

ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИНДЕКСОВ В КРИТИЧЕСКОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ УРАНОВОЙ СИСТЕМЕ С ТОРЦЕВЫМ ОТРАЖАТЕЛЕМ ИЗ ГИДРИДА ЛИТИЯ

А. А. Вайвод, С. С. Бесов, А. А. Юдов, М. А. Демиденко, В. И. Литвин, С. А. Андреев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е. И. Забабахина», г. Снежинск Челябинской обл.

Статья поступила в редакцию 04.07.2019, после доработки – 15.07.2019, принята к публикации – 04.10.2019

В работе описаны результаты прецизионных экспериментов по прохождению нейтронов через слои гидрида лития-7. В экспериментах определялись активационные интегралы нейтронно-активационных детекторов, расположенных в различных точках сборного отражателя из гидрида лития-7, установленного на торце урановой размножающей системы. На основе полученных данных вычислялись спектральные индексы.

Ключевые слова: бенчмарк-эксперименты, урановые размножающие системы, нейтронно-активационный метод, активационный интеграл, спектральные индексы.

SPECTRAL INDICES MEASUREMENT IN CRITICAL CYLINDRICAL URANIUM SYSTEM WITH LITHIUM HYDRIDE END REFLECTOR / A. A. VAYVOD, S. S. BESOV, A. A. YUDOV, M. A. DEMIDENKO, V. I. LITVIN, S. A. ANDREEV // The work considers precision experiments results, which show neutron passage through the layers of lithium hydride-7. Activation integrals of neutron-activation detectors, positioned in various points of composite lithium hydride-7 reflector, were determined. The reflector was mounted at the end of uranium breeder system. Spectral indices were calculated on the basis of the obtained data.

Key words: benchmark-experiments, uranium breeder systems, neutron-activation method, activation integral, spectral indices.

Введение

Прецизионные эксперименты по прохождению нейтронов через слои гидридов и дейтеридов лития необходимы для выбора системы нейтронных констант, а при необходимости и их корректировки. Численное моделирование экспериментов с использованием программ производственного счета позволяет оценить константную погрешность нейтронно-физических расчетов. Один из возможных способов постановки подобных бенчмарк-экспериментов основан на геометрии «источник – образец – детектор». При этом измеря-

ются следующие характеристики: числа реакций, временные и энергетические распределения. Измерение чисел реакций с относительно высокой точностью достигается при использовании пороговых нейтронно-активационных детекторов (ДНА), размещенных по толщине образца в жестко фиксированных позициях. Экспериментальные данные для такой постановки измерений – это активационные интегралы (числа реакций на ядро изотопа мишени).

В 2018 году во ВНИИТФ были проведены измерения с использованием нейтронно-активационного метода. В качестве источника нейтронов делительного спектра была исполь-

зована урановая активная зона размножающей системы, собранной на стенде для критических сборок (СКС) [1]. В работе описываются эксперименты с размещением слоев гидрида лития-7 на торце активной зоны (АЗ) размножающей системы (слои материала одновременно являются отражателем размножающей системы (РС)). Облучение различных типов ДНА проводилось на мощности ~24–31 Вт в течение 60–80 мин. Использовались пять типов активационных детекторов: Ni, In, Ti, Al, Cu. Эти детекторы позволили получить экспериментальные данные по пространственному распределению чисел взаимодействий для четырех реакций на быстрых нейтронах и двух реакций на тепловых и резонансных нейтронах.

Метод измерений

Суть метода заключается в облучении нейтронно-активационного детектора в нейтронном поле исследовательской ядерной установки, измерении активности образовавшегося радионуклида, расчете параметров нейтронного поля с использованием аттестованных характеристик детектора и справочных данных о ядерно-физических константах радионуклидов и нейтронных реакциях. Первичной экспериментально определяемой величиной в данном методе является число взаимодействий (реакций), нормированное на одно ядро изотопа-мишени, – активационный интеграл Q (АИ),

$$Q = \frac{1}{N_{\text{я}}} \int_0^{\infty} \Phi(E) \sigma(E) dE,$$

где $\Phi(E)$ – энергетическое распределение флюенса нейтронов, $\sigma(E)$ – микроскопическое сечение реакции, $N_{\text{я}}$ – число ядер изотопа-мишени в активационном детекторе.

Для измерения АИ облученных ДНА использовались методы гамма-спектрометрии. Детекторы представляли собой металлические диски, изготовленные из особо чистого материала (паспортизованного по составу). Диаметр дисков составлял ~20 мм, толщина – ~1 или ~2 мм. Основные ядерно-физические и технические характеристики активационных детекторов приведены в табл. 1. Для двух детекторов из титана и меди «конкурирующими» реакциями активации, в которых образуется такой же радионуклид, являются $^{48}\text{Ti}(n, np)^{47}\text{Sc}$ и $^{63}\text{Cu}(n, 2n)^{64}\text{Cu}$. По ранее данным оценкам, для спектров нейтронов реактора БАРС-5 их вклад пренебрежимо мал (менее 1 %).

Измерение активности нейтронно-активационных детекторов проводилось на полупроводниковом детекторе из особо чистого германия с высоким энергетическим разрешением из состава блоков детектирования эталонного гамма-спектрометрического комплекса ИКЭ-П-2 [2]. Эта установка использовалась как для измерений абсолютных значений активности облученных детекторов, так и для относительных измерений.

Таблица 1

Ядерно-физические и технические характеристики ДНА

Реакция активации	Содержание изотопа, %	ρ , г/см ³	$T_{1/2}$	E_{γ} , МэВ (выход на 100 распадов)	Размеры, мм	Масса, мг
$^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$	68,27	8,91	70,78 дн	0,81(99)	Ø20×1	2700
$^{115}\text{In}(n, n')^{115\text{m}}\text{In}$	95,72	7,31	4,49 ч	0,336(47)	Ø20×1	2200
$^{113}\text{In}(n, \gamma)^{114\text{m}}\text{In}$	4,28	7,31	49,51 дн	0,190(17)	Ø20×1	2200
$^{47}\text{Ti}(n, p)^{47}\text{Sc}$	7,30	4,51	3,35 дн	0,159(73)	Ø20×1	1350
$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$	~100	2,70	15,02 ч	1,369(100)	Ø20×2	1600
$^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$	69,10	8,96	12,70 ч	0,511(38)	Ø20×1	2200

Дополнительно с ИКЭ-II-2 были использованы два сцинтилляционных гамма-спектрометра: спектрометрическая установка СКС-50М с детектором на основе кристалла NaI(Tl) и спектрометр на основе кристалла LaBr₃:Ce. Эти установки использовали только для относительных измерений.

Расчет активационных интегралов и оценка погрешности измерений выполнялись по аттестованной методике. Погрешность абсолютных измерений составляла от ~4 до ~8 % (при $P = 95$ %). Погрешность относительных измерений определялась статистической точностью, корректностью программной обработки аппаратных пиков и согласием данных измерений, полученных на разных спектрометрических установках. Эта погрешность составила от 0,3 до 2,7 % (1σ).

Для сопоставления результатов различных экспериментов, проводимых на установке, необходима информация о числе делений, произошедших в РС за время облучения (средняя мощность ее работы), для каждого цикла облучения. Определение (далее – мониторинг) числа делений в РС, произошедших в каждом эксперименте, осуществляли расчетно-экспериментальным методом. Нейтронно-активационным методом определялось число реакций в никелевом активационном детекторе-мониторе диаметром 20 мм и толщиной 1 мм, который устанавливался на центр верхнего диска нижней части РС. Число реакций в детекторе на 1 деление в АЗ определялось расчетным путем по программе ПРИЗМА [3]. По полученным данным вычислялось общее число делений в каждом пуске реактора и число делений в единицу времени при известном времени облучения.

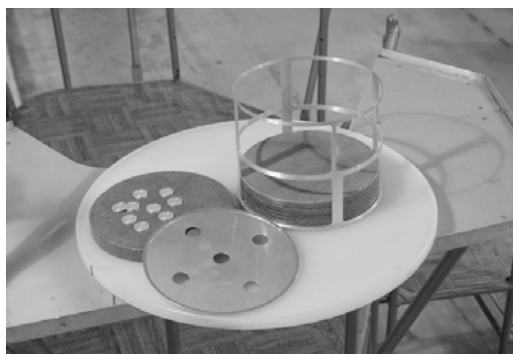
Постановка экспериментов

Размножающая система, с которой проводились эксперименты (рис. 1), представляла собой цилиндрическую сборку из высокообогащенного урана с верхним торцевым отражателем из гидрида лития-7. РС собиралась с разбиением на нижнюю и верхнюю части. Активная зона системы состояла из 10 урановых

дисков толщиной ~1 см и одного уранового диска толщиной ~1,2 см (высота нижней части из урана ~6,2 см, высота верхней части без отражателя ~5 см). Диаметр дисков ~20 см.

Активационные детекторы размещались в пазах алюминиевых дисков в фиксированных позициях между дисками из гидрида лития (на расстоянии соответственно 0; 0,5; 1; 1,5; 2; 3; 4; 6; 8; 10; 12 см от поверхности уранового диска ВЧ). Алюминиевые диски для установки детекторов показаны на рис. 1.

Сближение частей осуществлялось подъемом нижней части, закрепленной на механизированном штоке к неподвижной верхней части, удерживаемой ажурной диафрагмой. Эта процедура выполнялась дистанционно с пульта управления установки.



а



б

Рис. 1. Внешний вид исследуемых образцов и активационных детекторов (а) и собранной цилиндрической РС из урана с торцевым отражателем из гидрида лития для облучения активационных детекторов (б)

Зазор, соответствующий критическому на запаздывающих нейтронах состоянию $H_{кр.зап}$, был определен экстраполяцией к нулю функции обратного коэффициента умножения от зазора $y = 1/Q(H)$. Функция определялась линейной аппроксимацией, соответствующей экспериментальной зависимости, методом наименьших квадратов (МНК). За погрешность определения критического зазора была принята погрешность определения зазора между частями РС, которая составляет 0,05 мм.

Проводилось облучение активационных детекторов из никеля, индия, алюминия, титана и меди. В нижний и предпоследний алюминиевые диски устанавливалось по 5 ДНА, в остальные – по одному ДНА в центре. Облучение проводилось на мощности 24–31 Вт в течение 60–80 мин. При установке в РС 393 активационных детекторов из никеля, индия, алюминия ее критический зазор не менялся и составил $H_{кр.зап} = 6,60 \pm 0,05$ мм. Высота отражателя ВЧ РС составила $140,5 \pm 0,1$ мм. При одновременной установке в РС 393 активационных детекторов из титана и меди ее критический зазор составил $H_{кр.зап} = 6,44 \pm 0,05$ мм. Высота отражателя ВЧ РС при этом достигала $143,5 \pm 0,1$ мм.

Результаты экспериментов

В табл. 2 приведены типы использованных детекторов, длительность облучения детекторов ($T_{обл}$), расчетные значения мощности работы установки в каждом опыте, показания нейтронно-активационных детекторов-мониторов (Q_M).

Таблица 2

Основные параметры пусков установки

ДНА	$T_{обл}$, мин	W , Вт ($\delta = 3\%$, $P = 0,95$)	Q_M , реакций/ядро
Ni	70	24,1	$1,84 \cdot 10^{-12}$
In	60	28,5	$1,86 \cdot 10^{-12}$
Al	80	30,6	$2,67 \cdot 10^{-12}$
Ti+Cu	70	28,1	$2,14 \cdot 10^{-12}$

Результаты измерений для всех активационных детекторов, использованных в экспериментах на установке, представлены в табл. 3. В ней отражены результаты измерения активационных интегралов всех детекторов, приведенные к показаниям соответствующих детекторов-мониторов из никеля, установленных между НЧ и ВЧ РС.

Таблица 3

Результаты измерения АИ для всех ДНА, приведенные к показаниям детекторов-мониторов из никеля, установленных между НЧ и ВЧ размножающей системы

H , мм	$(Q/Q_M)_{Ni}$	δ , % (1 σ)	$(Q/Q_M)_{In\gamma}$	δ , % (1 σ)	$(Q/Q_M)_{Cu}$	δ , % (1 σ)	$(Q/Q_M)_{Inm'}$	δ , % (1 σ)	$(Q/Q_M)_{Ti}$	δ , % (1 σ)	$(Q/Q_M)_{Al}$	δ , % (1 σ)
0	$5,51 \cdot 10^{-1}$	0,6	$6,90 \cdot 10^0$	0,4	$1,39 \cdot 10^0$	0,6	$1,13 \cdot 10^0$	0,6	$9,21 \cdot 10^{-2}$	0,6	$3,81 \cdot 10^{-3}$	0,9
5	$3,93 \cdot 10^{-1}$	1,1	$9,09 \cdot 10^0$	0,9	$1,64 \cdot 10^0$	0,4	$8,16 \cdot 10^{-1}$	1,0	$6,50 \cdot 10^{-2}$	0,8	$2,76 \cdot 10^{-3}$	0,8
10	$3,02 \cdot 10^{-1}$	0,7	$9,89 \cdot 10^0$	0,6	$1,71 \cdot 10^0$	0,4	$6,38 \cdot 10^{-1}$	1,1	$4,97 \cdot 10^{-2}$	0,8	$2,21 \cdot 10^{-3}$	1,0
15	$2,39 \cdot 10^{-1}$	1,5	$1,07 \cdot 10^1$	0,8	$1,77 \cdot 10^0$	1,0	$5,14 \cdot 10^{-1}$	0,3	$3,92 \cdot 10^{-2}$	0,8	$1,79 \cdot 10^{-3}$	1,0
20	$1,89 \cdot 10^{-1}$	0,9	$1,10 \cdot 10^1$	0,6	$1,67 \cdot 10^0$	0,4	$4,14 \cdot 10^{-1}$	0,9	$3,12 \cdot 10^{-2}$	0,7	$1,37 \cdot 10^{-3}$	0,9
30	$1,31 \cdot 10^{-1}$	1,5	$1,07 \cdot 10^1$	0,8	$1,52 \cdot 10^0$	0,5	$2,85 \cdot 10^{-1}$	0,5	$2,14 \cdot 10^{-2}$	0,9	$9,92 \cdot 10^{-4}$	1,1
40	$9,37 \cdot 10^{-2}$	0,9	$9,53 \cdot 10^0$	0,9	$1,29 \cdot 10^0$	0,3	$2,03 \cdot 10^{-1}$	0,7	$1,54 \cdot 10^{-2}$	1,0	$6,97 \cdot 10^{-4}$	1,1
60	$5,03 \cdot 10^{-2}$	0,8	$6,78 \cdot 10^0$	0,9	$8,51 \cdot 10^{-1}$	0,9	$1,08 \cdot 10^{-1}$	1,0	$8,11 \cdot 10^{-3}$	0,9	$4,01 \cdot 10^{-4}$	1,0
80	$2,79 \cdot 10^{-2}$	0,8	$4,27 \cdot 10^0$	0,7	$5,07 \cdot 10^{-1}$	1,0	$5,95 \cdot 10^{-2}$	0,5	$4,53 \cdot 10^{-3}$	1,0	$2,48 \cdot 10^{-4}$	1,9
100	$1,60 \cdot 10^{-2}$	0,9	$2,26 \cdot 10^0$	1,0	$2,79 \cdot 10^{-1}$	1,2	$3,33 \cdot 10^{-2}$	1,1	$2,57 \cdot 10^{-3}$	2,1	$1,47 \cdot 10^{-4}$	2,4
120	$9,33 \cdot 10^{-3}$	0,9	$7,82 \cdot 10^{-1}$	1,2	$1,01 \cdot 10^{-1}$	2,2	$1,85 \cdot 10^{-2}$	2,0	$1,46 \cdot 10^{-3}$	2,7	$9,31 \cdot 10^{-5}$	1,8

Положению $H=0$ соответствует место размещения ДНА в центре установочного алюминиевого диска между верхней частью сборки и нижним диском из гидрида лития.

Относительная погрешность (1σ) приведенных значений определялась по формуле [4]

$$\delta_{Q/Q_M} = \sqrt{\frac{\sigma_{\bar{Q}(H)}^2}{\bar{Q}^2(H)} + \frac{\sigma_{\bar{Q}(M)}^2}{\bar{Q}^2(M)}}$$

где $\bar{Q}(H)$ – среднее арифметическое значение АИ детектора в точке H при n измерениях ($n=4$); $\bar{Q}(M)$ – среднее арифметическое значение АИ детектора-монитора при n измерениях ($n=4$); $\sigma_{Q(H)}$, $\sigma_{Q(M)}$ – соответствующие среднеквадратические отклонения (СКО).

СКО определялись по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}{n(n-1)}}$$

где Q_i – значения активационного интеграла в данной точке H при n измерениях ($n=4$); \bar{Q} – среднее арифметическое значение АИ.

В табл. 4 приведены спектральные индексы η пяти реакций, которые определялись как отношение приведенных к показаниям мониторов значений АИ для каждого ДНА к приведенным значениям АИ для Ni (см. табл. 3),

$$\eta = \frac{(Q(H)/Q_M)_{\text{ДНА}}}{(Q(H)/Q_M)_{\text{Ni}}}$$

Относительная погрешность $\eta(1\sigma)$ определялась следующим образом:

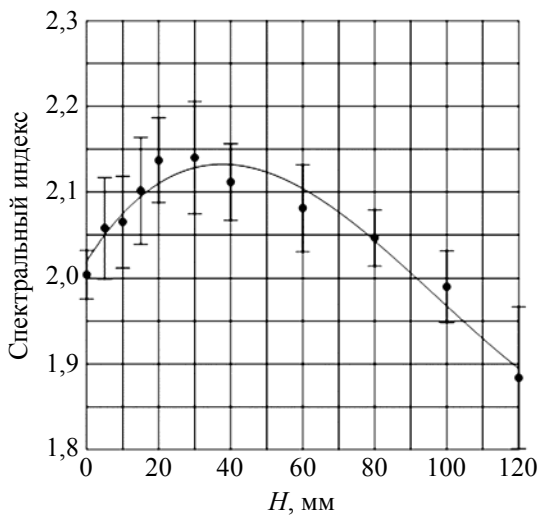
$$\delta_{\eta} = \sqrt{\delta^2 \left[(Q(H)/Q_M)_{\text{ДНА}} \right] + \delta^2 \left[(Q(H)/Q_M)_{\text{Ni}} \right]}$$

Результаты измерения спектральных индексов представлены в графической форме на рис. 2.

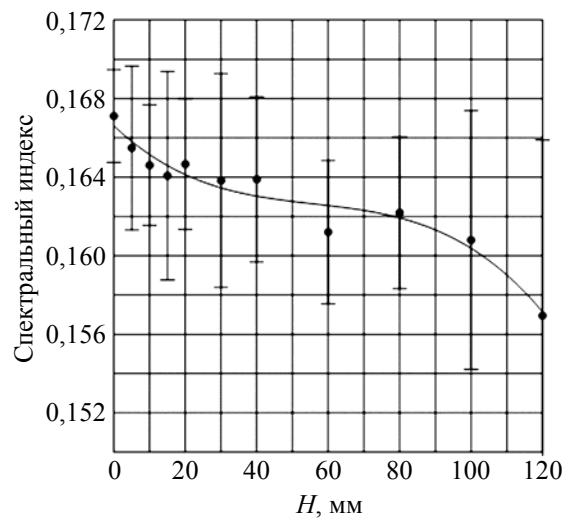
Таблица 4

Результаты определения спектральных индексов

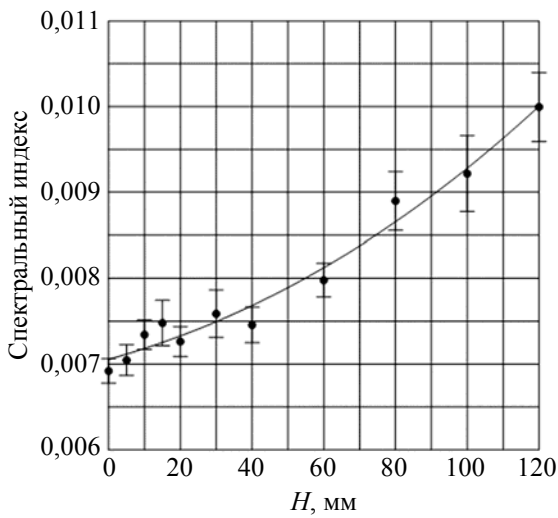
H , мм	$\eta_{\text{In}} \eta_{\gamma}$	$\delta\eta_{\text{In}} \eta_{\gamma}$, % (1σ)	η_{Cu}	$\delta\eta_{\text{Cu}}$, % (1σ)	$\eta_{\text{In}} \eta_{\text{nn}'}$	$\delta\eta_{\text{In}} \eta_{\text{nn}'}$, % (1σ)	η_{Ti}	$\delta\eta_{\text{Ti}}$, % (1σ)	η_{Al}	$\delta\eta_{\text{Al}}$, % (1σ)
0	12,5	0,7	2,50	0,8	2,00	0,8	0,166	0,8	$6,87 \cdot 10^{-3}$	1,1
5	23,0	1,4	4,16	1,2	2,06	1,5	0,165	1,4	$6,99 \cdot 10^{-3}$	1,4
10	32,6	0,9	5,64	0,8	2,07	1,3	0,164	1,1	$7,29 \cdot 10^{-3}$	1,2
15	44,4	1,7	7,17	1,8	2,10	1,5	0,163	1,7	$7,42 \cdot 10^{-3}$	1,8
20	57,7	1,1	8,76	1,0	2,14	1,3	0,164	1,1	$7,22 \cdot 10^{-3}$	1,3
30	81,3	1,7	11,6	1,6	2,14	1,6	0,163	1,7	$7,53 \cdot 10^{-3}$	1,8
40	101	1,3	13,7	1,0	2,11	1,2	0,163	1,3	$7,40 \cdot 10^{-3}$	1,4
60	134	1,2	16,8	1,2	2,08	1,1	0,160	1,2	$7,92 \cdot 10^{-3}$	1,3
80	152	1,1	18,1	1,3	2,05	0,9	0,161	1,3	$8,83 \cdot 10^{-3}$	2,1
100	140	1,3	17,4	1,5	1,99	1,4	0,160	2,3	$9,16 \cdot 10^{-3}$	2,6
120	83,3	1,5	10,8	1,4	1,88	2,2	0,156	2,8	$9,92 \cdot 10^{-3}$	2,0



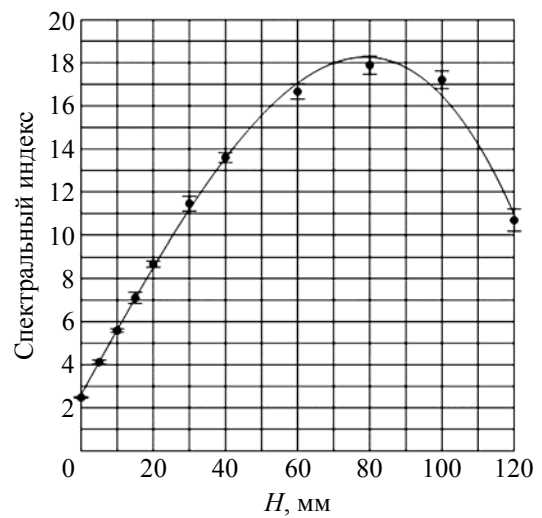
а



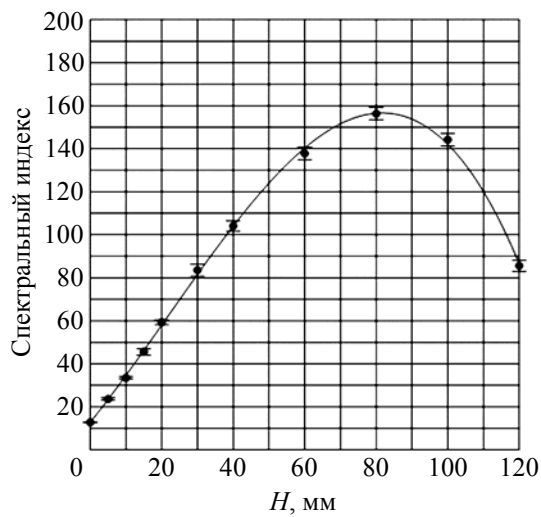
б



в



г



д

Рис. 2. Зависимость спектрального индекса от положения детектора в сборке для пяти реакций: $^{115}\text{In}(n, n')^{115\text{m}}\text{In}$ (а); $^{47}\text{Ti}(n, p)^{47}\text{Sc}$ (б); $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ (в); $^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$ (г); $^{113}\text{In}(n, \gamma)^{114\text{m}}\text{In}$ (д)

На СКС проведены спектральные измерения с цилиндрической РС из высокообогащенного урана с отражателем из гидрида лития-7. В экспериментах исследовали прохождение нейтронов делительного спектра через слои гидрида лития-7 общей толщиной до ~12 см. Для спектральных измерений использовали нейтронно-активационные детекторы пяти типов, обеспечивающие измерения чисел следующих реакций в диапазоне энергий от тепловых до быстрых нейтронов:

– $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$; $^{115}\text{In}(n, n')^{115\text{m}}\text{In}$; $^{47}\text{Ti}(n, p)^{47}\text{Sc}$;
 $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{25}\text{Na}$;
 – $^{113}\text{In}(n, \gamma)^{114\text{m}}\text{In}$; $^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$.

На основе полученных данных в табличной форме приведены зависимости нормированных чисел реакций детекторов, установленных между слоями отражателя из гидрида лития-7 на различных расстояниях от поверхности активной зоны РС. Нормировка абсолютных значений чисел реакций выполнена на показания детектора-монитора из никеля, установленного в центре верхнего диска НЧ РС. Нормированные значения чисел реакций приведены с относительной погрешностью от 0,3 до 2,7 % (1σ).

В графическом виде и табличной форме приведены зависимости спектральных индексов от расстояния между верхней поверхностью АЗ РС и положением детектора.

Результаты экспериментов предполагается использовать для верификации расчетных кодов и библиотек нейтронных констант.

1. Лукин А. В. Физика импульсных ядерных реакторов. – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2006.

2. Литвин В. И., Снопков А. А., Зайцев Д. В. и др. Обеспечение единства нейтронных измерений на ЯФУ РФЯЦ-ВНИИТФ // Импульсные реакторы: история создания и перспективы использования – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2016. Т. 1. С. 13–16

3. Зацепин О. В., Кандиев Я. З., Кашаева Е. А., Малышкин Г. Н., Модестов Д. Г. Расчеты методом Монте-Карло по программе ПРИЗМА нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора ВВЭР-1000 // Вопросы атомной науки и техники, сер. Физика ядерных реакторов, 2011, вып. 4, с. 64–73.

4. Кассандрова О. Н., Лебедев В. В. Обработка результатов наблюдений. – М.: Наука, 1970.

Контактная информация –

Вайвод Александр Андреевич
 e-mail: dep5@expd.vniitf.ru

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2019, вып. 4, с. 5–11.