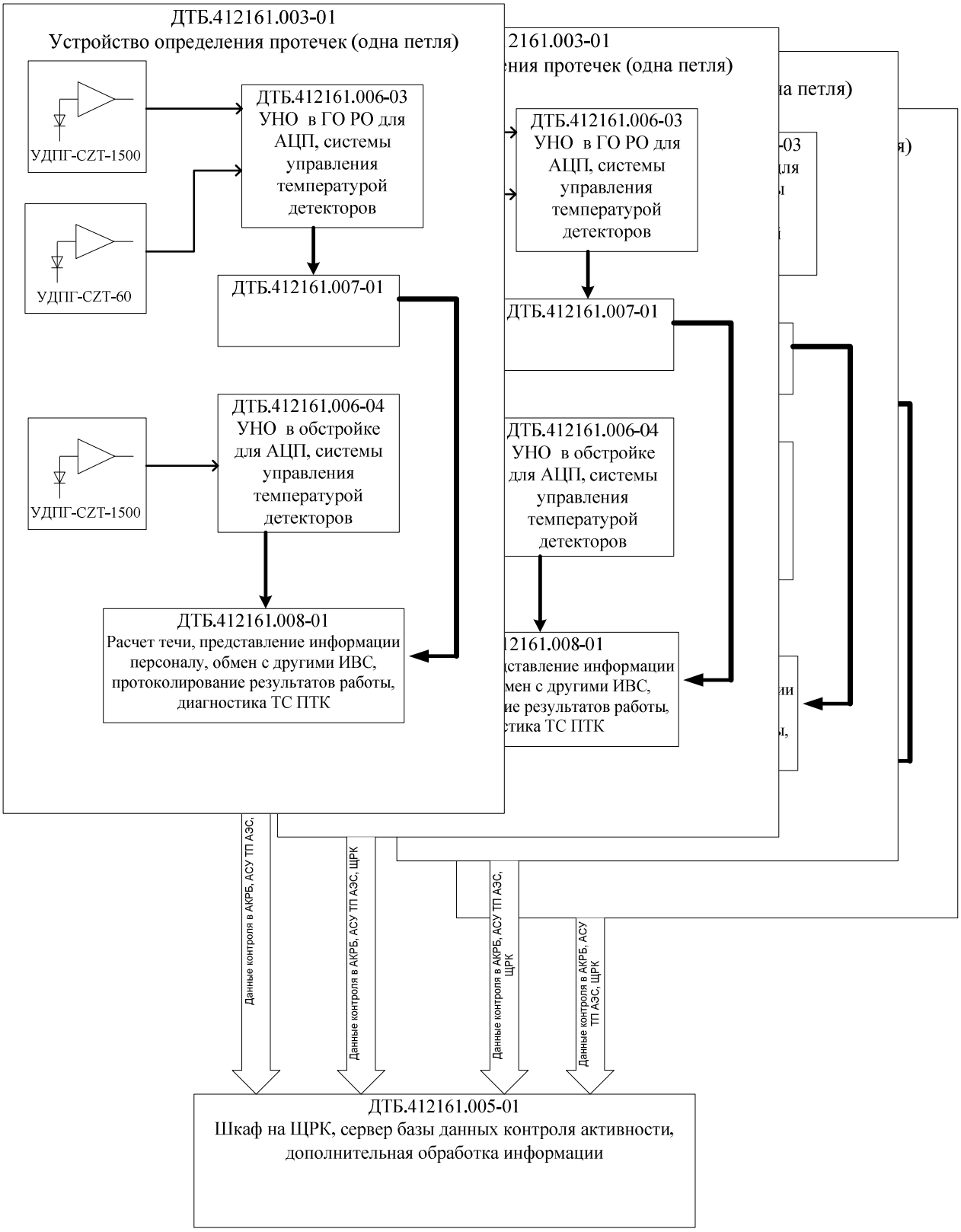

Рисунок 1 – Состав технических средств программно-технического комплекса радиационно-технологического контроля парогенератора

Устройство детектирования на основе CdZnTe-детектора создано для регистрации гамма-излучения и преобразования его в электрические сигналы с дальнейшей передачей в

амплитудный анализатор и представляет собой малогабаритное гамма-детектирующее устройство, измеряющее гамма-излучение в диапазоне от 100 до 2500 кэВ и от 20 до 8500 кэВ.

Устройства детектирования УДПГ-CZT-1500 и УДПГ-CZT-60 включают в себя CdZnTe кристалл, зарядочувствительный предварительный усилитель и водонепроницаемый корпус.

Роль многоканального амплитудного анализатора импульсов, его состав и конструкция описаны при разработке обобщенной структурной схемы системы измерения собственного гамма-излучения ОЯТ.

При повышении мощности реактора одной из основных является задача контроля состояния оболочек твэлов ОТВС. Таким образом, контроль герметичности оболочек (КГО) погружаемых ОТВС фактически является первым этапом организации управления состоянием ядерного топлива. К сожалению, существующие системы КГО для ВВЭР обладают низкой эффективностью и требуют существенных затрат времени для проведения контроля [6, 7]. В работе предложен двухэтапный потвэльный контроль ОТВС с применением методов пассивной томографии и оперативный контроль для выявления дефекта.

В соответствии со сформулированными выше требованиями для решения такой задачи построена структурная схема ПТК РТК (рис. 2). Концепция построения комплекса КГО реального времени основана на следующих основных принципах и средствах:

– отказ от применения сжатого воздуха для подготовки пробы;

– одновременный отбор проб воды и воздуха для проведения гамма-спектрометрического анализа содержания изотопов ^{133}Xe, ^{131}I, ^{134}Cs, ^{137}Cs в контролируемых пробах.

Технические средства, входящие в комплекс, подобны разработанным ранее системам контроля других технологических сред.

Отличительной особенностью комплекса является то, что продувка ТВС осуществляется водо-воздушным потоком, подаваемым группой инжекторов в нижнюю часть рабочей штанги. Двухфазный водо-воздушный поток обладает, по сравнению с воздушной продувкой, рядом преимуществ. Во-первых, пузырьки в таком потоке дольше сохраняют начальные размеры (более медленно коагулируют); во-вторых, такой поток обладает большей кинетической энергией и, следовательно, большей скоростью.

Указанное решение имеет следующие преимущества:

– нет необходимости применения воздушного компрессора, что существенно снижает стоимость системы, позволяет отказаться от масляных фильтров;

– малые габариты инжектора существенно упрощают проведение работ по доработке РШ ПМ;

– специально организованный двухфазный мелкодисперсный поток обладает качественно иными свойствами, чем продуваемый воздух, либо иной газ; это позволяет повысить эффективность «смывания» с оболочек твэлов продуктов деления;

– возможность регулировки газосодержания в процессе проведения контроля: таким образом можно, в случае необходимости, провести повторный контроль ОЯТ; это позволяет надежно идентифицировать факт контакта теплоносителя с топливной матрицей;

– многократная циркуляция по замкнутому контуру (внутри РШ ПМ и трубопроводами), подготовки пробы за время подъема ТВС в транспортное положение; это фактически приводит к концентрированию «смытых» с оболочек твэлов продуктов деления в верней части РШ ПМ, что в совокупности с постоянным контролем во время подъема ТВС повышает качество выполнения задач КГО;

– структура сформированного двухфазного мелкодисперсного потока такова, что, в отличие от методов с продуванием газа, омываются и внутренние твэлы, так как очевидно, что гидравлические характеристики указанного потока более совершенны: газовый, точнее воздушный, поток, полностью теряет всю свою энергию еще на участке до нижней решетки, и отразившись от хвостовика ТВС будет перемещаться между внешними рядами твэлов и рабочей штангой, таким образом, внутреннее пространство ТВС останется не контролированным.

При этом требования, предъявляемые к применяемому насосу, не велики: расход около 1 м^3/час, напор около 6 ат.

Комплекс работает следующим образом (рис. 3).

Насос центробежный 1 через пусковую емкость 2 и систему обратных 3 и запорных 4 клапанов забирает воду из рабочей штанги (РШ) и подает ее в раздающий водяной коллектор 6, откуда вода подается в группу инжекторов 7 на их рабочие сопла. Смешиваемый с водой воздух подсасывается из коллектора 5, куда он попадает из воздушного пространства рабочей штанги (т.е. объема, содержащего радиоактивные газы) по линии 12. В этом случае обеспечивается замкнутый режим многократной прогонки воздуха, используемого для продувки ТВС, и увели-

чение цикл за циклом концентрации радиоактивных изотопов в нем. Для баланса воды в системе, т. е. для сохранения уровня воды в рабочей штанге и снижения потери находящейся в воде активности, ее забор на инжекторы осуществляется также из внутренней полости РШ.

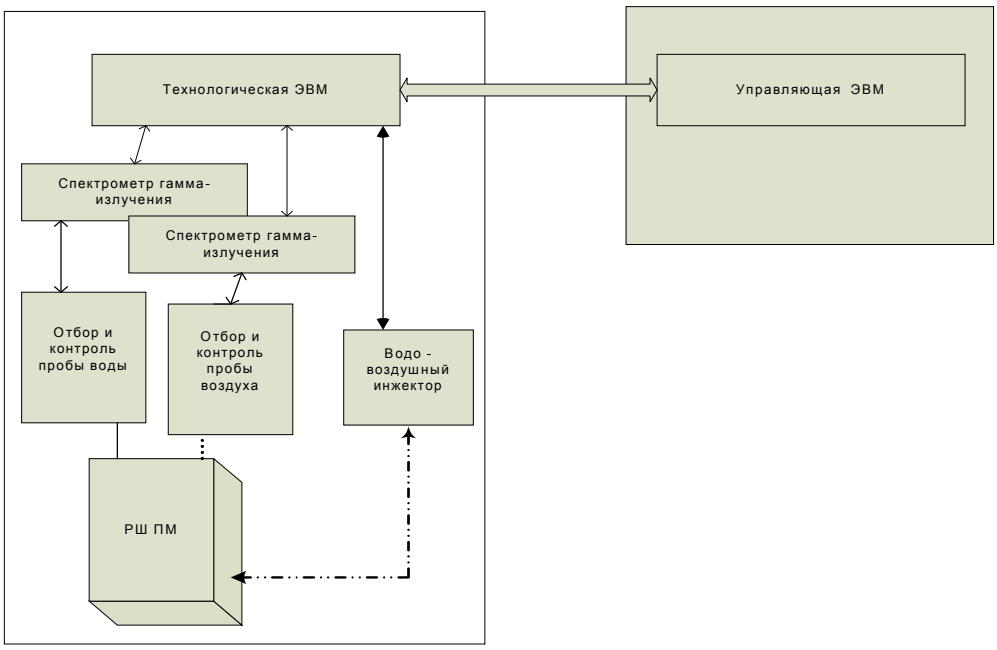

Рисунок 2 – Структурная схема системы контроля герметичности оболочки ТВС в реальном времени

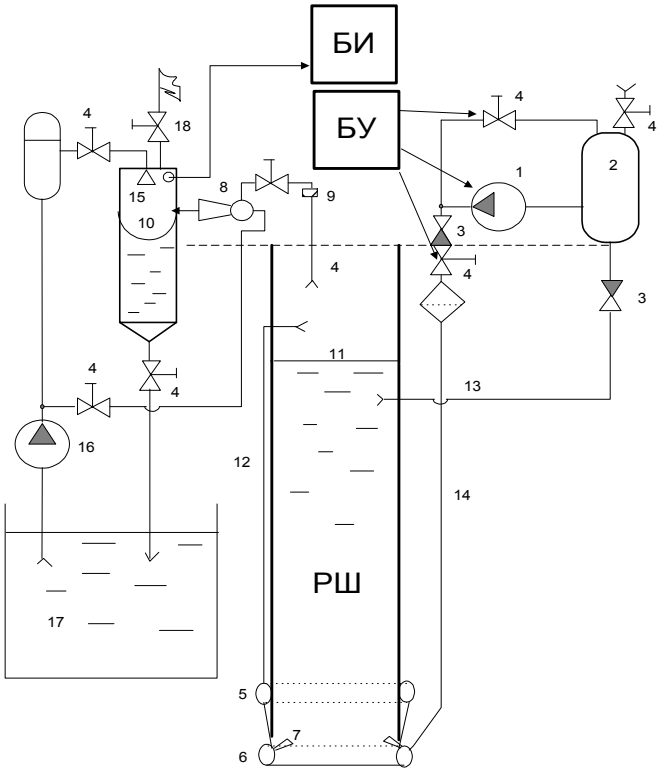

Рисунок 3 – Технологическая схема комплекса оперативного контроля герметичности оболочек ТВС в рабочей штанге перегрузочной машины: 1 – центробежный насос; 2 – пусковая емкость; 3 – обратные клапаны; 4, 18 – запорные клапаны; 5 – коллектор воздушный; 6 – коллектор водяной; 7 – инжекторная группа; 8 – эжектор измерительный; 9 – дроссель; 10 – измерительная емкость; 11 – уровень воды; 12 – линия забора воздуха; 13 – линия забора воды; 14 – линия подачи воды; 15 – шнек-распылитель; 16 – насос для забора чистой воды; 17 – бассейн выдержки

Для измерения активности система через заданный промежуток времени переключается в режим измерений. При этом закрывается линия подачи воды на группу инжекторов и открывается линия на эжектор измерительный 8. Эжектор 8 формирует заданную концентрацию водовоздушного потока и подает его тангенциально в измерительную емкость 10, где под действием центробежных сил происходит разделение воды и воздуха. Дроссель 9, установленный перед эжектором 8, формирует оптимальное для измерений газосодержание.

После проведения измерений возможно радиоактивное загрязнение измерительной емкости 10. Для ее отмывки предназначен дроссельный шнек-распылитель 15, установленный на оси измерительной емкости 10. Это позволяет провести отмывку внутренней поверхности емкости 10 высокоскоростным закрученным потоком воды. Подача воды на отмывку осуществляется насосом 16 с забором чистой воды из бассейна выдержки 17.

Выводы

Впервые разработаны программно-технические комплексы радиационно-технологического контроля (ПТК РТК) состояния защитных барьеров. Они базируются на измерении спектров собственного гамма-излучения технологических сред АЭС в режиме реального времени.

Один из комплексов предназначен для контроля протечек парогенератора по активности ^{16}N для каждой петли теплоносителя. Комплекс состоит из нескольких CdZnTe-детекторов, что позволило повысить надежность всей системы и ее чувствительность. Создана концепция построения комплекса и состав технических средств.

Разработан ПТК РТК контроля герметичности оболочек твэлов перегружаемых радиационных тепловыделяющих сборок. Контроль основан на применении созданного [5] метода пассивной томографии и оперативного выявления дефектного твэла. В данном случае увеличена эффективность пассивной томографии за счет применения немоноэнергетических измерений.

Отличительная особенность комплекса – продувка ТВС водо-воздушным потоком, который обладает преимуществами по сравнению с применяемой сейчас воздушной продувкой. При этом возможны одновременный контроль активности водной и газовой проб, выяление твэлов с дефектами типа «контакт топлива с теплоносителем» и «газовая неплотность» за счет гамма-спектрометрии с помощью CdZnTe-детекторов.

Список использованных источников

1. Горев В. С. Применение детекторов на основе теллурида кадмия в дозиметрии гамма-излучения / В. С. Горев, В. А. Кожемякин, О. А. Матвеев и др. // Приборы и техника эксперимента. – № 1, 1981. – С. 60 – 64.

2. 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.

3. Susumu Naito. Development of a New CdTe Area Radiation Monitor using the G(E) Function Method / Susumu Naito, Mikio Izumi, Toru Onodera, eds. // Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY. – Vol. 43. – No. 10, 2006. – P. 1173 – 1181.

4. Owens Alan. Compound semiconductor radiation detectors / Alan Owens, A. Peacock // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 531, 2004. – P. 18 – 37.

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

6. 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 г. – С. 3 – 7.

7. Маслов О. В. Блок детектирования γ-излучения на основе CdZnTe для систем радиационного контроля / О. В. Маслов, В. А. Мокрицкий, Ю. Е. Николаенко, М. В. Максимов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – № 3 (57), 2005. – С. 15 – 18.

8. Машкович В. П. Защита от ионизирующих излучений / В. П. Машкович, А. В. Кудрявцева. – Справочник. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 496 с.

Поступила в редакцию 05.06.2017

Рецензент: д.т.н., проф. Мокрицкий В. А., Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса.

О. В. Банзак, д.т.н., **Г. В. Банзак,** к.т.н.

ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНИЙ КОМПЛЕКС РАДІАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО КОНТРОЛЮ ОБ'ЄКТІВ АЕС НА ОСНОВІ CdZnTe-ДЕТЕКТОРІВ

У статті вперше розроблені програмно-технічні комплекси радіаційно-технологічного контролю (ПТК РТК) стану захисних бар'єрів. Вони засновані на вимірюванні спектрів власного гамма-випромінювання технологічних середовищ АЕС в режимі реального часу. Один з комплексів призначений для контролю протікань парогенератора за активністю 16N для кожної петлі теплоносія. До складу комплексу входять кілька CdZnTe-детекторів, що дозволило збільшити надійність всієї системи і її чутливість. Запропоновано концепцію побудови комплексу та склад технічних засобів.

Ключові слова: *радіаційно-технологічний контроль, дозиметрія, блок детектування, іонізуючі випромінювання*

O. V. Banzak, DSc, **G. V. Banzak,** PhD

PROGRAM TECHNICAL COMPLEX OF THE RADIATING TECHNOLOGICAL CONTROL OF OBJECTS APS ON THE BASIS OF CdZnTe-DETECTORS

In article program-technical complexes of the radiating technological control (PTC RTC) conditions of protective barriers for the first time are developed. They are based on measurement of spectra own scale-radiation of technological environments of the atomic power station in a mode of real time. One of complexes is intended for the control of leaking of a steam and gas generator over activity 16N for each loop of the heat-carrier. The structure of a complex includes some CdZnTe-detectors that have allowed increasing reliability of all system and its sensitivity. The concept of construction of a complex and structure of means is offered.

Keywords: *the radiating technological control, dosimeter, the block of detecting, an ionizing radiation*

УДК 531.71

К. О. Подостроєць

Одеська державна академія технічного регулювання та якості, м. Одеса

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СПОСОБУ ПЕРЕДАЧІ ОДИНИЦІ ФІЗИЧНОЇ ВЕЛИЧИНИ МЕТРА ВІД ЕТАЛОНУ ДО РОБОЧИХ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ В ЛАБОРАТОРНИХ УМОВАХ

Розглянуті особливості процесу метрологічного контролю віддалемірних засобів вимірювальної техніки та представлені відомі варіанти по його спрощенню. За приклад приведено спосіб передачі одиниці фізичної величини метра від еталону до робочих засобів вимірювальної техніки у лабораторних умовах шляхом вимірювання зигзагоподібних відстаней. Представлено математичну модель способу передачі одиниці фізичної величини метра від еталону до робочих засобів вимірювальної техніки у лабораторних умовах.

Ключові слова: *еталон, віддалемірні засоби вимірювальної техніки, повірка, калібрування.*

Вступ

Існуючі перешкоди по використанню відомої еталонної бази для метрологічного контролю приладів для вимірювання великих лінійних розмірів змушують шукати нові можливості по створенню та використанню більш зручних методів метрологічного контролю [1]. В процес створення нового методу входить: розробка моделі метрологічного контролю із способом передачі одиниці фізичної величини метра від еталону до робочих засобів вимірювальної техніки та проведення первинних досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, де започатковано розв'язання даної проблеми

На сьогодні метрологічний контроль віддалемірних засобів вимірювальної техніки здійснюється за допомогою спеціальних базисних лінійних геодезичних полігонів [2].

В Україні базисні лінійні геодезичні полігони функціонують в Одесі, Києві, Харкові, Вінниці, Миколаєві в Львівській та Івано-Франківській областях і Криму [3, 4]. У масштабі