#### Метрологические исследования. Поиски, новые решения

УДК 539.16.08:539.173

# МУЛЬТИКОМПОНЕНТНОЕ ОПОРНОЕ ПОЛЕ ИЗЛУЧЕНИЙ РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ С ФУНКЦИЕЙ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

## С.В. Воронцов<sup>1</sup>, А.С. Кошелев<sup>1</sup>, В.Х. Хоружий<sup>1</sup>, И.Ю. Дроздов<sup>1</sup> О.И. Коваленко<sup>2</sup>, В.В. Генералова<sup>2</sup>, В.Д. Севастьянов<sup>2</sup>, А.П. Жанжора<sup>2</sup>

<sup>1</sup>РФЯЦ – ВНИИ экспериментальной физики <sup>2</sup>ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево Московской обл. <sup>1</sup>Federal Nuclear Center of Russia – All-Russia Research Institute of Experimental Physics <sup>2</sup>All-Russia Research Institute of Physicotechnical and Radioengineering Measurements <u>koi@vniiftri.ru</u>, <u>sevast@vniiftri.ru</u>

Предлагается формировать на каждом ИЯР, ориентированном на выполнение функций испытательного комплекса, мультикомпонентное опорное поле МКОП с аттестованными характеристиками каждой значимой компоненты поля. Функциональные задачи МКОП - оперативный контроль метрологических характеристик освоенных детекторов сопровождения, внедрение новых разработок, изучение взаимовлияния разных излучений на одинаковую форму отклика детектора и т.п. В качестве практически реализованного МКОП рассматривается специализированный гамма-источник реактора БР-К1, пространственно совмещенный с аттестованным полем нейтронов МОП-К2.

Ключевые слова: исследовательские ядерные реакторы, мультикомпонентное опорное поле излучений.

Исследовательские ядерные реакторы (ИЯР) как преимущественно статические, так и преимущественно импульсные, являются одним из основных инструментов, используемых для проведения исследований и испытаний работоспособности изделий и их комплектующих гражданского и военного назначения в полях радиационного воздействия (нейтроны, γ-кванты, заряженные частицы и т.п.) природного и техногенного происхождения. Распространенное в разговорной практике обозначение ИЯР как источника излучения фразеологически удобно, но физически, как правило, слишком упрощенно. Координатная многозначность источников излучений, образующихся при работе ИЯР как в его активной зоне (АЗ), так и в технологическом оборудовании реактора и в биологической защите реакторного зала, предопределяет использование формализма поля излучений для физически обоснованного рассмотрения процессов радиационного нагружения (как расчетного, так и экспериментального).

Государственная система обеспечения единства нейтронных измеренийна ядерно-физических установках (ЯФУ) Российской Федерации предусматри-Альманах современной метрологии, 2015, №5 вает создание на ЯФУ опорного [1] или моделирующего опорного [2] поля нейтронов. Согласно [1], опорное поле (ОП) – это фиксированная в пространстве область нейтронного поля ЯФУ, аттестованная по постоянным спектральным характеристикам поля. Согласно [2], моделирующее опорное поле (МОП) – это ОП, которое либо создается на специальной установке, предназначенной для решения конкретных научно-технических задач, либо формируется на ИЯР таким образом, чтобы его характеристики наиболее полно отвечали требованиям решаемых научно-технических задач.

Базовыми характеристиками как ОП, так и МОП, являются флюенс нейтронов (в единицах измерения «нейтр/см<sup>2</sup>») и спектр единичного флюенса. Согласно общепринятому определению флюенса [1], [3], [4] – это отношение числа частиц dN, проникающих в элементарную сферу, к площади поперечного сечения dS этой сферы, записываемое как  $\Phi$ =dN/dS. К сожалению, однозначно следующее из общепринятого определения флюенса определение интенсивности флюенса в виде d $\Phi$ =dN/(dS·dt) (зафиксированное в [4] как fluence rate) пока не является ни общепризнанным, ни единообразно трактуемым. В интересах терминологической однозначности настало, на наш взгляд, время узаконить использование в практике метрологических измерений в ОП (МОП) характеристики поля «интенсивность флюенса» в единицах «нейтр/см<sup>2</sup>с». По форме определения характеристики «флюенс», «интенсивность флюенса» являются универсальными для поля излучений любого вида (и нейтроны, и γ-кванты, и пр.).

Возможность формирования на ИЯР как нейтронных, так и γ-полей излучений, позволяет, очевидно, организовывать и осуществлять как моно, так и мульти-компонентное радиационное нагружение объектов исследования (испытания). Соответственно можно говорить, в принципе, о формировании на ИЯР, кроме нейтронных ОП (МОП), также ОП (МОП) γ-квантов и комплексных (мульти-компонентных) ОП (МОП). Исходя из направленности и объема работ на ИЯР в интересах радиационных исследований и испытаний наиболее целесообразным представляется создание на каждом ИЯР ВНИИЭФ мульти-компонентного ОП (или МОП) с экспериментально (или экспериментально-расчетно) установленными флюенсом и спектром единичного флюенса для каждой конкретизированной компоненты.

Для конкретизации компонентной структуры и целевой направленности создаваемых на ИЯР опорных полей предлагается обсудить и узаконить систему соответствующих, однозначно трактуемых аббревиатурных обозначений. В качестве одного из возможных вариантов предлагаем рассмотреть следующий:

- для обозначения названия поля «опорное поле», «моделирующее опорное поле» использовать аббревиатуру ОП и МОП;

Альманах современной метрологии, 2015, №5

- для конкретизации компонентного приоритета добавлять к аббревиатуре названия поля через дефис односимвольное (однобуквенное) обозначение одной, двух и более включенных в аттестационный пакет поля компонент; например, для моделирующего опорного поля нейтронов аббревиатурная запись будет иметь вид МОП-п; для моделирующего опорного поля п-γ-компонентного МОП-п-γ.

Предлагаемый подход позволяет бесконфликтно перейти от ранее использованной только для нейтронных полей системы обозначений к системе обозначений полей излучений произвольного компонентного состава.

На рис. 1 представлена реализованная во ВНИИЭФ структура метрологического обеспечения измерений характеристик рабочих полей нейтронов моделирующих реакторных установок БР-1М и БР-К1 [5].



Рис. 1. Структура метрологического обеспечения измерений характеристик рабочих полей нейтронов моделирующих реакторных установок БР-1М и БР-К1

Представленные в табл. 1, 2 и на рис. 2, 3 избранные характеристики пяти аттестованных моделирующих опорных полей нейтронов, дополненные экспериментальными и расчетными [6] спектрально-дозовыми характеристиками γ-квантов и дозовыми характеристиками нейтронов [7], наглядно иллюстрируют широкое многообразие формирующихся на ИЯР полей излучений, отличающихся по интенсивности, энергетическим спектрам и компонентному соотношениям дозовых нагрузок.

МОП-К(ЦК) – это поле в центре компактной металлической АЗ ИЯР БР-1М из сплава высокообогащенного урана (~90% урана-235) с молибденом (10% массового содержания).

### Таблица 1

Эксплуатационные пределы избранных параметров п-ү-излучений в избранных МОП ИЯР БР-1М и БР-К1

ИЯР	Поле	Максимальное энерговыделение				Максимальная мощность			
		F, н/см2	F0.1 , н/см2	D, Гр	F0.1 /D, н/см2Гр	dF/dt, н/см2с	dF0.1 /dt, н/см2с	dD/dt , Гр/с	dF0.1 /dD, н/см2Гр
БР-1М	МОП-К(ЦК) МОП-К(R=5500)	9.9+14 8.3+11	9.4+14 3.3+11	3.0+3 0.9	2.9+11 3.0+11	8.2+18	7.8+18 2.4+15	1.8+7 -	4.3+11
БР-К1	МОП-К2(КГЗ-П) МОП-К2(КГЗ-СФ) МОП-К2(КГЗ- НГК)	4.5+14 3.2+14 1.3+14	3.9+14 2.4+14 5.9+13	610 82 1600	6.4+11 2.9+12 3.7+10		_ _ _		

## Таблица 2

Избранные нормализованные параметры п-ү-излучений в избранных МОП ИЯР БР-1М и БР-К1

	Поле излучений								
Параметр	БР-1М	БР-1М	БР-К1	БР-К1	БР-К1				
	(ЦК)	(R=5500)	КГЗ-П	КГЗ-СФ	КГЗ-НГК				
Fnf, нейтр/см2дел.АЗ	2.7-3	2.1-6	4.5-4	3.2–4	1.3–4				
$\overline{F}$ is p	1.20	0.44	0.76	0.66	0.50				
<i>L</i> , <i>Мэв</i>	1.6-3	6.1–7	1.6-4	1.9-5	2.9-4				
<i>Fyf</i> , квант/см2дел.АЗ	1.03	1.50	1.02	1.10	1.63				
$\overline{E}$ , МэВ									
Dnf, Гр/дел.АЗ	4.6–15	1.3–18	5.2-16	3.1-16	1.2–16				
Dyf, Гр/дел.АЗ	8.2-15	2.5-18	6.1–16	8.2-17	1.6-15				
Dnf+Dyf, Гр/дел.АЗ	12.8-15	3.8–18	11.3-16	3.92-16	1.72-15				
$Dnf/(Dnf+D\gamma f)$	0.36	0.34	0.46	0.79	0.07				

Представленные в табл. 1 данные соответствуют эксплуатационно допустимому в кратковременном энергопуске минутной длительности энерговыделению 3.6·1017 дел.АЗ и эксплуатационно-допустимой мощности в импульсе на мгновенных нейтронах 3·1021 дел.АЗ/с. Формирующие поле нейтроны – преимущественно быстрые (доля нейтронов в спектре с энергией выше 0.1 МэВ составляет ~95%), со средней энергией 1.2 МэВ. Для используемых в качестве базовых средств измерения поглощенной γ-дозы дозиметров СО ПД(ДТС)-0.05/10 (силикатное стекло с добавкой никеля) расчетная поглощенная доза от нейтронов составляет ~55% от поглощенной γ-дозы.

МОП-К(R=5500) – это поле нейтронов в реакторном зале ИЯР БР-1М на расстоянии 5.5 м от центра АЗ реактора. Согласно [8], в полном флюенсе нейтронов в указанной позиционной координате реакторного зала содержит-

ся до 80% нейтронов фонового происхождения с выраженным содержанием нейтронов тепловых и промежуточных энергий. Доля нейтронов выше 0.1 МэВ не превышает 40%. За счет фонового γ-излучения средняя энергия γ-спектра возрастает в 1.5 раза. Соотношение нейтронной и γ-доз в СО ПД(ДТС) практически соответствует таковому в МОП-К(ЦК).



Рис. 2. Спектры единичного флюенса нейтронов в избранных МОП ИЯР БР-1М и БР-К1: *1* - БР-1М (ЦК), *2* – БР-1М (R=5500), *3* - БР-К1 (КГ3-П), *4* – БР-К1 (КГ3-СФ), *5* – БР-К1 (КГ3-НГК)



Рис. 3. Спектры единичного флюенса ү-квантов в избранных МОП ИЯР БР-1М и БР-К1: *1* - БР-1М (ЦК), *2* – БР-1М (R=5500), *3* - БР-К1 (КГЗ-П), *4* – БР-К1 (КГЗ-СФ), *5* – БР-К1 (КГЗ-НГК)

Альманах современной метрологии, 2015, №5

МОП-К2(КГЗ-П) – это поле нейтронов в фиксированной области пространства внутризонной полости реактора БР-К1 с АЗ из сплава урана, обогащенного до 36% по урану-235, с молибденом (9% массового содержания). Представленные в табл. 1 данные соответствуют эксплуатационно допустимому в кратковременном энергопуске минутной длительности энерговыделению 1·1018 дел.АЗ. За счет пониженного обогащения по урану-235 имеет место смягчение спектра нейтронов в сравнении с полем МОП-К(ЦК) (средняя энергия 0.76 МэВ, доля нейтронов с энергией выше 0.1 МэВ ~87%). Спектр γ-квантов подобен таковому для МОП-К(ЦК). Нейтронная и γ-дозы в СО ПД(ДТС) практически совпадают.

МОП-К2(КГЗ-СФ) – это поле нейтронов в фиксированной области пространства внутри специализированного трансформера из свинца для внутризонной полости реактора БР-К1 с функцией фильтра γ-квантов поля КГЗ-П. При достаточно незначительном изменении характеристик нейтронного поля свинцовый трансформер снижает γ-дозу в ~7.5 раз. Прогнозируемая поглощенная доза от нейтронов в дозиметре СО ПД(ДТС) превышает поглощенную γ-дозу почти в 4 раза.

МОП-К2(КГЗ-НГК) – это поле нейтронов в фиксированной области пространства внутри специализированного трансформера быстрых нейтронов в у-кванты для внутризонной полости реактора БР-К1. Обеспечивает рост удозы в ~2.5 раза относительно МОП-К2(КГЗ-П) при одновременном снижении флюенса нейтронов с энергией выше 0.1 МэВ в ~6.5 раз. Прогнозируемая поглощенная доза от нейтронов в дозиметре СО ПД(ДТС) составляет всего 7.5% от поглощенной у-дозы.

В 2008 г. на реакторе БР-К1 в области формирования нейтронного поля МОП-К2(КГЗ-П) был создан специализированный гамма-источник (СГИ), фактически представляющий собой γ-поле в границах параллелепипеда длиной 100 мм, шириной 100 мм, высотой 50 мм, сформированного по центральной осевой контейнера горизонтальной загрузки во внутризонную полость реактора вокруг центра поля МОП-К2(КГЗ-П) [9]. В рамках предлагаемой терминологии совокупность полей МОП-К2(КГЗ-П) и СГИ можно рассматривать как двухкомпонентное п-γ-поле МОП-п-γ(КГЗ-П) реактора БР-К1.

Пространственно совмещенное расположение полей нейтронов и уквантов позволило осуществить ряд важных физических исследований, ограниченных в условиях однокомпонентного поля.

С помощью свинцового фильтра варьируемой толщины СФВТ, представляющего собой набор вкладывающихся друг в друга четырех свинцовых оболочек цилиндрической формы с толщиной стенки 2 см, была осуществлена оценка влияния нейтронов на γ-отклик дозиметров СО ПД(ДТС)-0.05/10. В количественном выражении получено, что в области Альманах современной метрологии, 2015, №5 совмещения полей МОП-К2(КГЗ-П) и СГИ вклад нейтронов в увеличение γотклика дозиметра СО ПД(ДТС)-0.05/10 составляет ~5% при практическом совпадении поглощенных доз от нейтронов и γ-квантов в дозиметре.

В γ-поле СГИ был прокалиброван перспективный токовый γ-детектор КГК-2 [10], позволяющий в режиме непрерывного контроля в формате текущего времени диагностировать γ-поля в диапазоне мощностей поглощенной дозы от 100 мкГр/с до 100 Гр/с. По аналогии с дозиметрами СО ПД(ДТС)-0.05/10 с использованием СФВТ была осуществлена оценка нейтронного влияния на γ-отклик КГК-2, в количественном выражении для поля СГИ равная также ~5%.

При исследовании в полях МОП-К2 реактора БР-К1 перспективного высокочувствительного детектора быстрых нейтронов КНК-2-7М [11] были выявлены особенности токового отклика детектора в условиях вариативности нейтронной и γ-компонент смешанного поля излучений. Характер этих особенностей иллюстрируют токограммы откликов функциональных секций в полях КГЗ-П, КГЗ-СФ и КГЗ-НГК, представленные на рис. 4.

Количественная конкретизация отношений токовых откликов нейтронной секции к токовым откликам у-секции для токограмм рис. 4 такова:

- при размещении КНК-2-7М в п-γ-поле КГЗ-П отношение стационарного тока нейтронной секции к стационарному току γ-секции ~3;

- при размещении КНК-2-7М в п-γ-поле КГЗ-СФ отношение стационарного тока нейтронной секции к стационарному току γ-секции ~7;

- при размещении КНК-2-7М в п-γ-поле КГЗ-НГК отношение стационарного тока нейтронной секции к стационарному току γ-секции ~0.95.

Приведенные результаты показывают, что из-за принципиально малого числа делений нептуния-237 в радиаторе нейтронной секции (ограниченное число ядер делящегося изотопа; высокий энергетический порог реакции деления, равный ~0.4 МэВ) необходима значительная интенсивность флюенса быстрых нейтронов при условии приемлемой мощности γ-излучения, что в условиях вариативности компонентного состава излучений поля не всегда может быть обеспечено. Предварительная калибровка функциональных секций КНК-2-7М и наличие информации об ожидаемом компонентном составе поля, планируемого для диагностирования детектором, позволяет заранее оценить возможность получения репрезентативно приемлемого уровня экспериментальных данных.

Исследования, проведенные с детектором КНК-2-7М в мульти-компонентных полях реактора БР-К1, актуализировали концентрацию усилий на освоении счетного режима работы детектора, позволяющего обеспечить высокую чувствительность к быстрым нейтронам при практическом исключении влияния γ-излучения на нейтронный отклик детектора.



Рис. 4. Секционные токи КНК-2-7М при измерениях в КГЗ-П, КГЗ-СФ и КГЗ-НГК

Наличие, однако, значимого наклона счетной характеристики при отсутствии надежных электронных методов контроля порога дискриминации осло-

жняет применение детекторов КНК-2-7М на реакторных установках, не имеющих опорных полей с выраженной нейтронной компонентой.

В условиях значительного разнообразия реакторных установок, режимов их работы, характеристик и соотношения излучений радиационного воздействия, приоритетной направленности проводимых исследований и испытаний, инструментария метрологического сопровождения, а также с учетом вышерассмотренного можно уверенно констатировать очевидную практическую целесообразность формирования на каждой ИЯР ВНИИЭФ комплекта мультикомпонентных моделирующих опорных полей, оптимизированного по составу с учетом актуального для конкретного ИЯР круга решаемых задач.

## Литература

- 1. Брегадзе Ю.И., Степанов Э.К., Ярына В.П. Прикладная метрология ионизирующих излучений. – Москва: Энергоатомиздат, 1990, 264 с.
- 2. Севастьянов В.Д. Система моделирующих опорных полей нейтронов на исследовательских реакторах // Атомная энергия, 2000, т.88, вып.5, с.378-387.
- 3. РМГ 78–2005. Рекомендации по межгосударственной стандартизации РМГ 78–2006. Государственная система обеспечения единства измерений. Излучения ионизирующие и их измерения. Термины и определения. – М: Стандартинформ, 2006.
- 4. ICRU REPORT No. 85: FUNDAMENTAL QUANTITIES AND UNITS FOR IONIZING EADIATION. The international commission on radiation units and measurements. April 2011 // Journal of the ICRU, vol. 11, No. 1 2011. Published by Oxford University Press.
- 5. Колесов В.Ф., Кувшинов М.И., Воронцов С.В. и др. Критические стенды и импульсные реакторы РФЯЦ-ВНИИЭФ Научное издание «65 лет ВНИИЭФ. Физика и техника высоких плотностей энергий», в 2-х выпусках. Вып. 1 Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011, с.136-164.
- 6. Кошелев А.С., Хоружий В.Х. Спектральные характеристики гамма-полей реакторных установок ВНИИЭФ // Вопросы атомной науки и техники, сер. Физика ядерных реакторов, 2013, вып.3, с.65-82.
- 7. Кошелев А.С., Хоружий В.Х. Исследование нейтронной чувствительности гамма-детекторов // Вопросы атомной науки и техники, сер. Физика ядерных реакторов, 2010, вып.2, с.69-82.
- 8. Кошелев А.С., Хоружий В.Х. Особенности формирования поля нейтронов в рабочем зале реактора с компактной активной зоной БР-1 (БР-1М) // Вопросы атомной науки и техники, сер. Физика ядерных реакторов, 2014, вып.3, с.72-82.

- 9. Генералова В.В., Жанжора А.П., Кошелев А.С., Нарожный А.Т. Специализированный источник гамма-излучения, пространственно совмещенный с моделирующим опорным полем нейтронов МОП-К2 // Измерительная техника, 2010, №1, с.24-27.
- 10. Кошелев А.С., Довбыш Л.Е., Хоружий В.Х., Чукляев С.В. Детектор мощности гамма-излучения типа КГК-2 для диагностики полей излучений ядерных реакторов в диапазоне от 1 мкГр/с до 100 Гр/с. // Вопросы атомной науки и техники, сер. Физика ядерных реакторов, 2012, вып.3, с.43-50.
- 11. Кошелев А.С., Довбыш Л.Е., Овчинников М.А., Пикулина Г.Н., Дроздов Ю.М., Чукляев С.В. Высокочувствительный детектор быстрых нейтронов КНК-2-7М // Вопросы атомной науки и техники, сер. Физика ядерных реакторов, 2014, вып.3, с.83-93.