

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власов А.А., Водолазских В.В., Мазин В.И. и др. Способ изотопного восстановления регенерированного урана. Пат. РФ № 2236053 от 10.09.2004. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2004, № 25, с. 562.
2. Сулаберидзе Г.А., Борисевич В.Д., Цюаньсинь Се. Квазиидеальные каскады с дополнительным потоком для разделения многокомпонентных изотопных смесей. — Теоретические основы хим. технологии, 2006, т. 40, № 1, с. 7—16.
3. Смирнов А.Ю., Сулаберидзе Г.А. Обогащение регенерированного урана с одновременным разбавлением $^{232-236}\text{U}$ природным сырьем и отвальным ураном. — Атомная энергия, 2014, т. 117, вып. 1, с. 36—41.
4. Водолазских В.В., Глухов Н.П., Палкин В.А. и др. Способ переработки загрязненного уранового сырья. Пат. РФ № 2377674 от 27.12.2009. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2009, № 36, с. 1207—1208.
5. Палкин В.А. Разделение изотопов урана в каскаде с промежуточным отбором. — Перспективные материалы, 2010, вып. 8, с. 11—14.
6. Власов А.А., Водолазских В.В., Гринев В.Г. и др. Способ изотопного восстановления регенерированного урана. Пат. РФ № 2242812 от 20.07.2004. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2004, № 35, с. 804—805.
7. Водолазских В.В., Козлов В.А., Мазин В.И. и др. Способ изотопного восстановления регенерированного урана. Пат. РФ № 2282904 от 27.08.2006. — Там же, 2006, № 24, с. 549—550.
8. Прусаков В.Н., Сазыкин А.А., Соснин Л.Ю. и др. Коррекция изотопного состава регенерированного урана по ^{232}U центробежным методом с введением газаносителя. — Атомная энергия, 2008, т. 105, вып. 3, с. 150—156.
9. Сулаберидзе Г.А., Борисевич В.А., Цюаньсинь Се. О некоторых разделительных проблемах при вовлечении регенерированного урана в топливный цикл. — В сб.: IX Всерос. научн. конф. «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул». Звенигород, 2004, с. 78—85.
10. Палкин В.А. Очистка регенерированного урана в каскадах с обогащением ^{235}U до 5%. — Атомная энергия, 2013, т. 115, вып. 1, с. 28—33.
11. Сазыкин А.А. Термодинамический подход к разделению изотопов. — В кн.: Изотопы: свойства, получение, применение. Под ред. В.Ю. Баранова. М.: ИздАТ, 2000, с. 72—108.
12. Палкин В.А. Очистка и обогащение регенерированного урана в двойном каскаде. — Атомная энергия, 2015, т. 118, вып. 2, с. 100—105.
13. Палкин В.А., Маслюков Е.В. Очистка регенерированного урана в дополнительном отборе R-каскада и его обогащение в ординарном каскаде. — Теоретические основы химической технологии, 2016, т. 50, вып. 5, с. 1—7.
14. Палкин В.А. Очистка регенерированного урана в двухкаскадной схеме при использовании в одном из каскадов промежуточного отбора. — Атомная энергия, 2016, т. 121, вып. 1, с. 37—41.
15. Палкин В.А., Маслюков Е.В. Очистка регенерированного гексафторида урана в двухкаскадной схеме при обогащении ^{235}U менее 5%. — Там же, 2017, т. 122, вып. 4, с. 219—224.
16. Палкин В.А. Применение квазиидеальных каскадов и операции разбавления для очистки регенерированного гексафторида урана. — Там же, 2016, т. 121, вып. 3, с. 152—157.
17. Палкин В.А. Оптимизация каскада центрифуг для разделения многокомпонентной смеси изотопов. — Там же, 2013, т. 115, вып. 2, с. 93—99.

Поступила в Редакцию 26.10.17

УДК 539.125.52:621.384.654

СИСТЕМА ЭТАЛОННЫХ ИСТОЧНИКОВ НЕЙТРОНОВ НА ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ ДЛЯ КОНТРОЛЯ, АТТЕСТАЦИИ И ГРАДУИРОВКИ АППАРАТУРЫ И ОБОРУДОВАНИЯ

Севастьянов В.Д., Коваленко О.И. (ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.)

Поля нейтронного излучения источников на основе ядерно-физических установок, таких, как ядерные реакторы и генераторы, нашли широкое применение для исследования радиационной защиты объектов гражданского и военного назначения, оценки радиационной стойкости изделий электронной и оптической техники, градуировки радиометрической и дозиметрической аппаратуры, аппаратуры систем управления и защиты, а также контроля выгорания ядерного

топлива. Воздействие нейтронного излучения на исследуемые объекты определяется не только флюенсом, но и энергетическим спектром нейтронов. Диапазон энергии нейтронов, излучаемых источником на основе ядерного реактора или нейтронного генератора, составляет преимущественно 10^{-10} —18 МэВ. Корректное решение указанных научно-технических задач невозможно без метрологического обеспечения нейтронных измерений.

Метрологическое обеспечение нейтронных измерений базируется на государственном первичном специальном эталоне единиц плотности потока и флюенса нейтронов на ядерно-физических установках ГЭТ 51—2017, который передает единицы плотности потока в диапазоне 10^3 — 10^{16} $\text{с}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$ и флюенса в диапазоне 10^4 — 10^{20} см^{-2} в соответствии с поверочной схемой для средств измерений согласно ГОСТу 8.105—80. Метрологическое обеспечение единства измерений осуществляется преимущественно путем создания эталонных источников с опорными и моделирующими опорными полями нейтронов для конкретной научно-технической задачи. Характеристики полей нейтронов измеряются в особых условиях, а именно при повышенной температуре 20—1000 °С, ограниченности доступного объема рабочей области измерений 5—300 мм, при наличии сопутствующего излучения, широком диапазоне плотности потока нейтронов до 10^{15} $\text{с}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$, работе ядерно-физической установки в импульсном (длительность импульса 10^{-9} — 10^{-3} с) и статическом режиме, при широком энергетическом диапазоне спектра нейтронов 10^{-10} —18 МэВ.

Наиболее полно перечисленным условиям удовлетворяет нейтронно-активационный метод определения нейтронных характеристик (плотности потока, флюенса и спектра нейтронов). Он состоит в облучении в исследуемом поле нейтронов стандартных активационных и делительных детекторов нейтронов, измерении и приведении на окончание облучения наведенной активности радионуклидов, расчете скорости ядерных реакций или числа реакций. Скорость реакций активации и деления рассчитывается по соотношению

$$Q_a^i = A_i^i / \{ N_{\text{я}}^i [1 - \exp(-\lambda^i t_0^i)] \exp(-\lambda^i t_{\text{в}}^i) \}$$

для активационного детектора,

$$Q_F^i = N_F^i / (\varepsilon_F N_{\text{я}}^i t_0^i)$$

для делительного детектора,

где A_i^i — активность i -го детектора на время t его измерения; $N_{\text{я}}^i$ — число ядер нуклида-мишени в i -м детекторе; λ^i — константа распада продукта активации в i -м детекторе; t_0^i — эффективное время облучения i -го детектора нейтронами; $t_{\text{в}}^i$ — время выдержки детектора;

N_F^i — число треков осколков деления в регистраторе i -го делительного детектора; ε_F — чувствительность регистрации актов деления.

Нейтронные характеристики полей определяются из системы интегральных уравнений Фредгольма с дискретным заданием параметров i , которые связывают скорость i -й ядерной реакции Q_i в активационном детекторе при его облучении нейтронами, нормированную на одно ядро нуклида-мишени в детекторах, с дифференциальной плотностью потока в поле нейтронов $\varphi(E)$ и сечением ядерной реакции $\sigma_i(E)$ для нуклида-мишени в i -м детекторе:

$$Q_i = \int_0^\infty \varphi(E) \sigma_i(E) dE, \quad (1)$$

где E — энергия нейтронов, МэВ.

Поскольку точного решения уравнения нет, так как ядро подынтегральной функции (сечение i -й ядерной реакции $\sigma_i(E)$), как правило, не определено во всем диапазоне энергии восстанавливаемого спектра, то при расчете предварительно формируют априорный спектр нейтронов в качестве первичной модели восстанавливаемого спектра, который в дальнейшем деформируется с учетом согласования измеренной скорости ядерных реакций в облученных нейтронами детекторах. Чем более физичен априорный спектр и близок к искомому, тем корректнее можно восстановить спектр в исследуемой точке поля нейтронов ядерно-физической установки. Из системы уравнений (1) следует, что необходимыми условиями точного определения характеристик измеряемого поля нейтронов являются:

измерение с минимальной погрешностью (не более 1—3%) скорости ядерных реакций в используемых детекторах;

применение для измерений спектра набора активационных детекторов с энергетической чувствительностью к нейтронам, перекрывающей весь энергетический диапазон восстанавливаемого спектра;

применение наиболее достоверных сечений ядерных реакций при восстановлении спектра.

Достаточным (методическим) условием решения системы уравнений (1) является формирование физически обоснованного априорного спектра. Известно несколько методов его формирования. Так, в качестве априорного часто используют спектр в исследуемой точке, рас-

считанный методом Монте-Карло, с учетом конкретной конструкции ядерного реактора. Хотя такой метод перспективен, но для его реализации необходимо достаточно точно моделировать конструкцию идентичных деталей и узлов ядерного реактора, формирующих спектр нейтронов в исследуемой точке. К недостаткам метода следует отнести его трудоемкость.

В настоящей работе спектры нейтронов определяли по методике [2]. Априорные спектры формировали в аналитической форме в виде суперпозиции физически обоснованных и хорошо изученных в мировой практике нейтронных измерений спектров: спектра мгновенных нейтронов деления ядер (спектры Максвелла, Ватта и др.), испарительных спектров (спектров Вайскопфа), спектра замедления (спектра Ферми), максвелловского спектра тепловых нейтронов, моноэнергетических нейтронов со спектром Гаусса.

Действительно, быстрые нейтроны деления ядер энергией 10^{-2} —18 МэВ генерируются в активной зоне в результате цепной реакции деления ядер ^{235}U . Нейтроны испарительных спектров Вайскопфа образуются в результате неупругого взаимодействия быстрых нейтронов спектра деления по реакциям (n, n') , $(n, 2n)$ с ядрами материалов конструктивных элементов как ядерно-физических установок, так и материала окружающих их предметов, например, стендов, на которых они установлены, пола, стен и потолка экспериментальных залов ядерных реакторов и др. Нейтроны спектра замедления Ферми и максвелловского спектра тепловых нейтронов формируются в результате многократного упругого рассеяния быстрых нейтронов на ядрах элементов, входящих в состав материалов отражателей активной зоны, а также замедляющих нейтроны сред ядерных реакторов.

Моноэнергетические нейтроны энергией 2,5 и 14 МэВ, генерируемые ускоренными пучками дейтронов в дейтериевых и тритиевых мишенях мишенных блоков нейтронных генераторов по реакциям $D(d, n)$ и $T(d, n)$, в настоящей работе представлены в форме известного распределения Гаусса со стандартным отклонением (энергетическим разрешением) σ_E .

Поиск интегрального спектра $F(E)$ в исследуемой точке поля нейтронов осуществляли в виде решения аналитического выражения [2].

Такое представление спектра нейтронов позволяет существенно уменьшить систематическую погрешность восстановления спектра нейтронов, сравнить спектры различных типов установок по вкладу отдельных парциальных спектров в результирующий, а также по средней энергии нейтронов в восстанавливаемых спектрах и др. Указанное представление спектров позволяет дополнительно оценить радиоактивное воздействие отдельных компонентов спектра на исследуемые объекты и оперативно моделировать отдельные компоненты в спектрах нейтронов при создании опорных полей.

Изложенная методика расчета спектров нейтронов стандартизована и реализована в комплексной вычислительной программе КАСКАД [3, 4].

Обобщенные результаты восстановления некоторых спектров моделирующих опорных полей источников нейтронов на основе установок, аттестованных в качестве эталонных по программе КАСКАД, приведены в таблице. Поля нейтронов представлены в пяти группах в соответствии с решаемыми на них научно-техническими задачами.

В полях нейтронов реакторов группы I исследуется радиационная стойкость изделий электронной и оптической техники, а также отдельные узлы и составляющие ядерных устройств разрабатываемых реакторов. Облучение проводится в центральных каналах реакторов БАРС-1, -5, БИР-2, БР-1 и БР-К1 только быстрыми нейтронами энергией более 10 кэВ. Диаметр центрального канала, где размещают исследуемые объекты, не превышает 300 мм. Средняя энергия нейтронов в спектрах полей указанных реакторов для этой группы составляет 0,7—1,34 МэВ. В спектрах этих полей отсутствуют как тепловые, так и надтепловые нейтроны.

Исследованиями установлено, что спектры в центре активных зон импульсных быстрых реакторов по своей структуре и характеристикам идентичны стандартным полям спектров деления ^{235}U тепловыми нейтронами и нейтронами спонтанного деления ^{252}Cf [5].

Поля нейтронов группы II находятся на расстоянии 0,7—10 м от центра активной зоны в направлении продольной оси экспериментального зала реактора БР-1. Средняя энергия нейтронов в спектрах этих полей лежит в диапа-

Обобщенные результаты восстановления спектров в полях нейтронов ЯФУ

ЯФУ	Флюенс, см ⁻² ; плотность потока, с ⁻¹ ·см ⁻² ; средняя энергия, МэВ; среднеквадратичное отклонение, %	Константы парциальных спектров (вклад в результирующий спектр, %)				
		Делительные спектры	Испарительные спектры	Спектры Максвелла	Спектры Ферми	Спектры Гаусса
		$\alpha_f^i (A_f^i)$	$\alpha_{Bi} (A_{Bi})$	$\alpha_m \cdot 10^7 (A_m)$	$\alpha_F (A_F)$	$\alpha_G (A_G)$
1	2	3	4	5	6	7
I. Спектр нейтронов в центре металлической активной зоны импульсных быстрых реакторов						
БАРС-1	1,37·10 ¹⁴ ; 1,35; 1,18; 15	0,780 (12,5) 0,786 (12,8) 0,815 (14,4)	0,69 (3,8); 0,97 (15,5); 5 (40,9)	—	—	—
	1,37·10 ¹⁴ ; 1,34; 1,68; 15		0,69 (7,29); 0,97 (45,7); 5 (47,1)	—	—	—
БАРС-5	4,50·10 ¹⁴ ; 1,26; 1,13; 21	0,780 (11,2) 0,786 (11,5) 0,815 (13,3)	0,69 (3,13); 0,97 (15,1); 5 (45,8)	—	—	—
	4,51·10 ¹⁴ ; 1,26; 1,88; 21		0,69 (6,05); 0,97 (42,9); 5 (51,1)	—	—	—
БИР-2	1,64·10 ¹⁴ ; 1,22; 0,66; 16	0,78 (10,9) 0,786 (11,2) 0,815 (12,8)	0,69 (2,99); 0,97 (13,6); 5 (48,5)	—	—	—
	1,64·10 ¹⁴ ; 1,22; 1,21; 16		0,69 (6,06); 0,97 (40,3); 5 (53,7)	—	—	—
БР-1	2,74·10 ¹⁴ ; 1,18; 0,80; 18	0,780(10,4) 0,786 (10,8) 0,815 (12,7)	0,69 (2,15); 0,97 (13,1); 5 (50,9)	—	—	—
	2,74·10 ¹⁴ ; 1,17; 1,30; 18		0,69 (5,16); 0,97 (38,8); 5 (56,1)	—	—	—
БР-К1	4,64·10 ¹⁴ ; 0,77; 1,87; 11	0,780 (4,55) 0,786 (4,84) 0,815 (6,31)	0,69 (0,34); 0,97 (7,94); 5 (76,1)	—	—	—
	4,64·10 ¹⁴ ; 0,77; 2,86; 11		0,69 (1,47); 0,97 (20,3); 5 (78,3)	—	—	—
II. Спектр полей нейтронов в реакторном зале БР-1 на разном расстоянии от центра активной зоны, мм						
БР-1 715	3,02·10 ¹² ; 1,27; 1,90; 9	0,780 (11,4) 0,786 (11,8) 0,815 (13,8)	0,69 (3,14); 0,97 (15,7); 5 (38,2)	3,3 (0,91)	0,9 (5,1)	—
1013	2,01·10 ¹² ; 1,03; 2,37; 13	0,780 (8,7) 0,786 (8,96) 0,815 (10,3)	0,97 (11,2); 5 (49,6)	3,3 (1,31)	0,9 (9,91)	—
1565	9,68·10 ¹¹ ; 0,90; 1,98; 13	0,780 (7,39) 0,786 (7,65) 0,815 (8,94)	0,69 (1,74); 0,97 (10,1); 5 (46,2)	3,3 (2,91)	0,9 (15,1)	—
2215	5,57·10 ¹¹ ; 0,86; 2,26; 19	0,780 (7,31) 0,786 (7,39) 0,815 (7,76)	0,69 (4,36); 0,97 (6,83); 5 (40,3)	3,3 (5,36)	0,9 (20,7)	—
3300	3,38·10 ¹¹ ; 0,68; 2,12; 15	0,780 (7,24) 0,786 (7,28) 0,815 (7,48)	1,02 (7,43); 5 (15,8); 8 (15,3)	3 (9,24)	0,9 (30,21)	—
5500	2,03·10 ¹¹ ; 0,51; 2,24; 14	0,780 (5,83) 0,786 (5,83) 0,815 (5,85)	1,02 (5,79); 5 (7,18); 8 (7,32)	3,3 (14,0)	0,9 (48,2)	—
7700	1,63·10 ¹¹ ; 0,37; 2,08; 6	0,780 (4,11) 0,786 (4,12) 0,815 (4,15)	1,02 (4,03); 5 (5,61); 8 (6,01)	3,3 (20,4)	0,9 (51,6)	—

Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6	7
10 000	$1,41 \cdot 10^{11}$; 0,29; 1,61; 6	0,780 (3,14) 0,786 (3,15) 0,815 (3,18)	1,02 (3,06); 5 (4,67); 8 (5,19)	3,3 (22,7)	0,9 (55,0)	—
III. Спектр полей нейтронов в центре активной зоны реакторов БР-К1 и Ф-1						
БР-К1(СПТ)	$2,66 \cdot 10^{14}$; 0,15; 1; 15	0,780 (1,78)	0,69 (1,23); 0,97 (1,78); 5 (9,02)	3,89 (71,6)	1,02 (14,6)	—
Ф-1	$1,78 \cdot 10^{10}$; 0,15; 0,94; 12	0,780 (0,52) 0,786 (0,54) 0,815 (0,66)	0,69 (0,14); 0,97 (0,92); 5 (20,6)	3,51 (39,7)	1 (36,9)	—
IV. Спектры полей нейтронов за специальными замедляющими сборками, расположенными снаружи активной зоны реактора БАРС-1						
МОП-1	$9,11 \cdot 10^{10}$; 0,81; 2,01; 11	0,780 (6,87) 0,786 (7) 0,815 (7,63)	0,69 (3,1); 0,97 (7,93); 5 (36,7); 320 (2,61)	3,26 (7,94)	0,93 (20,2)	—
ПГНИМ-1	$8,82 \cdot 10^{10}$; 0,76; 2,58; 12	0,780 (6,29) 0,786 (6,25) 0,815 (6,09)	0,69 (8,09); 0,97 (5,86); 5 (5,06); 32 (3,62)	3,26 (4,45)	0,86 (54,3)	—
МОП-2	$8,03 \cdot 10^{10}$; 0,44; 1,67; 11	0,780 (2,27) 0,786 (2,37) 0,815 (2,85)	0,69 (0,46); 0,97 (3,14); 5 (50,4); 12 (4,92); 320 (0,75)	3,26 (8,81)	0,93 (24,0)	—
ПГНИМ-2	$7,31 \cdot 10^{10}$; 0,52; 2,69; 12	0,780 (4,45) 0,786 (4,56) 0,815 (5,09)	0,69 (1,56); 0,97 (5,86); 5 (14,6); 12 (11,8); 320 (9,03)	3,26 (6,34)	0,93 (36,7)	—
V. Спектры термоядерных полей нейтронов на генераторе СНЕГ-13 с разными фильтрами						
ПГНИМ-3	$4,9 \cdot 10^2$; 3,87; 0,5; 12	0,786 (6,47)	0,69 (6,87); 0,97 (6,17); 5 (15,2); 8 (24,1)	3,3 (3,08)	0,93 (13,7)	13,5 (24,4)
	$4,89 \cdot 10^2$; 3,87; 0,83; 12	0,786 (23,9)	8 (34,7)	3,3 (3,08)	0,93 (13,7)	13,5 (24,6)
ПГНИМ-4	$3,04 \cdot 10^2$; 1,93; 0,3; 9	0,786 (5,28)	0,69 (5,26); 0,97 (5,15); 5 (9,89); 8 (13,1); 20 (15,5); 81 (14,8)	3,3 (4,31)	0,93 (15,8)	13,5 (11,0)

зоне 0,293—1,268 МэВ. Указанные поля использовали для верификации программ расчета спектров нейтронов ядерных реакторов методом Монте-Карло. Верифицированные программы, в свою очередь, использовали для расчета характеристик полей нейтронов в помещениях большого размера, в которых испытываются объекты больших габаритов. Кроме того, указанные поля реактора БР-1 с существенно отличающимися спектрами использовали для измерения энергетической зависимости чувствительности нейтронной радиометрической и дозиметрической аппаратуры. В указанных полях также исследовали закономерности формирования энергетических спектров нейтронов в экспериментальном зале ядерного реактора [6].

Поля тепловых и эпитепловых нейтронов реакторов группы III нашли широкое применение для градуировки аппаратуры систем управления и защиты ядерных реакторов, определе-

ния выгорания топлива в активной зоне энергетических реакторов, а также для аналитических исследований, например, для определения следового количества примесных элементов в особо чистых материалах [7].

В группе IV приведены характеристики полей нейтронов за специальными замедляющими сборками, размещенными на расстоянии ~0,6 м от центра активной зоны реактора БАРС-1. Эти поля моделируют по энергетическому спектру на расстоянии ~500 м от активной зоны быстрого импульсного реактора в целях экспрессной градуировки высокочувствительной радиометрической и дозиметрической аппаратуры, используемой для исследования низкоинтенсивных полей нейтронов на значительном расстоянии от ядерно-физических установок (более 500 м).

В группе V представлены рождаемые в термоядерных реакциях поля нейтронов, смодели-

рованные на генераторе СНЕГ-13. Поля нейтронов этой группы размещены за специальными замедляющими сборками на определенном расстоянии от мишенного блока генератора. Эти поля моноэнергетических нейтронов энергией 15 МэВ генератора СНЕГ-13 на расстоянии 1032 мм от тритиевого слоя мишени без поглотителя и с поглотителем из стали имитируют по энергетическому спектру идентичные поля генератора на расстоянии ~500 м от мишени.

Поля нейтронов групп IV и V предполагают использовать преимущественно для градуировки высокочувствительной нейтронной аппаратуры разрабатываемого прототипа термоядерного реактора.

В заключение отметим, что приведенные в статье спектры полей нейтронов восстановлены с высокой степенью достоверности. Среднеквадратичное отклонение измеренной и рассчитанной скорости ядерных реакций для всех используемых активационных детекторов не превышает 2,5%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Севастьянов В.Д., Коваленко О.И., Шибяев Р.М. Государственный первичный специальный эталон единиц плотности потока нейтронов и флюенса нейтронов для ядерно-физических установок. — Вестник метролога, 2017, № 2, с. 15—19.
2. Севастьянов В.Д., Кошелев А.С. Методика восстановления спектров нейтронов ядерных реакторов и нейтронных генераторов КАСКАД 200(176). М., ФГУП «ВНИИФТРИ», 2011. 26 с.
3. Севастьянов В.Д., Кошелев А.С., Маслов Г.Н. Метод расчета спектра нейтронов по результатам измерений с интегральными детекторами. Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. МИ 2804—2003. М., ВНИИФТРИ, 2003. 28 с.
4. Севастьянов В.Д., Кошелев А.С. Методика восстановления спектров нейтронов ядерных реакторов и нейтронных генераторов КАСКАД 200(176). ГСССД МР 182—2011. М., ВНИИФТРИ, 2011. 26 с.
5. Севастьянов В.Д., Кошелев А.С., Маслов Г.Н. Высокоинтенсивные поля нейтронов в центре металлической активной зоны быстрых реакторов как первичные стандартные поля нейтронов. — Приборы и техника эксперимента, 2003, № 4, с. 5—19.
6. Севастьянов В.Д., Воронцов С.В., Дроздов И.Ю. и др. Экспериментальные залы быстрых реакторов с открытой активной зоной как формователи энергетических спектров нейтронов. — Там же, 2004, № 6, с. 5—14.
7. Севастьянов В.Д., Дьяков А.А., Мелешко А.В. и др. Характеристики поля нейтронов в центре активной зоны исследовательского водо-водяного реактора ИВВ-2М. — Там же, 2007, № 3, с. 46—53.

Поступила в Редакцию 4.09.17

УДК 550.83

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙТРОННОГО ГАММА-МЕТОДА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗОЛЬНОСТИ УГЛЯ

Пак Ю.Н., Нугужинов Ж.С., Пак Д.Ю., Иманов М.О.

(Карагандинский государственный технический ун-т, г. Караганда, Республика Казахстан)

Традиционный способ определения зольности как важнейшей качественной характеристики угля предусматривает выполнение трудоемких операций по отбору представительной пробы, тщательной пробоподготовке до лабораторного и аналитического состояния с последующим сжиганием аналитической навески (~0,074 мм) в муфельной печи. Все эти операции вносят погрешность в конечный результат измерения зольности. В итоге интегральная погрешность оказывается значительно выше погрешности непосредственно стандартного (термомассового) анализа. Стандартный метод характеризуется деструктивностью, низкой представительностью и высокой трудоемкостью, что обесценивает результаты термомассо-

вого анализа, ограничивает и делает почти невозможным его использование для контроля качества и управления технологическими процессами добычи и переработки твердого топлива.

От указанных недостатков свободны инструментальные ядерно-физические методы, основанные на взаимодействии γ - и нейтронного излучения с веществом [1]. В основу инструментальных методов с применением γ - и рентгеновского излучения положены зависимости между зольностью (суммой минеральных составляющих) угля и измеряемыми интегральными физическими параметрами (насыпной плотностью, эффективным атомным номером и др.). В зависимости от вида объекта контроля качества (пробы, горная выработка, навалы,