

**В. И. Борисенко<sup>1,2</sup>, Ю. Ф. Пионтковский<sup>2</sup>, В. В. Горанчук<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Лысогорская, 12, Киев, 03028, Украина

<sup>2</sup>Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, просп. акад. Глушкова, 4, Киев, 03022, Украина

## ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ РОДИЕВОГО ЭМИТТЕРА ДЕТЕКТОРА ПРЯМОГО ЗАРЯДА

Представлены результаты численного моделирования в коде MCNP процесса формирования сигнала детектора прямого заряда (ДПЗ), который образуется в результате активации ядер эмиттера детектора под действием нейтронов, генерируемых в твэлах ТВС. Для учета неравномерности выгорания эмиттера по радиусу исследования проводились на модели, в которой эмиттер разделен на 10 равных по толщине слоев. Продемонстрировано, что основной вклад ~88 % в сигнал ДПЗ обеспечивают четыре периферийных слоя эмиттера. Определен вклад различных участков эмиттера в формирование сигнала ДПЗ в процессе выгорания топлива в течение срока эксплуатации ДПЗ в системе внутриреакторного контроля (СВРК). Результаты моделирования позволяют определить сигнал ДПЗ при изменении в течение топливной кампании спектральных характеристик нейтронного потока в месте расположения ДПЗ. Исследована и предложена модель ДПЗ большей нейтронной чувствительности, в которой, тем не менее, используется меньшее количество дорогостоящего топлива.

*Ключевые слова:* детектор прямого заряда, активация родиевого эмиттера, выгорание родиевого эмиттера, модель ДПЗ, спектр нейтронов.

### Введение

В ВВЭР линейное энерговыделение (ЛЭВ) твэлов является важным эксплуатационным показателем безопасности и надежности эксплуатации топлива. ЛЭВ (Вт/см) однозначно определяет и другие важные показатели энергонапряженности топлива в активной зоне: удельное энерговыделение в топливе (Вт/см<sup>3</sup>) и плотность теплового потока с поверхности твэла (Вт/см<sup>2</sup>). Эти параметры используются для определения критического теплового потока в задаче «запас до кризиса теплообмена», а также для определения температуры топлива и оболочки твэла – важных параметров безопасности.

В СВРК ВВЭР-1000 ЛЭВ определяется по сигналам 448 детекторов прямой зарядки (ДПЗ): 64 канала нейтронных измерений (КНИ), каждый КНИ состоит из 7 ДПЗ, равномерно расположенных по высоте КНИ [1]. При определении ЛЭВ твэлов в СВРК важное значение отводится подтверждению корректности решения задачи перехода от токов ДПЗ к ЛЭВ. Такая задача решается на основе периодически проводимой в СВРК процедуры согласования показаний ДПЗ с результатами нейтронно-физических расчетов [2, 3].

Задача определения ЛЭВ в СВРК нового поколения является весьма важной в настоящее время в связи с внедрением на ВВЭР-1000 новых топливных циклов и расширением номенклатуры применяемых видов топлива для формирования топливных загрузок, в том числе и разных производителей (ТВЭЛ, Wesninghouse), а также планы по использованию ВВЭР-1000 в маневренном режиме.

### Анализ работ по модели ДПЗ

ДПЗ конструктивно представляет собой коаксиальную стальную оболочку, внутри которой расположен родиевый эмиттер, а пространство между ними заполнено изолятором Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (в некоторых моделях ДПЗ изолятор MgO) [4]. Нейтронно-чувствительная часть ДПЗ для ВВЭР-1000 представляет собой родиевую (<sup>103</sup>Rh) проволоку диаметром 0,48 мм, длиной 250 мм, шаг расположения по высоте ТВС 437,5 мм.

Функционально ДПЗ - это источник электронов, которые образуются в эмиттере при β-распаде изотопа <sup>104</sup>Rh, который, в свою очередь, образуется в результате реакции радиационного захвата нейтронов на изотопе <sup>103</sup>Rh (рис. 1).

Ток ДПЗ пропорционален плотности нейтронного потока (ПНП) в месте его расположения, а ПНП, в свою очередь, определяет энерговыделение в твэлах.

Ток ДПЗ создается электронами, образуемыми следующими компонентами:

запаздывающим компонентом - β-распадом <sup>104</sup>Rh;

мгновенным компонентом - эффектом Комптона, связанным с испусканием жестких фотонов и образованием электронных пар;

мгновенным компонентом от реакторных фотонов;

© В. И. Борисенко, Ю. Ф. Пионтковский, В. В. Горанчук, 2017

запаздывающим компонентом от фотонов, испускаемых продуктами деления ядерного топлива; фоновым током линии связи.

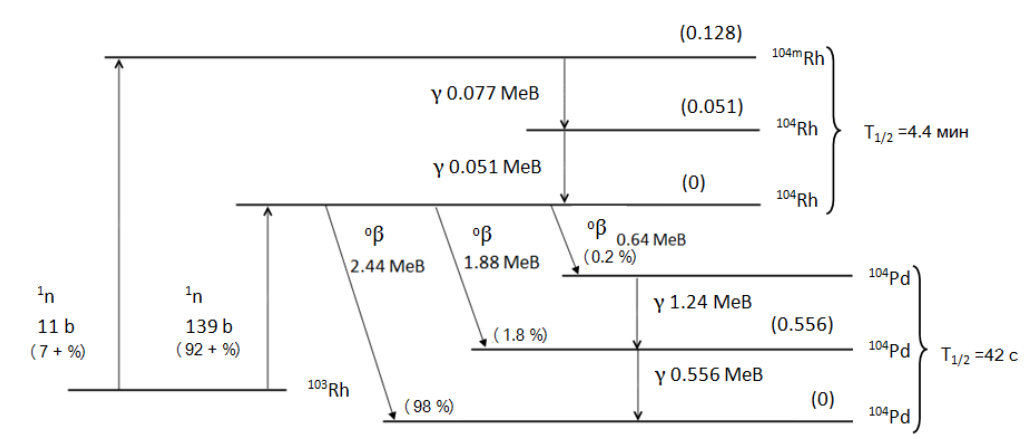


Рис. 1. Схема активации и распада  $^{103}\text{Rh}$ .

Ток ДПЗ зависит от ПНП, а также от сечения радиационного захвата нейтронов ядрами эмиттера детектора (см. рис. 1). Поэтому очевидно, что ток ДПЗ существенно зависит от энергетического спектра нейтронов [5, 6].

В связи с тем, что переходная функция от тока ДПЗ к ЛЭВ зависит от спектра нейтронов, а также учитывая тот факт, что в связи с накоплением плутония в топливе, который имеет существенно отличающуюся от урана энергетическую зависимость микросечения деления, очевидно, что спектральный фактор необходимо учитывать в переходной функции [3, 5].

В работе [3] отмечено, что переходная функция от тока ДПЗ к ЛЭВ не перекалибровывается в процессе эксплуатации, а рассчитывается отдельно для каждого сорта ТВС ВВЭР-1000. Применение современных нейтронно-физических и электронно-фотонных программ, в частности MCNP [7], позволяет уточнить переходную функцию от тока ДПЗ к ЛЭВ [8], а также определить, что и выгорание ДПЗ зависит от местоположения ДПЗ по высоте активной зоны [9].

Такая модель работы ДПЗ в ВВЭР разработана [8], основные параметры ДПЗ см. табл. 1, а в настоящей статье представлены результаты новых исследований на модели, в частности, учитывающие зависимость выгорания эмиттера ДПЗ от спектра нейтронов в месте установки ДПЗ в ВВЭР.

Таблица 1. Основные параметры модели ДПЗ и твэл

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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	сталь	UO <sub>2</sub>	Zr+ 1% Nb
Плотность, г/см <sup>3</sup>	12,41	3,99	7,8	10,4	6,55

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

Проведенный анализ чувствительность модели формирования тока ДПЗ по отношению к спектральному фактору показал [8], что модель «чувствительна» как к изменению температуры теплоносителя, так и к изменению концентрации борной кислоты. Поэтому геометрический и спектральный факторы переходной функции зависят от местоположения ДПЗ в КНИ (верх, низ), а также от выгорания топлива и изменения концентрации борной кислоты в теплоносителе 1-го контура в течение топливной кампании. Соответственно и местоположение ДПЗ в КНИ будет влиять и на параметры выгорания эмиттера [5, 9]. Принимая во внимание, что в настоящее время в СВРК принята общая для всех ДПЗ модель учета выгорания эмиттера ДПЗ [10], в перспективной СВРК должна быть реализована новая модель выгорания ДПЗ, учитывающая, что основная часть сигнала ДПЗ формируется в эпитепловой части по энергии нейтронов, вследствие наличия сильного резонанса в сечении поглощения  $^{103}\text{Rh}$  при 1,257 эВ (рис. 2).

Разработанная в коде MCNP модель формирования тока ДПЗ прошла дополнительную валидационную проверку:

на обширной базе критических экспериментов, описание одного из базы критических экспериментов представлено в [11];

при сравнении результатов, полученных на моделях критичности ТВС-1000 и ТВС-440 в кодах MCNP и SCALE при разработке главы 8 «Ядерная безопасность» [12];

при сравнении расчетных и экспериментальных данных по температурному коэффициенту реактивности ТВС ВВЭР-1000 различного обогащения [13];

при определении параметров выгорания эмиттера ДПЗ, полученных по модели ТВС ВВЭР-1000 в MCNP с параметрами выгорания родиевого эмиттера, которые используется в настоящее время в СВРК [5].

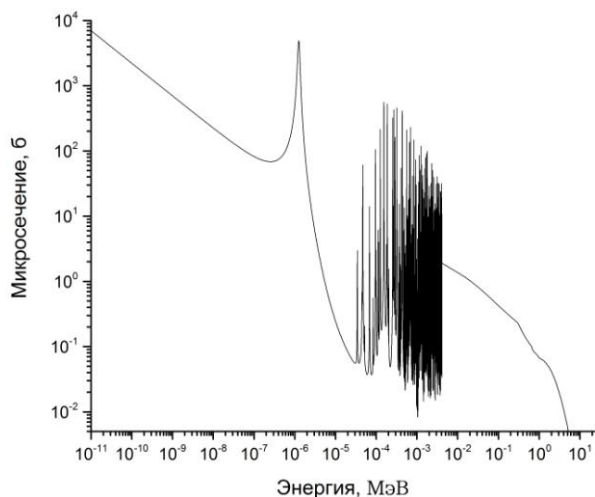


Рис. 2. Микросечение поглощения нейтронов на  $^{103}\text{Rh}$ .

### Результаты моделирования

Представлены результаты моделирования выгорания эмиттера по слоям в течение четырех топливных кампаний. Источник нейтронов – нейтроны генерируются твэлами двух ТВС: одна ТВС, в которой расположен ДПЗ, вторая ТВС соседняя (рис. 3).

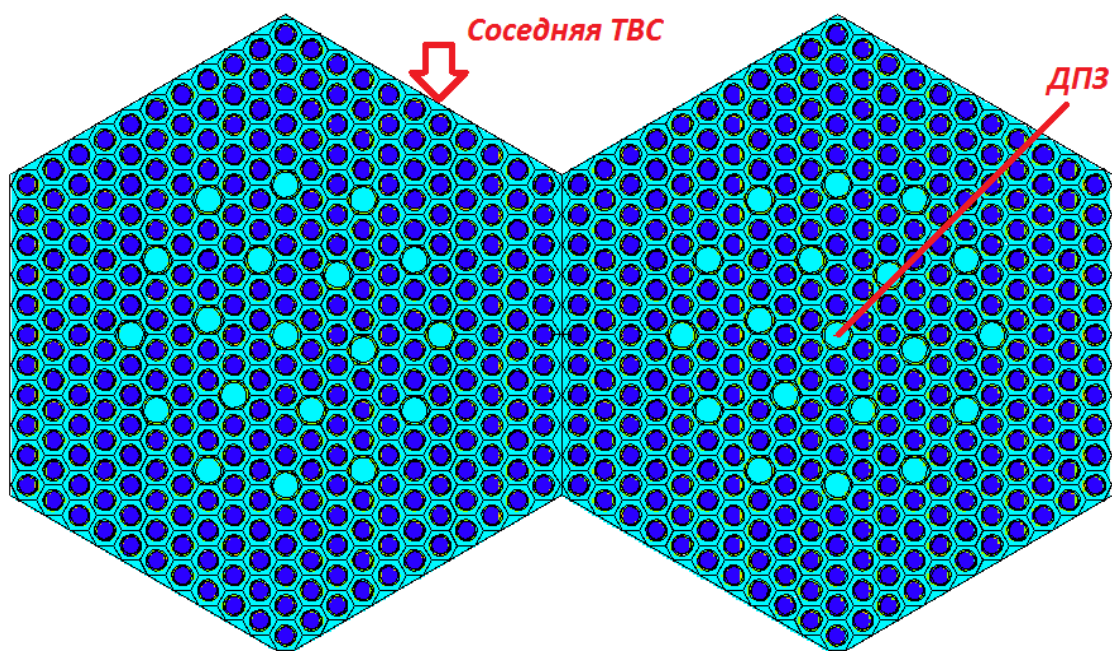


Рис. 3. Расчетная схема формирования сигнала ДПЗ от двух ТВС.

Нейтроны генерируются равномерно по всему объему твэла, распределение, генерируемых нейтронов по энергии, соответствует распределению Уатта.

В результате моделирования для каждого слоя эмиттера определено среднее количество реакций радиационного захвата в объеме эмиттера –  $k_1$  на один генерируемый в модели нейтрон.

В табл. 2 представлены значения  $k_1$  в зависимости от местоположения ДПЗ в активной зоне по высоте ТВС (низ – 290 °С, середина – 305 °С и верх – 320 °С), а также в зависимости от концентрации борной кислоты в теплоносителе 1-го контура (6 г/кг – начало, 3 г/кг – середина, 0 г/кг – конец топливной кампании).

Источник электронов равномерно распределен по всему объему эмиттера (в модели эмиттер поделен на 10 равных по толщине слоев). Спектр электронов соответствует спектру  $^{104}\text{Rh}$  (см. рис. 1). В результате для каждого слоя эмиттера получена доля электронов –  $k_2$ , которые попадают на коллектор ДПЗ при вылете одного усредненного по спектру и области, из которой вылетают электроны (табл. 3).

**Таблица 2. Значения  $k_1$  для ДПЗ с разным высотным расположением в КНИ в зависимости от концентрации борной кислоты в теплоносителе**

	$k_1$		
	290	305	320
0	$5,33 \cdot 10^{-4}$	$5,39 \cdot 10^{-4}$	$5,42 \cdot 10^{-4}$
3	$5,12 \cdot 10^{-4}$	$5,19 \cdot 10^{-4}$	$5,25 \cdot 10^{-4}$
6	$4,99 \cdot 10^{-4}$	$5,07 \cdot 10^{-4}$	$5,12 \cdot 10^{-4}$

**Таблица 3. Значения  $k_2$  в зависимости от номера слоя эмиттера**

№ слоя	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$k_2$	0,0081	0,0243	0,0403	0,0577	0,0754	0,0944	0,1175	0,1441	0,1783	0,2599

Для определения параметров выгорания эмиттера ДПЗ в течение всего срока эксплуатации в ВВЭР была смоделирована работа ДПЗ в течение четырех топливных кампаний, каждая продолжительностью 300 эффективных суток (эф. сут). В каждой топливной кампании изменение концентрации борной кислоты в теплоносителе 1-го контура учитывалось дискретно: от 0 до 100 эф. сут – 6 г/кг, от 100 до 200 эф. сут – 3 г/кг, от 200 до 300 эф. сут – 0 г/кг.

В табл. 4 представлены данные по выгоранию каждого слоя эмиттера в течение четырех топливных кампаний для ДПЗ, расположенного в середине по высоте активной зоны.

**Таблица 4. Выгорание эмиттера (%) по слоям в зависимости от времени работы ДПЗ при температуре теплоносителя 305 °С**

Эф. сут	Номер слоя эмиттера									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
100	3,7	3,7	3,7	3,8	3,8	3,9	4,1	4,4	4,8	6,2
200	7,5	7,5	7,5	7,6	7,7	7,9	8,4	8,9	9,7	12,6
300	11,4	11,4	11,4	11,6	11,8	12,1	12,7	13,6	14,8	19,3
400	15,1	15,1	15,0	15,4	15,6	16,0	16,9	17,9	19,6	25,5
500	18,9	18,9	18,8	19,2	19,6	20,0	21,1	22,4	24,5	31,9
600	22,9	22,9	22,7	23,3	23,6	24,2	25,5	27,1	29,6	38,6
700	26,5	26,5	26,4	27,0	27,5	28,1	29,6	31,5	34,4	44,8
800	30,3	30,3	30,2	30,9	31,4	32,1	33,9	36,0	39,3	51,2
900	34,3	34,3	34,1	34,9	35,5	36,3	38,2	40,7	44,4	57,9
1000	38,0	38,0	37,8	38,6	39,3	40,2	42,4	45,0	49,2	64,1
1100	41,8	41,8	41,6	42,5	43,2	44,3	46,6	49,5	54,1	70,5
1200	45,7	45,7	45,5	46,5	47,3	48,4	51,0	54,2	59,2	77,2

В табл. 5 и 6 представлены данные по выгоранию каждого слоя эмиттера на конец каждой из четырех топливных кампаний для ДПЗ, внизу и вверху активной зоны соответственно.

Таблица 5. Выгорание эмиттера (%) по слоям в зависимости от времени работы ДПЗ при температуре теплоносителя 290 °С

Эф. сут	Номер слоя эмиттера									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
300	11,3	11,3	11,2	11,5	11,7	11,9	12,6	13,4	14,6	19,0
600	22,5	22,5	22,4	22,9	23,3	23,9	25,1	26,7	29,2	38,1
900	33,8	33,8	33,6	34,4	35,0	35,8	37,7	40,1	43,8	57,1
1200	45,1	45,1	44,9	45,9	46,6	47,8	50,3	53,5	58,4	76,1

Таблица 6. Выгорание эмиттера (%) по слоям в зависимости от времени работы ДПЗ при температуре теплоносителя 320 °С

Эф. сут	Номер слоя эмиттера									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
300	11,5	11,5	11,5	11,7	11,9	12,2	12,9	13,7	14,9	19,5
600	23,1	23,1	22,9	23,5	23,9	24,4	25,7	27,3	29,9	38,9
900	34,6	34,6	34,4	35,2	35,8	36,6	38,6	41,0	44,8	58,4
1200	46,1	46,1	45,9	46,9	47,7	48,9	51,5	54,7	59,7	77,9

Ниже представлены данные по зарядам, сгенерированным каждым слоем эмиттера (табл. 7) и эмиттером в целом (табл. 8) для разных моментов в течение четырех топливных кампаний, а также в зависимости от температуры теплоносителя в месте расположения ДПЗ.

Таблица 7. Заряд (Кл), сгенерированный каждым слоем эмиттера в течение четырех топливных кампаний

Эф. сут	Номер слоя эмиттера									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
300	0,30	0,90	1,49	2,13	2,78	3,49	4,34	5,32	6,59	9,60
600	0,60	1,79	2,98	4,26	5,57	6,97	8,68	10,64	13,17	19,20
900	0,90	2,69	4,47	6,39	8,35	10,46	13,02	15,97	19,76	28,80
1200	1,20	3,59	5,95	8,52	11,14	13,95	17,36	21,29	26,34	38,40

Таблица 8. Заряд (Кл), сгенерированный эмиттером в зависимости от его местоположения в КНИ

Т, °С	Эф. сут							
	0	100	300	500	700	900	1100	1200
290	0,00	11,94	36,94	61,13	85,82	110,83	135,01	147,77
305	0,00	12,12	37,46	62,01	87,04	112,37	136,92	149,82
320	0,00	12,26	37,80	62,61	87,85	113,39	138,21	151,19

На рис. 4 представлены данные зависимости выгорания эмиттера от величины сгенерированного им заряда, полученные по нашей модели, и по данным Цимбалова [10] и Курченкова [3].

При больших зарядах, сгенерированных эмиттером ДПЗ, отличия в значениях выгорания эмиттера для разных моделей [3, 8, 10] может составлять более 5 %, что существенно скажется на точности восстановления полей энерговыделения в СВРК.

### Модель ДПЗ с тремя эмиттерами

На основе разработанной модели формирования тока в ДПЗ были проведены исследования по проектированию ДПЗ «альтернативной» конструкции. Цель такого исследования обоснование возможности создания ДПЗ меньшей себестоимости, без потери или даже улучшения нейтронной чувствительности.

Известно, что значительную часть стоимости ДПЗ формирует цена материала эмиттера – родия. Родий – один из самых дорогих, встречающихся в природе элементов. Так, например, его рыночная стоимость на 31 января 2017 г. составляла 27,17 \$/г, а, например, в 2008 г. его цена была более 300 \$/г. Поэтому задача уменьшения родиевой составляющей в стоимости ДПЗ является актуальной.

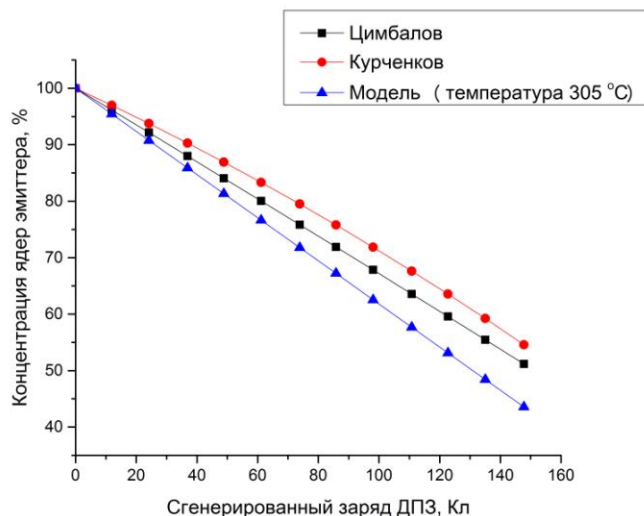


Рис. 4. Зависимость выгорания эмиттера от величины сгенерированного им заряда по модели [8], по моделям Цимбалова [10] и Курченкова [3].

Был смоделирован ДПЗ с тремя отдельными эмиттерами меньшего диаметра, чем у стандартного ДПЗ-1М.

Здесь представлены результаты моделирования такого ДПЗ с тремя эмиттерами - диаметр каждого 0,0288 см. Эмиттеры расположены в углах равностороннего треугольника, расстояние между центрами эмиттеров 0,0433 см (рис. 5). Пространство до внутренней оболочки стального коллектора радиусом 0,05 см заполнено изолятором  $Al_2O_3$ , внешний радиус коллектора 0,065 см, высота детектора 250 мм – аналогично стандартному ДПЗ-1М.

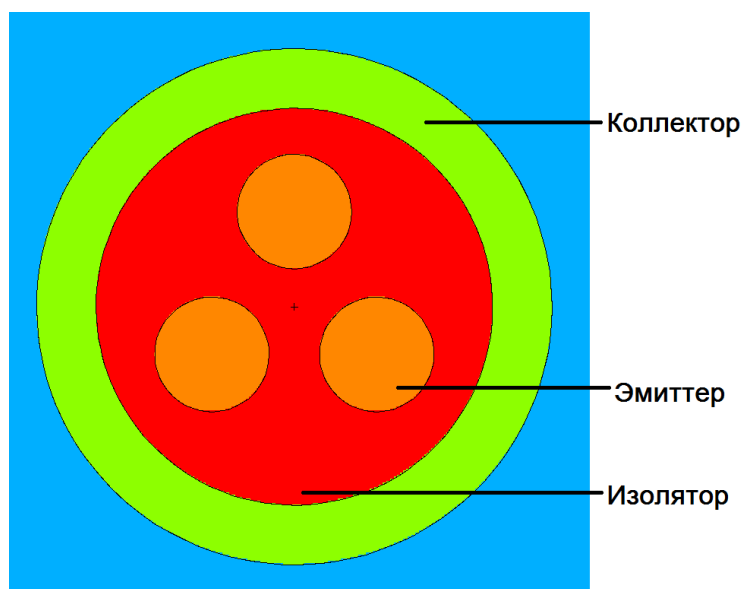


Рис. 5. Расчетная модель ДПЗ с тремя эмиттерами.

В результате моделирования на модели ДПЗ с тремя эмиттерами получены следующие значения количества реакций радиационного захвата в объеме эмиттеров на один нейтрон в ТВС: для 1-го эмиттера –  $9,3159 \cdot 10^{-5}$ , для 2-го эмиттера –  $9,6396 \cdot 10^{-5}$ , для 3-го эмиттера –  $9,2056 \cdot 10^{-5}$ . В модели ДПЗ с одним эмиттером значение количества реакций радиационного захвата в объеме эмиттера на один нейтрон в ТВС составило  $2,56503 \cdot 10^{-4}$ . Таким образом, суммарная эффективность ДПЗ с тремя

эмиттерами составляет  $2,8161 \cdot 10^{-4}$ , что на 9,8 % больше, чем для эффективности ДПЗ с одним эмиттером. А с учетом того факта, что вероятность долететь электрону, сгенерированному в модели ДПЗ с одним эмиттером, равна 0,53, а в модели ДПЗ с тремя эмиттерами – 0,58, получаем, что интегральная эффективность модели ДПЗ с тремя эмиттерами больше модели ДПЗ с одним эмиттером на ~22 %. Масса родия в модели ДПЗ с тремя эмиттерами равна массе родия в стандартном ДПЗ с одним эмиттером. Таким образом, может быть предложена более эффективная по чувствительности к нейтронам модель ДПЗ, в которой к тому же может использоваться меньшее количество родия.

### Заключение

Результаты моделирования показывают, что для обеспечения более высоких точностных показателей в задаче контроля ЛЭВ в СВРК необходимо учитывать индивидуальные параметры выгорания для каждого ДПЗ. Определена зависимость глубины выгорания эмиттера по его внутренним слоям от спектральных характеристик ПНП. Зависимость выгорания эмиттера ДПЗ от спектральных характеристик ПНП должна учитывать реальную схему перемещения каждого КНИ за его время эксплуатации в ВВЭР-1000.

Внедрение результатов моделирования при модернизации СВРК позволит повысить точность определения переходной функции от тока ДПЗ к ЛЭВ твэлов, а следовательно, повысить безопасность и надежность эксплуатации топлива в ВВЭР-1000.

Исследования на модели ДПЗ «альтернативной» конструкции демонстрируют принципиальную возможность разработки более чувствительных к нейтронному потоку ДПЗ, при снижении их себестоимости.

Разработка и исследования на модели формирования тока ДПЗ проводятся по заказу ЧАО СНПО «Импульс», а результаты моделирования использованы для обоснования возможности разработки СВРК отечественного производителя [16].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брагин В.А., Батенин И.В., Голованов М.Н., Кужиль А.С. и др. Системы внутриреакторного контроля АЭС с ВВЭР. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - С. 128.
2. Халимончук В. А. Функционирование программного обеспечения СВРК ВВЭР-1000 верхнего уровня в условиях реализации в Украине расширенной программы по диверсификации ядерного топлива / В. А. Халимончук // Ядерна та радіаційна безпека. - 2015. - Вип. 1. - с. 7-12.
3. Курченко А.Ю. Переходные функции, используемые при восстановлении и контроле энерговыделения реакторных установок водо-водяного типа: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук. - М.: НИЦ КИ, МИФИ, 2013. - С. 26.
4. Сборки внутриреакторных детекторов. СВРД. Руководство по эксплуатации. ШПИС.418260.002 РЭ.
5. Пионтковський Ю.Ф., Борисенко В.І. Врахування вигорання ДПЗ в задачі відновлення енергорозподілу по активній зоні ВВЕР-1000 // Сб. докл. V Междунар. науч.-практ. конф. "Повышение безопасности и эффективности атомной энергетики", Одесса, Украина, 5 - 9 сентября 2016 г. – Одесса, 2016.
6. 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.
7. MCNP4C – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C. Manual / Ed. by J. F. Briesmeister. – LA-13709-M, 2000. – 898 с. – (Documentation for CCC-700/MCNP4C Data Package, Section 4).
8. Борисенко В.И., Пионтковский Ю.Ф., Горанчук В.В. Модель формирования сигнала внутризонного детектора нейтронов // Ядерна фізика та енергетика. - 2016. - Т. 17, №. 4. – С. 364 - 373.
9. Пионтковський Ю.Ф., Борисенко В.І. Вплив параметрів активної зони ВВЕР-1000 на формування сигналу ДПЗ // Тези доп. XXIII щоріч. наук. конф. Ін-ту ядерних дослідж. НАН України. 1 - 5 лютого 2016 р., с. 104.
10. Цимбалов С.А. Характеристики родиевого детектора нейтронов ДПЗ-1М // Препр. ИАЭ-3899/4. – М., 1984. - 16 с.
11. VVER physics experiments: regular hexagonal (1.27 cm pitch) lattices of low-enriched U(2.4 wt. % <sup>235</sup>U)O<sub>2</sub> fuel rods in light water at different core critical dimensions // NEA/NSC/DOC/(95)03/IV. Volume IV/ LEU-COMP-THERM-064, p. 70.
12. Централизованное хранилище отработанного ядерного топлива реакторов ВВЭР Украины. Предварительный отчет по анализу безопасности. Гл. 8. Ядерная безопасность / ГНИЦ СКАР. - 2016. - С. 54.
13. Сапон М.М. Борисенко В.І. Визначення коефіцієнтів реактивності ВВЕР-1000 в програмному коді MCNP // Тези доп. XXIII щоріч. наук. конф. Ін-ту ядерних дослідж. НАН України. 1 - 5 лютого 2016 р., с. 107.
14. НТС ГП НАЭК «Энергоатом». Разработка национального расчетного комплекса СВРК-М2. Протокол № 3 от 16.11.2016.

**В. І. Борисенко<sup>1,2</sup>, Ю. Ф. Піонтковський<sup>2</sup>, В. В. Горанчук<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, Київ, 03028, Україна*

<sup>2</sup>*Київський національний університет імені Тараса Шевченка, просп. акад. Глушкова, 4, Київ, 03022, Україна*

### **ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ РОДІЄВОГО ЕМІТЕРА ДЕТЕКТОРА ПРЯМОГО ЗАРЯДУ**

Наведено результати числового моделювання в коді MCNP процесу формування сигналу детектора прямого заряду (ДПЗ), який утворюється в результаті активації ядер емітера детектора під дією нейтронів, що генеруються у твелах тепловиділяючої збірки. Для врахування нерівномірності вигорання емітера по радіусу дослідження проводились на моделі, в якій емітер розділений на 10 рівномірних по товщині шарів. Продемонстровано, що основний внесок ~88 % у сигнал ДПЗ забезпечують чотири периферійні шари емітера. Визначено внесок різних зон емітера у формування сигналу ДПЗ у процесі вигорання родію протягом експлуатації ДПЗ у системі внутрішньореакторного контролю. Результати моделювання дозволяють визначити сигнал ДПЗ при зміні протягом паливної кампанії спектральних характеристик нейтронного потоку в місці розташування ДПЗ. Досліджено й запропоновано модель ДПЗ із більшою нейтронною чутливістю, в якій, проте, використовується менша кількість вартісного родію.

*Ключові слова: детектор прямого заряду, активація родієвого емітера, вигорання родієвого емітера, модель ДПЗ, спектр нейтронів.*

**V. I. Borysenko<sup>1,2</sup>, Yu. F. Piontkovsky<sup>2</sup>, V. V. Goranchuk<sup>1</sup>**

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, Lysogirska str., 12, Kyiv, 03028, Ukraine*

*<sup>2</sup>Taras Shevchenko National University of Kyiv, Prospect Glushkova, 4, Kyiv, 03022, Ukraine*

### **AN INVESTIGATION OF MODELS OF RHODIUM EMITTER USED IN SELF-POWERED NEUTRON DETECTOR**

The paper presents the results of MCNP simulation of the self-powered neutron detector (SPND) signal formation as a result of emitter nuclei activation under the irradiation with neutrons generated in the fuel assemblies. To account for the non-uniformity of emitter burnup along the radius, its model was divided radially into 10 layers of equal thickness. It has been shown that the main contribution of about 88 % of SPND signal is provided by the four peripheral emitter layers. The contribution of different parts of emitter to the SPND signal formation throughout the lifetime of the SPND in the In-Core Monitoring System was found. Simulation results allow us to determine the SPND signal when the spectral characteristics of the neutron flux at the detector location change during the fuel campaign. The study has investigated and proposed a SPND model with the higher neutron sensitivity even though a smaller amount of expensive rhodium is used.

*Keywords: self-powered neutron detector, activation of rhodium emitter, burning of rhodium emitter, SPND model, neutron spectrum.*

### **REFERENCES**

1. *Bragin V.A., Batenin I.V., Golovanov M.N., Kuzhil A.S. et al. In-core Monitoring System of NPP with VVER. – Moskva: Energoatomisdat, 1987. - P. 128. (Rus)*
2. *Halimonchuk 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 radiatsiyna bezpeka. - 2015. - Vol. 1. - P. 7 - 12. (Rus)*
3. *Kurchenkov A.Yu. Transitional functions used in the restoration and control of energy release of water-water-type reactor installations. The dissertation author's abstract on competition of a scientific degree of the candidate of physical and mathematical sciences. - Moskva: SRC KI, MЭPhI, 2013. - P. 26. (Rus)*
4. *Assemblies of in-reactor detectors. SVRD. Manual. ШПИС.418260.002 РЭ. (Rus)*
5. *Piontkovsky Yu.F., Borysenko V.I. Accounting emitter burnup od SPND in the problem of reconstructing the energy distribution on the core of VVER-1000 // Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference "Safety and Efficiency of Nuclear Energy". Odessa, Ukraine, 5 - 9 Sept. 2016. - Odessa, 2016. (Rus)*
6. *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 // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. - 2010. - T. 316, № 2. - P. 67 - 71. (Rus)*
7. *MCNPTM – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C. Manual / Edited by J. F. Briesmeister. – LA-13709-M, 2000. – 898 с. – (Documentation for CCC-700/MCNP4C Data Package, Section 4).*
8. *Borysenko V.I. Piontkovsky Yu.F., Goranchuk V.V. The model of formation of in-core neutron detector signal // Yaderna physica ta energetyka. - 2016. - Vol. 17, No. 4. - P. 364 – 373. (Rus)*



9. *Piontkovskiy Yu.F., Borysenko V.I.* Influence of parameters of the core VVER-1000 to initiate a signal SPND // Abstracts. XXIII Annual Scientific Conference of the Institute for Nuclear Research of NAS of Ukraine. 1 – 5 Febr. 2016, p. 104. (Ukr)
10. *Tsimbalov S.A.* Features rhodium neutron detector DPZ-1M. Preprint IAE-3899/4. - 1984. - 16 p. (Rus)
11. *VVER* physics experiments: regular hexagonal (1.27 cm pitch) lattices of low-enriched U(2.4 wt. %  $^{235}\text{U}$ )O<sub>2</sub> fuel rods in light water at different core critical dimensions / NEA/NSC/DOC/(95)03/IV. Volume IV/ LEU-COMP-THERM-064, p. 70.
12. *Central Spent Fuel Storage Facility.* Preliminary safety analysis report. Chapter 8. Nuclear safety. SSIC CSER. 2016, p. 54. (Rus)
13. *Sapon M.M., Borysenko V.I.* Determination of reactivity coefficients VVER 1000 in the code MCNP // Abstracts. XXIII Annual Scientific Conference of the Institute for Nuclear Research of NAS of Ukraine. 1 - 5 Febr. 2016, p. 107. (Ukr)
14. *NTS NNEGC "Energoatom".* Development of a national settlement complex ICMS-M2. Protocol № 3 on 11/16/2016. (Rus)

Надійшла 27.03.2017  
Received 27.03.2017