



RU0610318

РОССИЙСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР

**"КУРЧАТОВСКИЙ
ИНСТИТУТ"**



**Б.В. Ефимов, В.С. Ионов,
С.И. Коняев, С.В. Марин**

ИАЭ-6389/2

**АКТИВАЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ
ПАРАМЕТРОВ СПЕКТРОВ НЕЙТРОНОВ.
РАСЧЕТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ**

Ключевые слова: спектр нейтронов, унифицированные активационные детекторы, обработка результатов измерений, вычислительная программа.

РЕФЕРАТ

Приведено описание математической постановки задачи определения спектральных характеристик полей нейтронов с использованием разработанных в РНЦ КИ унифицированных активационных детекторов (УКД). Обсуждается предложенный авторами метод обработки результатов активационных измерений и расчета величин, используемых для оценки параметров спектров нейтронов. Рассмотрены особенности обработки измерений унифицированными активационными детекторами, содержащими несколько специально подобранных изотопов, дающих при облучениях пики гамма-активности в общем спектре. Математическая обработка результатов измерений применяется для определения параметров спектров нейтронов реакторных установок с тепловым или близким к нему спектром нейтронов. Приведен пример обработки данных, полученных при проведении измерений на исследовательском реакторе Ф-1 РНЦ КИ.

The description of mathematical statement of a task for definition the spectral characteristics of neutron fields with use developed in RRC KI unified activation detectors (UKD) is resulted. The method of processing of results offered by authors activation measurements and calculation of the parameters used for an estimation of the neutron spectra characteristics is discussed. Features of processing of the experimental data received at measurements of activation with using UKD are considered. Activation detectors UKD contain a little bit specially the picked up isotopes giving at irradiation peaks scale of activity in the common spectrum scale of activity. Computing processing of results of the measurements is applied on definition of spectrum parameters for nuclear reactor installations with thermal and close to such power spectrum of neutrons. The example of the data processing, the measurements received at carrying out at RRC KI research reactor F-1 is resulted.

ВВЕДЕНИЕ.

Развитию атомной энергетики в текущем столетии придается большое значение, о чем свидетельствуют последние решения, принятые в рамках программы "Стратегии развития атомной энергетики России в первой половине XXI века". Значительное место отводится программам разработки ядерных реакторов нового поколения, которые должны отличаться от своих предшественников высокими экономическими характеристиками и безопасностью. Обеспечить требуемые характеристики можно только при условии получения достоверных данных о протекающих физических процессах и их глубоком понимании. Основные трудности, возникающие при измерении параметров, характеризующих физические процессы, заключается в том, что реактор представляет собой мощный источник различных видов излучений, характеристики которых меняются во времени и пространстве. Данные о спектрах нейтронов необходимы для получения практически всех нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора.

Современная экспериментальная ядерная физика представляет большой арсенал методов измерения спектров нейтронов. Применительно к измерению спектра нейтронов в активной зоне работающего реактора единственным на настоящее время остается метод активационных детекторов [1]. Метод активационных детекторов при правильном подборе изотопов-мишеней позволяет восстановить по результатам косвенных измерений скоростей ядерных реакций спектр нейтронов в широком энергетическом диапазоне. Первичной экспериментальной информацией являются измеряемые внутри реактора скорости ядерных реакций (n, γ) и (n, f) .

Задача восстановления спектра нейтронов по результатам обработки скоростей активации изотопов-мишеней сводится к решению обратной задачи. Под обратной задачей понимается определение интересующих нас количественных характеристик явления по результатам измерений их косвенных проявлений. В нашем случае необходимо от измеренной активности перейти к параметрам, описывающим спектр. Использование нейтронно-активационных методов для измерения спектров имеет давнюю историю. Развил ряд приемов, которые позволяют получить вполне удовлетворительные результаты. В настоящее время возможности физического эксперимента позволяют усовершенствовать эти приемы.

Особенность описываемого активационного метода состоит в том, что он использует для измерений пики гамма-активности, соответствующие различным значениям энергии нейтронов. Это позволяет определять параметры спектров, относительно которых предполагается, что спектры формируются в соответствии с моделью Весткотта и представляются состоящими из двух энергетических областей [2,7]. Рассматриваемый метод не предназначен для определения спектра быстрых нейтронов.

В методе используются детекторы, скорости реакций которых определяются по наведенной в них гамма-активности, вызванной распадом соответствующих радиоизотопов. Для исследования тепловой области используются детекторы, активация которых обеспечивается, в основном, тепловыми нейтронами. Для описания эпитепловой области используются детекторы, активация которых обеспечивается сильными резонансами в эпитепловой области.

Разработка метода и его использование проводились в РНЦ КИ на критических сборках с твэлами типа ВВЭР и реакторе Ф-1. В данной работе представлено дальнейшее развитие методов обработки измерений и использование современных вычислительных возможностей на основе усовершенствования техники активационного эксперимента. Для перехода от интегральных величин, получаемых в активационных измерениях, к дифференциальному виду спектра используется модель спектра, задаваемая несколькими параметрами.

1 ОЦЕНКА СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЕЙ НЕЙТРОНОВ

Методы исследования спектральных характеристик полей нейтронов с использованием активационных детекторов, получивших название "Унифицированные Композиционные Детекторы" (УКД), разработаны в РНЦ КИ [3,7]. Они позволяют определять абсолютные значения плотности потока нейтронов в различных участках энергетического спектра. УКД представляют собой композицию изотопов. Оптимальным составом для исследований на ядерных установках РНЦ КИ оказался детектор, включающий изотопы-мишени ^{55}Mn , ^{81}Br , ^{164}Dy , ^{186}W и ^{197}Au . Для исследования характеристик тепловой области спектра нейтронов были отобраны изотопы ^{55}Mn и ^{164}Dy , а для получения информации об эпитепловой области нейтронов, простирающейся до 130 эВ, были отобраны изотопы ^{81}Br , ^{186}W и ^{197}Au . При изготовлении детекторов в составе смеси для УКД используются химические соединения и металлы, содержащие естественный состав изотопов.

Технология изготовления УКД обеспечивает:

- оптимальную по значениям и равномерную активацию изотопов;
- возможность измерения плотности потока нейтронов (ППН) более $(1-10) \times 10^6 \text{ н см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ при флюенсе до $1 \times 10^{11} \text{ н см}^{-2} \text{ с}^{-1}$;
- самокранирование не более (1-2)%;
- равномерный набор статистики по отдельным изотопам;
- размещение образцов на работающей установке;
- последующий обсчет активности в лабораториях РНЦ КИ;
- исследование спектров в области энергий нейтронов от 0,001 до 200 эВ, где доминирующими являются реакция радиационного захвата нейтронов (n, γ) и реакция деления (n, f) для некоторых изотопов урана и трансурановых элементов.

При обработке данных и построении алгоритмов принимается, что спектр $\varphi(E)$ можно представить на основании формализма Весткотта в параметрическом виде суммой распределений Максвелла в тепловой области и Ферми - в эпитепловой области [2, 6]

$$\varphi(E) = F_i E \exp(-E/kT_n) / (kT_n)^2 + f_{epi} \Delta(E/kT_n) / E, \quad (1)$$

где: k - постоянная Больцмана;

$\Delta(E/kT_n)$ - функция, описывающая переходную область.

Неизвестными параметрами в этом выражении являются F_i , f_{epi} и T_n , которые после их вычисления используются для построения спектра.

Базовой программой для получения ядерных данных и оценок характеристик спектров нейтронов является вычислительная программа MCU-RFFI с решением уравнения переноса нейтронов методом Монте-Карло [8].

В результате облучения УКД, обработки данных по активациям и расчетов определяются скорости ядерных реакций $U_{Total,j}$, которые можно представить суммой скоростей реакций в тепловой и эпитепловой областях [6]:

$$U_{Total,j} = U_{t,j} + U_{epi,j} = F_{i,j} \sigma_{eff,j}(T_n) + f_{epi} I_{Cd,j}, \quad (2)$$

где $j = 1, 2, 3, 4, 5$ соответственно для ^{55}Mn , ^{81}Br , ^{164}Dy , ^{186}W и ^{197}Au ;

$\sigma_{eff,j}(T_n)$ - эфффективное сечение тепловых нейтронов, усредненное по распределению Максвелла с температурой нейтронного газа T_n ;

$I_{Cd,j}$ - закадмиевый резонансный интеграл.

Для пяти скоростей реакций изотопов $U_{Total,j}$ составляется система из пяти уравнений. Система является переопределенной. Решением системы уравнений являются F_i и f_{epi} . По этим данным вычисляется параметр жесткости $z = F_i / f_{epi}$.

Из анализа совокупности полученных экспериментальных и расчетных данных была выведена аппроксимационная зависимость значений температуры нейтронного газа (T_n) от параметра жесткости (z), которая представлена на рисунке 1.

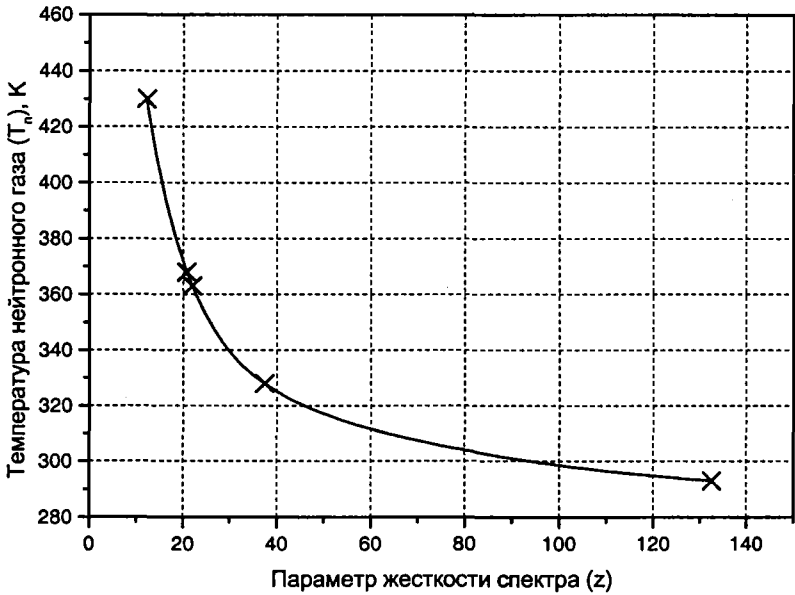


Рисунок 1 Зависимость температуры нейтронного газа от параметра жесткости спектра

Базовые значения, по которым была аппроксимирована зависимость температуры нейтронного газа от параметра жесткости спектра, приведены в таблице 1. На рисунке 1 эти значения обозначены символом (x).

Таблица 1 Базовые значения для аппроксимации зависимости $T_n = f(z)$.

Номер точки	z	T_n	$T_{n, \text{appr}}$	$100 * (T_n - T_{n, \text{appr}}) / T_n, \%$
1	12,2	430	429,99999	0,001
2	20,7	368	368,00022	-0,022
3	21,9	363	362,99964	0,036
4	37,4	328	327,99990	0,010
5	132,6	293	292,99997	0,003

Выражение для аппроксимационной зависимости имеет следующий вид:

$$T_n = T_0 + A_1 \exp(-(z - z_0)/t_1) + A_2 \exp(-(z - z_0)/t_2), \quad (3)$$

где $T_0 = 285,255$; $A_1 = 86,976$; $A_2 = 57,764$; $z_0 = 12,2$; $t_1 = 8,6907$; $t_2 = 59,886$.

По обработанным экспериментальным данным – скоростям ядерных реакций и значению температуры нейтронного газа, принимаемой в начале обработки за априорную, вычисляются значения F_i , f_{epi} и параметра жесткости спектра z . Вычисленные значения корректируются для того, чтобы значения z и T_n соответствовали зависимости $T_n = f(z)$ (рисунок 1).

Обработка данных и расчет параметров F_i , f_{epi} , z и T_n осуществляются с использованием программ ASTRA и MNKUKD.

Пример обработки экспериментальных данных и печати результатов расчетов приведены в приложении для двух случаев измерений.

2 АППАРАТУРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ГАММА СПЕКТРОВ

Цель процедуры измерения активности заключается в обнаружении и оценке излучений, испускаемых при распаде ядер или при переходе из возбужденного состояния в основное. Для измерения наведенной в изотопах-мишенях активности применяется гамма-спектрометрический метод, основанный на регистрации гамма-квантов, испускаемых радиоизотопами, образовавшимися в процессе облучения.

Наведенная в изотопах-мишенях гамма-активность исследуется полупроводниковым гамма-спектрометром-анализатором, основу которого составляет сверхчистый германиевый полупроводниковый детектор (СЧД) GMX-25200 фирмы "ORTEC". Электронная часть спектрометра выполнена в стандарте NIM и собрана из блоков фирмы "ORTEC". Анализирующая и обрабатывающая части состоят из 8000 канального анализатора S-100 и PC "FAST" фирмы "CANBERRA". Эффективность германиевого кристалла — 25%; разрешение при энергии 1,2 МэВ составляет 1,8 кэВ. Относительная эффективность регистрации гамма-квантов спектрометром измеряется с использованием радиоактивных источников ^{22}Na , ^{56}Co , ^{60}Co , ^{134}Cs , ^{152}Eu и других. Абсолютная эффективность спектрометра определяется с помощью стандартного набора ОСГИ №807. Гамма-спектрометр позволяет одновременно регистрировать гамма-спектры от всех активированных изотопов. Максимальная загрузка спектрометрического тракта, не приводящая к искажению формы гамма-пику в спектре, составляет 5×10^3 имп. с^{-1} . Для обработки выбираются наиболее характерные пики резонансов активности. Используемая установка обеспечивает повторяемость показаний в пределах статистической погрешности измерений. Для измерения УКД размещается на расстоянии от германиевого кристалла, обеспечивающего получение необходимой статистической точности измерений. В этом же положении измеряются показания источника ОСГИ и используется зависимость эффективности спектрометра от энергии гамма-квантов.

Измерения гамма-спектров начинаются через 1-3 часа после окончания облучения и доставки облученных детекторов на гамма-спектрометр. Длительность измерения одного образца на гамма-спектрометре составляет 10-20 минут. За один сеанс измерения в условиях РНЦ КИ может быть обработано до 20 образцов. Образцы размещаются на расстояниях от детектора 25-100 мм в зависимости от наведенной активности. Зависимость эффективности регистрации гамма-квантов (ϵI_γ) от их энергии и расстояния образцов до детектора определяется измерениями большого числа специально изготовленных гамма-источников (^{110}Ag , ^{152}Eu и другие). Абсолютная величина эффективности регистрации регулярно контролируется с помощью набора образцовых спектрометрических гамма-источников (ОСГИ), включающего несколько нуклидов.

Данными измерений, передаваемыми для расчетной обработки, являются:

- площади гамма – пикув, зарегистрированных гамма-спектрометром;
- значения эффективностей регистрации этих пикув (ϵI_γ), определяемые по результатам калибровки гамма-спектрометра;
- значения длительности облучения, выдержки (транспортировки и подготовки образца к обсчету) и обсчета.

3 КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ASTRA

Вычислительная программа, получившая название ASTRA, специально разработана для автоматизации обработки экспериментальных данных, которые используются в параметрическом представлении спектра нейтронов. Общая и математическая постановка задачи осуществлены Коняевым С.И., Ефимовым Б.В. и Ионовым В.С.

Автор программы: Коняев С.И.

Язык программирования: FORTRAN-77.

Объем программы: ~ 200 операторов языка FORTRAN.

Характерное время счета составляет ~ 2 с.

Назначение: по данным измерений (площади гамма – пиков и эффективности их регистрации гамма-спектрометром), с учетом длительности облучения, выдержки (доставки) и обсчета (измерения активности) рассчитываются скорости реакций U_j и параметры спектров F_i, f_{epi} .

3.1 Постановка задачи и методы вычисления

Полученные при измерениях активности (A_{ji}^0) для i -го гамма-пика приводятся с учетом массы j -го элемента по следующей формуле:

$$A_{ji}^0 = N_{ji} \frac{\exp(\lambda_j(T_c + T_m))}{3600 T_m (\epsilon I_\gamma)_{ji} P n_j^0} \quad (4)$$

где

A_{ji}^0 – активность j -го элемента в i -ом гамма-пике на одно ядро изотопа-мишени, Бк;

N_{ji} – количество отсчетов для j -го элемента в i -ом гамма-пике, зарегистрированных в течение 1 часа;

λ_j – постоянная распада j -го элемента, час⁻¹;

T_c – время выдержки от конца облучения до начала обсчета, час⁻¹;

T_m – время обсчета образца, час⁻¹;

$(\epsilon I_\gamma)_{ji}$ – эффективность регистрации гамма-кванта при полном его поглощении и квантовом выходе I_γ для j -го элемента в i -ом гамма-пике, отсчет Бк⁻¹;

P – масса элемента в образце, мг;

n_j^0 – количество ядер j -го элемента в одном мг.

Средняя активность j -го элемента облученном образце определяется по формуле:

$$A_j^0 = \frac{1}{NP} \sum_{i=1}^{NP} A_{ji}^0 \quad (5)$$

где NP – количество учетных пиков для j -го элемента.

Скорость реакций j -го элемента (количество захватов в секунду на ядро) определяется

как:

$$U_j^0 = A_j^0 \frac{1}{1 - \exp(-\lambda_j T_{irr})} \quad (6)$$

где T_{irr} – время облучения образца, час⁻¹.

Для унифицированного комбинированного детектора (УКД), состоящего из пяти изотопов-мишеней, система уравнений, записывается в соответствии с формулой (2), как

$$A \bar{X} = \bar{B}, \quad (7)$$

где $A = \begin{bmatrix} \sigma_{eff,1} & I_{Cd,1} \\ \sigma_{eff,2} & I_{Cd,2} \\ \sigma_{eff,3} & I_{Cd,3} \\ \sigma_{eff,4} & I_{Cd,4} \\ \sigma_{eff,5} & I_{Cd,5} \end{bmatrix}$ - матрица размерности (2,5),

\bar{B} - вектор значений измеренных скоростей реакций ($U_1^0, U_2^0, U_3^0, U_4^0, U_5^0$),

\bar{X} - вектор с неизвестными компонентами (F_i, f_{epi}),

и является переопределенной системой линейных уравнений.

В программе ASTRA система уравнений (7) может решаться одним из двух методов: наименьших квадратов (МНК) и по алгоритму, предложенному Б.В. Ефимовым [5,7].

При решении методом наименьших квадратов значения компонентов вектора \bar{X} находятся как

$$\bar{X} = (A^T A)^{-1} A^T B. \quad (8)$$

В качестве критерия точности принимается условие минимума суммы квадратов "невязок"

$$\eta = \min \sum_{j=1}^5 \left(\sum_{i=1}^2 (a_{ji} - b_j)^2 \right). \quad (9)$$

3.2 Входные данные

В пакет исходных данных для программы ASTRA входят величины, часть из которых задается с помощью операторов DATA, обеспечивающих присвоение начальных значений на этапе компиляции программы:

- названия исходных изотопов в образце;
- количество пиков для каждого изотопа;
- энергии пиков для изотопов;
- значения постоянной распада для радиоизотопов;
- энергий гамма-пиков для радиоизотопов, образовавшихся в процессе облучения;
- микроскопические сечения радиационного захвата нейтронов;
- значения эффективности регистрации квантового выхода $(\epsilon I_\gamma)_j$ для j-го элемента в i-ом гамма-пике;
- количества ядер изотопа элемента в одном миллиграмме, n_j^0 ;
- значения $\xi_j = n_{Dy}^0 \sigma_{Dy}^0 / n_j^0 \sigma_j^0$;
- длительность облучения, T_{irr} ;
- продолжительности выдержки, T_c ;
- время обсчета T_m .

Также вводятся комментарии, характеризующие экспериментальные данные.

3.3 Выходные данные

Выходные данные представлены описанием эксперимента, описанием детектора, результатами измерений, расчетными значениями скоростей реакций, расчетными значениями параметров спектра нейтронов и дополнительными сведениями об эксперименте, если в их описании есть необходимость. В Приложении А и Приложении Б приводятся примеры обработки для двух облученных УКД, которые использовались в экспериментах для получения параметров спектра нейтронов и других величин.

4 КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ MNKUKD

Вычислительная программа, получившая название MNKUKD, разработана с целью автоматизации обработки экспериментальных данных, которые используются в параметрическом представлении спектра нейтронов. Общая и математическая постановка задачи выполнены Ефимовым Б.В. и Ионовым В.С. Автор программы: Ионов В.С. Программная оболочка: MATLAB 6.5 release13 [9].

Объем программы: ~ 400 операторов и 10 кБ с базой данных и комментариями..
Характерное время счета составляет ~ 5 с.

Программа предназначена для расчета параметров спектров нейтронов по скоростям реакций для изотопов, входящих в состав УКД:

- поток тепловых нейтронов, F_t ;
- поток эпитепловых нейтронов с энергетическими границами $E1$ и $E2$, удовлетворяющие условию $\ln(E2/E1) = 1.0$, f_{epi} ;
- температура нейтронного газа, T_n , К;
- параметр жесткости спектра, z ;
- граница сшивки теплового и эпитеплового спектров, E_{Bound} ;
- характеристики точности рассчитываемых параметров.

4.1 Входные данные

Исходными данными для программы MNKUKD являются следующие величины:

- априорные значения F_t , f_{epi} и T_n ;
- скорости реакций для изотопов, входящих в состав УКД, U_j^0 , ядро⁻¹с⁻¹.

4.2 База данных

В состав базы данных программы MNKUKD входят следующие компоненты:

- тепловые сечения (σ_j) и резонансные закадмиевые интегралы ($I_{Cd,j}$) для изотопов, входящих в состав УКД;
- константы для моделей спектров по Максвеллу и Ферми;
- архив входных данных для вариантов, просчитанных по программе;
- базовые значения параметров для расчета зависимости температуры нейтронного газа от жесткости спектра, $T_n = f(z)$;
- значения спектральных индексов для изотопов, входящих в состав УКД.

4.3 Последовательность выполняемых процедур

- 1) Расчет исходных значений $\sigma_{eff,j}(T_n)$, $I_{Cd,j}$, $z = F_t / f_{epi}$ по априорным данным.
- 2) Расчет F_t , f_{epi} и z следующими методами:

в приближении $F_{t,Dy} = U_{Dy} / \sigma_{Dy}(T_n)$;

решение системы парных уравнений для U_i и U_j при условии, что $i \neq j$.

Вычисление по МНК для модели линейной регрессии без свободного члена (коэффициенты регрессии F_t, f_{epi}): значения и точности для коэффициентов регрессии, остатков моделей, параметров адекватности моделей, кривая для спектра по данным МНК без свободного члена. Также рассчитывается значение энергии E_{Bound} в точке сопряжения теплового и эпитеплового спектров.

С использованием программы MNKUKD может быть выполнена процедура уточнения T_n на соответствие со значением на кривой $T_n(z)$ (выполняется в режиме повторных расчетов при вновь заданных априорных T_n). Целью процедуры является поиск таких значений $T_n(z)$ и z , которые соответствуют зависимости $T_n = f(z)$, представленной на рисунке 1. Общая схема определения T_n строится следующим образом:

- в качестве постоянной информации используются величины $\sigma_{c,j}^{Thermal}$ и $I_{Cd,j}$;

- для описания детекторов используется величина n_j ;
- экспериментальной информацией являются значения U_j ;
- начало итераций в процедуре.

Шаг 1. в начале расчета принимается априорное значение T_n^* . В процессе итераций принимается значение T^* , вычисленное на шаге 6.

Шаг 2. Вычисляются значения $n_j \times \sigma_{c,j}^{Thermal}(T_n^*)$.

Шаг 3. С использованием величин U_j^0 , $n_j \times \sigma_{c,j}^{Thermal}(T_n^*)$ и $n_j \times I_{cd,j}$ формируется система линейных уравнений (7).

Шаг 4. Решением система уравнений (7) являются значения F_i и f_{epi} . По этим данным вычисляется параметр жесткости $z = F_i / f_{epi}$.

Шаг 5. По зависимости $T_n(z)$, представленной на рисунке 1, определяется значение температуры T' .

Шаг 6. Проводится корректировка температуры T_n .

Шаг 7. По критерию сходимости проверяется выход из итерационной процедуры.

- конец итераций в процедуре.

Метод отличается быстрой сходимостью итераций. Обычно их число не превосходит 5.

4.4 Выходные данные

Результаты расчета выводятся на экран монитора и представляют собой:

- протокол расчета в окне команд с возможностью распечатки содержимого окна команд и/или обработки средствами редактора WORD;
- график спектра, построенный средствами системы компьютерной математики MATLAB и/или редактора WORD;
- график зависимости параметра жесткости спектра от температуры нейтронного газа (кривая строится на базовых значениях, приведенных в таблице 1 и рисунке 1);
- график зависимости спектральных индексов U_i / U_j ($i \neq j$) от параметра z для измерений, проведенных в разное время.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны программные средства для обработки экспериментальных данных, полученных при облучении унифицированных композиционных детекторов на ядерных установках РНЦ «КИ»: реактор Ф-1, критические сборки типа ВВЭР «П» и ВВЭР «Ск-физ», критическая сборка типа ВТГР «Астра». По результатам анализ данных, полученных по разработанным вычислительным программам ASTRA и MNKUKD, отмечаются следующие особенности энергетических спектров нейтронов:

- существование функциональной зависимости между эффективной температурой нейтронного газа T_n и параметром $z = F_i / f_{epi}$, характеризующим жесткость спектра;
- наличие эмпирических зависимостей между z и отношениями скоростей радиационного захвата нейтронов (n, γ) U_1/U_3 , U_1/U_4 и U_1/U_5 ;
- возможность получения сведений об изменении f_{epi} с энергией нейтронов и с $z = F_i / f_{epi}$;
- стабильность значений параметра z при температурах нейтронного газа выше 600 К, что может свидетельствовать о наличии положительной корреляции между F_i и f_{epi} для активных зон ВВЭР;
- возможность получения оценки энергии сшивки тепловой и эпитепловой частей спектра при параметрическом представлении спектра нейтронов, построенного в соответствии с формализмом Весткотта.

Исследования проводятся при финансовой поддержке РФФИ (грант №05-08-33678-а).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Крамер-Агеев Е.А., Трошин И.С., Тихонов Е.Г. Активационные методы спектрометрии нейтронов. М., Атомиздат, 1976, с. 232.
2. Westcott C.H., Walker W.H., Alexander T.K. Effective Cross Sections and Cadmium Ratios for the Neutron Spectra of Thermal Reactors. Session A-11, P/202. Second Geneva Conf., 1958, p. 70-76.
3. Demidov A.M., Efimov B.V., Ionov V.S., Dikarev V.S. Application of Unified Complex Activation Detectors for Measurements of Reactor Neutron Spectra. Proc. LIANS,98. Paper #241, Long Island. 5-8 October 1998.
4. Брызгалов В.И., Гомин Е.А., Демидов А.М., Ефимов Б.В., Дикарев В.С., Ионов В.С. Сопоставление данных расчетов (программа MCU) и экспериментов (реактор Ф-1) при оценках параметров спектров нейтронов, измеренных с использованием активационных детекторов. ВАНТ РНЦ КИ. Серия: Физика ядерных реакторов, Вып. 3, 2000.
5. Демидов А.М., Ефимов Б.В., Дикарев В.С., Ионов В.С. Измерения характеристик реакторного нейтронного спектра с помощью активационных композиционных детекторов. 12-ый Международный Симпозиум по Реакторной Дозиметрии. Гатлинбург. США. 2005.США.
6. К. Бекурц, Виртц К. Нейтронная физика. Атомиздат, 1968, стр289.
7. Демидов А.М., Ефимов Б.В., Дикарев В.С., Ионов В.С., Марин С.В. Активационный метод измерения и исследования параметров спектров нейтронов с применением унифицированных композиционных детекторов. Препринт РНЦ КИ. ИАЭ-6388/2.
8. Программа MCU-REA с библиотекой констант DLC/MCU.DAT-2.1. Вопросы атомной науки и техники. Серия Физика ядерных реакторов. М. 2001, Вып.3, с.55-62.
9. MATLAB 6.5. Система инженерных и научных расчетов. «ДИАЛОГМИФИ». М.1999.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Образец обработки данных №1

Основание для работы Грант РФФИ № 05-08-33678-а
 Реактор Ф-1 Мощность 6 кВт
 Место облучения - горизонтальный канал
 Унифицированный композиционный
 детектор (УКД) Номер 2 Серии 3
 Расстояние от образца до кристалла 25 мм
 Дата облучения 28.10.05 Дата обсчета 28.10.05
 Время выдержки (в часах) - 5 часов
 Время измерения (в часах) - 0.166 часов (10 мин)
 Время облучения (в часах) - 1 час
 Температура нейтронного газа - 363°K

Данные измерений

Исходный Изотоп	Энергия γ -пика	Эффективн. счета	Кол-во отсчетов	$E\%$	$A^{\circ}ji$	$A^{\circ}j$
Dy-164	94.7	0.2460E-03	86136	0.8	0.5950E+06	0.6982E+06
	279.8	0.1750E-04	7526	3.8	0.7308E+06	
	361.7	0.2410E-04	9639	2.6	0.6797E+06	
	633.4	0.8990E-05	3571	8.1	0.6750E+06	
	719.3	0.7680E-05	3663	4.9	0.8105E+06	
Mn-56	864.8	0.1206E-02	15334	1.6	0.3746E+05	0.3746E+05
Au-198	411.8	0.2277E-02	30581	1.2	0.6119E+04	0.6119E+04
	W-187	134.2	0.5790E-03	14409	2.2	0.1451E+04
Vg-81	479.5	0.4840E-03	15750	2.0	0.1898E+04	
	685.5	0.4310E-03	13750	1.6	0.1860E+04	
	776.5	0.1104E-02	14828	1.7	0.3166E+03	0.3491E+03
	827.8	0.2980E-03	4531	3.7	0.3584E+03	
	1044.0	0.2720E-03	4296	3.0	0.3723E+03	

Характеристики детектора

Исходный Изотоп	Вес мг	σ	$I_{ca} \sigma$	Скорость реакций
Dy-164	4.653	2520.00	341.0	0.26835E+07
Mn-56	2.273	13.30	14.0	0.15872E+06
Au-198	3.860	98.65	1550.0	0.59170E+06
W-187	33.170	37.00	485.0	0.61098E+05
Vg-81	78.250	2.70	50.0	0.17955E+05

Результаты расчетов

Вычисление значений F_T и $f_{\text{эпи}}$ по методу МНК

$$F = 0.12695E+09 \quad f_{\text{эпи}} = 0.6035312E+07$$

$$\text{Исходные данные } F_T/f_{\text{эпи}} = z = 21.034$$

Температура нейтронного газа

$$\text{Априорная } T_{\text{нг}} = 363^{\circ}\text{K}, \quad T_{\text{нг}} \text{ в соответствии с зависимостью } T_{\text{нг}}(z) = 369.4^{\circ}\text{K}$$

Вычисление значений F_T и $f_{\text{эпи}}$ по методу Ефимова Б.В.

$$F = 0.1020973E+09 \quad f_{\text{эпи}} = 0.5760855E+07$$

$$\text{Исходные данные } F_T/f_{\text{эпи}} = z = 17.7226$$

Температура нейтронного газа

$$\text{Априорная } T_{\text{нг}} = 363^{\circ}\text{K}, \quad T_{\text{нг}} \text{ в соответствии с зависимостью } T_{\text{нг}}(z) = 382.9^{\circ}\text{K}$$

Скорректированные данные

$$F = 0.12712E+09 \quad f_{\text{эпи}} = 0.6035312E+07$$

$$F_T/f_{\text{эпи}} = z = 21.092 \quad T_{\text{нг}} = 366.9^{\circ}\text{K}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Образец обработки данных №2

Основание для работы Грант РФФИ № 05-08-33678-а
 Реактор Ф-1 Мощность 6 кВт
 Место облучения - горизонтальный канал
 Унифицированный композиционный
 детектор (УКД) Номер 2 Серии 3
 Расстояние от образца до кристалла 25 мм
 Дата облучения 28.10.05 Дата обсчета 28.10.05
 Время выдержки (в часах) - 5 часов
 Время измерения (в часах) - 0.166 часов (10 мин)
 Время облучения (в часах) - 1 час
 Температура нейтронного газа - 363°K

Исходный Изотоп	Энергия γ-пика	Данные измерений				A°ji	A°j
		Эффективн. счета	Кол-во отсчетов	Eβ			
Dy-164	94.7	0.2460E-03	92620	0.8	0.4848E+06	0.5599E+06	
	279.8	0.1750E-04	7595	3.8	0.5588E+06		
	361.7	0.2410E-04	10104	2.5	0.5398E+06		
	633.4	0.8990E-05	3996	7.3	0.5723E+06		
	719.3	0.7680E-05	3841	4.7	0.6439E+06		
Mn-56	864.8	0.1206E-02	16563	1.5	0.3247E+05	0.3247E+05	
Au-198	411.8	0.2277E-02	29744	1.2	0.5753E+04	0.5753E+04	
W-187	134.2	0.5790E-03	13615	2.4	0.1299E+04	0.1612E+04	
	479.5	0.4840E-03	15869	2.0	0.1811E+04		
	685.5	0.4310E-03	13462	1.2	0.1725E+04		
Br-81	776.5	0.1104E-02	14525	1.7	0.2986E+03	0.3318E+03	
	827.8	0.2980E-03	4474	3.7	0.3407E+03		
	1044.0	0.2720E-03	4268	3.0	0.3561E+03		

Исходный Изотоп	Вес мг	Характеристики детектора		
		σ	Iασ	Скорость реакций
Dy-164	4.778	2520.00	341.0	0.21519E+07
Mn-56	2.263	13.30	14.0	0.13761E+06
Au-198	3.959	98.65	1550.0	0.55627E+06
W-187	34.190	37.00	485.0	0.56707E+05
Br-81	79.960	2.70	50.0	0.17065E+05

Результаты расчетов

Вычисление значений Ft и fэпи по методу МНК
 $F = 0.101529E+08$ $f_{epi} = 0.65923E+07$

Температура нейтронного газа

Исходные данные Ft/fэпи = z = 15.400

Априорная Tнг = 363°K, Tнг в соответствии с зависимостью Tнг(z) = 398°K

Вычисление значений Ft и fэпи по методу Ефимова Б.В.
 $F = 0.8353934E+08$ $f_{epi} = 0.7774622E+07$

Исходные данные Ft/fэпи = z = 10.74513

Температура нейтронного газа

Априорная Tнг = 363°K, Tнг в соответствии с зависимостью Tнг(z) = 450°K

Скорректированные данные

$F = 0.10570E+08$ $f_{epi} = 0.65923E+07$

Ft/fэпи = z = 16.034 Tнг = 393.8°K

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	1
1 Оценка спектральных характеристик полей нейтронов	2
2 Аппаратура для измерения γ -спектров	4
3 Краткое описание вычислительной программы ASTRA	5
3.1 Постановка задачи и методы вычисления	5
3.2 Входные данные	6
3.3 Выходные данные	6
4 Краткое описание вычислительной программы MNKUKD	7
4.1 Входные данные	7
4.2 База данных	7
4.3 Последовательность выполняемых процедур	7
4.4 Выходные данные	8
Заключение	8
Список использованных источников	9
Приложение А	10
Приложение Б	11

Подписано в печать 26.12.2005. Формат 60×90/16

Печать офсетная. Усл. печ. л. 0,75

Тираж 65 экз. Заказ 88. Индекс 3624

Отпечатано в РИЦ «Курчатовский институт»
123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

