

## Нейтронно-активационные средства измерений. Состояние и перспективы

Е. И. ГРИГОРЬЕВ

*Рассмотрено современное состояние разработки и выпуска в стране стандартизованных нейтронно-активационных средств измерений. Показан комплексный подход в таких разработках, приведены параметры выпускаемой продукции. Обосновано дальнейшее развитие проблемы.*

Modern state of elaboration and production of neutron-activation standard means of measuring are considered. Complex approach to the elaboration is shown. Listing of produced production with main parameters is given. The ways of further developing of the problem are based.

Нейтронно-активационный метод является основным, а нередко и единственно возможным методом измерения характеристик нейтронных полей на ядерных реакторах. Суть нейтронно-активационного метода состоит в облучении образца вещества (нейтронно-активационного детектора) в нейтронном поле. При этом происходит реакция нейтронов с ядрами нуклида-мишени в детекторе, в результате которой образуется радиоактивный продукт. Измеренная после облучения наведенная активность детектора связана со спектром нейтронного поля, в котором облучался детектор, строгой зависимостью. Так, для случая стационарного облучения детектора в поле с неизменным спектром нейтронов эта зависимость имеет вид

$$A_i = N_{яi}(1 - \exp(-\lambda_i \tau_0)) \exp(-\lambda_i \tau_в) \int_0^{\infty} \sigma_i(E) \varphi(E) dE,$$

где  $A_i$  — измеренная через время  $\tau_в$  после облучения активность детектора  $i$ -го типа;  $\tau_0$  — продолжительность облучения;  $N_{яi}$  — число ядер нуклида-мишени в детекторе;  $\lambda_i$  — постоянная распада продукта реакции;  $\sigma_i(E)$  — сечение активации  $i$ -го типа;  $\varphi(E)$  — дифференциальный спектр нейтронов — искомая характеристика нейтронного поля.

Нейтронно-активационные измерения — это многопараметрические косвенные измерения, качество которых в первую очередь зависит от оснащенности экспериментатора надежными и разнообразными нейтронно-активационными детекто-

рами. Развитие прикладных направлений нейтронной физики, таких как ядерная технология и энергетика, определило массовый характер нейтронных измерений, при этом целесообразной стала централизованная система обеспечения потребителей аттестованными детекторами.

Мировая практика показывает различные подходы к организации обеспечения экспериментаторов нейтронно-активационными средствами измерений. Первый подход состоит в разработке и производстве специализированных материалов для детекторов, их аттестации по числу ядер нуклида-мишени на единицу массы материала и дальнейшем приговлении экспериментатором из этого материала детекторов нужного размера и конфигурации. Такой подход реализует в настоящее время ЕВРАТОМ (CBNМ, Geel, Belgium). Потребителю предлагается широкая номенклатура алюминиевых сплавов с добавками различных нуклидов-мишеней. Материалы выполнены в виде фольги и проволоки. Гарантируется чистота материала и равномерность добавки, аттестовано содержание добавки на единицу массы материала. Второй подход характерен для выпуска нейтронно-активационных средств в МАГАТЭ. По имеющейся у нас информации в 1970—1980 гг. потребителям предлагались наборы, состоящие из нескольких типов детекторов, которые позволяют выполнить конкретную измерительную задачу. Правильность измерения активности облученных детекторов обеспечивалась выпуском специализированных градуировочных источников. Этот подход можно характеризовать, как ограниченно комп-

лексный, снимающий с потребителя существенную часть усилий по организации нейтронно-активационного эксперимента и обеспечению его достоверности.

Разработка, стандартизация и выпуск нейтронно-активационных средств измерений для ядерных реакторов были организованы в СССР с начала 70-х годов [1]. Тогда же были сформированы основные принципы этой деятельности, важнейший из которых — комплексность разработки и выпуска средств измерений. Современные нейтронные измерения в полях ядерных реакторов, как правило, носят прикладной характер — обеспечить оперативно и с нужной точностью потребность технологического эксперимента в характеристиках нейтронного облучения какого-либо объекта. Для выполнения таких измерений требуются не только аттестованные детекторы, но и разнообразная облучательная оснастка, производство которой нередко связано со сложными технологическими процессами. Кроме того, необходимо решить вопросы надежного измерения наведенной активности в детекторах, оптимизировать сам процесс исследования, сводя к минимуму количество облучений; для корректной трактовки результатов измерения нужны надежные справочные данные, прежде всего о сечениях реакций активации. Возможно, более полное решение этих вопросов в рамках разработки нейтронно-активационных детекторов снимет с исполнителя нейтронных измерений большие затраты по подготовке исследования, обеспечит оперативность измерений и гарантирует достоверность результатов. Именно такой комплексный подход к разработке нейтронно-активационных детекторов принят в Центре метрологии ионизирующих излучений ВНИИФТРИ — ведущей организации страны в данной области измерений. Разработанный при таком подходе комплекс средств включает не только нейтронно-активационные детекторы, но и средства измерений их активности и облучательную оснастку. Такой комплекс классифицируется как нейтронно-активационные средства измерений — НАСИ.

Основными объектами разработки НАСИ являются: материалы для детекторов, производство детекторов и их аттестация;

- обеспечение измерений наведенной активности;
- облучательная оснастка;
- сечения реакций активации (справочные данные);
- формирование наборов НАСИ и их оптимизация.

Названные задачи решают компетентные специалисты и исследовательские группы различных институтов страны. Рассмотрим современное состояние разработок НАСИ по каждому направлению. Отметим, что стандартизованная форма детектора — диск диаметром 10 или 3 мм.

**Материалы.** Сырьевой базой производства нейтронно-активационных детекторов служит фонд материалов для детекторов (ФМД), в котором можно выделить универсальные и специальные материалы.

*Универсальные материалы* представляют собой химические элементы или их соединения в виде, пригодном для изготов-

ления детекторов. Предпочтение отдается металлам, прокатанным в фольгу различной толщины (Sc, Cu, Co, Rh, Cd, In, Ni, Fe, Ti, Al, V, Nb, Y, Zr). Порошкообразные материалы используются для изготовления детекторов из Na — NaF, Cr — Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Mn — MnO<sub>2</sub>, S — элементарной серы, P — (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, I — PbI<sub>2</sub>, F — карбонильного железа. Детекторы из порошков прессуются в таблетки, иногда с добавлением нейтральной связки. Материалы этой части фонда подбираются из промышленно выпускаемых марок, подходящих по чистоте (отсутствию мешающих после активации примесей). Аттестация детекторов по числу ядер нуклида-мишени сводится к взвешиванию образцов и расчету числа ядер с учетом изотопного состава и химической формулы соединения.

*Специальные материалы* создаются с:

максимально возможной концентрацией нуклида-мишени на единицу массы материала или отсутствием других изотопов данного элемента (концентрированные материалы); очень малым содержанием нуклида-мишени на единицу массы материала (разбавленные материалы); заданными свойствами, например по рабочей температуре, способу фиксации нуклида-мишени и др. (образцы изготавливают по особой технологии).

Результаты выполненных разработок для этой части ФМД приведены в табл. 1.

Концентрированные материалы — это обогащенные изотопы, в основном металлы, прокатанные в фольгу. Аттестация образцов сводится к взвешиванию и расчету числа ядер. Разбавленные материалы представлены в фонде четырьмя видами:

- сплавами высокочистого алюминия с небольшими (1—10 %) добавками элементов, включающих изотоп-мишень;
- сплавами ванадия с элементами-мишенями (0,01—10 %);
- керсолом (кварцевой керамикой), легированным добавками, в основном обогащенными изотопами (0,002—2 %);
- обедненными изотопами — металлическими фольгами из немешающего изотопа с небольшой примесью изотопа-мишени.

Представленный в фонде набор разбавленных материалов по своим параметрам (диапазону массы нуклида-мишени, рабочим температурам, номенклатуре реакций активации) удовлетворяет любым запросам экспериментаторов, позволяет сформировать сборку детекторов для облучения в любых типах реакторов. Существенное отличие разбавленных материалов от универсальных состоит в необходимости детального исследования материалов и аттестации каждой порции материала по числу ядер нуклида-мишени. Исследование включает проверку на примеси и определение объемной равномерности внедрения мишени. При достаточной равномерности (около 1 %) аттестация порции представляет обычно нейтронно-активационное взвешивание проб материала относительно опорного образца. Таким образом, структура этой части фонда представляет собой:

Таблица 1

Специальные материалы для нейтронно-активационных детекторов

Вид материала	Рабочая температура, °С	Содержание нуклида-мишени (масса, %)	Погрешность, %
Обогащенный изотоп	—	Концентрированные	
		<sup>46</sup> Ti (73,8); <sup>50</sup> Cr (88,4); <sup>54</sup> Fe (99,9); <sup>56</sup> Fe (99,7); <sup>60</sup> Ni (95,4—99,8); <sup>63</sup> Cu (99,6); <sup>64</sup> Zn (99,4); <sup>111</sup> Cd (96,3); <sup>204</sup> Pb (60,7—66,5)	
Сплав на основе Al	600	Разбавленные	
		Lu (4,69); Dy (3); In (0,88); Au (1,01); Sm (10); La (1,01); Co (1,015; 2,83); Mn (1,045); Cu (2,94; 6,29)	
		Dy (0,25); Au (0,08); La (9,5); Mn (3,6); Cu (3,7)	
		Co (0,01; 0,1; 1)	
Сплав на основе V	1000	Sc (0,168); In (1); Au (0,003); La (0,06); Co (0,003; 2); <sup>63</sup> Cu (0,13); Na (0,0662); <sup>50</sup> Cr (1); <sup>111</sup> Cd (0,03); Hg (2); <sup>64</sup> Zn (1,3); <sup>54</sup> Fe (0,170); <sup>56</sup> Fe (0,80); <sup>204</sup> Pb (2)	
		<sup>54</sup> Fe (0,196); <sup>58</sup> Ni (2,9); <sup>58</sup> Ni (0,23)	
Керсил (кварцевая керамика)	1000		
Обедненный изотоп	—		
Слой на Al-подложке Слой в углублении графитовой подложки Мишень в оболочке Ni Мишень в оболочке Al	100 500	По особой технологии	
		<sup>237</sup> Np; <sup>235</sup> U; <sup>238</sup> U; <sup>236</sup> U; <sup>238</sup> Pu; <sup>239</sup> Pu; <sup>241</sup> Am (0,1—100 мкг/см <sup>2</sup> )	
	Rh (0,8 мг/см <sup>2</sup> )		2—5 3
	<sup>237</sup> Np (0,5—10 мг)		2
	<sup>237</sup> Np (0,5—10 мг)		2

материалы-сырье, поступающие в фонд после изготовления с исходной информацией о компонентах и технологии; опорные образцы — образцы материала с известным содержанием нуклида-мишени, пригодные для сравнения с пробами сырья;

аттестованный материал или порции материала, пригодный для изготовления детекторов.

Особая технология разработана для производства делящихся детекторов, ориентированных на трековый метод регистрации осколков деления; родиевых детекторов с микроколичеством нуклида-мишени в детекторе и делящихся детекторов с большим содержанием мишени, ориентированных на измерение активности осколочных продуктов деления. В первом случае это слой делящегося вещества, впрессованный в поверхность Al-подложки. Стандартизованная форма детектора — диск с делящимся слоем диаметром 8 мм, зафиксированный на Al-диске диаметром 10 мм. Родиевый детектор представляет собой графитовую подложку диаметром 3 мм, имеющую углубление 0,5 мм диаметром 2 мм, на дно которого напылен слой родия общей массой около 20 мкг (толщиной 0,8 мкг/см<sup>2</sup>). Такой детектор рассчитан на облучение флюенсом 10<sup>15</sup> нейтр./см<sup>2</sup> энергией больше 3 МэВ. Нептуниевые детекторы большой массы представляют собой оболочку диаметром 10 мм из Al или Ni, внутри которой герметизировано 0,5—10 мг <sup>237</sup>Np. Эта часть фонда существует в виде образцов, а не материала для детекторов. Отличительная особенность этой части фонда — необходимость индивидуального исследования и аттестации каждого образца.

**Обеспечение измерений активности.** В России существует самостоятельная система метрологического обеспечения измерений активности, основанная на государственном эталоне, всем положениям которой подчиняются также измерения активности детекторов. Предпочтительным с точки зрения простоты и надежности является метод замещения, когда активированный детектор сравнивается на компараторе с аттестованным по активности источником, подобным детектору по виду излучения и конструкционному оформлению. Для реализации метода замещения разработаны градуировочные источники, перечень которых приведен в табл. 2. Каждый тип градуировочного источника соответствует определенному типу детекторов. Сочетание группы идентичных детекторов с соответствующим градуировочным источником называется активационным комплектом — АК. Активационные комплекты выпускаются в составе наборов НАСИ (см. ниже табл. 5).

Особый случай измерения активационного интеграла реакцией деления трековым методом решен стандартизацией сочетания: делящийся детектор — трековый регистратор осколков деления — фиксирующее устройство. Такое сочетание назы-

вается делящимся комплектом — ДК. Аттестованное значение эффективности регистрации осколков деления дано именно для такого сочетания.

**Оснастка.** Кроме нейтронно-активационных детекторов и градуировочных источников, в состав НАСИ входит функциональная и вспомогательная оснастка. Функциональную основную и вспомогательную, применение которых в сочетании составляют изделия, применение которых в сочетании с детекторами влияет на измерительный процесс, его качество и правильность. Это различные типы борных и кадмиевых экранов, трековые регистраторы, конвертор позитронных экранов, трековые держатели для делящихся комплектов. Вспомогательная оснастка представляет собой устройства, предназначенные для рационального хранения и удобства пользования НАСИ. Сюда входят различные типы полиэтиленовых капсул для хранения детекторов, маркировочные бирки, кварцевые ампулы, укладочные коробки для наборов детекторов и др.

В табл. 3 дан перечень функциональной оснастки, выпускаемой в составе НАСИ. Сферические борные экраны типа БЭ2 и БЭ3 нескольких модификаций, различающихся по толщине <sup>10</sup>B в стенке экрана, и цилиндрический борный экран БЭ4-04 изготовлены из аморфного бора различного обогащения. Специальные технологические приемы позволили получить прочные влагостойкие изделия многообразного назначения. Дополнительное оригинальное покрытие улучшает эксплуатационные характеристики экранов, позволяет работать в условиях интенсивного облучения нейтронами. Потребность в выполнении облучений при повышенных температурах восполнена новой разработкой керамических кадмиевых экранов КЭ0 под детекторы диаметром 10 и 3 мм.

**Сечения реакций активации** — самостоятельная область исследований в нейтронной физике, связанная с нейтронно-активационными измерениями. Однако с точки зрения пригодности того или иного хода сечения для нейтронно-активационных измерений на ядерных реакторах существует специальный критерий: ход сечения реакции должен соответствовать интегральному эксперименту в поле нейтронов с известным спектром. В качестве таких полей используют нейтроны деления <sup>235</sup>U и <sup>239</sup>Pu. Интегральной величиной служит среднее сечение реакции для данного спектра. Разработка нейтронно-активационного детектора и его стандартизация обязательно связаны с установлением рекомендованного хода сечения реакции активации и определением среднего сечения как критерия выбора или оценки хода сечения. Была разработана [2] оригинальная методика определения среднего сечения пороговых реакций для спектра <sup>235</sup>U по результатам экспериментов в реакторных полях нейтронов с известным спектром. Созданная к середине 80-х годов сеть аттестован-

Таблица 2

Градуировочные источники

Нуклид	Период полураспада	Энергия фотонов, МэВ	Характеристика
<sup>109</sup> Cd	462,6 сут	0,022	Условная активность для активационного комплекса родия (АК-Rh), погрешность 6%. Поставляется только в составе АК-Rh, входит в серийный набор АКН-2
<sup>241</sup> Am	432,9 лет	0,026	
<sup>109</sup> Cd	462,6 сут	0,088	То же. Источник экранирован кадмием, формирующим пик 0,026 МэВ, ориентирован на использование сцинтилляционного спектрометра
<sup>139</sup> Ce	137,6 сут	0,165	
<sup>51</sup> Cr	27,70 сут	0,325	Внешнее фотонное излучение 3%. Набор АКН-Т в составе АК-Lu
<sup>113</sup> Sn	115,2 сут	0,392	
<sup>137</sup> Cs	30,0 лет	0,666	
<sup>22</sup> Na	2,602 лет	0,511	Внешнее фотонное излучение 2%. Набор АКН-2 в составе АК-Cd
<sup>56</sup> Co	70,78 сут	0,810	То же. В составе АК-In
<sup>54</sup> Mn	312,2 сут	0,835	
<sup>60</sup> Co	5,271 лет	1,173 1,332	То же. Набор АКН-Т в составе АК-Au
SP ( <sup>32</sup> P)	14,29 сут	$E_{\beta} = 1,7$	То же. Используется как контрольный или реперный источник. Самостоятельная поставка
<sup>90</sup> Sr— <sup>90</sup> Y	29,12 лет	$E_{\beta} = 2,27$	То же. Набор АКН-2 в составе АК-Zn; набор АКН-Т в составе АК-Cu
			Активность 2—3%. Набор АКН в составе АК-Ni
			Внешнее излучение 2—3%. Набор АКН-2 и АКН-Т в составе АК-Fe
			Активность 2—3%. Набор АКН-Т в составе АК-Co
			Активность <sup>32</sup> P в стандартном серном детекторе. Наборы НДС, АКН-2 в составе АК-S
			Внешнее $\beta$ -излучение в угол 2л. Контрольный источник для $\beta$ -радиометров. Наборы НДС и АКН-2

ных опорных полей нейтронов на исследовательских реакторах позволила эффективно реализовать эту методику и получить экспериментальные значения средних сечений для вновь вводимых детекторов. С учетом существующих литературных данных оценивали и рекомендовали значения средних сечений в качестве критерия для установления хода сечения реакции. Результаты этой работы сведены в табл. 4. Большинство результатов опубликовано в различных изданиях. В 80-е годы для координации усилий различных специалистов страны и экспертиз справочных данных была создана Тематическая группа «Нейтронная метрология» при Комиссии по ядерным данным ПКАЭ. Под ее эгидой были разработаны библиотеки стандартных и рекомендованных сечений реакций активации — файл РНМФ-87 (ГСССД 131—88) и РНМФ-Д89.

**Формирование наборов НАСИ и их оптимизация.** Основная форма выпуска нейтронно-активационных средств измерений — целевой набор, представляющий собой оптимизированное для выполнения конкретной измерительной задачи сочетание детекторов с различной оснасткой.

В табл. 5 приведен перечень типов наборов НАСИ, выпускаемых в настоящее время, и их краткие характеристики.

Выпускаются целевые наборы регламентированного состава серийного изготовления (НДС, S-пакет, АКН, АКН-2, ДКН-2, АКН-Т, АМОС), а также наборы индивидуального исполнения, комплектуемые по желанию потребителей из предложенного перечня изделий (САД-Р, САД-П, СН).

Оптимизация наборов может осуществляться по двум критериям:

составу для наилучшего удовлетворения условиям конкретной измерительной задачи (тщательно подобранная номенклатура реакций, приспособленная оснастка);

числу ядер нуклида-мишени для обеспечения возможности совместного (или одновременного) облучения всех типов детекторов из набора.

В качестве универсального показателя нейтронного облучения для детекторов в реакторе принят флюенс нейтронов с энергией больше 3 МэВ. Значением этого флюенса (см. табл. 5) задается рекомендуемый режим облучения. Для детекторов тепловых и надтепловых нейтронов при этом предполагаются условия типичного спектра водо-водяного реактора. Существенно, что все серийные наборы сопровождаются рекомендованными методиками облучения и измерения активности. Все типы детекторов аттестованы в качестве госу-

Таблица 3

Универсальная функциональная оснастка

Наименование	Тип	Назначение, характеристика
Борный экран	БЭ2-04	Поглощение медленных нейтронов. Сферический экран, внешний диаметр 46 мм, масса 70 г. Внутри размещается кадмиевый экран типа КЭ-15/10. Флюенс $10^{15}$ нейтр./см <sup>2</sup> . Толщина по <sup>10</sup> B 0,4 г/см <sup>2</sup>
Борный экран	БЭ2-1	То же. Толщина 1,0—1,1 г/см <sup>2</sup>
Борный экран	БЭ2-2	То же. Толщина около 1,8 г/см <sup>2</sup>
Борный экран	БЭ3-04	То же. Внешний диаметр 28 мм, масса 12 г. Внутри размещаются 2—3 капсулы К-1. Флюенс $10^{17}$ нейтр./см <sup>2</sup> . Толщина по <sup>10</sup> B 0,4 г/см <sup>2</sup>
Борный экран	БЭ3-1	То же. Толщина 0,8—0,9 г/см <sup>2</sup>
Борный экран	БЭ4-04	Поглощение медленных нейтронов. Цилиндрический экран $\varnothing 12 \times 20$ мм, масса 2 г, внутренняя полость $\varnothing 4,5 \times 12$ мм. Флюенс $10^{18}$ нейтр./см <sup>2</sup> . Толщина по <sup>10</sup> B 0,4 г/см <sup>2</sup>
Кадмиевый экран	КЭ-15/10-1	Поглощение тепловых нейтронов. Цилиндрический экран $\varnothing 15 \times 10$ мм при толщине стенки из металлического кадмия 1 мм. Масса 6 г
Кадмиевый экран	КЭ-12/10-1	То же. Экран $\varnothing 12 \times 10$ мм, толщина стенки 1) мм, масса 4 г
Кадмиевый экран	КЭ-12/4-1	То же. Экран $\varnothing 12 \times 4$ мм, толщина стенки 1) мм, масса 3 г
Кадмиевый экран	КЭ-15/10-05	То же. Экран $\varnothing 15 \times 10$ мм, толщина стенки 0,5 мм, масса 3,5 г
Кадмиевый экран	КЭ0-15/9-1,2	То же. Экран $\varnothing 15 \times 9$ мм, внутренняя полость $\varnothing 1,1 \times 5$ мм, материал — керамика из окиси кадмия, толщина стенки 1,2 мм (соответствует металлическому кадмию), масса 18 г. Рабочая температура 1000 °С
Кадмиевый экран	КЭ0-6/5-08Т	То же. Экран $\varnothing 6 \times 5$ мм, полость $\varnothing 3 \times 2,5$ мм, толщина 0,8 мм, масса 1 г
Трековый регистратор осколков	ТР-С	Регистрация осколков деления от делящегося детектора. Используется в составе делящегося комплекта. Диск из слюды-мусковит $\varnothing 10 \times 0,1$ мм
Капсула	К-1	Стандартизованный держатель для делящегося комплекта. Выполнен из полиэтилена $\varnothing 12,5 \times 2,5$ мм, внутренняя полость $\varnothing 10,5 \times 1,5$ мм
Конвертор позитронов	КП-1	Поглощение позитронов, вылетающих из активационных детекторов и градуировочных источников при измерении активности. Держатель из сплава алюминия эффективной толщины 1 мм

Таблица 4

Интегральные сечения пороговых реакций (эксперимент и оценка)

Реакция	Год публикации	Эффективный порог $E_{эфф}$ , МэВ	Эффективное сечение $\sigma_{эфф}$ , мб	Среднее сечение для спектра <sup>235</sup> U	
				Эксперимент	Оценка
<sup>111</sup> Cd(n, n') <sup>111m</sup> Cd	1989	1,3	350	198 ± 4	198 ± 4
<sup>199</sup> Hg(n, n') <sup>199m</sup> Hg	1984	1,4	410	225 ± 10	225 ± 10
<sup>64</sup> Zn(n, p) <sup>64</sup> Cu*	1989	3,0	162	34,4 ± 0,8	33,8 ± 0,7
<sup>204</sup> Pb(n, p) <sup>204m</sup> Pb	1986	4,0	182	19,8 ± 1,5	19,4 ± 1,2
Ti(n, x) <sup>46</sup> Sc	1986	4,5	159	11,6 ± 0,5	11,3 ± 0,4
<sup>60</sup> Ni(n, p) <sup>60</sup> Co	1985	6,0	89	2,25 ± 0,20	2,25 ± 0,20
<sup>63</sup> Cu(n, p) <sup>63</sup> Co	1985	7,0	42	0,50 ± 0,04	0,494 ± 0,030
<sup>51</sup> V(n, α) <sup>48</sup> Sc	1987	9,0	8,0	0,0215 ± 0,0008	0,0209 ± 0,0008
<sup>93</sup> Nb(n, 2n) <sup>92m</sup> Nb	1987	10,5	470	0,416 ± 0,015	0,428 ± 0,006
<sup>89</sup> Y(n, 2n) <sup>88</sup> Y	1991	12,7	910	0,170 ± 0,014	0,161 ± 0,010
<sup>90</sup> Zr(n, 2n) <sup>89</sup> Zr	1989	13,3	919	0,0945 ± 0,0045	0,0966 ± 0,0024

\* Для абсолютной интенсивности фотонов 0,511 МэВ, равной 34,3 %.

Стандартизованные наборы нейтронно-активационных детекторов

Набор	Назначение	Состав детекторов, оснастка	Год разработки. Уровень стандартизации
НДС	Мониторирование полей нейтронов по флюенсу $E_n > 3$ МэВ; 100 °С; $5 \cdot 10^{10} - 10^{15}$ нейтр./см <sup>2</sup>	$^{32}\text{S}(n, p) ^{32}\text{P}$ ; градуировочный источник SP; контрольный источник $^{90}\text{Sr} - ^{90}\text{Y}$ ; КЭ-115/110-11	1972 ТУ ГСО
S-пакет	Массовое мониторирование $E_n > 3$ МэВ; 100 °С; $5 \cdot 10^{10} - 10^{15}$ нейтр./см <sup>2</sup>	$^{32}\text{S}(n, p) ^{32}\text{P} - 1000$ шт.	1972 ТУ ГСО
АКН	Спектрометрия быстрых нейтронов в области 0,2—5 МэВ; 100 °С; $10^{12} - 10^{15}$ нейтр./см <sup>2</sup>	$^{237}\text{Np}(n, f)$ ; $^{103}\text{Rh}(n, n')$ $^{103m}\text{Rh}$ ; $^{115}\text{In}(n, n')$ $^{115m}\text{In}$ ; $^{199}\text{Hg}(n, n')$ $^{199m}\text{Hg}$ ; $^{58}\text{Ni}(n, p) ^{58}\text{Co}$ ; $^{32}\text{S}(n, p) ^{32}\text{P}$ . Градуировочные источники: $^{109}\text{Cd}(^{241}\text{Am})$ ; $^{51}\text{Cr}$ ; $^{139}\text{Ce}$ ; $^{58}\text{Co}$ ; SP. БЭ3-04; КЭ-115/110-11; К-1; TP-C	1972 TK ГСО
АКН-2	Спектрометрия быстрых нейтронов в области 0,2—8 МэВ; 100 °С; $2 \cdot 10^{12}$ нейтр./см <sup>2</sup>	$^{237}\text{Np}(n, f)$ ; $^{103}\text{Rh}(n, n')$ $^{103m}\text{Rh}$ ; $^{115}\text{In}(n, n')$ $^{115m}\text{In}$ ; $^{111}\text{Cd}(n, n')$ $^{111m}\text{Cd}$ ; $^{64}\text{Zn}(n, p) ^{64}\text{Cu}$ ; $^{32}\text{S}(n, p) ^{32}\text{P}$ ; $^{56}\text{Fe}(n, p) ^{56}\text{Mn}$ . Градуировочные источники: $^{109}\text{Cd}$ , $^{51}\text{Cr}$ , $^{139}\text{Ce}$ , $^{22}\text{Na}$ , $^{54}\text{Mn}$ , SP. БЭ3-04; КЭ-115/110-11; К-1; TP-C; КП-11	1990 ГСО
ДКН-2	Спектрометрия низкоинтенсивных нейтронных полей в области от тепловых нейтронов до 6 МэВ; 100 °С, $10^{10} - 10^{12}$ нейтр./см <sup>2</sup>	Реакция деления на нуклидах: $^{235}\text{U}$ ; $^{239}\text{Pu}$ ; $^{238}\text{Pu}$ ; $^{237}\text{Np}$ ; $^{241}\text{Am}$ ; $^{238}\text{U}$ ; $^{32}\text{S}(n, p) ^{32}\text{P}$ . БЭ3-11; ВЭ3-04; КЭ-115/110-11; К-1; TP-C	1976/1990 ТУ ГСО
АКН-Т-10 АКН-Т-3	Спектрометрия надтепловых нейтронов, тепловые нейтроны, индивидуальные режимы облучений для детекторов; 100—600 °С	Две модификации набора с детекторами диаметром 10 и 3 мм. Реакции $(n, \gamma)$ на нуклидах: $^{176}\text{Lu}$ ; $^{197}\text{Au}$ ; $^{59}\text{Co}$ ; $^{55}\text{Mn}$ ; $^{63}\text{Cu}$ ; $^{54}\text{Fe}(n, p) ^{54}\text{Mn}$ ; $^{56}\text{Fe}(n, p) ^{56}\text{Mn}$ . Градуировочные источники: $^{109}\text{Cd}$ ; $^{113}\text{Sn}$ ; $^{60}\text{Co}$ ; $^{54}\text{Mn}$ ; $^{22}\text{Na}$ . КЭ-112/110-11; КЭ-112/4-11; К-11; КП-11	1976 ТУ ГСО
САД-Р	Спектрометрия в области тепловых-надтепловых нейтронов; 1000 °С; $10^{15}$ нейтр./см <sup>2</sup>	Реакция $(n, \gamma)$ на нуклидах: $^{45}\text{Sc}$ ; $^{197}\text{Au}$ ; $^{139}\text{La}$ ; $^{59}\text{Co}$ ; $^{65}\text{Cu}$ ; $^{23}\text{Na}$ ; $^{50}\text{Cr}$ ; $^{58}\text{Ni}(n, p) ^{58}\text{Co}$ . КЭ-115/9-11; КЭ-112/110-11	1989 ТУ ГСО
САД-П	Спектрометрия быстрых нейтронов; 1000 °С; $10^{15} - 10^{16}$ нейтр./см <sup>2</sup>	$^{237}\text{Np}(n, f)$ $^{140}\text{Ba}$ ; $^{103}\text{Rh}(n, n')$ $^{103m}\text{Rh}$ ; $^{115}\text{In}(n, n')$ $^{115m}\text{In}$ ; $^{64}\text{Zn}(n, p) ^{64}\text{Cu}$ ; $^{111}\text{Cd}(n, n')$ $^{111m}\text{Cd}$ ; $^{58}\text{Ni}(n, p) ^{58}\text{Co}$ ; $^{54}\text{Fe}(n, p) ^{54}\text{Mn}$ ; $^{204}\text{Pb}(n, n')$ $^{204m}\text{Pb}$ ; $\text{Ti}(n, x) ^{46}\text{Sc}$ ; $^{56}\text{Fe}(n, p) ^{56}\text{Mn}$ ; $^{27}\text{Al}(n, \alpha) ^{24}\text{Na}$ ; $^{51}\text{V}(n, \alpha) ^{48}\text{Sc}$ ; $^{93}\text{Nb}(n, 2n) ^{92m}\text{Nb}$ ; $^{90}\text{Zr}(n, 2n) ^{89}\text{Zr}$ . БЭ3-04; БЭ4-04; КЭ0-115/9-11,2; КЭ-112/110-11; К11	1989 ТУ ГСО
АМОС	Массовое мониторирование в полях энергетических реакторов; 11000 °С; $10^{17} - 10^{20}$ нейтр./см <sup>2</sup>	$^{58}\text{Ni}(n, p) ^{58}\text{Co}$ ; $^{54}\text{Fe}(n, p) ^{54}\text{Mn}$ ; $^{46}\text{Ti}(n, p) ^{46}\text{Sc}$ ; $^{60}\text{Ni}(n, p) ^{60}\text{Co}$ ; $^{63}\text{Cu}(n, \alpha) ^{60}\text{Co}$	1986 ГСО
СН	Набор детекторов индивидуального исполнения. Можно заказать: диапазоны чувствительности набора по энергии нейтронов, флюенса, температуры; размеры детекторов; оснастку		1980 Индивидуальная аттестация

дарственных стандартных образцов (ГСО), их изготовление и выпуск регламентированы государственными техническими условиями (ТУ).

Перспективы развития в области разработки и выпуска НАСИ обусловлены существующими запросами практики. Так, потребность ресурсных испытаний материалов в мониторинге с низкой пороговой энергией и большим периодом полураспада продукта активации привлекла внимание исследователей у нас в стране и особенно за рубежом к реакции  $^{93}\text{Nb}(n, n') ^{93m}\text{Nb}$ . Создалась предпосылка к стандартизации и выпуску детекторов этого типа, и, хотя технологические и методические трудности затянули сроки этой весьма актуальной разработки, к настоящему времени подготовлен к серийному выпуску набор МБФ (мониторы для больших флюенсов), включающий детекторы из Nb и  $^{54}\text{Fe}$  с градуировочными источниками, предполагается также ввести стандартизованный Nb-детектор в состав набора АМОС. Наличие в стране широкой сети аттестованных нейтронных полей на реакторах потребовало разработать стандартизованный способ и средства контроля сохранности характеристик таких полей. Для этой цели разработан набор ДОКС (детекторы оперативного контроля спектра), который сочетает детекто-

ры тепловых, надтепловых и быстрых нейтронов, дающих при активации одинаковый радионуклид. Сборка этих детекторов, сконструированная в стандартизованном держателе, рассчитана на многократное применение. Она позволяет обнаруживать изменение спектра медленных нейтронов на уровне 2—3 % и вводить соответствующие поправки. Процедура измерения занимает 2—3 ч. В связи с расширяющимся использованием термоядерных спектров увеличивается потребность в высокопороговых детекторах, прежде всего по реакциям  $(n, 2n)$ . Расширение номенклатуры реакций в этой области потребовало обратить внимание на измерение средних сечений этих реакций в стандартных спектрах.

## ЛИТЕРАТУРА

- Григорьев Е. И., Ярына В. П. // Измерительная техника. — 1980. — № 9. — С. 61.
- Григорьев Е. И., Тарновский Г. Б., Ярына В. П. // Материалы 6-ой Всесоюз. конф. «Нейтронная физика». (Киев, 2—6 окт. 1983 г.) — М.: ЦНИИАтоминформ, 1984. — Т. 3. — С. 187.