

УДК 539.125.52

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ПЕРЕДАЧИ РАЗМЕРА ЕДИНИЦ ОТ ГОСЭТАЛОНА ГЭТ 51-2017

В.Д. Севастьянов

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.
sevast@vniiftri.ru*

В статье рассмотрены новые методы передачи размера единиц от Госэталона ГЭТ 51-2017 к полям нейтронов на ядерно-физические установки (ЯФУ) РФ. Методики передачи размера единиц плотности потока и флюенса нейтронов апробированы при измерениях на реальных ЯФУ.

The article considers new methods of transferring the size of units from the State Standard GET 51-2017 to the neutron fields on the nuclear and physical installations (NPI) of the Russian Federation. The methods for transferring the size of the units of flux density and neutron fluence were tested when measured at real NPIs.

Ключевые слова: эталон, ядерно-физические установки, характеристики полей нейтронов, методики измерений, передача размера единиц от эталона.

Key words: standard, nuclear and physical installations, characteristics of neutron fields, measurement techniques, unit size transfer from the standard.

Госэталон и Государственная поверочная схема для средств измерения плотности потока нейтронов и флюенса нейтронов на ядерно-физических установках утверждены приказами № 2222 от 22 октября 2018 г. и № 561 от 17 марта 2017 г. Министерства промышленности и торговли Российской Федерации и Федеральным агентством по метрологическому регулированию и метрологии Росстандарт [1, 2].

Переутверждение Госэталона ГЭТ 51-2017 было сделано с целью его модернизации и совершенствования методов передачи размера единиц от Госэталона к источникам нейтронов на ядерно-физических установках (ЯФУ), т.е. ядерных реакторах и нейтронных генераторах.

Результаты работы по модернизации Госэталона описаны в работе [3]. В настоящей работе кратко изложены результаты работы по совершенствованию методов передачи размера единиц от Госэталона к ЯФУ на предприятиях различных ведомств РФ. Поля нейтронов на ЯФУ различают по энергетическому спектру нейтронов в диапазоне от 10^{-4} до 18 МэВ и плотности потока нейтронов от 10^3 до 10^{15} нейтр $\cdot$ см $^{-2}$ $\cdot$ с $^{-1}$.

В настоящее время при измерении характеристик полей нейтронов на ЯФУ используется стандартизированная программа КАСКАД [4–6], разработанная специалистами ФГУП «ВНИИФТРИ» и «ВНИИЭФ». Она применима для восстановления спектра в полях нейтронов различных типов ядерных установок даже в случае применения в них для измерений спектра незначительного количества активационных детекторов. Восстанавливаем

мый с её помощью спектр нейтронов представляется в аналитической форме в виде суперпозиции парциальных физически обоснованных спектров: спектра нейтронов деления ядер в форме Максвелла, спектра неупруго рассеянных нейтронов в форме Вайскопфа, спектра Максвелловских тепловых нейтронов, спектра замедления в форме Ферми и спектра моноэнергетических нейтронов в форме Гаусса.

Представление восстанавливаемого спектра нейтронов в таком виде существенно уменьшает систематическую погрешность его восстановления. Именно поэтому программа КАСКАД нами и использовалась при калибровке источников нейтронов на ЯФУ в указанных выше диапазонах энергии и плотности потока нейтронов. В частности, при калибровке специальных детектирующих систем: управления и защиты ядерных реакторов, определения степени выгорания ^{235}U в ядерном топливе, наработке радионуклидов, представляющих интерес для науки, техники и медицины и др. Калибровку детекторов указанных выше детектирующих систем, как правило, проводили в аттестованных ранее полях ядерных реакторов. Однако в отдельных случаях требуется провести калибровку детекторов именно в аттестованном поле его ЯФУ. Это существенно усложняет процесс калибровки. Именно для таких калибровок нами и разработаны новые методики измерений характеристик полей нейтронов на ЯФУ. Одна из них была апробирована при калибровке источника нейтронов в моделирующем опорном поле на мощном энергетическом реакторе Белоярской АЭС.

Этот калибруемый источник нейтронов является ключевым звеном в системе метрологического обеспечения нейтронных измерений многосекторной системы определения герметичности ТВЭЛ при работающем ядерном реакторе. Многосекторная система нейтронных измерений на таком реакторе включает в себя идентичные блоки детектирования нейтронов, пульта управления, блоки питания и измерительные каналы, связывающие камеры деления блоков детектирования с пультом управления. Для регистрации нейтронов в каждом из блоков установлены по три однотипных стандартных камеры деления. При калибровке аттестуемого источника нейтроны излучаются радионуклидным PuBe -источником, который устанавливается в центральном канале блока детектирования нейтронов. В стандартных же рабочих условиях после остановки реактора нейтроны спонтанного деления урана попадают в калибруемое поле источника из охлаждающей жидкости первого контура а.з. реактора в результате разгерметизации аварийного ТВЭЛ зоны. Импульсы с камер деления каждого сектора а.з., обусловленные регистрацией нейтронов спонтанного деления ядер, передаются через линии связи на центральный пульт управления для анализа. По результатам анализа полученной информации с каждого сектора а.з. судят о том, в каком из секторов а.з. реактора произошла разгерметизация ТВЭЛ, т.е. создана аварийная ситуация, которая требует быстрого удаления дефективных ТВЭЛ.

Однако следует отметить, что интенсивность поля нейтронов в калибруемом поле источника нейтронов незначительна из-за низкого значения потока PuBe -источника нейтронов. На дату измерения поток составлял $4,93 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$. Плотность потока нейтронов, создаваемая этим источником в калибруемом поле нейтронов, также незначительна ($8,39 \cdot 10^4 \text{ нейтр} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$). Поэтому для измерений характеристик калибруемого источника нейтронов пригодны только делительные трековые детекторы, которые имеют максимальную чувствительность к нейтронам во всём диапазоне калибруемого поля.

Кроме детекторов из урана-235, для измерений нами были использованы другие делительные пороговые детекторы из нептуния-237 и урана-238. Их эффективные энергетические пороги регистрации нейтронов составляют 0,58 и 1,5 МэВ соответственно. Они и были применены для восстановления спектра нейтронов в исследуемых полях нейтронов в области быстрых нейтронов. При измерениях в диапазоне тепловых и медленных нейтронов нами также были использованы и описанные выше детекторы из урана-235.

Измерение характеристик поля калибруемого источника нейтронов с применением новой методики впервые в практике нейтронных измерений на ЯФУ начинали с измерения в нём кадмиевого отношения для делительного трекового детектора. Для этого детектор из урана-235 последовательно облучали в поле калибруемого источника нейтронов в экране из кадмия и без него. Затем сосчитывали в регистраторах из слюды-мусковит делительных детекторов нейтронов из урана-235 на микроскопе количество треков от осколков деления ядер и находили кадмиевые отношения для детектора из урана. Значение кадмиевого отношения в калибруемом поле нейтронов было 20,4. Это значение отношения сравнивали со значениями кадмиевых отношений для стандартизированных полей нейтронов (см. табл. 1) из данных, приведённых в работе [7]. Оно оказалось близким к кадмиевому отношению критсборки КВАНТ (ИК-6) [8], что позволило нам использовать его хорошо изученный спектр в качестве априорного при восстановлении спектра в калибруемом поле нейтронов на реакторе БН-800 по стандартной программе КАСКАД.

Нами был использован также и другой способ апробации новой методики. Он включал в себя изготовление макета идентичного блоку детектирования БДН БН-800 и измерения в нём энергетического спектра нейтронов. В макете МБДН в качестве радионуклидного источника использовали стандартный $^{238}\text{PuBe}$ -источник ТН-18-76 с потоком нейтронов $2,26 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ на 31.12.2014 г. Этот макет устанавливался в лабораторных условиях института. В этом случае у нас не было возможности установить его на глубине 7 м возле центра активной зоны реактора БН-800. Это означает, что мы не смогли обеспечить полную идентичность формирования спектра нейтронного поля в поле макета блока детектирования.

Однако спектр нейтронов в макете блока детектирования оказался близким к спектру калибруемого источника внутри блока детектирования БДН (БН-800). Краткие результаты измерений нейтронных характеристик обоих источников нейтронов на реакторе и в макете приведены в табл. 2. Из данных таблицы 2 видно, что спектры нейтронов восстановлены с высокой степенью достоверности, т.к. сечения ядерных реакций, измеренные в экспериментах и расчётах для детекторов, используемых при измерениях, согласуются в пределах десятых долей процентов. Из табл. 2 можно видеть также, что вклады нейтронов различных энергетических групп в исследуемых блоках детектирования отличаются незначительно. Это означает, что спектр нейтронов в макете блока детектирования смоделирован в основном правильно. Для восстановления спектра в обоих блоках детектирования применялась одна и та же разработанная нами методика, которая обеспечила требуемую практикой точность измерений. Это следует из совпадения значений сечений ядерных реакций, полученных в эксперименте и расчёте с использованием измеренного значения плотности потока нейтронов и дифференциальных сечений ядерных реакций, имеющихся в библиотеке программы КАСКАД.

Таблица 1

Сечения деления $^{235}\text{U}(n,f)$, усреднённые по спектру нейтронов, и кадмиевые отношения для детекторов из урана в стандартизированных полях нейтронов ядерно-физических установок

№ п/п	Ядерная установка, канал реактора, поле нейтронов	Усреднённое сечение по спектру нейтронов, барн	Кадмиевое отношение для реакции $^{235}\text{U}(n,f)$
1	ГИДРА(Ц7К)	81,6	10,1
2	МОП МС (3*)	136	11,6
3	БН-800 (МБДН)	82,4	20,4
4	БН-600 (4Б2)	208	21,7
5	КВАНТ (ИК-6)	121	22,7
6	ИР-50 (ВЭК-1)	145	24,0
7	ИР-100 (ЦЭК)	162	25,7
8	БР-1 (КВЗ)	194	28,1
9	Реактор Ф1 (ЦГК)	209	29,2
10	СМ-3, Н1, Я4-3	200	29,6
11	АРГУС, ГЗ:ЭК-2:135	255	35,2
12	БР-К1 (ПТ)	194	38,8
13	ФС-1-4,37р	187	48,7
14	РИЗ/С (ГК)	312	52,0

Продолжение таблицы 1

№ п/п	Ядерная установка, канал реактора, поле нейтронов	Усреднённое сечение по спектру нейтронов, барн	Кадмиевое отношение для реакции $^{235}\text{U}(\text{n},\text{f})$
15	ИР-8 (ВЭК)	241	56,2
16	БАРС-6 (ЭУС-24)	320	72,0
17	ИБВ-2М (ЦЭК)	302	78,6
18	БАРС-6 (ЭУС-16)	260	86,4
19	ИР-50 (ВЭК-4)	316	91,7
20	БР-1 (МГК)	356	96,9
21	БР-К1 (СПТ)	365	117
22	ИР-100 (ВЭК-4)	396	150
23	БР-1 (ШПЗ)	386	171

Таблица 2

Краткие характеристики полей нейтронов
в калибруемом поле нейтронов на реакторе БДН БН-800
и в макете блока детектирования нейтронов МБДН БН-800

БДН БН-800					
Делительный детектор нейтронов, ядерная реакция	Толщина экрана из кадмия, мм	Скорость реакции	Сечение реакции		Отличие, %
			барн (Э)	барн (Р)	
$^{235}\text{U}(\text{n},\text{f})$	1,00	$0,1660 \cdot 10^{-24}$	$0,9753 \cdot 10^2$	$0,9753 \cdot 10^2$	0,0
$^{235}\text{U}(\text{n},\text{f})$	0,00	$0,9350 \cdot 10^{-26}$	$0,5493 \cdot 10^1$	$0,5493 \cdot 10^1$	0,0
$^{237}\text{Np}(\text{n},\text{f})$	1,00	$0,0000 \cdot 10^{-00}$	$0,0000 \cdot 10^1$	$0,7767 \cdot 10^0$	0,0
$^{238}\text{U}(\text{n},\text{f})$	1,00	$0,4520 \cdot 10^{-27}$	$0,2656 \cdot 10^0$	$0,2656 \cdot 10^0$	0,0
Плотность потока нейтронов, нейтр·см ⁻² ·с ⁻¹ $1,702 \cdot 10^{-3}$					
Средняя энергия, МэВ 2,188					
СКО по всей совокупности используемых детекторов нейтронов, % 0,002					
Вклад в энергетический спектр нейтронов, %:					
тепловые 19,177					
эпитепловые 30,329					
быстрые 50,500					
М БДН БН-800					
Делительный детектор нейтронов, ядерная реакция	Толщина экрана из кадмия, мм	Скорость реакции	Сечение реакции		Отличие, %
			барн (Э)	барн (Р)	
$^{235}\text{U}(\text{n},\text{f})$	0,00	$0,1200 \cdot 10^{-24}$	$0,8263 \cdot 10^2$	$0,8236 \cdot 10^2$	0,0

Продолжение таблицы 2

М БДН БН-800					
Делительный детектор нейтронов, ядерная реакция	Толщина экрана из кадмия, мм	Скорость реакции	Сечение реакции		Отличие, %
			барн (Э)	барн (Э)	
$^{235}\text{U}(\text{n},\text{f})$	1,00	$0,5885 \cdot 10^{-26}$	$0,4039 \cdot 10^1$	$0,4039 \cdot 10^1$	–0,01
$^{237}\text{Np}(\text{n},\text{f})$	1,00	$0,1329 \cdot 10^{-26}$	$0,9122 \cdot 10^0$	$0,9137 \cdot 10^0$	–0,17
$^{238}\text{U}(\text{n},\text{f})$	1,00	$0,4510 \cdot 10^{-27}$	$0,2656 \cdot 10^0$	$0,3095 \cdot 10^0$	–0,16
Плотность потока нейтронов, нейтр·см ^{–2} ·с ^{–1} $1,457 \cdot 10^{-3}$					
Средняя энергия, МэВ 2,569					
СКО по всей совокупности используемых детекторов нейтронов, % 0,17					
Вклад в энергетический спектр нейтронов, %:					
тепловые 16,509					
эпитепловые 23,092					
быстрые 60,908					

Литература

1. Приказ № 561 от 17 марта 2017 г. «Об утверждении Государственного первичного специального эталона единиц плотности потока нейтронов и флюенса нейтронов для ядерно-физических установок». Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. Федеральное агентство по метрологическому регулированию и метрологии Росстандарт.
2. Приказ № 2222 от 22 октября 2018 г. «Об утверждении Государственной поверочной схемы для средств измерений плотности потока нейтронов и флюенса нейтронов на ядерно-физических установках». Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. Федеральное агентство по метрологическому регулированию и метрологии Росстандарт.
3. Севастьянов В.Д., Коваленко О.И., Шibaев Р.М. Государственный первичный специальный эталон единиц плотности потока нейтронов и флюенса нейтронов для ядерно-физических установок. ФГУП «ВНИИФТРИ» // Вестник метролога. 2017. № 2. С. 15–19.
4. Севастьянов В.Д., Кошелев А.С., Маслов Г.Н. МИ 2804-2003. Метод расчёта спектра нейтронов по результатам измерений с интегральными детекторами. Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Утверждена: ГНМЦ «ВНИИФТРИ» 19.03.2003 г. Зарегистрирована: «ВНИИМС» 07.07.2003 г. М.: ВНИИФТРИ, 2003. 28 с.
5. Маслов Г.Н., Севастьянов В.Д., Кошелев А.С. Метод расчёта спектров нейтронов по результатам измерений с интегральными детекторами, реализованный в новой версии программы КАСКАД // Измерительная техника. 2003. № 5. С. 58–62.

6. МЕТОДИКА ГСССД МР182-2011 (Аттестат № 182 от 03.05.2011). «Методика восстановления спектров нейтронов ядерных реакторов и нейтронных генераторов КАСКАД 200 (176)» В.Д. Севастьянов, А.С. Кошелев. Российский научно-технический центр информации по стандартизации, метрологии и оценки соответствия. М., 2011. 17 с.
7. Севастьянов В.Д., Кошелев А.С., Маслов Г.Н. Характеристики полей нейтронов. Источники мгновенных нейтронов деления и 14 МэВ — генераторы нейтронов, исследовательские и энергетические реакторы, специальные конвертирующие нейтронное излучение устройства: справочник: в 2 т. Т. 1, 2. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2014.
8. Севастьянов В.Д., Ярына В.П., Волков А.Е., Павлов В.Д. Измерительный комплекс для градуировки нейтронной аппаратуры СУЗ транспортных ЯФУ // Атомная энергия. 2000. Вып. 5. Т. 77. С. 387–391.