

В. И. Борисенко^{1,2}, Ю. Ф. Пионтковский², В. В. Горанчук¹

¹ *Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев*

² *Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев*

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛА ВНУТРИЗОННОГО ДЕТЕКТОРА НЕЙТРОНОВ

Линейное энерговыделение твэлов является одним из наиболее важных показателей безопасности и надежности эксплуатации топлива ВВЭР. В статье рассмотрена эволюция развития в системе внутрореакторного контроля реализации функции контроля энергораспределения по активной зоне ВВЭР. Показано, что требования к объему информации и точности определения энергораспределения в настоящее время существенно выросли по сравнению с первыми проектами ВВЭР. Представлены результаты численного моделирования в MCNP процесса формирования сигнала детектора прямого заряда (ДПЗ), который образуется в результате активации ядер эмиттера детектора под действием нейтронов, генерируемых в твэлах тепловыделяющих сборок (ТВС). Продемонстрировано, что основной вклад (~75 %) в сигнал ДПЗ обеспечивают твэлы ТВС, в которой расположен ДПЗ, а вклад твэлов смежных ТВС составляет ~25 %. Определен вклад различных участков твэлов, расположенных на разной высоте по отношению к уровню расположения самого ДПЗ. Результаты моделирования позволяют определить геометрический фактор, определяющий вклад твэлов в формирование сигнала ДПЗ не только от шести ближайших твэлов, что реализовано в настоящее время в системе внутрореакторного контроля, а от нескольких рядов твэлов, что повысит точность определения геометрического фактора. Получены результаты, указывающие на необходимость учета влияния спектральных характеристик нейтронного поля на сигнал ДПЗ.

Ключевые слова: линейное энерговыделение, восстановление энергораспределения, детектор прямого заряда, активация родиевого эмиттера, выгорание родиевого эмиттера.

В настоящее время все энергетические реакторы оснащены системами внутрореакторного контроля (СВРК). Задача СВРК – получение оперативной информации о распределении полей энерговыделения, температуры и других теплотехнических и ядерно-физических параметров внутри активной зоны реактора.

В первых проектах ВВЭР основное внимание уделялось контролю подогрева теплоносителя на выходе из тепловыделяющих сборок (ТВС), а внутрizonный контроль энергораспределений был незначительным. Так например, термопары на выходе из ТВС в ВВЭР-210 (349 ТВС) было установлено в 220 ТВС, а каналы нейтронных измерений (КНИ) с детекторами прямого заряда (ДПЗ) с родиевым эмиттером только в 12. Также в первых СВРК применяли ванадиевые КНИ (1-2 шт., длина ванадиевого ДПЗ равна высоте активной зоны), а количество родиевых ДПЗ в одном КНИ было 4 шт., равномерно расположенных по высоте активной зоны. Впоследствии перешли на 7 ДПЗ в КНИ. Количество КНИ в ВВЭР-440 (349 ТВС) увеличилось с 12 до 36, в ВВЭР-1000/В-320 (163 ТВС) установлено уже 64 КНИ. В процессе развития СВРК количество ТВС, оснащенных КНИ, увеличилось с ~ 5 до ~ 40 %. Это связано, во-первых, с необходимостью более детального определения полей энерговыделения при росте значений локальных энерговыделений в разных поколениях ВВЭР, а во-вторых, подтверждает важность задачи определения энергораспределения по объему актив-

ной зоны реактора для обеспечения безопасной эксплуатации реактора.

До внедрения КНИ в проектах ВВЭР энергораспределение по объему активной зоны определялось с помощью активационных детекторов на основе меди или стальной проволоки с добавлением марганца. Такие детекторы (проволоку) помещали в специальные измерительные каналы (в центральную трубку ТВС через крышку реактора), а после облучения и накопления изотопов (⁶⁴Cu и ⁵⁶Mn соответственно) извлекали из активной зоны. Распределение γ -активности по длине активационного детектора (проволоки) пропорционально энергораспределению по высоте измерительного канала (в т.ч. и ТВС) во время облучения.

Таким образом, в процессе эволюции СВРК подтверждено, что энергораспределение, в том числе и линейное энерговыделение (ЛЭВ) твэлов, является одним из важных показателей безопасности и надежности эксплуатации топлива ВВЭР. С ЛЭВ (Вт/см) непосредственно связаны и другие показатели энергонапряженности топлива в активной зоне: удельное энерговыделение в топливе (Вт/см³) и плотность теплового потока с поверхности твэла (Вт/см²). Задача надежного контроля ЛЭВ является наиболее важной среди задач контроля СВРК. При определении ЛЭВ ядерного топлива в реакторе особую роль занимает процедура согласования показаний ДПЗ СВРК с результатами нейтронно-физических расчетов. Этой процедуре предшествует решение

© В. И. Борисенко, Ю. Ф. Пионтковский, В. В. Горанчук, 2016

задачи корректного перехода от токов ДПЗ к ЛЭВ топлива. Обоснованность и экспериментальное подтверждение правильности решения задачи перехода от токов ДПЗ к ЛЭВ топлива в значительной мере определяет безопасную и экономичную работу реактора.

Особую остроту задача определения ЛЭВ в СВРК получила в последнее время в связи с внедрением новых топливных циклов и расширением номенклатуры применяемых видов топлива для формирования топливных загрузок, в том числе и разных производителей (Westinghouse), а также планы по использованию ВВЭР-1000 в маневренном режиме.

Контроль ЛЭВ в СВРК за период эксплуатации ВВЭР претерпел несколько модернизаций, вызванных, прежде всего, внедрением современных технических средств и прикладного программного обеспечения (ПО), а также повышением требований к точности определения ЛЭВ. В настоящее время в СВРК ВВЭР-1000 АЭС Украины для восстановления полей энерговыделений по объему активной зоны используются ПО «КРУИЗ» разработки РФ, а на блоках, на которых планируется внедрять топливо производства Westinghouse, внедряется ПО BEACON разработки Westinghouse. Отсутствие в Украине ПО собственной разработки будет приводить к проблемам в эксплуатации СВРК в будущем [1]. Для решения задачи разработки отечественного прикладного ПО СВРК, наряду с освоением программ подготовки нейтронно-физических констант (НФК) и программ расчета нейтронно-физических характеристик (НФХ) активной зоны ВВЭР-1000, необходимо решить задачу корректного учета и восстановления тока ДПЗ в зависимости от изменения параметров активной зоны: выгорания топлива, температуры и концентрации борной кислоты в теплоносителе, положения органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ) и др. Для решения такой задачи предлагается использовать разработанную в коде MCNP модель формирования тока ДПЗ. Аналогичные модели в коде MCNP были реализованы авторами статьи при разработке главы 8 «Ядерная безопасность» [2]. Валидация моделей ТВС ВВЭР-1000 в коде MCNP была проведена на обширной базе критических экспериментов, описание одного из базы критических экспериментов представлено в [3]. Дополнительно проводилось сравнение результатов, полученных на моделях критичности ТВС-1000 и ТВС-440 в кодах MCNP и SCALE [2]. Дополнительные материалы о валидации модели ТВС ВВЭР-1000 представлены в [4 - 6]. В работе [4] показано хорошее согласие в сравнении расчетных и эксперимен-

тальных данных по температурному коэффициенту реактивности ТВС ВВЭР-1000 различного обогащения. В работах [5, 6] представлены результаты определения параметров выгорания эмиттера ДПЗ, полученные по модели ТВС ВВЭР-1000 в коде MCNP, и отмечено хорошее согласие с параметрами выгорания родиевого эмиттера, которые используется в настоящее время в СВРК [7].

В рамках валидации модели ТВС ВВЭР-1000 в коде MCNP проведено сравнение спектральных параметров нейтронного потока в месте расположения ДПЗ, полученных в коде MCNP и в коде MCU, разработанного в НЦ «Курчатовский институт» [8].

Внедряемые в настоящее время СВРК нового поколения характеризуются следующими признаками:

- увеличено количество получаемой и обрабатываемой информации;
- высокое быстродействие;
- повышена надежность;
- дополнение функциональных возможностей новыми защитными и управляющими функциями;
- улучшенный пользовательский интерфейс и возможность полной архивации исходных данных;

В КНИ ВВЭР-1000 нейтронно-чувствительная часть ДПЗ – эмиттер, который представляет собой отрезок родиевой проволоки диаметров 0,48 мм, длиной 250 мм, шаг расположения по высоте ТВС 437,5 мм (в КНИ ВВЭР-440 длина детектора 200 мм, шаг расположения 305 мм).

ДПЗ функционально является источником тока, который возникает за счет электронов, которые образуются в нейтронно-чувствительной части детектора (эмиттере) при β -распаде, активированного под действием нейтронов ядра. Эмиттеры изготавливают из материалов, которые имеют большие сечения радиационного захвата и являются β -активными с небольшим периодом полураспада. Обычно используют ^{103}Rh , ^{51}V , ^{55}Mn .

Конструкционное исполнение ДПЗ: состоит из эмиттера и коллектора, между которыми находится изолятор. При облучении нейтронами детектора на ядрах эмиттера происходит реакция радиационного захвата. Образуется β -радиоактивный элемент, который излучает электроны, которые, проходя через изолятор, попадают на коллектор и создают во внешней цепи ток, регистрируемый в аппаратуре СВРК. В реакторах ВВЭР-1000 используются детекторы с родиевым эмиттером (рис. 1).

Выходной сигнал ДПЗ пропорционален плотности нейтронного потока в месте его расположения, который связан с энерговыделением в ближайших твэлах.

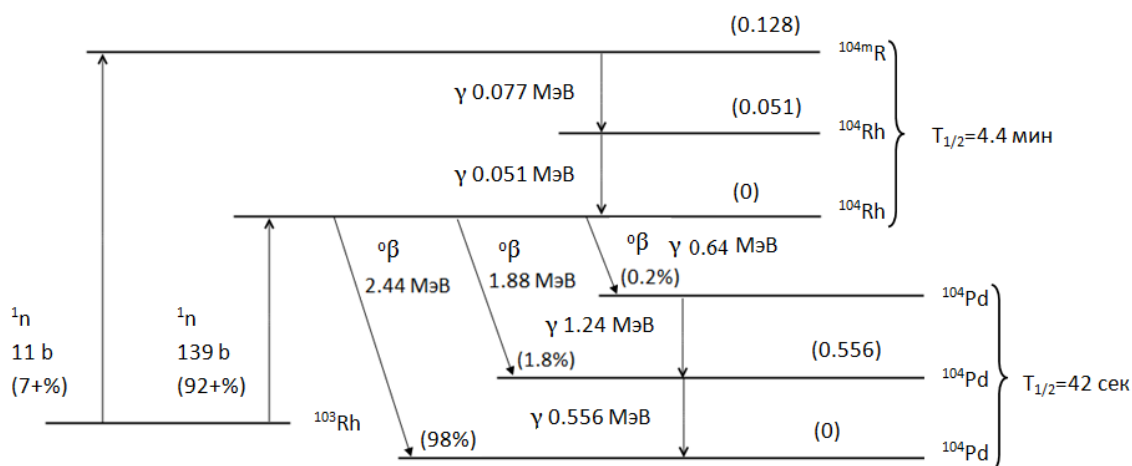


Рис. 1. Схема активации и распада ^{103}Rh .

Вклад в сигнал ДПЗ обусловлен следующими составляющими:

запаздывающий компонент – β -распад активированных ядер родия (см. рис. 1), составляет $92 \pm 95\%$ всего сигнала;

мгновенный компонент – эффект Комптона, связанный с испусканием жестких фотонов и образованием электронных пар, примерно $3 \pm 5\%$;

мгновенный компонент от реакторных фотонов, $\sim 1,5\%$;

запаздывающая фотонная составляющая, испускаемая продуктами деления ядерного топлива, $\sim 1\%$;

фоновый ток линии связи.

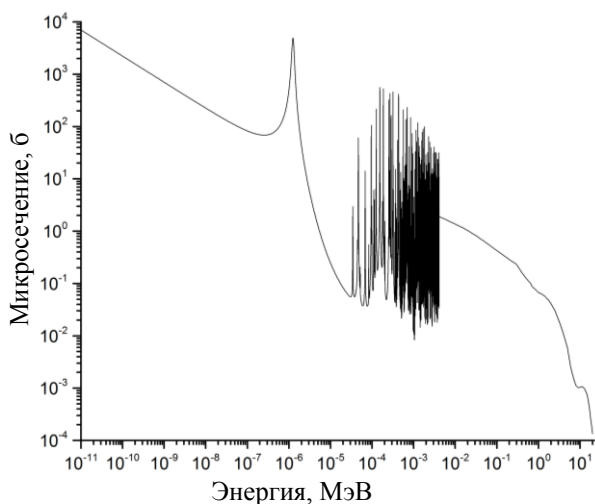


Рис. 2. Микросечение поглощения нейтронов на ^{103}Rh .

Сигнал ДПЗ зависит от спектра нейтронов. Это является следствием влияния на изменение микросечений поглощения ^{103}Rh как общего закона $1/V$, так и возможно разной степенью зависимости от энергии (скорости) нейтрона (отклонение от закона $1/V$, фактор Весткотта) микросечений образования ^{104m}Rh и ^{104}Rh (рис. 2). Это проявляется в результатах исследований составляющих тока ДПЗ в разные моменты топливной

кампании, а также на реакторах с различными характеристиками по параметрам теплового потока [9, 10].

Также необходимо учитывать, что на коэффициент перехода от тока ДПЗ к энерговыделению будет влиять различная энергетическая зависимость микросечений поглощения нейтронов в уране и плутонии, которая также по всему спектру не совпадает с энергетической зависимостью микросечений родия. Для учета такого различия необходимо дополнительно ввести спектральный коэффициент перехода от измеренного сигнала ДПЗ к энерговыделению в контролируемой детектором области активной зоны.

Все вышеперечисленные процессы должны быть учтены в коэффициентах перехода от энерговыделения в твэлах, окружающих ДПЗ, к току ДПЗ – геометрический фактор. Традиционно принято определять такой коэффициент перехода для шести ближайших твэлов. Полученные результаты позволяют определять коэффициент перехода для произвольного числа слоев твэлов, окружающих ДПЗ. Так, например, доля в сигнал ДПЗ от твэлов первого ряда от центральной трубки ТВС (шести ближайших твэлов) составляет $\sim 6\%$, а, например, от четырех рядов твэлов $\sim 36\%$.

В процессе работы реактора спектр нейтронов изменяется в основном за счет изменения концентрации борной кислоты в теплоносителе 1-го контура, а также за счет выгорания топлива и накопления продуктов деления. Изменяется также и чувствительность ДПЗ в первую очередь за счет выгорания ядер эмиттера, а также за счет изменения спектра нейтронов в реакторе.

Упрощенная схема определения ЛЭВ ТВС q_{ij} в месте размещения ДПЗ определяется по формуле

$$q_{ij} = a_{ij}(I_{ij} - b_j I_i^\phi),$$

где I_{ij} – значение тока j -го датчика ДПЗ в i -м

КНИ; I_i^ϕ – значение сигнала фонового тока в i -м КНИ; a_{ij} и b_j – постоянные коэффициенты, которые периодически рассчитываются в СВРК.

Коэффициенты a_{ij} зависят от изменения параметров, характеризующих состав активной зоны вблизи расположения ДПЗ: обогащения и выгорания топлива; температуры и давления теплоносителя; концентрации борной кислоты в теплоносителе 1-го контура.

Коэффициенты b_j определяют долю измеренного фонового тока I_i^ϕ , которая относится к j -му ДПЗ в i -м КНИ.

В КНИ первых поколений применялся общий фоновый проводник для всех ДПЗ, расположенных в КНИ [10, 11]. Для учета влияния фонового тока на сигнал i -го ДПЗ применялся алгоритм, учитывающий долю фонового тока, пропорциональную длине линии связи i -го ДПЗ и линейному энерговыделению на длине линии связи этого ДПЗ. В настоящее время каждый ДПЗ имеет как сигнальную, так и фоновую жилы, токи которых вычитаются аппаратно.

В ВВЭР-1000 проектом предусмотрены ограничения по линейному энерговыделению:

для слоев от низа активной зоны до ее середины – 448 Вт/см;

с середины активной зоны до верха активной зоны линейное уменьшение с реперной точкой на высоте 80 % от низа активной зоны – 360 Вт/см.

Возможности современной СВРК-М позволяют реализовать новые функции: защиту по локальным расчетным параметрам активной зоны – линейное энерговыделение твэлов и запас до кризиса теплообмена, которые должны быть реализованы в соответствии с требованиями НТД [12].

Для корректного решения задачи определения функции перехода от тока ДПЗ к ЛЭВ необходимо решить следующие подзадачи:

учет выгорания материала эмиттера ДПЗ в процессе его работы;

определить геометрический фактор, а именно вклад твэлов, окружающих ДПЗ, в сигнал ДПЗ;

определить влияние изменения спектра нейтронов в процессе работы реактора на сигнал ДПЗ;

определить влияние на сигнал ДПЗ изменения следующих параметров: выгорания топлива, концентрации борной кислоты в теплоносителе 1-го контура, температуры теплоносителя.

В середине 1990-х годов были разработаны алгоритмы расчета переходной функции для конкретных ТВС, применяемых в ВВЭР-1000 [11]. В настоящее время развитие и применение нейтронно-физических и вероятностных про-

грамм позволяют уточнить эти алгоритмы, а также использовать их для расчета переходной функции для новых типов топлива.

В настоящей статье, используя результаты моделирования в программе MCNP процесса формирования сигнала ДПЗ от нейтронов, генерируемых твэлами самой ТВС, в которой находится ДПЗ, а также твэлами соседних ТВС, рассмотрены некоторые задачи определения функции перехода от сигнала ДПЗ к линейному энерговыделению, в том числе:

количественно характеризующие влияние температуры теплоносителя и концентрации борной кислоты в теплоносителе 1-го контура на сигнал ДПЗ;

определяющие пределы пространственной чувствительности детектора к энерговыделению в твэлах ТВС.

Модель для численных расчетов построена на основном процессе формирования сигнала, а именно на процессе активации родиевого эмиттера под действием потока нейтронов. Для оценки влияния параметров активной зоны реактора на формирование сигнала в детекторе использовался специализированный код MCNP4C [13].

Для определения зоны чувствительности ДПЗ к нейтронам, генерируемым в окружающих твэлах, учитывая симметрию задачи для центральных ТВС, в модели достаточно учесть две соседние ТВС. А для моделирования сигнала ДПЗ достаточно рассмотреть область 60° сектора симметрии, в который попадают твэлы ТВС, где расположен ДПЗ, а также твэлы соседней ТВС. На рис. 3 изображен поперечный разрез моделируемой области, а также выделена расчетная область 60° сектора симметрии.

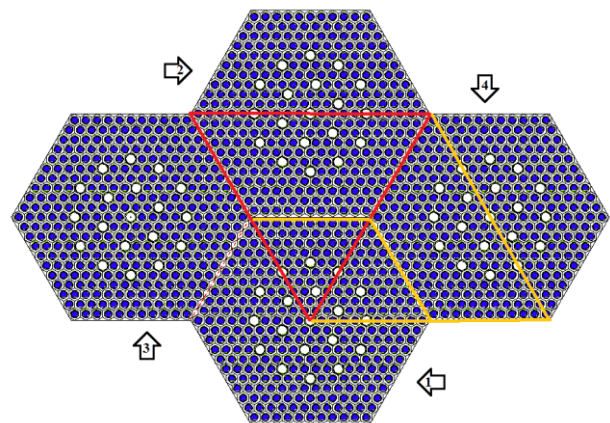


Рис. 3. Поперечный разрез моделируемой области ТВС.

Принимая во внимание симметрию модели в формировании сигнала ДПЗ в вертикальном направлении, при моделировании источником нейтронов был выбран участок ТВС 60° сектора

симметрии высотой 1250 мм – 5 значений высоты ДПЗ – 250 мм. Моделируемый сектор ТВС разбит по высоте на 5 зон по 250 мм каждая для определения дифференциального вклада в сигнал ДПЗ каждой зоны (рис. 4).

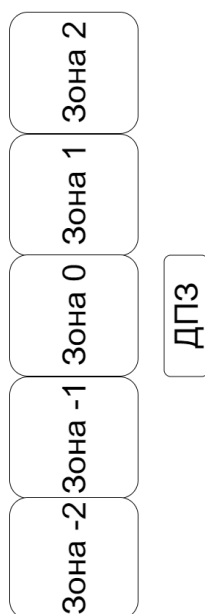


Рис. 4. Схема взаимного расположения зон ТВС и ДПЗ.

На рис. 5. представлена схема расположения ДПЗ и первый ряд окружающих твэлов. В табл. 1 приведены основные параметры модели ДПЗ и твэлов.

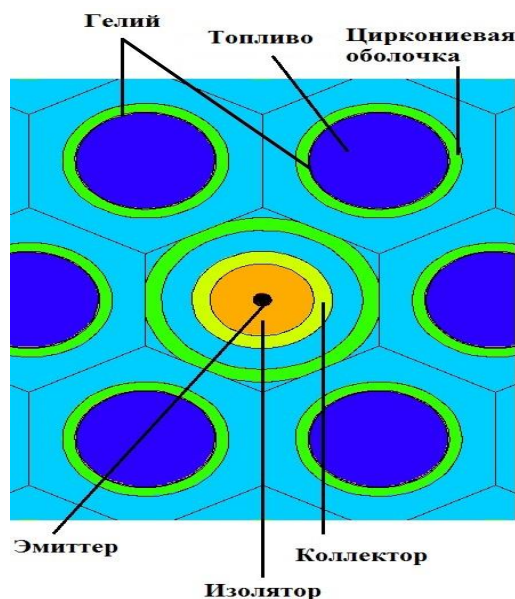


Рис. 5. Центральная часть ТВС с ДПЗ.

Таблица 1. Основные параметры модели ДПЗ и твэлов

Наименование параметра	ДПЗ			Твэл	
	эмиттер	изолятор	коллектор	таблетка	оболочка
Внутренний диаметр, мм	0	0,48	1,0	0	7,79
Наружный диаметр, мм	0,48	1,0	1,3	7,57	9,1
Длина, мм	250	250	250	3530	3530
Материал	Rh	Al ₂ O ₃	сталь	UO ₂ ,	Zr + 1 % Nb
Плотность, г/см ³	12,41	3,99	7,8	10,4	6,55

Шаг расположения твэлов 12,75 мм; шаг решетки треугольный.

На рис. 6 представлена общепринятая нумерация твэлов в ТВС. Далее в представлении некоторых результатов расчетов используется именно такая нумерация твэлов.

Цель моделирования – определить чувствительность модели формирования сигнала ДПЗ к изменению таких параметров реакторной установки, как температура теплоносителя и концентрация борной кислоты в теплоносителе.

Анализ результатов моделирования показал, что разработанная модель формирования сигнала ДПЗ позволяет получить необходимые коэффициенты перехода от регистрируемого тока ДПЗ к линейному энерговыделению «соседних» твэлов ТВС, в которой расположен КНИ.

Вклад в сигнал ДПЗ от твэлов соседних (смежных) ТВС составляет 25 - 30 %, в зависимости от температуры теплоносителя и концентрации борной кислоты. Поэтому основное внимание в представлении результатов расчета уделено вкладу от твэлов ТВС, в которой расположен ДПЗ.

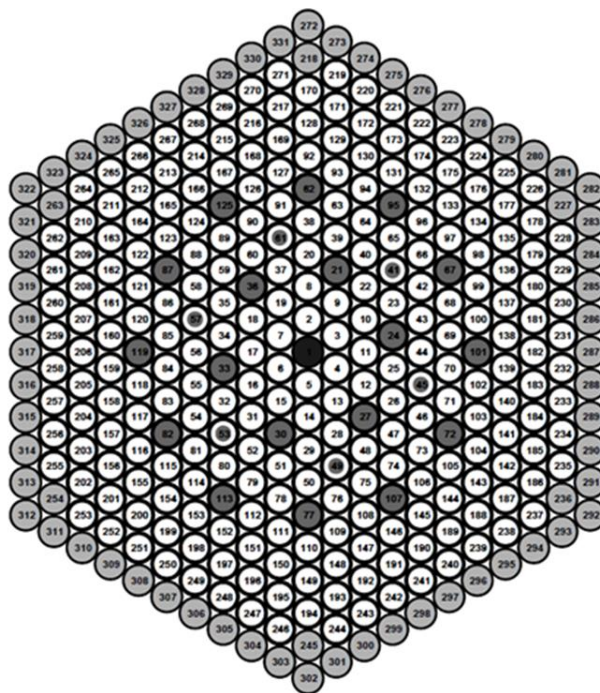


Рис. 6. Общепринятая нумерация твэлов в ТВС.

Проведенный анализ чувствительности модели формирования тока ДПЗ по отношению к исследуемым факторам влияния – концентрации борной кислоты в теплоносителе, а также температуры теплоносителя – показал, что модель позволяет надежно «фиксировать» влияние на ток ДПЗ изменения температуры теплоносителя на 1 °С, а концентрации борной кислоты на 0,1 г/кг. Таким образом, один из важных выводов анализа результатов моделирования: геометрический и спектральный факторы зависят от местоположения ДПЗ в КНИ (верх, низ). Также местоположение ДПЗ в КНИ будет влиять и на степень выгорания эмиттера [6], а в настоящее время в СВРК принята общая для всех ДПЗ модель учета выгорания эмиттера ДПЗ [7].

В работах [2, 5, 6] представлены данные по чувствительности модели к изменению размеров

эмиттера ДПЗ, а также к изменению размеров топливной таблетки, оболочки твэла и шагу расположения твэлов. Так например, уменьшение диаметра эмиттера на 0,048 мм приводит к уменьшению сигнала ДПЗ более чем на 20 %, а уменьшение внешнего диаметра таблетки на 0,1 мм приводит к увеличению коэффициента размножения нейтронов на 0,005. Данные по чувствительности модели к изменению размеров топливной таблетки приведены для случая «повреждения» оболочки твэла и заполнения водой зазора между оболочкой и топливной таблеткой [2].

На рис. 7 и 8 представлены результаты расчетов вклада от твэлов расчетной области в сигнал ДПЗ для различных состояний активной зоны по температуре теплоносителя и концентрации борной кислоты.

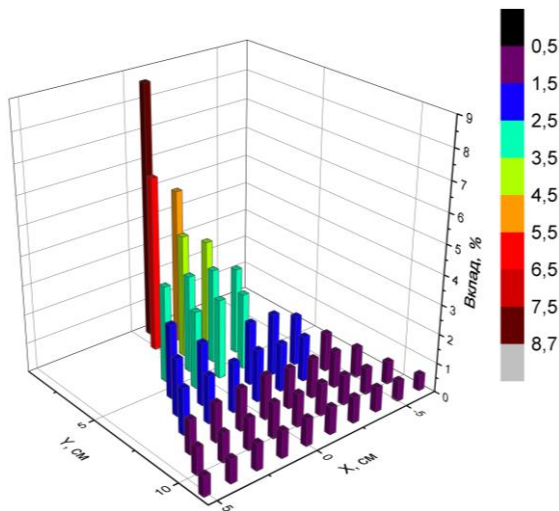


Рис. 7. Вклад в сигнал ДПЗ от твэлов ТВС-1 при температуре теплоносителя 290 °С и концентрации борной кислоты 0 г/кг. (См. цветной рисунок на сайте журнала.)

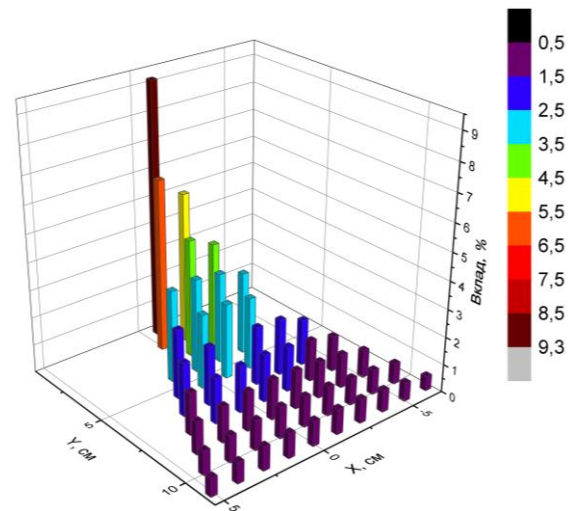


Рис. 8. Вклад в сигнал ДПЗ от твэлов ТВС-1 при температуре теплоносителя 290 °С и концентрации борной кислоты 5 г/кг. (См. цветной рисунок на сайте журнала.)

Распределение вклада в сигнал ДПЗ от зон по высоте ТВС, в которой расположен ДПЗ, представлено в табл. 2.

Таблица 2. Распределение вклада в сигнал ДПЗ от зон по высоте ТВС, %

Температура теплоносителя, °С	Концентрация борной кислоты, г/кг	Зона 0	Зона (-1 + 1)	Зона (-2 + 2)
290	0	77,81	21,91	0,28
290	5	78,70	21,03	0,26
320	0	77,04	22,63	0,33
320	5	77,83	21,86	0,31

На рис. 9 и 10 представлены вклады в сигнал ДПЗ от зон по высоте твэлов ТВС-1 и ТВС-2 соответственно.

На рис. 11 представлено изменение вклада от «среднего» твэла в зависимости от номера ряда твэла.

Суммарный вклад в сигнал ДПЗ от твэлов

дальней половины соседней ТВС менее 4 %. Таким образом, показано, что вклад от твэлов смежных с соседней ТВС не более 1 %, а от одиночного твэла порядка 0,001 %.

В табл. 3 представлена информация о вкладе в сигнал ДПЗ от рядов твэлов в ТВС-1 и в ТВС-2.

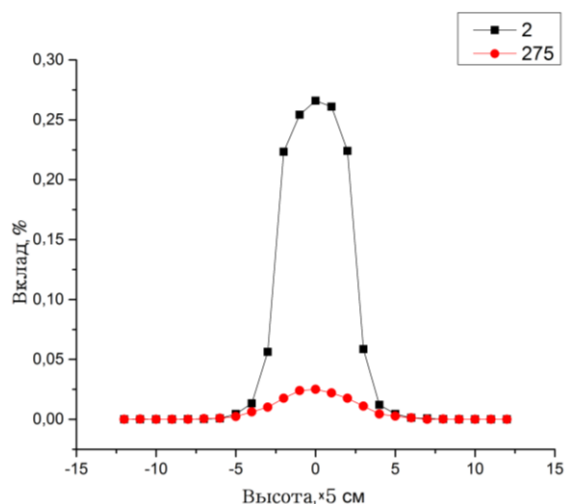


Рис. 9. Вклад в сигнал ДПЗ от 25 зон по высоте ТВС-1 от разных ТВЭЛов (указан номер ТВЭла в ТВС).

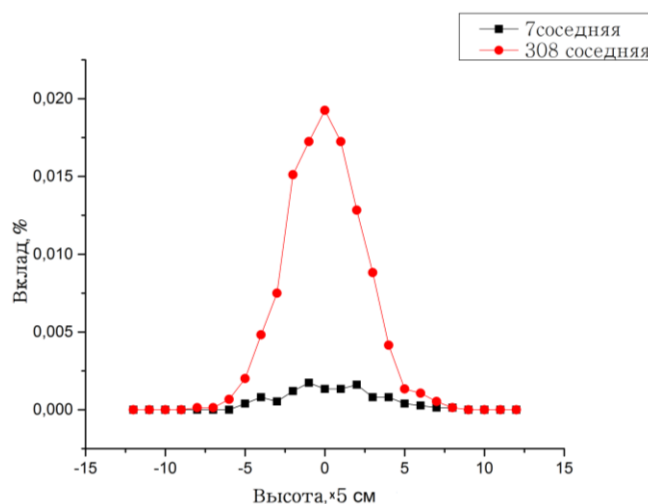


Рис. 10. Вклад в сигнал ДПЗ от 25 зон по высоте ТВС-2 от разных ТВЭЛов (указан номер ТВЭла в ТВС).

Таблица 3. Распределение вклада в сигнал ДПЗ по рядам ТВЭЛов в ТВС-1, в которой расположен ДПЗ, и смежной ТВС-2, %

ТВС	№ ряда в ТВС	Температура теплоносителя, °С			
		290		320	
		Концентрация борной кислоты, г/кг			
		0	5	0	5
ТВС-1	1	6,24	6,77	5,98	6,46
	2	8,08	8,57	7,68	8,12
	3	5,68	5,94	5,46	5,64
	4	9,18	9,46	8,86	9,06
	5	7,52	7,67	7,16	7,40
	6	7,23	7,20	7,11	7,13
	7	8,03	8,01	7,96	8,01
	8	7,51	7,49	7,48	7,37
	9	6,55	6,42	6,62	6,51
	10	5,81	5,69	5,89	5,74
ТВС-2	11	4,80	4,62	4,98	4,85
	10	4,21	4,00	4,35	4,23
	9	3,73	3,59	3,84	3,72
	8	3,23	3,01	3,34	3,14
	7	2,51	2,44	2,73	2,65
	6	2,12	1,98	2,28	2,13
	5	2,15	2,03	2,34	2,23
	4	1,52	1,45	1,67	1,59
	3	1,53	1,43	1,68	1,60
	2	1,34	1,26	1,49	1,42
1	1,03	0,96	1,10	1,01	

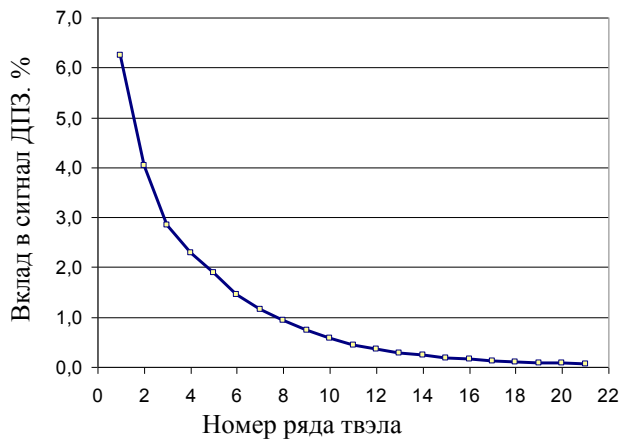


Рис. 11. Вклад в сигнал ДПЗ от одного «среднего» твэла ряда.

Энергетическая зависимость сечения радиационного захвата нейтронов ядрами ^{103}Rh определяет, что ДПЗ, размещенные в местах с равной тепловой мощностью участков ТВС, но с разным спектром нейтронов, будут генерировать разные токи - больший ток в более жестком спектре.

Изменение изотопного состава ядерного топлива и накопление изотопов плутония в течение топливной кампании также приводит к ужесточению спектра нейтронов, поэтому в задаче восстановления ЛЭВ важной является задача определения и учета спектрального фактора.

Выводы

Полученные результаты позволяют оценить факторы, влияющие на формирование сигнала ДПЗ и их изменение в процессе топливной кампании. Результаты моделирования позволяют повысить точность определения геометрического и спектрального факторов, существенно влияющих на точность восстановления линейного энерговыделения в ТВС.

Исследования на модели формирования тока ДПЗ проводятся по заказу ЧАО СНПО «Импульс», а результаты исследований были использованы при обосновании необходимости разработки СВРК отечественного производителя [14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Халимончук В.А. Функционирование программного обеспечения СВРК ВВЭР-1000 верхнего уровня в условиях реализации в Украине расширенной программы по диверсификации ядерного топлива // Ядерна та радіаційна безпека. - 2015. - Вип. 1. - С. 7 - 12.
2. Централизованное хранилище отработанного ядерного топлива реакторов ВВЭР Украины. Предварительный отчет по анализу безопасности. Глава 8 // Ядерная безопасность. - ГНИЦ СКАР, 2016. - С. 54.
3. VVER physics experiments: regular hexagonal (1.27 cm pitch) lattices of low-enriched U(2.4 wt.% ^{235}U)O₂ fuel rods in light water at different core critical dimensions / NEA/NSC/DOC/(95)03/IV. Vol. IV/ LEU-COMP-THERM-064. - P. 70.
4. Сапон М.М., Борисенко В.І. Визначення коефіцієнтів реактивності ВВЕР-1000 в програмному кодї MCNP // XXIII щоріч. наук. конф. Ін-ту ядерних дослідж. НАН України: Тези доп. (1 - 5 лютого 2016 р.). - К., 2016. - С. 107.
5. Піонтковський Ю.Ф., Борисенко В.І. Вплив параметрів активної зони ВВЕР-1000 на формування сигналу ДПЗ // XXIII щоріч. наук. конф. Ін-ту ядерних дослідж. НАН України: Тези доп. (1 - 5 лютого 2016 р.). - К., 2016. - С. 104.
6. Піонтковський Ю.Ф., Борисенко В.І. Врахування вигорання ДПЗ в задачі відновлення енергорозподілу по активній зоні ВВЕР-1000 // V междунар. науч.-практ. конф. «Повышение безопасности и эффективности атомной энергетики»: Сб. докл. (Одесса, Украина, 5 - 9 сент. 2016 г.) - Одесса, 2016.
7. Цимбалов С.А. Характеристики родиевого детектора нейтронов ДПЗ-1М. - М., 1984. - 16 с. - (Препр. / ИАЭ-3899/4).
8. Шаманин И.В., Киселев А.В., Лызко В.А. Контроль поля энерговыделения в процессе эксплуатации ядерного реактора с помощью детекторов прямого заряда // Изв. Томск. политехн. ун-та. - 2010. - Т. 316, № 2. - С. 67 - 71.
9. Борисенко В.І. Пространственные эффекты реактивности, обусловленные изменением теплогидравлических и нейтронно-физических параметров активной зоны водо-водяного энергетического реактора: дис. ... канд. техн. наук / НПО ЦКТИ. - Л., 1991. - С. 136.
10. Брагин В.А., Батенин И.В., Голованов М.Н. и др. Системы внутриреакторного контроля АЭС с ВВЭР. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - С. 128.
11. Цимбалов С.А., Шикалов В.Ф., Крейко А.В. Испытания системы внутриреакторного контроля при пуске АЭС с реактором ВВЭР-440. - М., 1974. - 24 с. - (Препр. / ИАЭ-3050).
12. Правила ядерної безпеки реакторних установок атомних станцій з реакторами з водою під тиском. НП 306.2.145-2008.
13. MCNPTM - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C. Manual / Ed. by J. F. Briesmeister. - LA-13709-M, 2000. - 898 p. - (Documentation for CCC-700/MCNP4C Data Package, Sec. 4).
14. НТС ГП НАЭК «Энергоатом». Разработка национального расчетного комплекса СВРК-М2. Протокол № 3 от 16.11.2016.

В. І. Борисенко^{1,2}, Ю. Ф. Піонтковський², В. В. Горанчук¹

¹ Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Київ

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ СИГНАЛУ ВНУТРІШНЬОЗОННОГО ДЕТЕКТОРА НЕЙТРОНІВ

Лінійне енерговиділення твєлів є одним із найбільш важливих показників безпеки та надійності експлуатації палива ВВЕР. У статті розглянуто еволюцію розвитку в системі внутрішньореакторного контролю реалізації функції контролю енергорозподілу по активній зоні ВВЕР. Показано, що вимоги до обсягу інформації і точності визначення енергорозподілу в даний час істотно зросли в порівнянні з першими проектами ВВЕР. Представлено результати чисельного моделювання в MCNP процесу формування сигналу детектора прямого заряду (ДПЗ), який утворюється в результаті активації ядер емітера детектора під дією нейтронів, що генеруються у твєлах тепловиділяючої збірки (ТВЗ). Продемонстровано, що основний внесок (~75 %) у сигнал ДПЗ забезпечують твєли ТВЗ, в якій розташований ДПЗ, а внесок твєлів суміжних ТВЗ становить ~25 %. Визначено внесок різних ділянок твєлів, розташованих на різній висоті по відношенню до рівня розташування самого ДПЗ. Результати моделювання дозволяють визначити геометричний фактор, який визначає внесок твєлів у формування сигналу ДПЗ не тільки від шести найближчих твєлів, що реалізовано в даний час у системі внутрішньореакторного контролю, а від декількох рядів твєлів, що підвищить точність визначення геометричного фактора. Отримано результати, що вказують на необхідність урахування впливу спектральних характеристик нейтронного поля на сигнал ДПЗ.

Ключові слова: лінійне енерговиділення, відновлення енергорозподілу, детектор прямого заряду, активація родієвого емітера, вигоряння родієвого емітера.

V. I. Borysenko^{1,2}, Yu. F. Piontkovskiy², V. V. Goranchuk¹

¹ Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

² Nuclear Physics Department, Taras Shevchenko National University, Kyiv

MODEL OF FORMATION OF IN-CORE NEUTRON DETECTOR SIGNAL

Fuel rods linear power rate is one of the most important indicators of safety and operating reliability of VVER fuel. The article describes the evolution of implementation of in-core monitoring system (ICMS) power distribution control function for VVER core. It is shown that requirements for the data and accuracy of determining the power distribution have significantly increased in comparison with the first VVER projects. This work presents results of MCNP numerical simulations of the signal formation in the Self-Powered Neutron Detector (SPND), which is resulted from the activation of emitter's nuclei under the neutron irradiation. It has been demonstrated that the main contribution (~75 %) to the SPND signal provide fuel rods of fuel assembly in which SPND is located, and the fuel rods of adjacent fuel assemblies contribute ~25 %. Also, the height-dependent contribution of fuel rod to SPND signal was determined. The simulation results allow calculation of the geometric factor, which determines the contribution of fuel elements to SPND signal, taking into account not only six closest fuel rods, as implemented in the ICMS now, but few adjacent rows of fuel rods. This approach will improve the accuracy of the geometric factor calculation. The obtained results indicate the need to consider the effect of the spectral characteristics of neutron field on the SPND signal.

Keywords: linear power rate, reconstruction of power distribution, self-powered neutron detector, activation of rhodium emitter, burning of rhodium emitter.

REFERENCES

1. *Khalimonchuk V.A.* Operation Software ICMS top level of VVER-1000 under implementation in Ukraine of the expanded program on diversification of nuclear fuel // *Yaderna ta radiatsiina bezpeka (Nuclear and Radiation Safety)*. - 2015. - Iss. 1. - P. 7 - 12. (Rus)
2. *Central Spent Fuel Storage Facility.* Preliminary safety analysis report. Chapter 8 // *Yadernaya bezopasnost' (Nuclear safety)*. - SSIC CSER, 2016. - P. 54. (Rus)
3. *VVER physics experiments: regular hexagonal (1.27 cm pitch) lattices of low-enriched U(2.4 wt.% 235U)O₂ fuel rods in light water at different core*
4. *Sapon M.M., Borysenko V.I.* Determination of reactivity coefficients VVER 1000 in the code MCNP // *XXIII Annual Sci. Conf. of the Institute for Nucl. Res. of NAS of Ukraine: Abstracts (1 - 5 Feb. 2016)*. - Kyiv, 2016. - P. 107. (Ukr)
5. *Piontkovskiy Yu.F., Borysenko V.I.* Influence of parameters of the core VVER-1000 to initiate a signal SPND // *XXIII Annual Sci. Conf. of the Institute for Nucl. Res. of NAS of Ukraine: Abstracts (1 - 5 Feb. 2016)*. - Kyiv, 2016. - P. 104. (Ukr)
6. *Piontkovskiy Yu.F., Borysenko V.I.* Accounting emit-

- ter burnup od SPND in the problem of reconstructing the energy distribution on the core of VVER-1000/ V Int. Sci. and Practical Conf. "Safety and Efficiency of Nuclear Energy" (Odessa, Ukraine, 5 - 9 Sept. 2016). - Odessa, 2016. (Ukr)
7. *Tsimbalov S.A.* Features rhodium neutron detector DPZ-1M. - Moskva, 1984. - 16 p. - (Prepr. / IAE-3899/4). (Rus)
 8. *Shamanin I.V., Kiselev A.V., Lyzko V.A.* Control of energy distributions in the operation of a nuclear reactor using a self-powered neutron detector // *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta.* - 2010. - Vol. 316, No. 2. - P. 67 - 71. (Rus)
 9. *Borysenko V.I.* Spatial effects of the reactivity of a change in thermal-hydraulic and neutron-physical parameters of the VVER core: Thesis of Candidate of Science (05.14.03) NPO CKTI. - Leningrad, 1991. - P.136. (Rus)
 10. *Bragin V.A. Batenin I.V., Golovanov M.N. et al.* In-core Monitoring System of NPP with VVER. - Moskva: Energoatomisdat, 1987. - P. 128. (Rus)
 11. *Tsimbalov S.A., Shikalov V.F., Craiko A.V.* Tests of in-core monitoring system at start-up nuclear power plants with VVER-440. - Moskva, 1974. - 24 p. - (Prepr. / IAE-3050). (Rus)
 12. *Rules* of nuclear safety of reactor units of nuclear power plants with pressurized water reactors. NP 306.2.145-2008. (Ukr)
 13. MCNPTM – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C. Manual / Ed. by J. F. Briesmeister. - LA-13709-M, 2000. - 898 p. - (Documentation for CCC-700/MCNP4C Data Package, Sec. 4).
 14. NTS NNEGC "Energoatom". Development of a national settlement complex ICMS-M2. Protocol No. 3 on 11/16/2016. (Rus)

Надійшла 25.11.2016
Received 25.11.2016