

СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЧИСЕЛ РЕАКЦИЙ В ДЕТЕКТОРАХ ИЗ УРАНА И НИКЕЛЯ НА КОМПЛЕКСЕ БАРС-5М+РУН-2

В. И. Литвин, Л. Ю. Самойлова, Д. В. Зайцев, А. Л. Подъезжих, Д. В. Хмельницкий
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е. И. Забабахина», г. Снежинск Челябинской обл.

Статья поступила в редакцию 14.06.2019, после доработки – 28.09.2019, принята к публикации – 04.10.2019

В реакторном комплексе ТИРАН проведены измерения чисел реакций нейтронных детекторов из никеля и урана, установленных в различных точках активных зон. Параллельно методом Монте-Карло по программе ПРИЗМА-Д с нейтронными константами библиотеки ENDF-BVI проведен расчет значений чисел реакций для этих детекторов. Сравнение полученных данных показало хорошую сходимость эксперимента и расчета. На основании проведенной работы уточнены значения коэффициентов связи между энерговыделением в АЗ комплекса и показаниями нейтронно-активационных мониторов из никеля.

Ключевые слова: реактор, энерговыделение, число делений, активационные детекторы, библиотека нейтронных констант ENDF-BVI, программа ПРИЗМА-Д, метод Монте-Карло.

EXPERIMENT VERSUS COMPUTATION IN DETERMINING THE NUMBER OF REACTIONS IN URANIUM AND NICKEL DETECTORS ON BARS-5M+RUN-2 COMPLEX / V. I. LITVIN, L. Yu. SAMOYLOVA, D. V. ZAISTEV, A. L. PODYEZZHIKH, D. V. KHMELNITSKY // The number of reactions in U-, and Ni-neutron detectors fixed at different points of reactor cores was measured on the TIRAN complex. In parallel, the number of reactions in these detectors was calculated by the Monte Carlo method using the PRISMA-D code with the ENDF-BVI neutron constants library. Comparison of obtained results showed close fit between experiment and computation. Our study helped to update values of coupling factors between energy release in the complex's reactor core and readings of activation-neutron Ni-monitors.

Key words: reactor, energy release, total fissions, activation neutron detectors, ENDF-BVI neutron constants library, PRISMA-D code, Monte Carlo method.

Испытания на нейтронную стойкость специзделий и больших блоков РЭА, проводимые на трехзонном импульсном реакторе БАРС-5М+РУН-2 (далее – комплекс ТИРАН) [1], требуют полного и точного знания характеристик полей нейтронного излучения и энерговыделения в АЗ реактора. Эти параметры экспериментально определяют (или рассчитывают) на этапе физического пуска реакторов и при необходимости уточ-

няют в последующем. Энерговыделения в активных зонах комплекса ТИРАН были определены на основе измерений распределений чисел делений урана-235 по объему АЗ с последующим интегрированием.

Конструкция АЗ БАРС-5 позволяет достаточно подробно измерить распределения числа делений по всему ее объему. Для этого использовалось около 150 детекторов, размещенных между дисками зоны, в канале

и на внешней поверхности. Эти эксперименты были выполнены для одиночных АЗ (диаметр канала 60 и 100 мм), для связанной системы с расстоянием между зонами, равным 33,7 см, и нескольких других конфигураций [2].

В отличие от БАРС-5 конструкция АЗ реактора-умножителя РУН-2 не позволяет столь детально разместить детекторы по объему зоны. Поэтому пришлось ограничиться установкой детекторов на отдельных элементах АЗ с последующим экстраполированием на весь объем. Детекторы разместили на поверхности урановых стержней в 3 из 30 гнезд матрицы АЗ, в центральном канале и на внешней поверхности матрицы. Детекторы были установлены вдоль стержней на ближней к центру АЗ стороне и противоположной. Распределение числа делений внутри стержня (диаметр стержня 60 мм) оценивалось по данным расчета Монте-Карло. Такой подход, конечно, не позволял получить высокую точность измерения энерговыделения в АЗ. Кроме этого следует отметить, что РУН-2 рассчитан на работу в различных конфигурациях: расстояние между РУН-2 и БАРС-5М может устанавливаться от 20 до 68 см, возможно частичное заполнение матрицы РУН-2 урановыми стержнями, для радиационных испытаний в канале РУН-2 могут быть размещены массивные образцы.

Для определения (или мониторинга) энерговыделения в рабочих пусках комплекса ТИРАН, как в других ИЯР ВНИИТФ, используются нейтронно-активационные детекторы из никеля (детекторы-мониторы). Детекторы-мониторы устанавливают в фиксированных позициях на АЗ реактора. Коэффициент связи между энерговыделением в реакторе и показанием детектора-монитора определяют отдельно в специальном эксперименте на основе расчета по результатам измерения распределения числа делений, как изложено выше. Сложность и трудоемкость таких экспериментов не позволяют проводить их для каждой конфигурации активных зон и загрузки испытываемыми изделиями комплекса ТИРАН.

Оптимальным выходом из этой проблемы является проведение численных расчетов коэффициента связи между энерговыделением в АЗ комплекса и показаниями детекторов-мониторов. Доказательством правильности это-

го должно быть подтверждение данных численных расчетов результатами эксперимента. Данная работа посвящена решению этой задачи. Была поставлена конкретная цель – сравнить данные эксперимента и результаты расчета для одной из конфигураций ТИРАН. В результате требовалось следующее:

- сравнить расчетные и экспериментальные функции распределений числа делений (ч.д.) $^{235}\text{U}(n, f)$ в канале АЗ РУН-2 и в 3 гнездах матрицы с урановыми стержнями;

- провести аналогичное сравнение числа реакций (ч.р.) $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$ для детекторов из никеля, установленных в тех же позициях;

- определить коэффициенты связи между энерговыделениями в АЗ комплекса и показаниями детекторов-мониторов из никеля и сравнить их с ранее полученными экспериментальными данными;

- сравнить расчетные и экспериментальные значения активационных и делительных интегралов для нескольких нейтронных реакций, используемых в спектрометрии нейтронов.

Постановка эксперимента

Для измерения распределений ч.д. $^{235}\text{U}(n, f)$ использованы небольшие ($\sim 3 \times 3 \times 0,1 \text{ мм}^3$) детекторы из металлического урана высокого обогащения. Детекторы были закреплены на полосках из никелевой фольги. Использование таких полосок позволило оперативно устанавливать и снимать детекторы, размещаемые на элементах АЗ. После облучения урановые детекторы снимали с полосок, а полоски разделяли на части с размерами $10 \times 10 \text{ мм}^2$. Эти части служили в качестве активационных детекторов реакции $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$.

Измерения активности облученных урановых и никелевых детекторов в относительной форме выполняли на сцинтилляционном γ -спектрометре. Активность урановых детекторов измеряли по выходу гамма-излучения с энергией больше 1 МэВ (за 5 мм медным и 1 мм свинцовым фильтрами). Активность никелевых детекторов измеряли по фотопику γ -квантов с энергией 810 кэВ. Погрешность относительных измерений не хуже 1–3 %.

Абсолютные значения активности измеряли только для детекторов, установленных в контрольных точках активных зон комплекса. Для этих измерений использовали гамма-спектрометр с полупроводниковым детектором высокого разрешения [3]. Погрешность измерений активности составляла 4–5 % ($P = 0,95$).

Число делений $^{235}\text{U}(n, f)$ определяли по выходу осколков делений. В расчетах использовали до 10 долгоживущих осколков делений (^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{103}Ru , ^{131}I , ^{140}Ba , ^{140}La и др.). Погрешность определения ч.д. в пределах 5–8 % ($P = 0,95$).

Расчет распределений ч.д. $^{235}\text{U}(n, f)$ и ч.р. $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$ выполнен методом моделирования переноса нейтронов в исследуемой системе с использованием программы ПРИЗМА-Д с нейтронными константами из библиотеки ENDF-BVI [4].

Схематичный вид расчетной модели комплекса ТИРАН и матрицы РУН-2 приведен на рис. 1 и 2. В расчетной модели было установлено 157 детекторов в точках, соответствующих установке нейтронных детекторов в эксперименте.

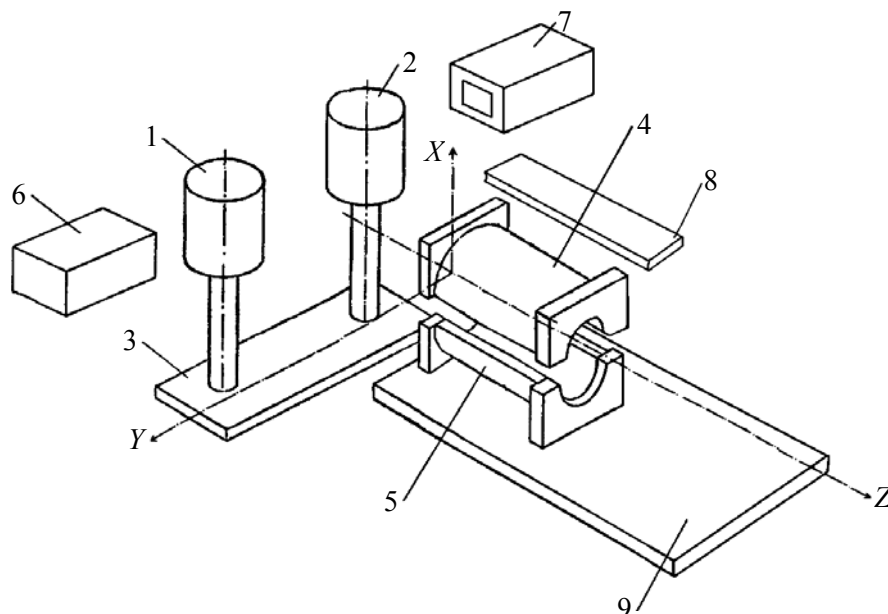


Рис. 1. Расчетная модель комплекса ТИРАН (общий вид): 1, 2 – АЗ1 и АЗ2 реактора БАРС-5; 3 – плита под реактором; 4, 5 – верхний и нижний блоки матрицы РУН-2; 6, 7 – полиэтиленовые блоки для размещения детекторов мощности; 8, 9 – соответственно, верхняя (показана часть) и нижняя плита РУН-2. Направление оси центрального канала – от АЗ БАРС-5 к РУН-2. Нумерация оси начинается от передней стенки РУН-2

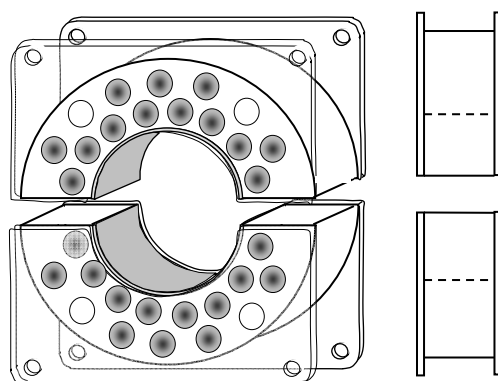


Рис. 2. Матрица реактора-умножителя РУН-2

Результаты эксперимента и численных расчетов

Распределения ч.р. $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$ и ч.д. $^{235}\text{U}(n, f)$ вдоль урановых стержней в гнездах № 1, 4 и 11 и вдоль оси центрального канала показаны на рис. 3–10. Данные нормированы на показания детектора, стоявшего в центре канала РУН-2. Приведенные погрешности соответствуют 2σ . Данным эксперимен-

та соответствуют значки \bullet , расчета Монте-Карло – \blacktriangle .

Результаты эксперимента и численных расчетов МК коэффициентов связи между энерговыделением в АЗ ТИРАН и показаниями детекторов-мониторов из никеля, полученные в эксперименте и методом Монте-Карло, приведены в табл. 1. Для полноты информации в таблице приведены данные расчета для случая предельного заполнения АЗ РУН-2 урановыми стержнями.

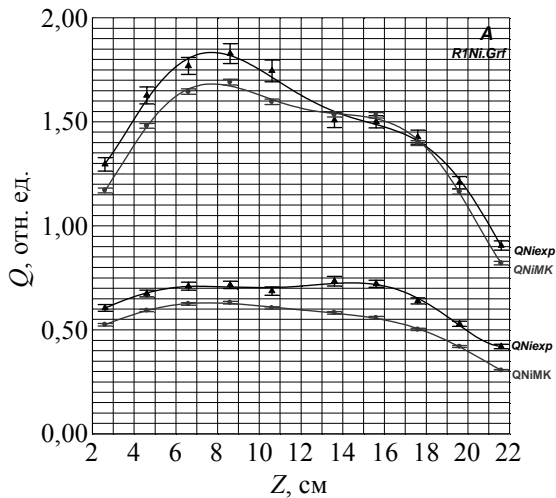


Рис. 3. Распределение ч.р. $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$ вдоль урановых стержней в гнезде № 1

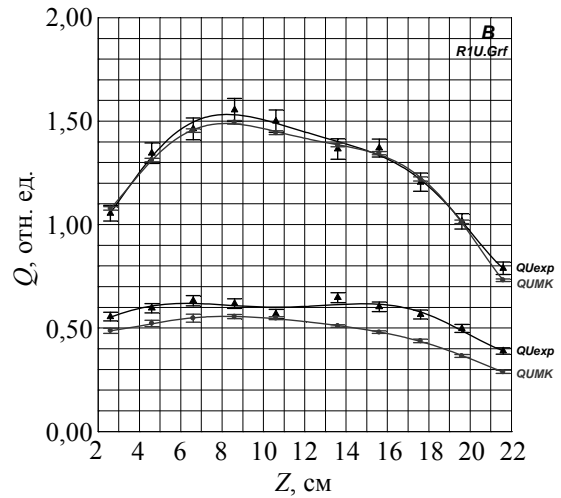


Рис. 4. Распределение ч.д. $^{235}\text{U}(n, f)$ вдоль урановых стержней в гнезде № 1

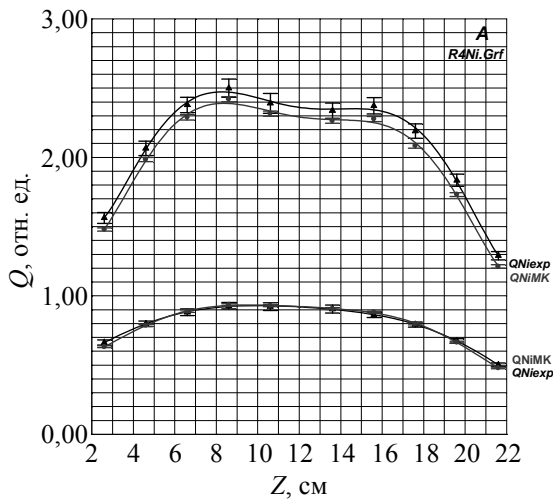


Рис. 5. Распределение ч.р. $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$ вдоль урановых стержней в гнезде № 4

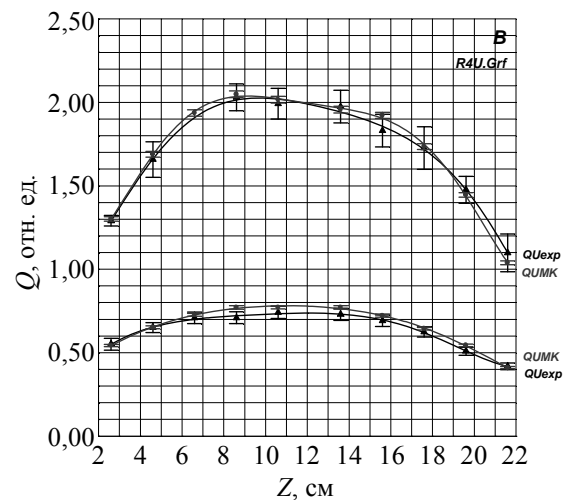


Рис. 6. Распределение ч.д. $^{235}\text{U}(n, f)$ вдоль урановых стержней в гнезде № 4

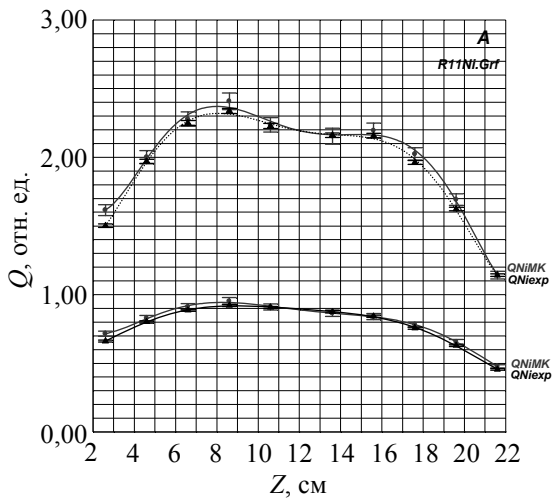


Рис. 7. Распределение ч.р. $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$ вдоль урановых стержней в гнезде № 11

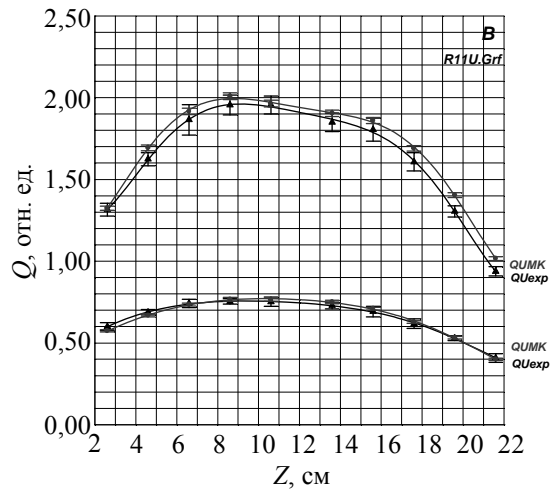


Рис. 8. Распределение ч.д. $^{235}\text{U}(n, f)$ вдоль урановых стержней в гнезде № 11

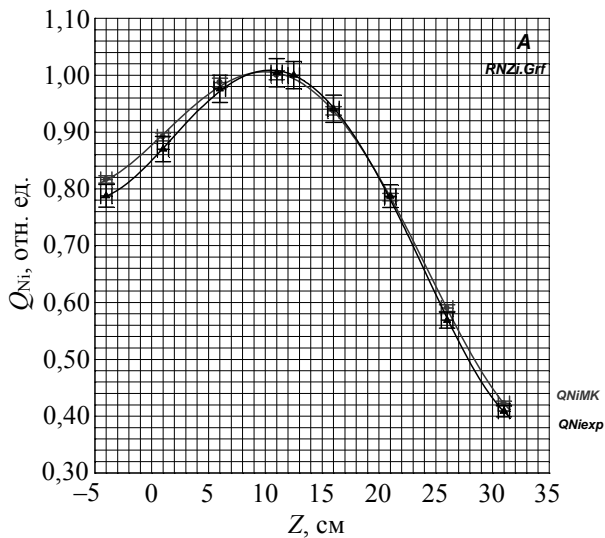


Рис. 9. Распределение ч.р. $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$ вдоль оси центрального канала

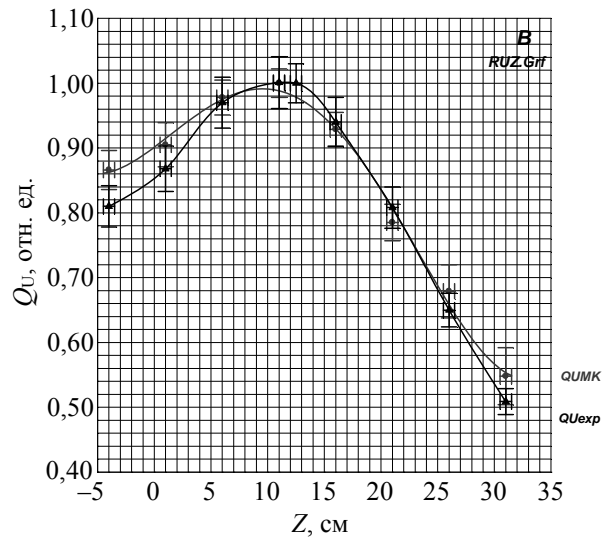


Рис. 10. Распределение ч.д. $^{235}\text{U}(n, f)$ вдоль оси центрального канала

Таблица 1

Коэффициенты связи между энерговыделением в АЗ ТИРАН и показаниями детекторов-мониторов из никеля, полученные в эксперименте и методом Монте-Карло

Реактор (место установки монитора)	Расчет МК	Экспери- мент	Расчет МК/ эксперимент	Расчет МК	Экспери- мент	Расчет МК/ эксперимент
	В гнездах № 2, 6, 9, 13 железо			Все гнезда матрицы заполнены		
БАРС-5М (монитор на поверхности)	1,43E+28	1,36E+28	1,05	1,40E+28	1,36E+28	1,03
РУН-2 (центр канала)	1,98E+28	1,74E+28	1,14	2,11E+28	1,74E+28	1,21
РУН-2 (монитор на поверхности)	3,44E+28	3,39E+28	1,01	3,66E+28	—	—

Анализ результатов эксперимента, проведенного на реакторном комплексе ТИРАН, и данных численных расчетов показал:

1. Распределения ч.р. $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$ и ч.д. $^{235}\text{U}(n, f)$ вдоль поверхности урановых стержней в гнездах № 4 и № 11, полученные в эксперименте и методом Монте-Карло, совпадают в пределах погрешностей измерений и расчета. Распределение этих реакций вдоль поверхности уранового стержня в гнезде № 1 в целом удовлетворительное. Расхождение наблюдается только для удаленных от центра детекторов на втором стержне.

2. Сравнение коэффициентов связи между энерговыделением в АЗ БАРС-5М и показаниями детекторов-мониторов из никеля, полученные в расчете, совпадают с ранее полученными экспериментальными данными в пределах погрешностей измерений (погрешность экспериментальных данных оценивалась в пределах 10 %).

3. Сравнение коэффициентов связи между энерговыделением в АЗ РУН-2 и показаниями

детекторов-мониторов из никеля, полученные в расчете для частично заполненной ураном матрицы АЗ, практически совпадают с ранее полученными экспериментальными данными в пределах погрешностей измерений (погрешность экспериментальных данных оценивалась как 17 %).

4. Такое же сравнение, полученное для предельно заполненной ураном матрицы АЗ РУН-2, не совпадает с ранее полученными экспериментальными данными до 20–30 % (погрешность этих коэффициентов для данной конфигурации в эксперименте трудно оценить, так как измерения были сделаны для ограниченной части АЗ РУН-2).

5. Спектральные соотношения (ч. д. урана-235, урана-238 и ч.р. нескольких ДНА, отнесенные к ч. р. $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$), полученные в расчете и эксперименте для поверхности АЗ БАРС-5М (табл. 2, 3), расходятся не более чем на 1–2 %, для АЗ РУН-2 – не более 2–4 %, что существенно меньше погрешностей измерений этих соотношений.

Таблица 2

Спектральные характеристики комплекса ТИРАН, полученные в эксперименте и методом Монте-Карло, для реакций $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$ и $^{235}\text{U}(n, f)$

Реактор (место измерения)	Расчет МК			Эксперимент			МК/ экспери- мент
	Q_U , дел./ядро	Q_{Ni} , реак./ядро	$\frac{Q_U}{Q_{Ni}}$	Q_U , дел./ядро	Q_{Ni} , реак./ядро	$\frac{Q_U}{Q_{Ni}}$	
БАРС-5М (поверхность АЗ1)	8,01E-28	3,63E-29	22,1	1,70E-10	7,84E-12	21,6	1,023
БАРС-5М (поверхность АЗ2)	7,90E-28	3,57E-29	22,1	1,70E-10	7,79E-12	21,8	1,014
РУН-2 (канал)	5,85E-28	1,98E+28	28,7	1,29E-10	4,32E-12	30,0	0,96
РУН-2 (поверхность АЗ)	3,72E-28	3,39E+28	31,3	8,06E-11	2,62E-12	30,8	1,016

Спектральные характеристики делительных и активационных детекторов, облученных на комплексе ТИРАН, полученные в эксперименте и методом Монте-Карло

Реакция	Расположение детектора	Q_{DD} , реакций/ядро	$\frac{Q_{ДНА}}{Q_{Ni}}$	$Q_{ДНА}$, реакций/ядро	$\frac{Q_{ДНА}}{Q_{Ni}}$	Расчет МК/ эксперимент
		Расчет МК		Эксперимент		
$^{235}U(n,f)$	Центр канала РУН-2	5,626E-28	2,83E+01	1,29E-10	2,95E+01	0,961
$^{238}U(n,f)$		6,705E-29	3,37E+00	1,49E-11	3,40E+00	0,992
$^{58}Ni(n,p)$		1,987E-29	1,00E+00	4,38E-12	1,00E+00	1,000
$^{27}Al(n,a)$		1,321E-31	6,65E-03	2,70E-14	6,16E-03	1,081
$^{24}Mg(n,p)$		2,904E-31	1,46E-02	5,78E-14	1,39E-02	1,054
$^{235}U(n,f)$	Монитор на поверхности РУН-2	3,527E-28	3,04E+01	8,06E-11	3,10E+01	0,979
$^{238}U(n,f)$		4,035E-29	3,47E+00	8,75E-12	3,37E+00	1,032
$^{58}Ni(n,p)$		1,162E-29	1,00E+00	2,60E-12	1,00E+00	1,000
$^{27}Al(n,a)$		7,230E-32	6,22E-03	1,56E-14	6,00E-03	1,037
$^{24}Mg(n,p)$		1,504E-31	1,29E-02	3,16E-14	1,28E-02	1,014

Заключение

Проведенный эксперимент доказывает правомерность использования расчетов методом Монте-Карло по программе ПРИЗМА-Д с нейтронными константами из библиотеки ENDF-BVI коэффициентов связи между показаниями активационных детекторов-мониторов из никеля и энерговыделением в АЗ реакторного комплекса ТИРАН.

Особую важность этот эксперимент имеет для достоверного и точного определения энерговывода в специзделия из ДМ, испытываемых на нейтронную стойкость на комплексе ТИРАН. Это обусловлено тем, что экспериментальная методика трековых делительных детекторов [5], используемая в таких испытаниях, не позволяет оперативно получить информацию, а в отдельных случаях (если не соблюдены условия облучения трековых делительных детекторов), экспериментальные данные могут иметь большую погрешность результатов измерений.

Список литературы

1. Магда Э. П., Погребов И. С., Снопков А. А. и др. Импульсные реакторы в Институте технической физики // ВАНТ. Сер.: Физика ядерных реакторов. 2003. Вып. 1–2, с. 3–6.
2. Снопков А. А., Черашев В. И., Кошмяков В. П., Литвин В. И. Нейтронно-физические характеристики трехзонного импульсного реактора ТИРАН // ВАНТ. Сер.: Физика ядерных реакторов. 2001. Вып. 1/2, с. 23–32.
3. СВИДЕТЕЛЬСТВО № 43011.2Ж621 на рабочий эталон II разряда РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ИКЭ-II-2.
4. Кандиев Я. З., Куропатенко Э. С., Лифанова И. В. и др. Расчет методом Монте-Карло взаимодействия частиц с веществом в программном комплексе ПРИЗМА // Сборник тезисов докладов III Всесоюзной научной конференции по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок. – Тбилиси, 1981.

5. Севастьянов В. Д. Моделирующие опорные поля нейтронов для метрологического обеспечения нейтронных измерений на ядерно-физических установках РФ. – Менделеево: ВНИИФТРИ. 2015.

Контактная информация –

Литвин Виктор Иванович,
e-mail: dep5@expd.vniitf.ru

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2019, вып. 4, с. 126–133.