

На правах рукописи

Андрианов Тимофей Викторович

**МЕТОДИКА ОБНАРУЖЕНИЯ РАННИХ СТАДИЙ
НЕГЕРМЕТИЧНОСТИ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА АЭС
С РЕАКТОРАМИ ТИПА РБМК-1000**

Специальность: 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Автор:

Москва - 2010

Работа выполнена на кафедре «Радиационной физики, биофизики и экологии» Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»

Научный руководитель доктор физико-математических наук, профессор Крамер-Агеев Евгений Александрович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Бушуев Анатолий Васильевич
доктор технических наук, профессор Григорьев Евгений Иванович

Ведущая организация: Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций

Защита состоится “16” июня 2010 г., в 15 часов

на заседании диссертационного совета Д 212.130.07 в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31, аудитория К-207

телефон: (495) 323-95-26, (495) 324-84-98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»

Автореферат разослан “ ___ ” _____ 2010 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор физико-математических наук

Улин С.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В 2006 году Правительство Российской Федерации утвердило «Программу развития атомной отрасли», которая предполагает увеличение доли электроэнергии, выработанной АЭС, до 23% в общей выработке электроэнергии (32% в европейской части РФ) и ввод 26 энергоблоков к 2020 г. В программе развития атомной отрасли предпочтение было отдано реакторам типа ВВЭР (проект ВВЭР АЭС-2006). При этом на территории РФ действуют Ленинградская, Смоленская и Курская АЭС с реакторами типа РБМК-1000, т.е. 30% энергоблоков на территории РФ оснащены реакторами данного типа. Доля реакторов РБМК в выработке электроэнергии составляет 47,8% (по данным на 2008 г.). Ввиду невозможности отказа от реакторов типа РБМК необходимо проводить модернизацию существующего оборудования на АЭС, спроектированного более 30 лет назад, и ужесточать контроль за нормальной эксплуатацией АЭС, которая должна отвечать современным требованиям радиационной безопасности.

Ядерный энергетический реактор РБМК является гетерогенным канальным реактором на тепловых нейтронах, в котором в качестве замедлителя используется графит. Теплоноситель – кипящая вода, циркулирующая по вертикальным каналам, пронизывающим кладку активной зоны. Активная зона является вертикальным цилиндром диаметром 11,8 м и высотой 7 м. Она окружена боковым отражателем толщиной 1 м и торцевыми отражателями толщиной по 0,5 м. В 1693 ячейках квадратной решетки активной зоны размещены технологические каналы, представляющие собой трубу диаметром 88 мм и толщиной стенки 4 мм и изготовленную из циркониевого сплава. Внутри канала устанавливается тепловыделяющая кассета, представляющая собой две последовательно соединенные тепловыделяющие сборки (ТВС) длиной 3,5 м каждая. ТВС состоит из 18 стержневых ТВЭЛов. ТВЭЛ представляет собой трубку наружным диаметром 13,5 мм с толщиной стенки 0,9 мм из циркониевого сплава, заполненную

таблетками диаметром 11,5 мм из двуокиси урана плотностью до 10,5 г/см³. Каналы системы контроля и управления (179 шт.) располагаются так же, как и технологические, в центральных отверстиях графитовых колонн.

Система контроля герметичности оболочек (КГО) ТВЭЛов занимает важнейшее место в системе радиационной безопасности АЭС. Система КГО позволяет своевременно обнаруживать начавшуюся разгерметизацию ТВЭЛа и отслеживать развитие дефекта, предотвращая, тем самым, аварию. На АЭС с реакторами типа РБМК проблема обнаружения негерметичных ТВЭЛов является еще более актуальной в связи с одноконтурной системой циркуляции теплоносителя и увеличением выброса радионуклидов непосредственно в атмосферу в случае аварии. В настоящее время на всех действующих российских атомных электростанциях с реакторами типа РБМК-1000 (11 энергоблоков) эксплуатируется штатная система КГО ТВЭЛов, разработанная еще в конце 60-х гг, которая морально и физически устарела. В связи с этим представляется актуальным разработать новые способы определения фотонов «летучих» осколков деления на фоне интенсивного излучения фотонов большой энергии ^{16}N . Предложенные методы позволили разработать аппаратуру нового поколения для обнаружения негерметичности ТВЭЛов, а также предложить новый метод определения расхода теплоносителя. Всё это решает вопрос об оснащении АЭС с реакторами РБМК-1000 современной системой КГО, обеспечивающей безопасность эксплуатации станции и обладающей высокой степенью надежности и оперативностью в обнаружении аварийных ситуаций.

Цель работы – предложить новые физические и аппаратные подходы к обнаружению утечек продуктов деления из трещин в оболочках ТВЭЛов, повысить выявляемость пиков полного поглощения, связанных с продуктами деления, вышедшими из ТВЭЛов, разработать метод контроля сохранения линейности многоканального гамма-спектрометра в процессе работы, предложить методику проведения измерений, которая повысит точность и оперативность обнаружения разгерметизации ТВЭЛов по сравнению со

штатной методикой.

Научная новизна работы

1. Впервые предложен метод обработки экспериментальной информации, полученной с блоков детектирования поканального контроля, который позволяет обнаруживать разгерметизацию тепловыделяющих элементов на более ранней стадии по сравнению со штатной методикой. При этом погрешность снижена не менее чем в 4 раза по сравнению с существующим методом.
2. Предложен способ идентификации разгерметизации ТВЭЛ по отношению числа импульсов в максимуме аннигиляционного пика фонового излучения ^{16}N и числа импульсов в “долине” приборного спектра.
3. Предложен способ стабилизации энергетической шкалы автоматизированных сцинтилляционных гамма-спектрометров, который позволяет стабилизировать энергетическую шкалу во всем рабочем диапазоне. По результатам работы получен патент Российской Федерации на изобретение.
4. Разработан метод повышения выявляемости пиков полного поглощения в гамма-спектре продуктов деления на фоне ^{16}N , который основан на вычитании из спектра, измеренного кристаллом NaI(Tl) , спектра, измеренного пластмассовым сцинтиллятором, после предварительного согласования по краю комптоновского распределения и по эффективности регистрации.
5. Предложенные методы позволили разработать устройство детектирования поканального контроля, позволяющее оценивать расход теплоносителя через топливный канал радиационным методом, контролировать и дублировать показания штатного расходомера на случай выхода его из строя.

Практическая значимость работы заключается в том, что заложены физические основы для модернизации всей штатной системы КГО со времени ее ввода в эксплуатацию. Впервые внедрена конструкция поканального устройства детектирования, позволяющая радиационным методом оценивать расход теплоносителя через топливный канал на реакторах типа РБМК. Проведена экспериментальная апробация разработанного поканального блока

детектирования в реальных условиях эксплуатации ядерного энергоблока Курской АЭС, а также проверка предлагаемых методик обнаружения разгерметизации. Получено положительное заключение о работе новой аппаратуры и об использовании предлагаемых методик обработки аппаратурных данных для повышения достоверности и оперативности обнаружения негерметичного ТВЭЛа. По результатам работы получен патент Российской Федерации на изобретение способа стабилизации энергетической шкалы многоканальных сцинтилляционных спектрометров гамма-излучения.

Положения, выносимые на защиту:

- метод обнаружения разгерметизации ТВЭЛов, основанный на измерении соотношения высокоэнергетичной и низкоэнергетичной области приборного спектра гамма-излучения от технологического канала, обусловленного фоновым излучателем ^{16}N и продуктами деления;

- способ обнаружения разгерметизации ТВЭЛов, основанный на изменении разрешения аннигиляционного пика фонового излучателя ^{16}N и соответствующем изменении соотношения пик/долина;

- способ контроля расхода теплоносителя через технологический канал, основанный на регистрации гамма-излучения при помощи двух разнесенных по высоте сцинтилляционных блоков детектирования и его техническая реализация;

- метод улучшения выявляемости пиков полного поглощения от продуктов деления путем одновременного использования детектора из сцинтиллирующей пластмассы и кристалла NaI(Tl) для эффективного подавления комптоновского распределения высокоэнергетичного излучения ^{16}N ;

- способ стабилизации энергетической шкалы автоматизированных сцинтилляционных гамма-спектрометров во всем рабочем диапазоне.

Личный вклад автора. Все результаты, представленные в диссертации, получены лично автором либо при его непосредственном участии. Автор принимал активное участие в разработке новых методов обнаружения

разгерметизации на ранних стадиях. Непосредственно автором предложена методика обработки приборного спектра, основанная на измерении соотношений вклада различных энергетических «окон». Лично автором предложено использовать кристалл из сцинтиллирующей пластмассы совместно с кристаллом NaI(Tl) для подавления непрерывного комптоновского распределения фонового излучателя ^{16}N в приборном гамма-спектре для повышения информативности спектрометрического метода определения негерметичности ТВЭЛов. Автором лично определены технические параметры разработанных блоков и устройств детектирования. На способ стабилизации энергетической шкалы гамма-спектрометров автором получен патент РФ на изобретение.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на конференциях (II международная конференция-выставка «Экологические системы и приборы, чистые технологии», апрель 2007; отраслевая конференция «Ядерное приборостроение-2008. Аппаратурное обеспечение», апрель 2008; отраслевая конференция «Ядерное приборостроение-2009. Аппаратурное обеспечение», апрель 2009), научной конференции МИФИ-2009.

По результатам работы получен патент на изобретение.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 научных статей (в том числе 5 статей в журналах, входящих в перечень ВАК) и 1 патент на изобретение).

Структура и объем диссертации. Диссертация содержит 115 стр., включая 49 рисунков, и состоит из введения, шести глав, заключения, списка используемой литературы 53 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом разделе диссертации - введении - дано обоснование актуальности работы, сформулирована цель, показана практическая значимость полученных результатов и всей работы в целом, а также отмечены положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена описанию штатных систем и методов КГО, применяемых на всех реакторах типа РБМК-1000. Основной проблемой для определения продуктов деления по фотонному излучению является гамма-излучение ^{16}N с энергией фотонов 6,1 МэВ. Радионуклид ^{16}N ($T_{1/2}=7,1$ с) образуется в ходе реакции $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$. В тоже время летучие продукты деления (благородные газы, йоды, цезий) имеют более низкие энергии фотонов (ниже 3 МэВ). В первой главе представлены принцип работы и структура штатной системы КГО типа РУГ2-01, которой оснащены все реакторы типа РБМК-1000. Подробно изложена штатная методика обнаружения конкретного технологического канала (ТК) с негерметичным ТВЭЛом, основанная на алгоритме вычитания вклада фонового излучения ^{16}N и определении скорости счета от осколков деления:

$$N_{\text{н.г.}} = N_{(E_1-E_2)} - K_{\text{фон}} \cdot N_{(E_2-6,5)} \quad (1)$$

где - $N_{\text{н.г.}}$ - скорость счета от осколков деления, при наличии негерметичности в оболочке ТВЭЛа;

- $N_{(E_1-E_2)}$ – скорость счета от летучих осколков деления и фона, создаваемого ^{16}N в диапазоне энергий $(E_1 - E_2)$ МэВ (т.е. $N_{(E_1-E_2)} = N_{1\text{фон}} + N_{\text{н.г.}}$);

- $N_{1\text{фон}}$ – скорость счета в диапазоне энергий $(E_1 - E_2)$ при отсутствии разгерметизации;

- $K_{\text{фон}}$ – отношение скорости счета в диапазоне $(E_1 - E_2)$ МэВ к скорости счета в диапазоне $(E_2 - 6,5)$ МэВ, определенное в заведомо герметичном канале;

- $N_{(E_2-6,5)}$ – скорость счета при энергиях более E_2 ;

Показано, что среднее квадратичное отклонение определения величины $N_{\text{н.г.}}$ является очень большим и не нормировано на мощность реактора:

$$\sigma_- = \sqrt{N_{(E1-E2)} + K_{фон}^2 \cdot N_{(E2-6.5)}} \quad (2)$$

Также в главе 1 рассмотрены другие пути решения задач КГО, которые, однако, носят модельный (расчетный) характер и используют показания и алгоритмы, заложенные в штатной системе.

В главе 2 описаны физические предпосылки для проектирования новой штатной системы КГО ТВЭЛов. Подробно рассмотрены процессы формирования радиоактивности контура циркуляции теплоносителя реактора РБМК-1000, оптимизирован объем и обоснованы точки контроля активности теплоносителя. В результате чего введены дополнительные подсистемы контроля активности теплоносителя, которые повышают надежность, эффективность и безопасность эксплуатации ядерного реактора по сравнению с существующей системой КГО. В главе 2 предложен метод остановки самоходного датчика поканального контроля строго против центра технологического канала (ТК). Остановка «тележки» с блоком детектирования против ТК в настоящее время осуществляется фактически «на глаз» - устройство поканального контроля (УПК) оснащено ручным приводом и по показанию стрелки интенсиметра, выведенного на пульт, оператор старается остановить «тележку» в момент наибольшего отклонения стрелки (максимальной скорости счета), что соответствует центру ТК. Однако стрелка интенсиметра имеет большую инерционность в показаниях, что может привести к неточности установки блока детектирования против ТК и искажению получаемых данных. При проезде «тележки» мимо паро-водяной коммуникации (ПВК) диаграмма зависимости скорости счета поканального датчика от координаты проезда мимо ТК выглядит как «колокол». Высота этого «колокола» зависит от активности теплоносителя в конкретной ПВК. Экспериментально было обнаружено, что если данную зависимость нормировать на интегральное (суммарное) количество импульсов, то, независимо от активности источника в трубе, экспериментальные точки удовлетворительно ложатся на одну кривую. После данной нормировки они

подчиняются одной и той же функции распределения $f(x)$. Т.о., нахождение центра ПВК сводится к нахождению координаты, где производная функции обращается в ноль ($f'(x) = 0$). Также в главе 2 описан метод, позволяющий радиационным методом оценивать расход теплоносителя. Разнесенные по высоте блоки детектирования в устройстве поканального контроля позволят оценивать расход теплоносителя за счёт распада ядер азота-16. При этом для сокращения времени обегания нитки ПВК блоки детектирования должны просматривать каждый свой ряд ПВК и в то же время быть экранированными от противоположенного ряда. При выявлении устройством поканального контроля технологического канала, в котором подозревается разгерметизация ТВЭЛа, блоки детектирования, расположенные один над другим, должны быть ориентированы в одну сторону и просматривать один канал. Исходя из закона радиоактивного распада, скорость протекания теплоносителя будет вычисляться по формуле:

$$V = \frac{0.693 \cdot L}{T_{1/2} \cdot \ln\left(\frac{N_1}{N_2}\right)} \quad (3),$$

где L – длина пролета;

$T_{1/2}$ – период полураспада ^{16}N ;

N_1 – скорость счета нижнего детектора (БД1);

N_2 – скорость счета верхнего детектора (БД2).

Зная длину реального пути пароводяной смеси из активной зоны до места регистрации (конструктивные размеры), геометрический фактор (для определения истинной скорости счета и, соответственно, для оценки активности в трубе ПВК), а также, зная расход теплоносителя, можно оценить мощность реактора в каждом топливном канале, а также во всей активной зоне реактора.

В главе 3 описываются предлагаемые методы повышения достоверности и оперативности обнаружения негерметичных ТВЭЛов.

Основной составляющей наведенной активности в воде (при малом времени доставки теплоносителя до места установки детектора) является гамма-излучение ^{16}N , образующегося по реакции $^{16}\text{O}(n, p)$. При разгерметизации

ТВЭЛа на фоне ^{16}N появляются реперные нуклиды: ^{133}Xe , ^{135}Xe , $^{135\text{m}}\text{Xe}$, ^{138}Xe , $^{85\text{m}}\text{Kr}$, ^{87}Kr , ^{88}Kr , ^{138}Cs , ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{134}I , ^{135}I . Помимо основных энергий гамма-излучения у этих нуклидов содержится еще множество менее значимых линий, поэтому, в аппаратурном спектре при разгерметизации ТВЭЛа с учетом разрешения NaI(Tl) будет наблюдаться сплошной прирост показаний в области энергий до $(2,5 \div 3)$ МэВ (см. рисунок 1).

В связи с этим предлагается установить два энергетических поддиапазона:

- диапазон №1: от 0,2 МэВ до 3 МэВ – область «эффекта» (скорость счета обусловлена комптоновской частью приборного спектра ^{16}N и продуктами осколков деления);

- диапазон №2: от 3 МэВ до 6,5 МэВ – область «фона» (скорость счета обусловлена излучением ^{16}N).

Для повышения достоверности обнаружения разгерметизации ТВЭЛов на ранней стадии предлагается следующая методика.

Введем соотношение $K_{\text{эфф.ект}} = N_1/N_{2\text{ф}}$ (где N_1 - количество импульсов в энергетическом диапазоне №1 при негерметичном ТВЭЛе, $N_{2\text{ф}}$ - количество импульсов в энергетическом диапазоне №2) и $K_{\text{фон}} = N_{1\text{ф}}/N_{2\text{ф}}$ (где $N_{1\text{ф}}$ - количество импульсов в энергетическом диапазоне №1 при герметичном ТВЭЛе, $N_{2\text{ф}}$ - количество импульсов в энергетическом диапазоне №2);

При этом $N_1 = N_{1\text{ф}} + N_{\text{эфф.ект}}$ (где $N_{\text{эфф.ект}}$ – количество импульсов от продуктов деления в области энергий $(0,2-3)$ МэВ)

При разгерметизации ТВЭЛа происходит возрастание количества импульсов в энергетическом окне $(0,2-3)$ МэВ. В энергетическом окне $(3-6,5)$ МэВ количество импульсов остается таким же, как и в случае сохранения герметичности ТВС при постоянной мощности реактора (см. рисунок 1).

Рассмотрим отношение коэффициента эффекта $K_{\text{эфф.ект}}$ к коэффициенту фона $K_{\text{фон}}$:

$$\frac{K_{\text{эфф.ект}}}{K_{\text{фон}}} = x + 1; \quad (4),$$

где $x = N_{\text{эффект}}/N_{1\phi}$.

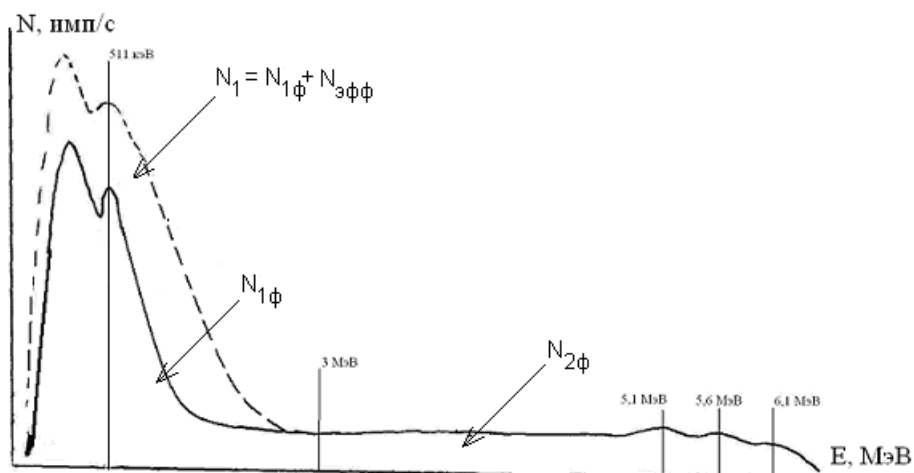


Рисунок 1. Приборный спектр ТВС
сплошной спектр – спектр герметичной ТВС;
пунктирный спектр – спектр негерметичной ТВС

Значение $K_{\text{фон}}$ и его погрешность определяется, как:

$$K_{\text{фон}} = K_{\text{фон}} \pm u \sqrt{\frac{K_{\text{фон}} (K_{\text{фон}} + 1)}{N_{2\phi}}} \quad (5)$$

Значение $K_{\text{эффект}}$ и его погрешность определяется, как:

$$K_{\text{эффект}} = K_{\text{фон}} (x + 1) \pm u \sqrt{\frac{K_{\text{фон}}^2 (x + 1)^2 + K_{\text{фон}} (x + 1)}{N_{2\phi}}}, \quad (6) *$$

где $x = \frac{N_{\text{э}}}{N_{1\phi}}$, u – число средних квадратических отклонений при заданной

вероятности.

*При отсутствии продуктов деления в контуре (т.е. $N_{\text{эффект}}=0$, что равносильно $x=0$), $K_{\text{эффект}}=K_{\text{фон}}$ (формула (6) переходит в формулу (5), что и должно наблюдаться в отсутствии "эффекта" (разгерметизации))

Предлагается следить за отношением $K_{\text{эффект}}/K_{\text{фон}}$, т.е. за величиной $(x+1)$.

Погрешность σ : вычисления отношения $K_{\text{эффект}}/K_{\text{фон}}$ равна:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x+1)^2(2K_{\text{фон}}+1)+(x+1)}{K_{\text{фон}}N_{2\text{фон}}}} \quad (7)$$

Относительная δ : погрешность вычисления отношения $K_{\text{эффект}}/K_{\text{фон}}$ равна:

$$\delta = \frac{\sqrt{\frac{(x+1)^2(2K_{\text{фон}}+1)+(x+1)}{K_{\text{фон}}N_{2\text{фон}}}}}{(x+1)} \quad (8)$$

Отличие отношения $K_{\text{эффект}}/K_{\text{фон}}$ от единицы будет однозначно свидетельствовать о начавшейся разгерметизации в ТК и одновременно давать приблизительную оценку величины разгерметизации.

Для сравнения штатной и предлагаемой методик были проведены эксперименты по определению наличия «эффекта» (продуктов деления) при постоянно присутствующем большом «фоне». Обнаружение «эффекта» проводилось на фоне постоянного излучения. Для моделирования использовались разные наборы низко- и высокоэнергетичных нуклидов (^{137}Cs - ^{60}Co , ^{133}Ba - ^{88}Y и др.). Эксперименты проводились для разной статистики набора $N_{2\text{фон}}$ и фонового коэффициента (для возможных разных границ E_1 и E_2). При этом «эффект» выбирался равным 2,9%; 3,4%; 4,8%; 9,4% от величины $N_{1\text{фон}}$ (важно было исследовать область малого «эффекта», то есть, ранней стадии разгерметизации).

Как показало сравнение результатов штатной разностной методики с предлагаемой методикой отношения скоростей счета, относительная погрешность разностной методики достигает 62 % для малого «эффекта» (разгерметизация составляет порядка 3% от количества импульсов N_1), в то время как по предлагаемой методике отношения, относительная погрешность не превышает 5 % для того же «эффекта».

При поканальном контроле проводятся однократные измерения, таким образом, особенно важно обеспечить отсутствие выбросов, превышающих

заданную допустимую погрешность, относительно средней величины. При использовании разностной методики наблюдается значительное количество показаний, которые не укладываются в рассчитанную погрешность (до 40% выбросов экспериментальных данных при малых степенях разгерметизации). При определении “эффекта” по предлагаемой методике отношения погрешность всех одиночных измерений не превышают расчетной погрешности, в том числе и для расчетной погрешности $\delta_r = 1,5 \%$.

В лабораторных условиях для проверки правильности работы методики в области высоких энергий использовался нуклид ^{12}C , возникающий в реакции $\alpha + \text{Be} = ^{12}\text{C} + \text{n}$, который испускает фотоны с энергией 4,44 МэВ и является сопутствующим гамма-излучением Pu- α -Be источника (см. рисунок 2). Форма полученного спектра гамма-излучения от данного источника аналогична по внешнему виду к спектру, полученному при поканальном контроле штатной системой КГО III блока Курской АЭС от пароводяной коммуникации (ПВК) (ср. рисунок 2 и рисунок 3). Отличие состоит в том, что в спектре излучения ПВК присутствует более высокоэнергетичные фотоны ^{16}N с тройным пиком, соответствующим в приборном спектре энергии 6,1 МэВ.

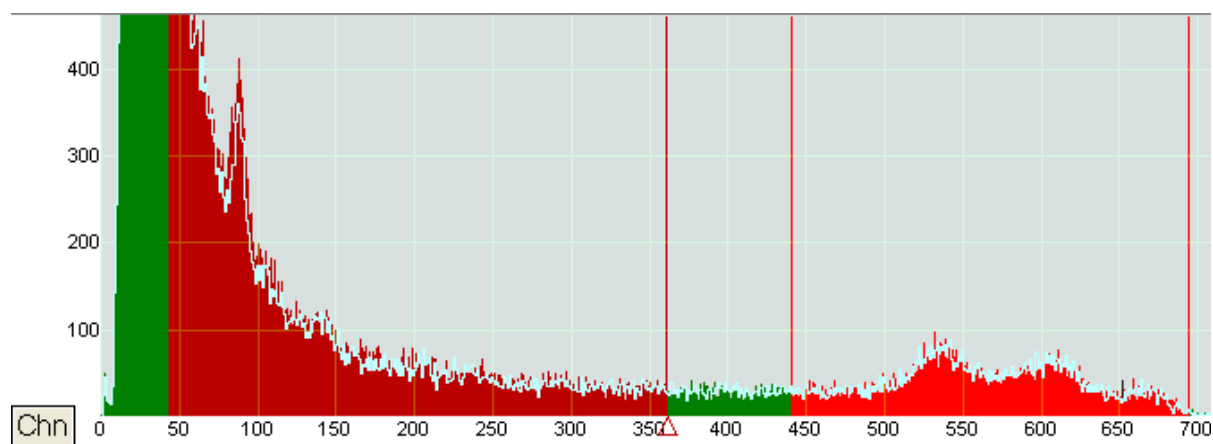
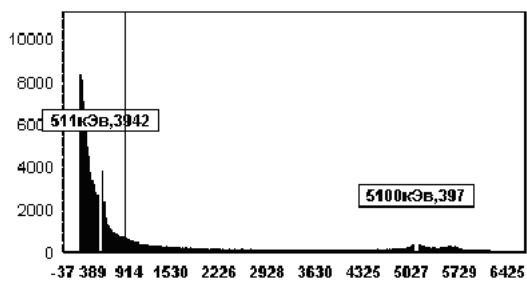
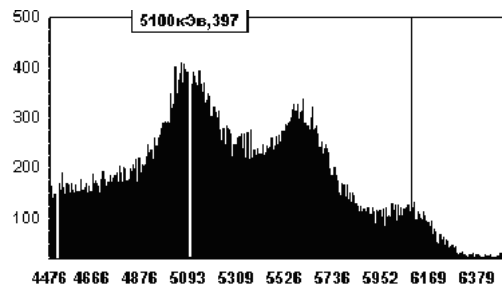


Рисунок 2. Приборный спектр фотонов Pu-Be источника



а)



б)

Рисунок 3. Приборный спектр излучения ^{16}N , полученный при поканальном контроле на действующем реакторе (III энергоблок Курской АЭС)

а) энергетическое «окно» (0,2 - 6,5) МэВ

б) энергетическое «окно» (4,5 - 6,5) МэВ

Методика отношения была проверена в условиях эксплуатации на АЭС. Были обработаны данные по сканированию ниток пароводяных коммуникаций (ПВК) при запуске поканального детектора (структурно реактор РБМК-1000 разбит на 8 ниток по 118 технологических каналов каждая). Обработывались данные всей нитки ПВК. В качестве временного среза для анализа развития разгерметизации был выбран период - две недели до выгрузки обнаруженной негерметичной кассеты. Проводилась обработка статистических данных по предложенному алгоритму отношения в штатных энергетических диапазонах, установленных руководящими документами на АЭС. Совокупность показаний поканального блока детектирования при его перемещении вдоль отдельной трубы ПВК в каждом энергетическом диапазоне аппроксимировались полиномом шестой степени и далее проводилось интегрирование в пределах ширины одной ПВК. При этом из полезного сигнала вычитался фон от соседних ПВК. Фоновые значения аппроксимировались линейной функцией. Пояснения даны на рисунке 4.

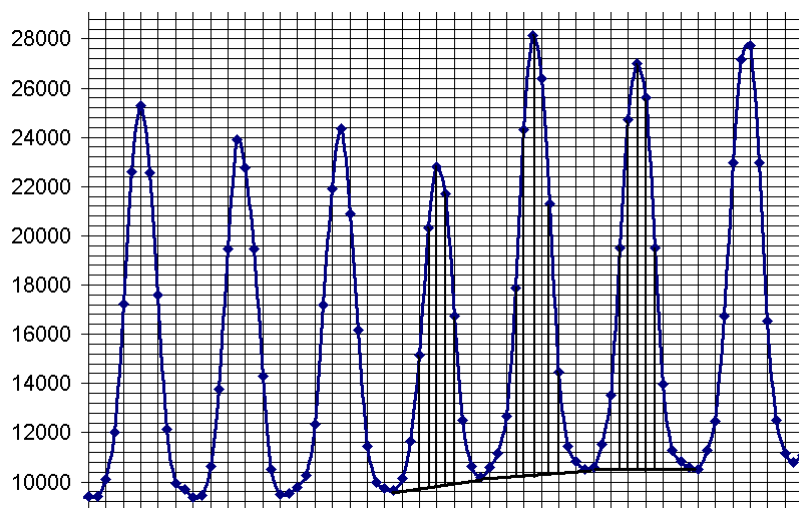


Рисунок 4. Пример обработки сигналов поканального блока детектирования

В результате обработки массива информации за две недели до выгрузки обнаруженной негерметичной кассеты по методике отношения было выявлено, что ПВК № 55 нитки № 2 первого энергоблока КуАЭС является негерметичной (обнаруженный номер негерметичной ПВК совпал с показаниями штатной системы). Процесс начавшейся разгерметизации был обнаружен штатной системой КГО 23.09.07 по росту показаний активности в барабан-сепараторе и устройстве сжигания гремучей смеси. При этом показания поканального блока детектирования с использованием штатной методики не позволили идентифицировать конкретную негерметичную ПВК. С момента обнаружения начавшейся разгерметизации (23.09.07) был начат усиленный поиск негерметичной кассеты. По результатам показаний и алгоритмов штатной системы КГО 25.09.07 после четырех прогонов поканального блока детектирования вдоль рядов ПВК было принято решение о выгрузке ПВК № 55.

С другой стороны, в результате применения предлагаемой методики отношения к показаниям блоков детектирования поканального контроля, оказалось, что идентификация негерметичного канала и решение о выгрузке негерметичной кассеты при использовании алгоритма отношения могло быть принято на сутки раньше (24.09.07), чем при использовании штатной методики. На рисунке 5 показан тренд показаний негерметичной кассеты за временной срез в две недели. Из графика (см. рисунок 5) видно, что уже 23.09.07 при

использовании методики отношения зарегистрирован кратковременный выход продуктов деления в ПВК № 55.

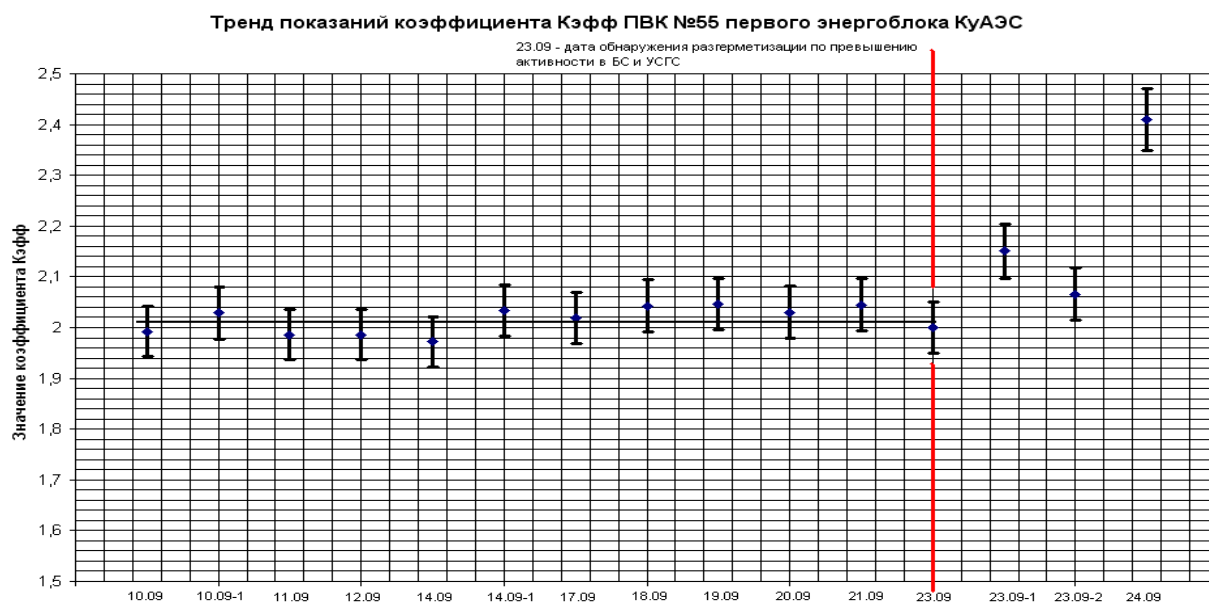


Рисунок 5. Тренд показаний коэффициента Кэфф ПВК №55 первого энергоблока КуАЭС

При значениях отношения $K_{\text{эффект}}/K_{\text{фон}}$ близких к единице (малая степень разгерметизации), предлагаемая методика на порядок снижает случайную погрешность определения выброса продуктов деления в случае однократного измерения и позволяет исключить принятие ложного решения о наличии негерметичного ТВЭЛа.

С целью повышения достоверности обнаружения негерметичности и возможности анализа развития степени разгерметизации автором диссертации предлагается энергетическое «окно» (0,2 – 3,0) МэВ разбить на поддиапазоны:

- (0,2 – 0,8) МэВ – первый поддиапазон;
- (0,8 – 1,6) МэВ – второй поддиапазон;
- (1,6 – 3,0) МэВ – третий поддиапазон;

В первый поддиапазон при разгерметизации основной вклад дает группа нуклидов: ^{74}Kr , ^{76}Kr , ^{77}Kr , ^{79}Kr , ^{87}Kr , ^{88}Kr , ^{89}Kr , ^{90}Kr , ^{121}Xe , ^{123}Xe , ^{125}Xe , ^{127}Xe , ^{135}Xe , ^{137}Xe . Во второй поддиапазон попадают преимущественно радионуклиды

йода: ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{134}I , ^{135}I . В третий поддиапазон попадают жесткие линии нуклидов: ^{88}Kr , ^{89}Kr , ^{90}Kr , ^{138}Xe .

Каждому энергетическому поддиапазону, таким образом, будет соответствовать свой коэффициент $K_i = \frac{N_i}{N_{3-6,5}}$, где

N_i – скорость счета в i -поддиапазоне,

$N_{3-6,5}$ – скорость счета в диапазоне энергий (3 - 6,5) МэВ.

Таким образом, $K_{\Sigma} = K_1 + K_2 + K_3 = \sum_i K_i$

Дисперсия определения коэффициента K_i равна:

$$\begin{aligned} \sigma_i^2 &= \sigma^2\left(\frac{N_i}{N_{3-6,5}}\right) = \frac{N_i}{N_{3-6,5}^2} + \frac{N_i^2}{N_{3-6,5}^4} \cdot N_{3-6,5} = \frac{1}{N_{3-6,5}} \cdot \frac{N_i}{N_{3-6,5}} \left(1 + \frac{N_i}{N_{3-6,5}}\right) = \\ &= \frac{1}{N_{3-6,5}} \cdot K_i \cdot (1 + K_i) \end{aligned} \quad (9)$$

Тогда:

$$\sigma_{\Sigma}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 = \frac{K_1 + K_2 + K_3 + K_1^2 + K_2^2 + K_3^2}{N_{3-6,5}} = \frac{K_{\Sigma} + K_1^2 + K_2^2 + K_3^2}{N_{3-6,5}} \quad (10)$$

С другой стороны, дисперсия определения коэффициента K_{Σ} определяется, как:

$$\sigma_{\Sigma}^2 = \sigma^2\left(\frac{N_{0,1-3}}{N_{3-6,5}}\right) = \frac{K_{\Sigma} \cdot (K_{\Sigma} + 1)}{N_{3-6,5}} = \frac{K_{\Sigma} + K_{\Sigma}^2}{N_{3-6,5}} \quad (11)$$

Как видно из формул (10) и (11), разбиение энергетического "окна" (0,2-3) МэВ на поддиапазоны приводит к уменьшению дисперсии конечного результата. Относительный вклад того или иного коэффициента K_i будет свидетельствовать о степени развития разгерметизации.

Другим (дополнительным) критерием разгерметизации может служить отношение пик/долина в аннигиляционном пике 0,511 МэВ. При разгерметизации в результате появления ИРГ и наложения множества линий, происходит ухудшение разрешения аннигиляционного пика в приборном спектре ^{16}N по сравнению со случаем герметичного канала. Приборные спектры

герметичной ТВС и негерметичной ТВС, полученные при поканальном контроле на третьем энергоблоке Курской АЭС представлены на рисунках 6 и 7, соответственно.

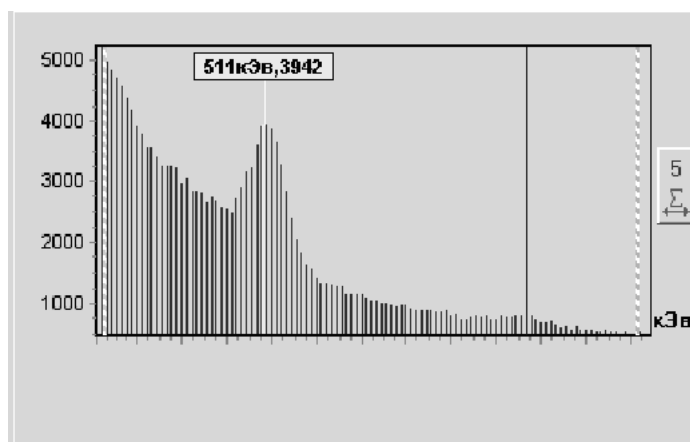


Рисунок 6 Спектр герметичной ТВС, полученный при поканальном контроле на третьем энергоблоке КуАЭС. «Окно» 300÷1000 кэВ

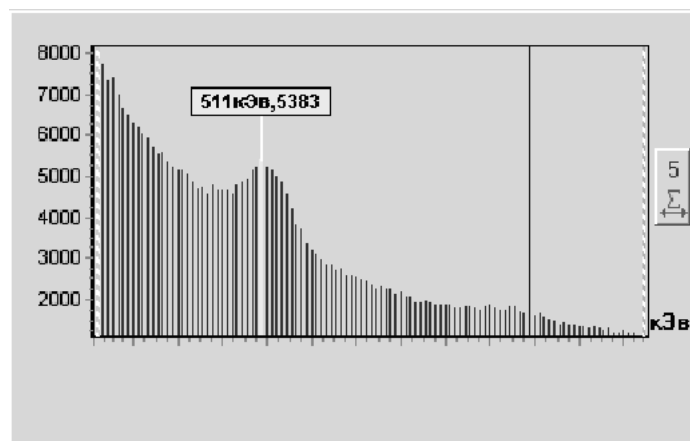


Рисунок 7 Спектр негерметичной ТВС, полученный при поканальном контроле на третьем блоке КуАЭС. «Окно» 300÷1000 кэВ.

Как видно из рисунка 7, загрузка по каналам при разгерметизации ТВС стала больше по сравнению с герметичной ТВС, а новых пиков полного поглощения (ППП) не обнаружено – приборный спектр негерметичной ТВС сплошной. Рост загрузки наблюдается до энергий (2,5÷3) МэВ.

Полученные экспериментальные данные подтверждаются анализом энергетических линий нуклидов, появляющихся при разгерметизации, и их вкладом в пик 0,511 МэВ (проанализированы линии ^{133}Xe , ^{135}Xe , $^{135\text{m}}\text{Xe}$, ^{138}Xe , ^{85}Kr , $^{85\text{m}}\text{Kr}$, ^{87}Kr , ^{88}Kr , ^{138}Cs , ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{134}I , ^{135}I в области энергий близких к 0,511 МэВ).

Отношение скорости счета в максимуме ППП 0,511 МэВ к скорости счета в долине («провал» слева от ППП) определяется только разрешением сцинтилляционного детектора на основе NaI(Tl). Т.о., в случае разгерметизации отношение пик/долина уменьшится за счет размытия пика 0,511 МэВ, вследствие появления газообразных продуктов деления и будет однозначно свидетельствовать о факте разгерметизации.

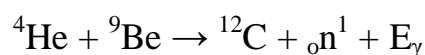
Использование одновременно нескольких предлагаемых методик позволяет более точно определять наличие факта разгерметизации и принимать решение о выгрузке подозреваемой ТВС, а установка дополнительных энергетических окон позволяет судить о степени и характере разгерметизации.

В главе 4 подробно описываются принципы работы и назначение блоков и устройств детектирования, разработанных для новой штатной системы СКГО-01Р реактора типа РБМК-1000. Разработанные устройства детектирования позволяют комплексно решить задачу КГО ТВЭЛов. Поканальный контроль (определение номера пароводяной коммуникации с негерметичным ТВЭЛом) проводится с помощью нового устройства поканального контроля с двумя разнесенными по высоте сцинтилляционными блоками детектирования, размещенными в самоходном свинцовом контейнере-коллиматоре, который просматривает обегаящим способом технологические каналы. Разнесенные по высоте блоки детектирования позволяют оценивать расход теплоносителя в технологическом канале радиационным методом. Групповой контроль (контроль целостности оболочек ТВЭЛов по четвертям активной зоны по конденсату пара барабан-сепараторов) проводится разработанным сцинтилляционным блоком детектирования с измерительной емкостью. Непрерывный контроль нуклидного состава в воде контура многократной принудительной циркуляции (КМПЦ) осуществляется с помощью разработанных устройств детектирования на основе ППД из ОЧГ и сцинтилляционного детектора с кристаллом NaI(Tl). Периодический контроль нуклидного состава жидких проб в лабораторных условиях также ведется при помощи разработанного устройства детектирования на основе ППД из ОЧГ.

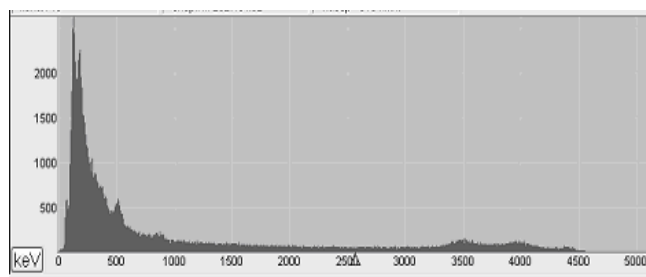
Для контроля эжекторных газов в трубопроводе между устройством сжигания горючей смеси и установкой подавления активности разработано устройство детектирования с детектором NaI(Tl). Определены характеристики всех разработанных устройств детектирования.

В главе 5 описывается способ стабилизации многоканальных спектрометров. Для многоканальных спектрометров характерна нестабильность, вызываемая смещением нулевого канала. При этом эффективное изменение в калибровке различно в различных областях спектра. Одной из задач, решенных в диссертации, является стабилизация энергетической шкалы сцинтилляционного спектрометра гамма-излучения одновременно по нескольким опорным линиям, лежащим в начале, середине и конце рабочего диапазона, с помощью одного источника радиоактивного излучения, обеспечение возможности стабилизации спектрометра в области высоких энергий (более 3 МэВ), обеспечение долговременного результата стабилизации.

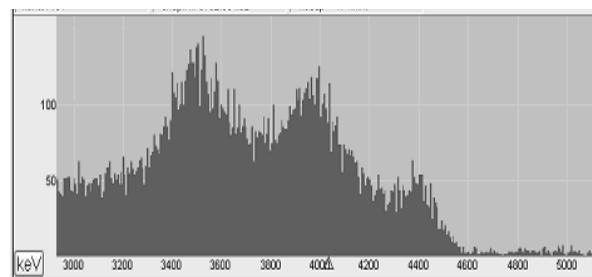
В основе разработанного в диссертации способа – регистрация гамма-квантов с энергией 4,44 МэВ, соответствующих возбужденному ядру ^{12}C (см. рисунок 8). Ядро ^{12}C образуется в ходе (α, n) -реакции:



Стабилизацию положения номера канала спектрометра от энергии гамма-излучения проводят по следующим пикам полного поглощения: 4,44 МэВ, 3,93 МэВ – пик при утечке одного аннигиляционного фотона, 3,42 МэВ – пик при утечке двух аннигиляционных фотонов, 834 кэВ ^{54}Mn , 511 кэВ – аннигиляционный пик, (94,7 – 103,8) кэВ от смеси ^{239}Pu , ^{240}Pu и ^{241}Pu , 59,5 кэВ - ^{241}Am ;



а)



б)

Рисунок 8. Спектр гамма-излучения Pu-Be источника

а) Энергетическое «окно» (0 – 5,0) МэВ

б) Энергетическое «окно» (3,0 – 5,0) МэВ

На предлагаемый способ автором диссертации получен патент Российской Федерации. Техническим результатом от использования предложенного изобретения является расширение диапазона стабилизации энергетической шкалы многоканального сцинтилляционного спектрометра гамма-излучения до двух порядков по сравнению с известными способами, снижение интегральной нелинейности по сравнению с использованием стандартного набора образцовых спектрометрических источников гамма-излучения (ОСГИ), стабилизация энергетической шкалы многоканального спектрометра по нескольким опорным линиям.

В главе 6 исследованы метрологические характеристики и технические возможности устройства поканального контроля. Оценена чувствительность к объемным источникам ^{85}Kr и ^{137}Cs , путем имитации информативного участка пароводяной коммуникации. Предложено использовать блок детектирования с пластмассовым сцинтиллятором одновременно с блоком детектирования с кристаллом NaI(Tl) . Реальный спектр при работающем реакторе содержит фоновое излучение, являющееся непрерывным распределением импульсов электронов комптон-эффекта от фотонов ^{16}N во всем заданном энергетическом диапазоне. При наличии негерметичных ТВЭЛов на фоне ^{16}N возникает спектр других радионуклидов.

Поэтому на ранней стадии разгерметизации и при небольших выбросах продуктов деления, необходимо как можно лучше выделить их пики полного поглощения (ППП). Исходя из этого, наряду с использованием блока детектирования с кристаллом NaI(Tl) размером 40×40 мм, проводились отдельные измерения с пластмассовым сцинтиллятором на основе полистирола. Таким образом, кристалл NaI(Tl) заменялся на аналогичный по размерам пластмассовый сцинтиллятор и проводились измерения.

При согласовании непрерывного комптоновского распределения, измеряемого обоими сцинтилляторами, как по шкале скоростей счета (учет эффективности регистрации), так и по энергетической шкале (учет различия световых выходов), а затем при вычитании одного спектра из другого

экспериментально показано, что комптоновская часть приборного спектра от ^{16}N почти полностью подавляется, существенно улучшается соотношение пик/долина и ППП видны гораздо лучше. Результирующее распределение состоит, фактически, только из ППП, регистрируемых в NaI(Tl) .

Таким способом, однако, нельзя полностью исключить непрерывное распределение, так как форма его в детекторе с пластмассовым сцинтиллятором несколько отличается от формы в детекторе с кристаллом NaI(Tl) из-за различного вклада многократного рассеяния. При вычитании возможно появление ложных пиков. Однако ложные пики пренебрежимо малы по сравнению с ППП (примеры спектров представлены на рисунках 9-10).

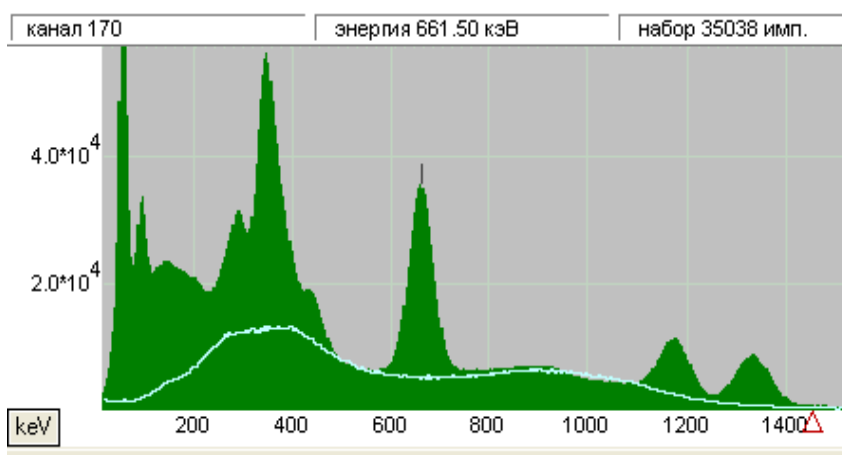


Рисунок 9. Спектр ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{60}Co от кристалла NaI(Tl) (сплошной спектр) и пластмассового сцинтиллятора (светлая линия)

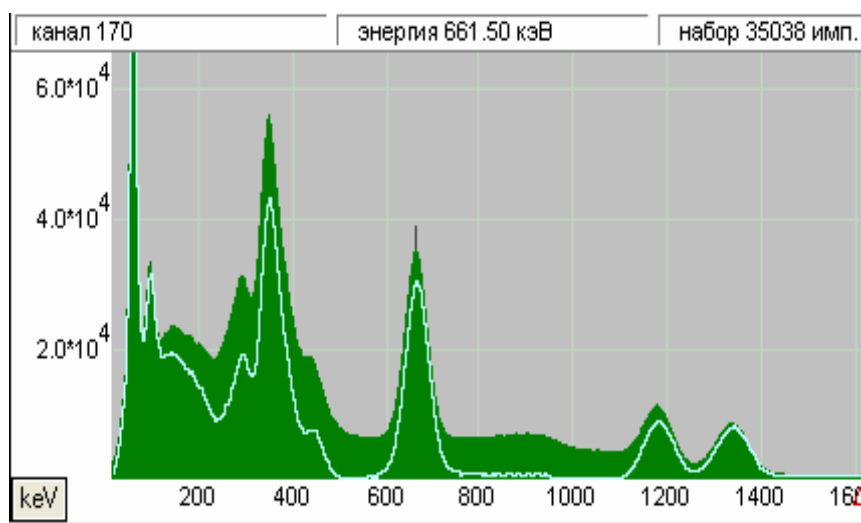


Рисунок 10. Спектр ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{60}Co от кристалла NaI(Tl) и за вычетом спектра от пластмассового сцинтиллятора (светлая линия)

Заключение

Экологическая безопасность при эксплуатации реактора РБМК в значительной степени зависит от сохранения герметичности оболочек ТВЭЛ. Используемые в настоящее время устройства и методики обнаружения негерметичности были разработаны более 40 лет назад и физически и морально устарели. Проблема замены устаревшего оборудования не сводится только к внедрению современных блоков и устройств детектирования.

В диссертационной работе разработан ряд методов повышения информативности и надежности выявления негерметичных ТВЭЛов:

- предложена методика обработки экспериментальной информации, полученной с блоков детектирования поканального контроля, которая позволяет обнаруживать разгерметизацию тепловыделяющих элементов на более ранней стадии по сравнению со штатной методикой. При этом погрешность снижена не менее чем в 4 раза по сравнению с существующим методом;
- предложен способ идентификации разгерметизации ТВЭЛ по отношению числа импульсов в максимуме аннигиляционного пика фонового излучения от ^{16}N и числа импульсов в “долине” приборного спектра;
- предложен способ стабилизации энергетической шкалы автоматизированных сцинтилляционных гамма-спектрометров, который позволяет стабилизировать энергетическую шкалу во всем рабочем диапазоне;
- разработан метод повышения выявляемости пиков полного поглощения в приборном гамма-спектре продуктов деления на фоне ^{16}N , который основан на вычитании из спектра, измеренного кристаллом NaI(Tl), спектра, измеренного пластмассовым сцинтиллятором, после предварительного согласования по краю комптоновского распределения и по эффективности регистрации;
- предложенные методики позволили разработать устройство детектирования поканального контроля, позволяющее оценивать расход теплоносителя через топливный канал радиационным методом, контролировать и дублировать показания штатного расходомера на случай выхода его из строя.

Применение предлагаемых методик индикации разгерметизации позволяет:

- существенно снизить погрешность обнаружения разгерметизации на ранних стадиях;
- снизить количество «выбросов» экспериментальных данных над расчетными при однократных измерениях;
- снизить риск пропуска начала развития аварии.

Применение изобретения, предложенного автором диссертации, позволяет стабилизировать работу блоков детектирования в более широком, ранее не доступном диапазоне.

Разработаны новые современные блоки и устройства детектирования, характеристики которых значительно лучше, чем у используемых в настоящее время.

Одновременное использование сцинтилляторов на основе сцинтиллирующей пластмассы и NaI(Tl) позволяет выделить пики полного поглощения нуклидов, образующихся при разгерметизации.

Разработанное устройство поканального контроля позволяет оценивать расход теплоносителя в технологическом канале.

Расширено количество точек контроля, что позволяет обеспечить более безопасную и эффективную работу реактора.

Обеспечен контроль работоспособности блока детектирования поканального контроля в процессе штатного измерения по контрольному источнику в произвольный момент времени без вывода тележки в стояночный бокс КГО.

С участием автора диссертации разработана новая штатная система контроля герметичности оболочек ТВЭЛов СКГО-01Р для реакторов типа РБМК-1000, которая может быть применена на всех существующих энергоблоках.

Список публикаций по теме диссертации:

1. Андрианов Т.В., Волков С.В., Володин В.П., Макаров В.В., Янин В.С. Спектрометрические устройства детектирования гамма-излучения в системе контроля герметичности оболочек (КГО) тепловыделяющих элементов реакторов типа РБМК. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2005. №7.

2. Андрианов Т.В., Волков С.В., Володин В.П. Экспериментальное определение радиометрических и спектрометрических характеристик блоков детектирования БДРС-05Р и БДРС-05Р1. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2005. №8.

3. Андрианов Т.В., Волков С.В., Володин В.П., Кутелев А.С. Экспериментальное сравнение чувствительности устройства УПК-04Р к гамма-излучению точечных и объемных источников. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2006. №1.

4. Андрианов Т.В., Волков С.В., Володин В.П. Методы повышения достоверности обнаружения разгерметизации тепловыделяющих элементов реакторов РБМК-1000. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2006. №8.

5. Андрианов Т.В., Волков С.В., Володин В.П. Применение изотопных источников быстрых нейтронов для оценки чувствительности блоков детектирования БДРС-05Р к гамма-излучению высоких энергий. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2007. №5.

6. Андрианов Т.В., Волков С.В. Метод и приборная подсистема для прямого контроля выбросов инертных радиоактивных газов и радиойодов через вентиляционную трубу реакторов АЭС. // Экологические приборы и системы. 2007. №7.

7. Андрианов Т.В., Бирюков И.П., Бородуля Ю.Г., Волков С.В., Макаров В.В., Мирский Д.Е. Приборный контроль распространения радионуклидов по контурам циркуляции теплоносителя реактора РБМК-1000. // Приборы и

системы. Управление, контроль, диагностика. 2009. №1.

8. Андрианов Т.В. Методы повышения достоверности обнаружения разгерметизации тепловыделяющих элементов реакторов РБМК-1000. Научная сессия МИФИ-2009. Аннотация докладов. В 3 томах./Редкол. В.Н.Гребенев, В.И.Наумов и др. Том 1. М.; МИФИ, 2009. с.102

9. Андрианов Т.В., Волков С.В. Способ стабилизации энергетической шкалы многоканальных сцинтилляционных спектрометров гамма-излучения. Патент на изобретение № 2366979 от 10.09.09.