

УДК 621.039.51:539.125.52:389

СТАНДАРТНОЕ ПОЛЕ НЕЙТРОНОВ В ЦЕНТРЕ АКТИВНОЙ ЗОНЫ БИР-2

Севастьянов В.Д. (ВНИИФТРИ), Кошелев А.С., Маслов Г.Н. (ВНИИЭФ)

Быстрые импульсные реакторы в последние десятилетия широко используются в качестве мощных источников нейтронного и γ -излучения [1]. Для реакторной дозиметрии нашли применение стандартные поля реакторов Godiva (США), Tаріго (Италия), Yayoі (Япония) [2, 3] и др.

В настоящей работе рассмотрены отдельные аспекты исследований на быстром реакторе БИР-2 [4, 5], проведенных в целях определения возможности использования нейтронного поля в центре его активной зоны для экспертизы сечений ядерных реакций, которые применяются для спектрометрии нейтронов на ядерно-физических установках.

БИР-2 с компактной активной зоной из металлического урана может работать как в импульсном, так и статическом режиме, что позволяет изменять интенсивность поля в центральном канале активной зоны диаметром 40 мм в широких пределах. В выбранной для проведения исследований области в центральном канале, на уровне геометрического центра активной зоны, для номинального импульса БИР-2 энерговыделением 3 МДж и шириной на полувысоте 60 мкс плотность потока нейтронов достигает $6,8 \cdot 10^{18} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ при флюенсе $4,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

За счет хорошей экранировки делящимися материалами спектр в центральном канале активной зоны не подвержен влиянию рассеянных нейтронов реакторного помещения (рассеяние на окружающих активную зону предметах и оборудовании, в стенах защитной оболочки и т.д.) и по энергетическим параметрам (средняя энергия 1,26 МэВ, доля нейтронов энергией более 0,1 МэВ 95%) близок к спектру реакторов Godiva, Tаріго, Yayoі. Измерения детекторами, предназначенными для исследований на ядерно-физической установке, существенно упрощаются из-за наличия изотропного поля и отсутствия тепловых нейтронов в этой области.

Для мониторингирования флюенса нейтронов в центральном канале предусмотрено несколько методов, а именно:

- по наведенной активности детекторов из никеля, устанавливаемых в фиксированных позициях снаружи активной зоны и непосредственно в центральном канале;
- по числу отсчетов штатных детекторов контроля статической мощности реактора;
- по числу отсчетов специальных малогабаритных импульсных камер деления со слоями из $^{235,238}\text{U}$, устанавливаемых в фиксированных позициях у поверхности активной зоны или непосредственно в центральном канале.

Совокупность указанных методов позволила мониторировать флюенс нейтронов в индивидуальном пуске реактора с погрешностью не более 1% (здесь и далее погрешность для доверительной вероятности $P = 0,95$) при неизменной, соответствующей условиям калибровки, конфигурации активной зоны и ее окружения.

Спектр и флюенс нейтронов измеряли методом интегральных детекторов с использованием нейтронно-активационных и делительных детекторов. Предпочтение отдавалось детекторам с высоким уровнем точности по константному и методическому обеспечению (сечения взаимодействия, схемы распада, радионуклидное содержание, детекторы и измерительная аппаратура и т.д.) [6, 7].

Особое внимание уделялось детекторам с делящимися радионуклидами, так как информация, получаемая с их помощью, является в значительной степени определяющей при восстановлении спектра и установлении флюенса нейтронов. Были применены три методики работы с делящимися радионуклидами [8]. В первой использовали детекторы, аналогичные ДКН [9], с заменой капсулы из полиэтилена на металлическую для исключения эффекта замедления нейтронов на ядрах водорода. Во второй между делящимся слоем и трековым регистратором из слюды мусковит размещали

диафрагму с сотовой системой отверстий для исключения малых углов входа осколков в регистратор. В третьей слое с делящимися радионуклидами помещали внутри специально разработанных малогабаритных камер деления, аналогичных по конструкции описанной в работе [10]. Слой с делящимися радионуклидами аттестовывали на радиометрическом комплексе, входящем в состав государственного специального эталона единиц плотности потока и флюенса нейтронов для области измерений на ядерно-физической установке [11] в основном по методикам, изложенным в работе [12].

В качестве основной для восстановления спектра нейтронов по измеренным интегральным откликам использовали программу КАСКАД [13], устойчивость решения которой проверяли дополнительным применением еще двух независимых программ [14, 15]. Отличия в восстановленных по разным программам спектрах незначительны и наблюдались в основном при энергии менее 0,1 МэВ, что связано с ограниченной информативностью комплекта детекторов в условиях малого количества нейтронов ниже энергетической границы ($\sim 5\%$) и неограниченностью выбора априорного спектра в программах восстановления.

Восстановление спектра по программе КАСКАД предусматривает два этапа. На первом формируется априорный спектр в виде суммы аналитических представлений спектра деления и спектра неупругого рассеяния в форме Максвелла — $(2\alpha^{3/2}/\sqrt{\pi})\sqrt{E} \exp(-\alpha E)$ и $\alpha^2 E \exp(-\alpha E)$ соответственно. Процесс подбора априорного спектра организуется в форме итерационной процедуры поиска масштабных коэффициентов b_m для файла групповых флюенсов $F_j = \sum_m b_m F_{mj}$ (j — индекс энергетической группы в 176-групповом формате, совместимом с форматом ENDF/B IV; m — индекс аналитического представления), удовлетворяющих выборке экспериментальных данных. Такой подход, особенно при хорошем согласовании экспериментальных и расчетных данных непосредственно на первом этапе восстановления, дает возможность представления спектра нейтронов в удобной для последующего использования и достаточно физически обоснованной аналитической форме.

На втором этапе восстановления спектра проводится дополнительная корректировка флюенса в групповом энергетическом диапазоне, организованная в форме итерационной процедуры $F_j^{k+1} = F_j^k [\sum_i (A_i/A_i^k) \cdot (\sigma_{ij}/A_i^k)] / \sum_i (\sigma_{ij}/A_i^k)$, где A_i , A_i^k — экспериментальный и расчетный интегральные отклики; σ_{ij} — сечение i -го детектора для j -го энергетического интервала.

При двухэтапной процедуре восстановления спектра нейтронов БИР-2 основной целью на втором этапе являлось достижение максимальной сходимости данных для ядерных реакций, входящих в первую категорию [6], при отсутствии физически необоснованных осцилляций получаемого решения.

Интегральные отклики различных нейтронно-активационных и делительных детекторов в выбранной области центрального канала активной зоны БИР-2 измеряли многократно в период с 1980 по 1990 г. Выбранный для восстановления набор детекторов и соответствующих экспериментальных значений интегральных откликов A_i , нормированных на ядро изотопа-мишени и энерговыделение в активной зоне 1 МДж, представлен в табл. 1. Там же приведены определенные при окончательном варианте восстановленного спектра нейтронов экспериментально-расчетные и расчетные сечения (σ_i и σ_i^k), погрешности экспериментальных данных (δA_i) и невязки индивидуальных сечений ($\delta \sigma_i = 100(\sigma_i^k - \sigma_i)/\sigma_i^k$).

Т а б л и ц а 1. Оцененные экспериментальные интегральные отклики, экспериментально-расчетные и расчетные сечения для спектра БИР-2 в выбранной области центрального канала активной зоны

Реакция	A_i , реакций/(ядро·МДж)	δA_i , %	σ_i , мб	σ_i^k , мб	$\delta \sigma_i$, %
$^{239}\text{Pu}(n, f)$	$2,87 \cdot 10^{-10}$	2,0	1766	1723	-2,5
$^{239}\text{Pu}(n, f) + \text{Cd}(1 \text{ мм})$	$2,84 \cdot 10^{-10}$	2,0	1747	1722	-1,5
$^{235}\text{U}(n, f)$	$2,00 \cdot 10^{-10}$	1,5	1231	1280	+3,9
$^{235}\text{U}(n, f) + \text{Cd}(1 \text{ мм})$	$2,04 \cdot 10^{-10}$	1,5	1255	1280	+1,9
$^{63}\text{Cu}(n, f)$	$2,60 \cdot 10^{-12}$	4,0	16,0	16,0	0,0
$^{237}\text{Np}(n, f)$	$1,52 \cdot 10^{-10}$	2,0	935,2	906,9	-3,1
$^{103}\text{Rh}(n, n')$	$7,36 \cdot 10^{-11}$	5,0	452,8	471,1	+3,9
$^{115}\text{In}(n, n')$	$1,85 \cdot 10^{-11}$	4,5	113,8	108,2	-5,2
$^{238}\text{U}(n, f)$	$2,54 \cdot 10^{-11}$	2,5	156,3	164,3	+4,9
$^{58}\text{Ni}(n, p)$	$9,04 \cdot 10^{-12}$	4,0	55,62	56,82	+2,1
$^{32}\text{S}(n, p)$	$5,58 \cdot 10^{-12}$	4,0	34,33	33,65	-2,0
$^{27}\text{Al}(n, \alpha)$	$5,43 \cdot 10^{-14}$	4,0	0,334	0,329	-1,4
$^{56}\text{Fe}(n, p)$	$5,87 \cdot 10^{-14}$	4,0	0,546	0,555	+1,7

Примечание: $\sigma_i = A_i / F^k$; $\sigma_i^k = A_i^k / F^k$; A_i , A_i^k — экспериментальный и расчетный интегральный отклик i -й реакции; F^k — флюенс, соответствующий итоговому восстановленному спектру нейтронов; данные по $\sigma(E)$ для $i = 1-5$ — из файла ENDF/B IV, для $i = 6-13$ — [7].

Выборка F_j окончательного решения представлена в табл. 2. Групповое представление ограничено интервалом $82 \leq j \leq 165$, в пределах которого для всех детекторов интегральный отклик не менее 95% полного. Для окончательного решения также имеем среднюю энергию 1,255 МэВ, среднеквадратичную невязку 3,16%, флюенс для экспериментальной выборки A_i $1,62 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

Аналитическое решение для спектра нейтронов имеет вид

$$F(E) = 0,431\sqrt{E} \exp(-0,786E) + 11,3E \exp(-5E). \quad (1)$$

Его интегральные характеристики: средняя энергия 1,228 МэВ, среднеквадратичная невязка 5,1%, флюенс для экспериментальной выборки A_i $1,64 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

Было проведено сравнение восстановленного и рассчитанного по методу Монте-Карло спектра. В расчете учитывали как состав и геометрию активной зоны, так и состав и геометрию окружающих ее элементов реакторного стенда. Из-за малого числа энергетических групп расчетного спектра сравнивали расчетные интегральные отклики для восстановленного и расчетного спектров нейтронов. В пределах погрешностей эксперимента и расчета установлена взаимосогласованность сравниваемых величин.

Флюенс нейтронов уточняли с применением двух методик: по числу реакций $^{239}\text{Pu}(n, f)$ и принятому сечению 1720 мб и по относительному измерению плутониевым детектором в полях БИР-2 и прецизионного источника нейтронов ^{252}Cf , аттестованного по потоку с погрешностью 2% [16]. Средний по двум упомянутым методам флюенс в центральном канале активной зоны при энерговыделении 1 МДж составил $1,63 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ с погрешностью 3%.

Т а б л и ц а 2. Дифференциальный и интегральный спектр нейтронов БИР-2

j	$E_j^{(2)}, \text{МэВ}$	F_j/AE_j	$1\% \sum_j F_j$	j	$E_j^{(2)}, \text{МэВ}$	F_j/AE_j	$1\% \sum_j F_j$	j	$E_j^{(2)}, \text{МэВ}$	F_j/AE_j	$1\% \sum_j F_j$	j	$E_j^{(2)}, \text{МэВ}$	F_j/AE_j	$1\% \sum_j F_j$
82	1.60-2	0.1886	0.9982	103	0.76	0.4381	0.4806	124	2.90	0.0815	0.1166	145	7.00	0.0046	0.0059
83	2.00-2	0.2252	0.9973	104	0.88	0.3639	0.4370	125	3.00	0.0766	0.1089	146	7.20	0.0040	0.0051
84	2.55-2	0.2713	0.9958	105	1.00	0.3055	0.4003	126	3.20	0.0701	0.0949	147	7.40	0.0034	0.0044
85	3.20-2	0.3274	0.9937	106	1.10	0.2677	0.3736	127	3.40	0.0620	0.0825	148	7.60	0.0030	0.0038
86	4.00-2	0.3893	0.9906	107	1.20	0.2416	0.3494	128	3.60	0.0547	0.0716	149	7.80	0.0026	0.0033
87	5.00-2	0.4605	0.9860	108	1.30	0.2217	0.3272	129	3.80	0.0478	0.0620	150	8.00	0.0022	0.0028
88	6.30-2	0.5415	0.9789	109	1.40	0.2045	0.3068	130	4.00	0.0416	0.0537	151	8.20	0.0019	0.0024
89	8.00-2	0.6324	0.9682	110	1.50	0.1875	0.2880	131	4.20	0.0367	0.0463	152	8.40	0.0017	0.0021
90	1.00-1	0.7247	0.9537	111	1.60	0.1742	0.2706	132	4.40	0.0321	0.0399	153	8.60	0.0014	0.0018
91	1.15-1	0.7924	0.9418	112	1.70	0.1632	0.2542	133	4.60	0.0278	0.0344	154	8.80	0.0012	0.0016
92	1.35-1	0.8442	0.9249	113	1.80	0.1536	0.2389	134	4.80	0.0240	0.0296	155	9.00	0.0011	0.0014
93	1.60-1	0.8921	0.9026	114	1.90	0.1450	0.2244	135	5.00	0.0207	0.0254	156	9.20	0.0009	0.0012
94	1.90-1	0.9283	0.8747	115	2.00	0.1371	0.2107	136	5.20	0.0178	0.0218	157	9.40	0.0008	0.0010
95	2.20-1	0.9447	0.8464	116	2.10	0.1297	0.1978	137	5.40	0.0152	0.0188	158	9.60	0.0007	0.0009
96	2.55-1	0.9439	0.8134	117	2.20	0.1230	0.1855	138	5.60	0.0130	0.0162	159	9.80	0.0006	0.0007
97	3.00-1	0.9230	0.7718	118	2.30	0.1167	0.1738	139	5.80	0.0111	0.0140	160	10.0	0.0005	0.0006
98	3.60-1	0.8738	0.7194	119	2.40	0.1105	0.1627	140	6.00	0.0095	0.0121	161	10.5	0.0004	0.0004
99	4.25-1	0.7983	0.6675	120	2.50	0.1039	0.1523	141	6.20	0.0082	0.0104	162	11.0	0.0003	0.0003
100	5.00-1	0.7052	0.6146	121	2.60	0.0978	0.1426	142	6.40	0.0070	0.0090	163	11.5	0.0002	0.0002
101	5.75-1	0.6114	0.5688	122	2.70	0.0919	0.1334	143	6.60	0.0061	0.0078	164	12.0	0.0001	0.0001
102	6.60-1	0.5213	0.5245	123	2.80	0.0867	0.1247	144	6.80	0.0052	0.0068	165	12.5	0.0001	0.0001

В табл. 3 приведены данные о сечениях базовых для определения спектров реакций в стандартных полях Godiva, Yayoі, Tapiro и выбранной области центрального канала активной зоны БИР-2.

Совокупность данных о сечениях реакции $^{239}\text{Pu}(n, f)$ послужила основанием для выбора опорного сечения 1720 мб в упомянутой методике определения флюенса.

Т а б л и ц а 3. Выборка базовых сечений, мб

Реакция	Godiva [3]	Yayoі [3]	Tapiro [3]	БИР-2, сечения	
				экспериментально-расчетные	расчетные
$^{239}\text{Pu}(n, f)$	1730	1715	1716	1766	1723
$^{235}\text{U}(n, f)$	1253	1267	1260	1231	1280
$^{237}\text{Np}(n, f)$	1093	1012	1026	935,2	906,9
$^{238}\text{U}(n, f)$	207,4	185,2	185,8	156,3	164,3
$^{58}\text{Ni}(n, p)$	67,0	57,8	58,9	55,6	56,8

Выборка данных табл. 3 позволила также получить аналитические представления спектров нейтронов Godiva, Yayoі, Tapiro. Для Godiva спектр нейтронов имеет вид

$$F(E) = 0,574\sqrt{E} \exp(-0,786E) + 6,66E \exp(-5E). \quad (2)$$

Для Yayoі и Tapiro аналитические представления одинаковы и имеют вид

$$F(E) = 0,540\sqrt{E} \exp(-0,786E) + 7,82E \exp(-5E). \quad (3)$$

Сравнение аналитических представлений (1)—(3) выявляет очевидную тенденцию перераспределения компонентов при сохранении двухкомпонентного представления спектра. Физическая обоснованность отмеченного изменения спектрального состава хорошо видна из кратких характеристик активной зоны для всех перечисленных реакторов (табл. 4), откуда следует, что жесткость спектра прямо связана с обогащением по ^{235}U и количеством балластных материалов.

Т а б л и ц а 4. Стандартные поля для реакторной дозиметрии на базе быстрых импульсных реакторов

Реактор	Средняя энергия, МэВ	Медианная энергия, МэВ	Энергетическая группа, 90% доли флюенса, МэВ		Краткая характеристика активной зоны
			5%	95%	
БИР-2	1,26	0,71	0,105	4,10	Цилиндрическая сборка (диаметр 220 мм, высота 217 мм, диаметр центрального канала 40 мм) из металлического урана, обогащенного до 85% по ^{235}U , с массовым содержанием молибдена 6%
Yayoі	1,38	0,89	0,113	4,22	Цилиндрическая сборка (диаметр 125 мм, высота 155 мм, диаметр центрального канала 23 мм) из металлического урана, обогащенного до 93% по ^{235}U , в бланкете диаметром 333 мм из обедненного урана и толстом свинцовом отражателе
Tapiro	1,44	0,90	0,122	4,40	Цилиндрическая сборка (диаметр 126 мм, высота 109 мм, диаметр центрального канала 8 мм) из металлического урана, обогащенного до 93,5% по ^{235}U , с массовым содержанием молибдена 1,5%, в отражателе из меди
Godiva	1,51	1,02	0,143	4,50	Сферическая сборка из металлического урана, обогащенного до 93,5% по ^{235}U

Определенный методом интегральных детекторов спектр нейтронов БИР-2 был апробирован для экспертизы отдельных сечений деления, представляющих интерес для дозиметрии нейтронов на ядерно-физических установках [17—19]. Сечение реакции $^{236}\text{U}(n, f)$ взято из работы [20], $^{238}\text{Pu}(n, f)$ — [21], $^{240}\text{Pu}(n, f)$ и $^{241}\text{Am}(n, f)$ — из файла ENDF/BIV. Уровень согласования экспериментально-расчетных и расчетных сечений, представленных в табл. 5, показывает, что методы определения интегральных откликов для детекторов указанного типа и константное обеспечение энергетической зависимости сечений реакций находятся на высоком уровне, как и для широко применяемых в практике исследований детекторов деления из табл. 1.

Т а б л и ц а 5. Результаты апробации избранных детекторов деления на спектре БИР-2

Реакция	A_i , реакций/(ядро·МДж)	σ_i , мб	σ_i^k , мб	$\delta\sigma_i$, %
$^{236}\text{U}(n, f)$	$5,64 \cdot 10^{-11}$	347,0	335,0	-3,7
$^{238}\text{Pu}(n, f)$	$2,87 \cdot 10^{-10}$	1766	1716	-2,9
$^{240}\text{Pu}(n, f)$	$1,48 \cdot 10^{-10}$	910,6	954,8	+4,6
$^{241}\text{Am}(n, f)$	$1,49 \cdot 10^{-10}$	916,7	911,2	-0,6
$\delta A_i = 2,5\%$				

Поле в выбранной области центрального канала активной зоны БИР-2 в качестве опорного включено в состав отраслевой метрологической базы нейтронных измерений [22], созданной в соответствии с ГОСТ 8.105—80 «Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений плотности потока и флюенса нейтронов на ядерно-физических установках».

В заключение следует отметить перспективность использования для создания стандартных полей быстрых нейтронов с варьруемым двухкомпонентным спектральным распределением реакторов с металлической активной зоной с большой внутренней полостью типа Super kukla [1] и БР-К [23]. Целенаправленное изменение соотношения компонентов может быть достигнуто за счет размещения в большой полости сферических или цилиндрических вкладышей из различных материалов, в том числе из металлического урана различного обогащения по ^{235}U .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесов В.Ф. Импульсные реакторы самогасящего действия и методы их расчета. Часть 1. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Импульсные реакторы и простые критические сборки, 1985, вып. 1, с. 43—77.
2. Vlasov M. IAEA Programme on Benchmark Neutron Fields Applications for Reactor Dosimetry. INDC(SEC)-54/I.DOS., July, 1976, IAEA Nuclear Data Section, KARNTNER RING II, A-1010, Vienna.
3. Grundl J., Einsenhauer C. Benchmark Neutron Fields for Reactor Dosimetry. IAEA-208. Neutron Cross Sections for Reactor Dosimetry. Vienna: IAEA, 1978, v. 1, p. 53—104.
4. Харитон Ю.Б., Воинов А.М., Колесов В.Ф. и др. Аперриодические исследовательские импульсные реакторы. — В кн.: Вопросы современной экспериментальной и теоретической физики. Л.: Наука, 1984, с. 103—109.
5. Сибгатуллин И.З., Кувшинов М.И., Чередник П.Ф. и др. Модернизированный реактор БИР-2М. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 1991, вып. 2, с. 3—8.
6. Fabry A., McElroy W.N., Kellogg L.S. Review of Microscopic Integral Cross Section Data in Fundamental Reactor Dosimetry Benchmark Neutron Field IAEA-208. Neutron Cross Section for Reactor Dosimetry. Vienna: IAEA, 1978, v. 1, p. 233—264.
7. Таблицы стандартных справочных данных. Нейтронно-активационные детекторы для реакторных измерений сечений реакций взаимодействия нейтронов с ядрами. ГСССД 131—89. М.: Изд-во стандартов, 1989.

8. Борисов Г.А., Севастьянов В.Д., Вершинин В.Г. и др. Прецизионные измерения с делящимися детекторами нейтронов в реакторе БИР-2. Тез. V Всес. сов. по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. 3—7 декабря 1990 г. М.: НПО ВНИИФТРИ, 1990, с. 131—133.
9. Галиев Н.Б., Григорьев Е.И., Севастьянов В.Д., Ярына В.П. Комплекс нейтронно-активационных средств измерений для ядерно-физических установок. — Труды ВНИИФТРИ «Методы и аппаратура для точных измерений параметров ионизирующих излучений», 1978, вып. 36(66), с. 44—49.
10. Chalypka A. A law-mass, fast ionization chamber for detection of fission fragments. — Nucl. Instrum. Meth., 1979, v. 164, p. 105—112.
11. Васильев Р.Д., Ярына В.П., Севастьянов В.Д. Государственный специальный эталон единицы плотности потока нейтронов для области измерений на ядерно-физических установках. — Измерительная техника, 1974, № 7, с. 10—14.
12. Севастьянов В.Д., Тютиков Н.В. Исследование образцов веществ с делящимися нуклидами. — Труды ВНИИФТРИ, «Методы и аппаратура для точных измерений параметров ионизирующих излучений», 1984, с. 77—84.
13. Кошелев А.С., Маслов Г.Н., Петров Ю.В. КАСКАД—комплексная вычислительная программа для метода интегральных нейтронных детекторов. Тез. докл. V Всес. сов. по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. 3—7 декабря 1990 г. М.: НПО ВНИИФТРИ, 1990, с. 116—118.
14. Методические указания МИ 1806—87. ГСИ. Характеристики реакторных полей. Методика расчета спектров нейтронов по результатам нейтронно-активационных измерений. М.: ВНИИФТРИ, 1987.
15. Берзонис М.А., Бондарс Х.Я. Информационное и программное обеспечение расчетов спектров нейтронов по измеренным скоростям реакций. — Kernenergie, 1983, Bd. 26, S. 103—106.
16. Тарасенко Ю.Н., Игуменцев В.Н., Агуров В.А. и др. Создание и исследование вторичного эталона единицы плотности потока нейтронов. Тез. докл. IV Всес. сов. по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. 26—29 ноября 1985 г. М.: ВНИИФТРИ, 1985, с. 3.
17. Крайтор С.Н., Кошаева К.А. Исследование ^{231}Pa и ^{236}U для измерения спектров быстрых нейтронов. — Атомная энергия, 1973, т. 34, вып. 7, с. 49—52.
18. Борисов Г.А., Севастьянов Е.Д., Тарновский Г.Б. Исследование детекторов нейтронов с делящимся нуклидом уран-236. Тез. докл. V Всес. сов. по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. 3—7 декабря 1990 г. М.: НПО ВНИИФТРИ, 1990, с. 57—58.
19. Голиков И.Г., Лешаков И.И., Остроумов В.И. и др. Применение детекторов ^{238}Pu и ^{241}Am для измерения спектра нейтронов. — Труды ВНИИФТРИ «Методы и аппаратура для точных измерений параметров ионизирующих излучений», М.: ВНИИФТРИ, 1976, вып. 30(60), с. 42—46.
20. Клепацкий А.Б., Коньшин В.А., Маслов В.М. и др. Оцененные нейтронные константы урана-236: Препринт ИЯЭ АН БССР, Минск, 1987, № 2.
21. Клепацкий А.Б., Маслов В.М., Породинский Ю.В., Суховицкий Е.Ш. Применение теоретической модели для предсказания нейтронных сечений малоизученных ядер на примере ^{231}Pu . — В кн.: Нейтронная физика, т. 1. Материалы I Межд. конф. по нейтронной физике. 14—18 сентября 1987 г. М., 1988, с. 372—376.
22. Борисов Г.А., Севастьянов В.Д., Ярына В.П. и др. Создание отраслевой метрологической базы нейтронных измерений. Тез. докл. V Всес. сов. по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. 3—7 декабря 1990 г. М.: НПО ВНИИФТРИ, 1990, с. 3—4.
23. Павловский А.И., Малинкин А.А., Колесов В.Ф. и др. Двухсекционный бустер-реактор «Каскад» (БР-К). — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 1992, вып. 3, с. 3—11.

Поступила в Редакцию 10.09.93

УДК 621.039.54-436.1

УСТАНОВКА ДИНАМИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ РАЗМЕРОВ, ФОРМЫ И ПЛОТНОСТИ МИКРОТВЭЛОВ

Доморацкий Е.П. (ВНИИТФА)

Среди параметров шаровых твэлов ВТГР, определяющих его надежную и экономичную работу, важное место занимают геометрические характеристики и плотность микротвэлов [1]. Для управления качеством этой массовой продукции и формирования ее заданных свойств непосредственно в процессе производства (в режиме on-line) необходимы методы и средства автоматического высокопроизводительного прецизионного контроля, классификации, сортировки и дозирования гранул микро топлива (кernels, их покрытий и микротвэлов) по размеру, форме, числу, массе и плотности.