

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ДЛЯ НЕЙТРОННОЙ БИБЛИОТЕКИ АКТИВАЦИОННЫХ ФАЙЛОВ «IEAF-2005»

**Г.Б. Пильнов, А.В. Тихоненко**

*Обнинский государственный технический университет атомной энергетики,  
г. Обнинск*



В рамках создания библиотеки нейтронных активационных данных IEAF-2005 (The Intermediate Energy Activation File) проведен статистический анализ экспериментальных и теоретических данных, полученных с использованием 8 моделей, описывающих ядро-ядерные взаимодействия. Приводятся результаты статистического анализа по выбору модели, наилучшим образом описывающей существующие в открытом доступе экспериментальные данные 2006 и 2007 гг., представленные в библиотеке EXFOR.

### ВВЕДЕНИЕ

С развитием ядерной техники и топливных циклов, связанных с ней, на сегодняшний день одним из существенно прорабатываемых вопросов является трансмутация ядерных отходов, накапливаемых в электро- и термоядерных установках, под действием частиц высоких энергий. Для изучения поведения конструкционных материалов при их длительном облучении в установках с жестким нейтронным и протонным спектром, необходимы расчетные активационные данные в широком энергетическом диапазоне.

Кроме того, такие данные необходимы в ядерной астрофизике, для оценки скоростей производства тяжелых химических элементов в процессах нуклосинтеза, протекающих в звездах на различных стадиях их эволюции, развития моделей динамических процессов обмена веществом между звездами и межзвездной средой и между галактиками и межгалактической средой.

Большинство имеющихся в настоящий момент библиотек нейтронных активационных ядерных данных ограничены энергиями 150 МэВ. Ввиду этого было принято решение о создании новой библиотеки IEAF-2005 (Intermediate Energy Activation File) [1], содержащей данные для энергий первичных нейтронов до 1 ГэВ.

IEAF-2005 (библиотека нейтронных ядерных данных, используемых для активационного анализа материалов нейтронами) является продолжением предыдущей версии библиотеки IEAF-2001 [2], которая содержит нейтронные активационные данные до 150 МэВ. IEAF-2005 включает в себя набор отдельных нейтронных файлов для 682 нуклидов. Каждый файл включает данные по сечениям нейтронных реакций с ядрами мишеней от  $Z = 1$  до  $Z = 84$  в энергетическом диапазоне

от 150 МэВ до 1 ГэВ. Ниже приведено описание математических (статистических) подходов к обработке экспериментальных и теоретических (расчетных) данных и выбору наилучшей модели, описывающей экспериментальные сечения реакций взаимодействия нуклонов с ядрами мишеней.

С целью выбора наилучшей модели были проанализированы сечения реакций взаимодействия протонов с ядрами мишеней:

- представленные в открытом доступе в Интернет в библиотеке экспериментальных данных EXFOR [3];
- расчетные ядерные данные, полученные с использованием восьми расчетных моделей ( $j$  – номер модели): Bertini/ABLA ( $j = 1$ ); Bertini/Dresner ( $j = 2$ ); CEM2K ( $j = 3$ ); INCL4/ABLA ( $j = 4$ ); INCL4/Dresner ( $j = 5$ ); ISABEL/ABLA ( $j = 6$ ); ISABEL/Dresner ( $j = 7$ ) и CASCADE ( $j = 8$ ).

### ПОДГОТОВКА ДАННЫХ ДЛЯ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА

Для проведения сравнительного анализа были выбраны из всех включенных в библиотеку EXFOR работ по активационным данным 3 999 экспериментальных значений сечений реакций взаимодействия протонов с ядрами  $Z = 6-84$  для более 1 000 реакций ( $p, xnурза$ ) в энергетическом диапазоне  $E = 150-1000$  МэВ.

Наряду с независимыми выходами ядер были включены в рассмотрение реакции типа ( $p, xnурза$ ), для которых были приведены:

- данные для образования остаточных ядер в основных состояниях, если метастабильное ядро переходит в основное состояние с вероятностью более 90%;
- данные для суммы выходов ядер в основном или метастабильном состоянии, а также в основном, первом и втором метастабильном состояниях.

Работа с Интернет-библиотекой EXFOR осуществлялась с использованием специально написанной на языке PHP программы. Она позволяла работать с форматом представления данных EXFOR, извлекать экспериментальные данные по сечениям взаимодействия из заданного списка работ и транспонировала их в единый файл формата EXCEL. Работы, содержащие экспериментальные данные и представленные в EXFOR, отбирались с использованием подходов отмеченных выше. Список задавался в виде гиперссылок. Выбранные экспериментальные данные (для примерно тысячи реакций) представлялись в EXCEL файле в виде последовательности:

$$EXP_l = \left\{ \begin{matrix} E_{1l} & \sigma_{1l}^{exp} & \Delta\sigma_{1l}^{exp} \\ \dots & \dots & \dots \\ E_{il} & \sigma_{il}^{exp} & \Delta\sigma_{il}^{exp} \\ \dots & \dots & \dots \\ E_{Il} & \sigma_{Il}^{exp} & \Delta\sigma_{Il}^{exp} \end{matrix} \right\} \rightarrow \left( \begin{matrix} X_{1l} & Y_{1l}^{exp} & \Delta Y_{1l}^{exp} \\ \dots & \dots & \dots \\ X_{il} & Y_{il}^{exp} & \Delta Y_{il}^{exp} \\ \dots & \dots & \dots \\ X_{Il} & Y_{Il}^{exp} & \Delta Y_{Il}^{exp} \end{matrix} \right), \quad (1)$$

где  $l = 1, \dots, L$  – номер реакции,  $i = 1, \dots, I$  – количество экспериментальных точек соответствующих ей,  $E_{il}$  – энергия (в МэВ) налетающего протона,  $\sigma_{il}^{exp}$  и  $\Delta\sigma_{il}^{exp}$  – сечение (в мб) и погрешность сечения выхода остаточного ядра (второй блок в формуле (1) содержит обозначения для энергий и сечений, которые далее используются в программах обработки данных).

Значения  $EXP_l$  были ранжированы в порядке возрастания массового числа ядра-мишени с  $A = 12-210$  и разбиты на 9 поддиапазонов, включающих в себя практически равное количество экспериментальных точек (кроме первого поддиапазона, см. табл. 1).

Таблица 1

**Характеристики выбранных поддиапазонов**

Поддиапазон	A ядра-мишени	Количество экспериментальных точек
I	$12 \leq A \leq 22$	179
II	$23 \leq A \leq 27$	408
III	$28 \leq A \leq 55$	422
IV	$56 \leq A \leq 59$	529
V	$60 \leq A \leq 89$	519
VI	$90 \leq A \leq 124$	432
VII	$125 \leq A \leq 181$	438
VIII	$182 \leq A \leq 201$	455
IX	$202 \leq A \leq 210$	617

В каждом поддиапазоне экспериментальным данным были сопоставлены данные, полученные с использованием программы CASCADE/INPE [4] и многоцелевой программы MCNPX [5].

Необходимо заметить, что, с одной стороны, исходные экспериментальные данные сильно различались как по их количеству для разных реакций, так и по степени их однородности внутри каждого диапазона, а с другой стороны, не все исходные расчетные данные покрывали соответствующие области экспериментальных данных. Поэтому первоначальная обработка экспериментальных данных и подготовка их для последующего анализа проводились на основе двух подходов: с использованием экспертных оценок и с помощью полиномиальной регрессии.

В рамках первого подхода в среде программы EXCEL выполнялся отбор данных (для которых возможен сравнительный анализ) с помощью фактора согласия

$$D_{il} = \left| \frac{\sigma_i^{calc} - \sigma_i^{exp}}{\sigma_i^{exp}} \right| = \left| \frac{(Y_0)_{1l} - (Y_0)_{il}}{(Y_0)_{1l}} \right|, \quad (2)$$

где  $\sigma_{il}^{exp}$  и  $\sigma_{il}^{calc}$  – экспериментальные и расчетные сечения для  $i$ -го экспериментального значения и реакции  $l$ .

В качестве оценочного значения фактора  $D$  были выбраны максимальные значения, равные 0.8 и 0.4. Для отбора данных по этим двум оценкам была написана программа на языке Fortran. Она позволила переработать единый EXCEL файл экспериментальных и соответствующих им расчетных данных в соответствии с выбранными оценочными значениями. В результате были подготовлены два набора данных и представлены в формате (2) в виде двух EXCEL файлов с 1624 экспериментальными измерениями и 191 реакцией для  $D_1 \leq 0.4$  и 2124 экспериментальными измерениями и 249 реакциями для  $D_2 \leq 0.8$ . В результате этого отбора получался набор данных в виде 191 вектора  $Y_0$  для  $D_1$  и 249 векторов  $Y_0$  для  $D_2$ .

Подготовленные в рамках первого подхода данные импортировались из EXCEL в прикладной математический пакет MATHCAD, где проводилась дальнейшая их обработка и анализ.

В рамках второго подхода первоначальная обработка и последующий анализ данных (для обоих подходов) проводились с помощью комплекса программ в среде прикладного математического пакета MATHCAD. Экспериментальные данные обрабатывались методом полиномиальной регрессии с помощью прикладного математического пакета MATHCAD: для каждой реакции строились интерполяционные функции, определяющие функциональную зависимость сечения реакции от энер-

гии налетающего протона в виде

$$f_l(x) = \text{interp}(R_l, X_l, Y_{0l}, N_l, x), \quad (3)$$

и аппроксимирующие полиномы

$$F(x) = \sum_{k=3}^{N+3} R_k \cdot x^k, \quad (4)$$

где  $R_L$  – вектор-функция полиномиальной регрессии в MATHCAD:

$$R_l = \text{regress}(X_l, Y_{0l}, N_l), \quad (5)$$

$X_l$  – вектор энергий,  $Y_{0l}$  – вектор экспериментальных данных,  $N_l$  – порядок полинома. С помощью полученных сглаживающих полиномов были подготовлены наборы данных в формате векторов  $Y_0$ . В обоих подходах число компонент векторов  $Y_0$  определяется числом компонент вектора энергий  $X$ .

В результате подготовленные в рамках двух подходов экспериментальные и модельные данные представлялись как три совокупности (для  $D_1 \leq 0.4$ ,  $D_2 \leq 0.8$  и метода регрессии) векторов в MATHCAD:

$$X = \begin{pmatrix} X_{1l} \\ \dots \\ X_{Il} \end{pmatrix}, Y_0 = \begin{pmatrix} (Y_0)_{1l} \\ \dots \\ (Y_0)_{Il} \end{pmatrix}, \Delta Y_0 = \begin{pmatrix} (\Delta Y_0)_{1l} \\ \dots \\ (\Delta Y_0)_{Il} \end{pmatrix}, Y_j = \begin{pmatrix} (Y_j)_{1l} \\ \dots \\ (Y_j)_{Il} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где  $X$  – вектор энергий,  $Y_0$  и  $\Delta Y_0$  – векторы экспериментальных данных с сечениями протонных реакций и их погрешностей соответственно,  $Y_j$  ( $j = 1, 2, \dots, 8$ ) – восемь векторов расчетных сечений реакций, причем размерности векторов определялись количеством реакции  $l$ , рассматриваемых в рамках каждого из указанных подходов.

## МЕТОД НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ И КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ

Сравнительный анализ подготовленных в рамках рассматриваемых подходов экспериментальных данных с расчетными данными проводился с помощью метода наименьших квадратов и корреляционного анализа по следующей схеме.

1. Вычислялись векторы:

а)  $\mathbf{MMQ}^{(L)}_j$  – вектор обратных значений сумм квадратов разностей экспериментальных и теоретических данных для каждой реакции (максимальность каждой компоненты вектора  $\mathbf{MMQ}_j$  характеризует «наилучшее» согласие экспериментальных и расчетных данных):

$$\mathbf{MMQ}^{(L)}_j = \left( \sum_{i=1}^{i_{\max}} (Y_{0i}^{(L)} - Y_{ji}^{(L)})^2 \right)^{-1}, \quad (7)$$

где  $i_{\max}$  – число значений энергий для реакции  $L$ ,  $j$  – номер модели ( $j = 1, 2, \dots, 8$ ) (при этом отсутствие для некоторых моделей данных, импортируемых в MATHCAD, учитывалось при вычислении  $\mathbf{MMQ}^{(L)}_j$  подпрограммой с использованием булевых операций);

б)  $\mathbf{COR}^{(L)}_j$  – вектор корреляций экспериментальных и теоретических данных для каждой реакции (максимальность каждой компоненты вектора  $\mathbf{COR}_j$  характеризует «наилучшую» корреляцию экспериментальных и расчетных данных):

$$\mathbf{COR}^{(L)}_j = \frac{\text{cvar}(Y_0^{(L)}, Y_j^{(L)})}{\text{stdev}(Y_0^{(L)}) \cdot \text{stdev}(Y_j^{(L)})}, \quad (8)$$

где  $cvar(Y_0, Y_j)$  и  $stdev(Y_j)$  – операторы MATHCAD для вычисления ковариации и стандартного отклонения соответственно (хотя в MATHCAD имеется оператор вычисления корреляции, ввиду неполноты расчетных данных необходимо использовать регуляризующие процедуры, которые могут программно учесть это с использованием этой формулы);

в)  $MMQ\_COR^{(L)}_j$  – вектор, компоненты которого являются произведениями обратных значений сумм квадратов разностей и корреляций экспериментальных и расчетных данных для каждой реакции (максимальность каждой компоненты вектора  $MMQ\_COR_j$  характеризует «наилучшее» согласие экспериментальных и теоретических данных с учетом их корреляции):

$$MMQ\_COR^{(L)}_j = MMQ^{(L)}_j \cdot COR^{(L)}_j = \left( \sum_{i=1}^{i_{max}} (Y_{0i}^{(L)} - Y_{ji}^{(L)})^2 \right)^{-1} \cdot \frac{cvar(Y_0^{(L)}, Y_j^{(L)})}{stdev(Y_0^{(L)}) \cdot stdev(Y_j^{(L)})}. \quad (9)$$

2. Для анализа, основанного на частотном подходе, вычислялись нормированные значения этих векторов для реакции под номером  $L$ :

$$MMQ_{Nj}^{(L)} = \frac{MMQ^{(L)}_j}{\sum_L MMQ^{(L)}_j}, \quad MMQ\_COR_{Nj}^{(L)} = \frac{MMQ\_COR^{(L)}_j}{\sum_L MMQ\_COR^{(L)}_j}, \quad (10)$$

причем нормировку можно сделать как в рамках реакции  $L$ , так и для диапазона реакций.

3. Экспериментальные и расчетные данные для всех исследуемых реакций, обработанные в соответствии с пунктами 1 и 2 в MATHCAD, представлялись в виде девяти матриц данных ( $MMQ\_N$ ,  $COR\_N$ ,  $MMQ\_COR\_N$  по три матрицы для подхода, связанного с факторами согласия  $D_1 \leq 0.4$ ,  $D_2 \leq 0.8$ , и три матрицы для подхода, основанного на методе регрессии), значения которых еще раз нормировались по всем реакциям:

$$MMQ\_N = \frac{MMQ^{(l)}_j}{\sum_{j=1}^8 \sum_{l=1}^L MMQ^{(l)}_j}, \quad MMQ\_COR\_N = \frac{MMQ\_COR^{(l)}_j}{\sum_{j=1}^8 \sum_{l=1}^L MMQ\_COR^{(l)}_{Nl}}. \quad (11)$$

На рис. 1 представлены визуализации с помощью трехмерных гистограмм нормированных матриц данных  $MMQ\_N$  и  $MMQ\_COR\_N$  для всех реакций для фактора согласия  $D_2 \leq 0.8$ .

4. Экспериментальные и расчетные данные для всех исследуемых реакций, обработанные в соответствии с пунктами 1 и 2 в MATHCAD, представлялись также в виде трех матриц данных для каждого из 9 поддиапазонов  $MMQ\_S$  и  $MMQ\_COR\_S$ , значения которых еще раз нормировались на значение реакций, включенных в эти матрицы:

$$MMQ\_S = \frac{MMQ^{(l)}_j}{\sum_{j=1}^8 \sum_{l=L_1}^{L_2} MMQ^{(l)}_j}, \quad MMQ\_COR\_S = \frac{MMQ\_COR^{(l)}_j}{\sum_{j=1}^8 \sum_{l=L_1}^{L_2} MMQ\_COR^{(l)}_{Nl}}, \quad (12)$$

где  $S$  – номер поддиапазона,  $L_1$  и  $L_2$  – начало и конец поддиапазона соответственно. На рис. 2 представлены визуализации с помощью трехмерных гистограмм нормированных матрицы данных  $MMQ\_COR\_S$  для  $D_1 \leq 0.4$ ,  $D_2 \leq 0.8$  и регрессии для поддиапазона № III массовых чисел ( $28 \leq A \leq 55$ ).

Используя матрицы  $MMQ\_S$  и  $MMQ\_COR\_S$ , вычислялись «интегральные» частотные векторы-значения для отдельных поддиапазонов массового числа для каж-

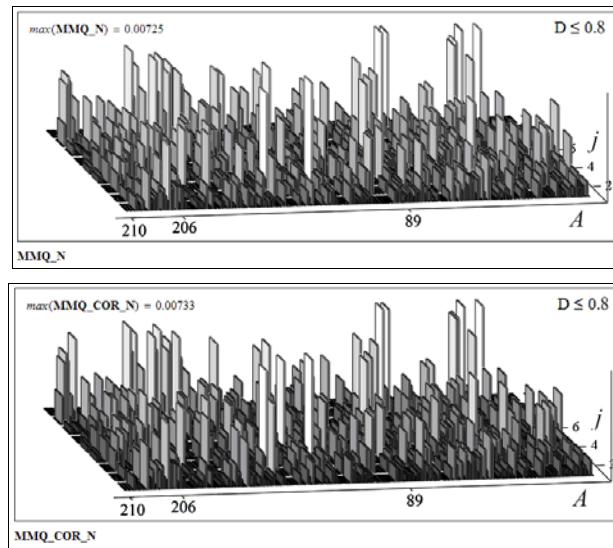


Рис. 1. Визуализация нормированных матриц данных **MMQ**, **COR** и **MMQ\_COR** по всем реакциям, полученных методом фактора согласия ( $D_2 \leq 0.8$ )

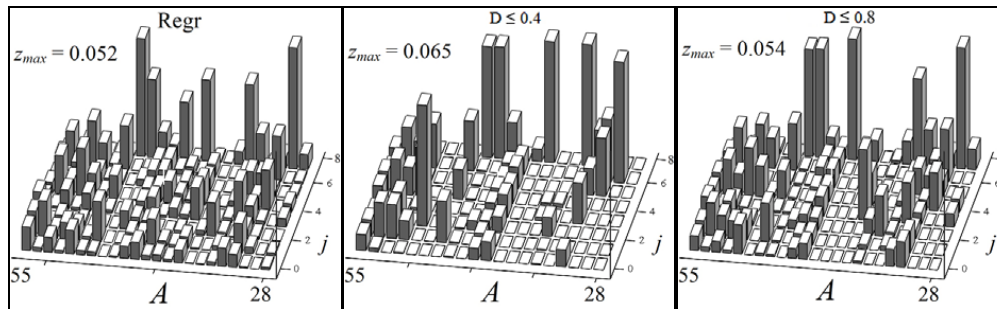


Рис. 2. Визуализация нормированных матриц данных **MMQ\_COR\_S**

дой реакции. Для этого определялись суммы частот вкладов всех реакций диапазона для каждой из рассматриваемых моделей:

$$MMQ\_S = \sum_{l=L_1}^{L_2} MMQ\_S_j^{(l)}, MMQ\_COR\_S = \sum_{l=L_1}^{L_2} MMQ\_COR\_S_j^{(l)}.$$

Результаты вычислений **MMQ\_S**, **COR\_S**, **MMQ\_COR\_S** представлены в виде таблицы (табл. 2) и на двумерном графике (рис. 3).

Сравнение частотных векторов **MMQ\_S** и **MMQ\_COR\_S** для III диапазона и  $D_1 \leq 0.4$ ,  $D_2 \leq 0.8$  и регрессии показывает, что полученные результаты близки друг другу. Так, относительная разница данных по **MMQ\_COR\_S** для  $D_1 \leq 0.4$  и  $D_2 \leq 0.8$  составляет в зависимости от реакции 325% (в среднем примерно 15%), для  $D_1 \leq 0.4$  и метода регрессии 233% (в среднем примерно 17%), для  $D_2 \leq 0.8$  и метода регрессии 0.710% (в среднем примерно 6%). Последний результат означает практическое равенство результатов сравнительного анализа, полученных на основе предварительной обработки данных методом полиномиальной регрессии и обработки с фактором согласия с  $D_2 \leq 0.8$ .

Аналогичные результаты получаются для других поддиапазонов. Это означает, что результаты первого подхода с фактором согласия с  $D_2 \leq 0.8$  оказываются очень близки результатам второго подхода, основанного на методе регрессии; поэтому

Таблица 2

**Суммы частот вкладов всех реакций  
для поддиапазона  $28 \leq A \leq 55$  для каждой  
из восьми рассматриваемых моделей**

2006	$D_1 \leq 0.4$		$D_2 \leq 0.8$		Regr	
Модель	MMQ	MMQ_COR	MMQ	MMQ_COR	MMQ	MMQ_COR
$j = 1$	0.039	0.039	0.061	0.062	0.077	0.076
$j = 2$	0.087	0.087	0.09	0.092	0.106	0.114
$j = 3$	0.118	0.119	0.074	0.075	0.059	0.066
$j = 4$	0.061	0.06	0.1	0.1	0.094	0.098
$j = 5$	0.112	0.111	0.152	0.149	0.14	0.144
$j = 6$	0.074	0.074	0.061	0.062	0.073	0.077
$j = 7$	0.207	0.209	0.134	0.137	0.138	0.135
$j = 8$	0.302	0.301	0.327	0.324	0.314	0.29
Сумма	1	1	1	1	1	1

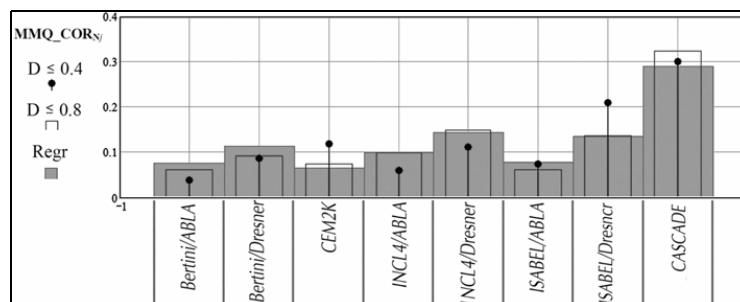


Рис. 3. Визуализация «интегральных» частотных векторов данных  $MMQ\_COR_{jL}$  для  $D_1 \leq 0.4$ ,  $D_2 \leq 0.8$  и регрессии для поддиапазона  $28 \leq A \leq 55$

дальнейшее сравнение имеет смысл проводить в рамках только первого подхода.

Для поддиапазонов массового числа ядер-мишеней численные значения нормированных частотных векторов представлены в табл. 3 (результаты по данным 2006 г.).

5. Вычислялись «интегральные» частотные векторы-значения для всего диапазона массовых чисел для каждой реакции. Для этого определим суммы частот вкладов всех реакций диапазона для каждой из рассматриваемых моделей:

$$MMQ = \sum_{l=1}^L MMQ\_S_j^{(l)}, \quad MMQ\_COR = \sum_{l,j} MMQ\_COR_j^{(l)}$$

и представим эти величины в виде таблицы (табл. 4) и двумерных графиков (рис. 4) – результаты по данным 2006 г.

6. Приведенные данные и результаты относятся к расчетам данных, полученных по восьми моделям к концу 2006 г. В текущем году стала доступной для расчетов улучшенная версия каскадно-экситонной модели СЕМ – СЕМ03.01. Она включает в себя предыдущие версии моделей СЕМ2k+GEM2, СЕМ97 и СЕМ95 и учитывает такие стадии ядерной реакции, как внутриядерный каскад, предравновесную и испарительную стадии, стадию деления и механизм Ферми распада, а также образования комплексных частиц.

Поэтому разработанный комплекс программ для статистического анализа (описанный выше) был использован для обработки новых данных, полученных с уче-



Таблица 3

**Интегральные значения нормированных частотных векторов для рассматриваемых моделей в зависимости от поддиапазона массового числа ядер-мишени (жирным шрифтом отмечены максимальные для данного поддиапазона значения частотных векторов)**

Год/ Фактор $D$		Расчетная модель							
		Bertini/ ABLA	Bertini/ Dresner	CEM2K*	INCL4/ ABLA	INCL4/ Dresner	ISABEL/ ABLA	ISABEL/ Dresner	CASCADE
1. Ядра-мишени с массовым числом $12 \leq A \leq 22$									
2006	0.4	0.003	0.003	0.010	0.016	<b>0.024</b>	0.002	0.002	
	0.8	0.005	0.006	0.010	<b>0.012</b>	0.011	0.004	0.005	
2007	0.4	0.068	0.070	0.099	0.223	<b>0.435</b>	0.053	0.052	0
	0.8	0.068	0.070	0.099	0.223	<b>0.435</b>	0.053	0.052	0
2. Ядра-мишени с массовым числом $23 \leq A \leq 27$									
2006	0.4	0.003	0.006	<b>0.008</b>	0.002	0.005	0.001	0.008	0.002
	0.8	0.003	0.005	<b>0.008</b>	0.003	0.004	0.002	0.005	0.001
2007	0.4	0.186	0.143	<b>0.208</b>	0.079	0.155	0.024	0.157	0.048
	0.8	0.184	0.143	<b>0.200</b>	0.077	0.164	0.023	0.159	0.050
3. Ядра-мишени с массовым числом $28 \leq A \leq 55$									
2006	0.4	0.005	0.011	0.015	0.007	0.014	0.009	0.026	<b>0.037</b>
	0.8	0.006	0.009	0.008	0.010	0.015	0.006	0.014	<b>0.033</b>
2007	0.4	0.030	0.074	0.205	0.067	0.131	0.059	0.176	<b>0.258</b>
	0.8	0.029	0.074	0.203	0.066	0.135	0.057	0.176	<b>0.260</b>
4. Ядра-мишени с массовым числом $56 \leq A \leq 59$									
2006	0.4	0.016	0.016	0.013	0.020	0.015	0.017	<b>0.027</b>	0.010
	0.8	0.017	0.015	0.011	0.017	0.014	0.016	<b>0.018</b>	0.006
2007	0.4	0.084	0.078	<b>0.335</b>	0.126	0.119	0.115	0.110	0.033
	0.8	0.086	0.074	<b>0.334</b>	0.130	0.120	0.115	0.110	0.031
5. Ядра-мишени с массовым числом $60 \leq A \leq 89$									
2006	0.4	0.014	0.021	0.020	0.023	0.027	0.020	0.015	<b>0.035</b>
	0.8	0.015	0.017	0.011	0.020	0.025	0.017	0.015	<b>0.038</b>
2007 )	0.4	0.071	0.086	0.112	0.143	0.159	0.101	0.089	<b>0.240</b>
		0.067	0.106	0.101	0.144	0.148	0.102	0.088	<b>0.243</b>
	0.8	0.075	0.095	0.189	0.120	0.138	0.090	0.079	<b>0.214</b>
		0.071	0.087	0.187	0.118	0.139	0.088	0.077	<b>0.233</b>
6. Ядра-мишени с массовым числом $90 \leq A \leq 124$									
2006	0.4	0.007	0.010	0.019	0.011	0.011	0.012	0.012	<b>0.027</b>
	0.8	0.006	0.014	0.012	0.010	0.010	0.010	0.010	<b>0.014</b>
2007 )	0.4	0.081	0.140	0.110	0.098	0.104	0.09	0.117	<b>0.262</b>
		0.083	0.131	0.108	0.100	0.085	0.092	0.101	<b>0.301</b>
	0.8	0.055	<b>0.187</b>	0.132	0.162	0.163	0.076	0.088	0.137
		0.056	<b>0.184</b>	0.133	0.157	0.167	0.075	0.091	0.138
7. Ядра-мишени с массовым числом $125 \leq A \leq 181$									
2006	0.4	0.006	0.010	0.016	0.004	0.016	<b>0.019</b>	0.012	0.019
	0.8	0.006	0.012	0.014	0.013	0.011	<b>0.014</b>	0.009	0.013
2007 )	0.4	0.051	0.102	0.106	0.045	0.115	0.201	0.081	<b>0.299</b>
		0.051	0.118	0.104	0.037	0.125	0.210	0.103	<b>0.251</b>
	0.8	0.055	0.111	0.200	0.098	0.089	<b>0.207</b>	0.082	0.157
		0.049	0.113	<b>0.204</b>	0.128	0.102	0.199	0.080	0.125



Продолжение табл. 3

Год/ Фактор $D$		Расчетная модель							
		Bertini/ ABLA	Bertini/ Dresner	CEM2K*	INCL4/ ABLA	INCL4/ Dresner	ISABEL/ ABLA	ISABEL/ Dresner	CASCADE
8. Ядра-мишени с массовым числом $182 \leq A \leq 201$									
2006	0.4	0.003	0.018	0.009	0.002	0.003	0.004	0.011	<b>0.035</b>
	0.8	0.010	0.022	0.008	0.015	0.005	0.018	0.008	<b>0.022</b>
2007 )	0.4	0.032	0.058	0.409	0.021	0.021	0.023	0.022	<b>0.415</b>
		0.029	0.055	0.405	0.021	0.021	0.023	0.023	<b>0.423</b>
	0.8	0.071	0.118	<b>0.286</b>	0.11	0.043	0.149	0.048	0.176
		0.072	0.13	<b>0.254</b>	0.126	0.044	0.163	0.05	0.161
9. Ядра-мишени с массовым числом $202 \leq A \leq 210$									
2006	0.4	0.003	0.007	0.021	0.029	0.003	0.020	0.002	<b>0.095</b>
	0.8	0.029	0.014	0.018	0.050	0.011	0.042	0.016	<b>0.072</b>
2007 )	0.4	0.022	0.033	<b>0.490</b>	0.066	0.025	0.083	0.016	0.265
		0.018	0.028	<b>0.515</b>	0.066	0.021	0.083	0.014	0.254
	0.8	0.079	0.043	0.208	0.163	0.068	0.117	0.050	<b>0.272</b>
		0.083	0.042	0.183	0.168	0.061	0.122	0.046	<b>0.296</b>

\* В 2006 г. рассматривалась модель CEM2k, в 2007 г. – CEM03.01

Таблица 4

**Суммы частот вкладов всех реакций для каждой из восьми рассматриваемых моделей для  $D \leq 0.4$  и  $D \leq 0.8$**

Модель		$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	$j = 5$	$j = 6$	$j = 7$	$j = 8$	Сумма
		Bertini/ ABLA	Bertini/ Dresner	CEM2K	INCL4/ ABLA	INCL4/ Dresner	ISABEL/ ABLA	ISABEL/ Dresner	CASCADE	
Фактор		Для данных 2006 г.								
0.4	MMQ	0.062	0.103	0.128	0.115	0.117	0.104	0.115	<b>0.258</b>	1
	MMQ_COR	0.059	0.1	0.131	0.115	0.117	0.105	0.115	<b>0.259</b>	1
0.8	MMQ	0.091	0.129	0.11	0.134	0.123	0.118	0.11	<b>0.184</b>	1
	MMQ_COR	0.091	0.132	0.109	0.137	0.126	0.118	0.111	<b>0.175</b>	1
		Для данных 2006 г.								
0.4	MMQ	0.057	0.083	<b>0.272</b>	0.091	0.112	0.090	0.087	0.209	1
	MMQ_COR	0.076	0.095	<b>0.196</b>	0.142	0.112	0.112	0.081	0.187	1
0.8	MMQ	0.075	0.094	<b>0.210</b>	0.135	0.111	0.111	0.081	0.183	1
	MMQ_COR	0.076	0.095	<b>0.196</b>	0.142	0.112	0.112	0.081	0.187	1

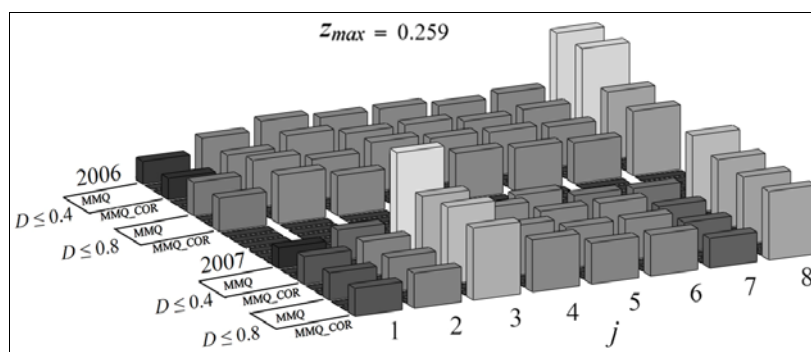


Рис. 4. Визуализация сумм частот вкладов всех реакций для каждой из восьми рассматриваемых моделей для  $D_1 \leq 0.4$  и  $D_2 \leq 0.8$  для данных 2006 и 2007 гг.

том использования модели CEM03.01. Результаты анализа обновленных в 2007 г. данных представлены в табл. 3 (результаты по данным 2006 и 2007 гг.) и в виде гистограмм для **MMQ** и **MMQ\_COR<sub>jL</sub>** для всех реакций при  $D_2 \leq 0.8$  на рис. 5. Как видно из приведенных таблиц и гистограмм, результаты ранжирования моделей по данным 2007 г. изменились (см. ниже).

Заметим, что описанные процедуры для статистического анализа были осуществлены также с использованием программы EXCEL. В программной среде EXCEL в рамках описанных подходов проведен статистический анализ с использованием метода наименьших квадратов и корреляционный анализ. Были вычислены значения векторов **MMQ<sup>(L)</sup><sub>j</sub>**, **COR<sup>(L)</sup><sub>j</sub>** и **MMQ\_COR<sup>(L)</sup><sub>j</sub>**, их нормированные значения, а также наборы матриц **MMQ\_S**, **COR\_S**, **MMQ\_COR\_S** и **MMQ\_N**, **COR\_N**, **MMQ\_COR\_N**. Полученные с использованием программы EXCEL результаты совпали с представленными выше результатами, полученными в программной среде MATHCAD.

### РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА

На основе проведенных вычислений можно сделать выводы о степени согласия расчетных моделей с отобранными экспериментальными данными в зависимости от поддиапазона массового числа ядер-мишеней.

1. Результаты сравнительного анализа данных, полученных на основе предварительной обработки данных методом полиномиальной регрессии, в пределах нескольких процентов совпадают с данными, полученными в первом подходе предварительной обработки с фактором согласия с  $D_2 \leq 0.8$ .

2. Результаты сравнительного анализа данных, полученных на основе предварительной обработки данных с факторами согласия  $D_1 \leq 0.4$  и  $D_2 \leq 0.8$ , хотя и дают численно различающиеся суммы частот вкладов для поддиапазонов и для всех реакций, качественно не меняют картины ранжирования моделей, которые наилучшим образом согласуются с экспериментальными данными.

3. Результаты сравнительного анализа данных, полученных с помощью метода наименьших квадратов оказываются определяющими для ранжирования моделей; учет корреляционных данных, хотя и вносит небольшие поправки в суммы частот вкладов для поддиапазонов и для всех реакций, качественно не меняют результатов (исключения составляют некоторые результаты 2007 г. – см. табл. 3).

Таблица 5

#### Модели, которые наилучшим образом согласуются с экспериментальными данными

Поддиапазон		Модель	
		2006	2007
1	6-C-12 - 10-Ne-22	INCL4/Dresner	INCL4/Dresner
2	11-Na-23 - 13-Al-27	CEM2K	CEM03.01
3	12-Mg-28 - 27-Co-55	CASCADE	CASCADE
4	29-Cu-56 - 28-Ni-59	ISABEL/Dresner	CEM03.01
5	26-Fe-60 - 40-Zr-89	CASCADE	CASCADE
6	38-Sr-90 - 54-Xe-124	CASCADE	CASCADE+CEM03.01
7	50-Sn-125 - 75-Re-181	ISABEL/Abla	CASCADE+CEM03.01+ISABEL/ABLA <sup>*)</sup>
8	72-Hf-182 - 80-Hg-201	CASCADE	CASCADE+CEM03.01
9	81-Tl-202 - 84-Po-210	CASCADE	CEM03.01+CASCADE <sup>*)</sup>

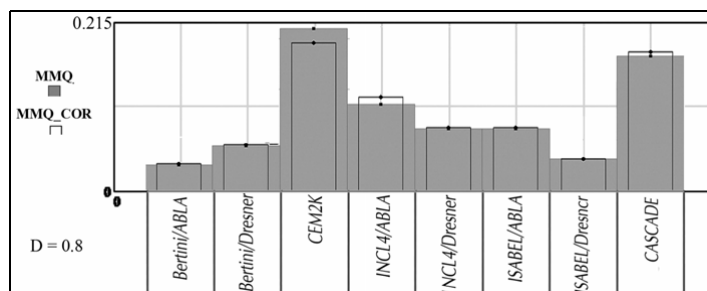


Рис. 5. Визуализация «интегральных» частотных векторов данных **MMQ** и **MMQ\_COR<sub>jl</sub>** для всех реакций при  $D_2 \leq 0.8$

4. Для отдельных поддиапазонов массового числа ядер-мишеней результаты сравнительного анализа дают картину ранжирования моделей по выбору наиболее лучшей, представленную в табл. 3 и 5.

5а. Для данных 2006 г.: для всего диапазона массового числа ядер-мишеней: оптимальной моделью для всего диапазона является восьмая модель – CASCADE (см. табл. 4 и рис. 4). В рамках обоих подходов эта модель дает наибольшее значение сумм частот вкладов всех реакций. Это дает основание считать модель CASCADE, реализованную в программе CASCADE/INPE, лучшей.

5б. Для данных 2007 г.: для всего диапазона массового числа ядер-мишеней: оптимальной моделью для всего диапазона является восьмая модель – CEM03.01 (см. табл. 4 и рис. 5). В рамках обоих подходов эта модель дает наибольшее значение сумм частот вкладов всех реакций. Это дает основание считать модель CEM03.01 лучшей.

### Литература

1. Конобеев А.Ю., Коровин Ю.А. и др. Нейтронная библиотека активационных файлов «IEAF-2005» в энергетическом диапазоне от 150 МэВ до 1 ГэВ // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2007. – № 2.
2. Fischer U., Konobeyev A., Korovin Yu. et al. Intermediate energy activation file 2001 (IEAF 2001) / / Interner Bericht IRS-Nr. 10/01 – FUSION-Nr. 179. – August, 2001.
3. McLane V. EXFOR Basis. A Short Guide to the Nuclear Reaction Data Exchange Format // BNL-NCS-63380-2000/05-Rev., 2000.
4. Hendricks J. S. et al. MCNPX Extensions Version 2.5.0 / LA-UR-05-2675. – 2005.
5. Барашенков В.С., Конобеев А.Ю., Коровин Ю.А., Соснин В.Н. Компьютерная программа CASCADE/INPE // Атомная энергия. – 87. – 1999. – С.283.

Поступила в редакцию 14.05.2007

The quoted information touches upon goals and methods of loop tests in the MIR research reactor with the purpose of VVER fuel elements serviceability study in transitive and emergency modes (power cycling, RAMP, LOCA, RIA). Loop installations characteristics and their instrumental equipment are represented. The applied irradiation devices and sensors for measuring and determination of experimental parameters are listed. The developed instrumentation and installations are available for testing of VVER-type fuel at transient and project emergency conditions.

#### УДК 621.039.56

*Reactivity Temperature Coefficient Measurement by the Dynamic Method under Non-equilibrium Xenon Concentration Conditions* \ N.A. Vinogorov, Yu.A. Groznov, D.N. Jukovsky; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 7 pages, 2 tables, 3 illustrations. – References – 7 titles.

Some methodical characteristic features of the application of the known method to measure the reactivity temperature coefficient under xenon transient conditions are considered.

The consideration is illustrated with the results obtained at pressurized water transportation-purpose reactor in the isothermal state.

#### УДК 621.039.543.6

*Experiments in Support of MOX Fuel Disposal Program in VVER* \ A.L. Kochetkov, I.P. Matveenko, E.V. Rojihin, A.M. Tsibulya; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 10 pages, 5 tables, 11 illustrations. – References – 10 titles.

Accordingly to the national program of neutronic experiments, needed for licensing of VVER-100 cores with MOX fuel, certification of calculational codes and the receiving of the national experience, at SSC RF IPPE site (Obninsk) the construction of SUPR facility is planned. Till the finalization of SUPR construction, the settle down of the experimental and calculational methods were carried out at MATR and RF-GS facilities. Now days, so called pre-SUPR experimental program is accomplished by experiments at BFS-1 facility. The results of these experiments and their analysis are presented.

#### УДК 621.534: 519.7

*Statistical Analysis Data for Neutron Library of Activation Files «IEAF-2005»* \ G.B. Pilnov, A.V. Tikhonenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 11 pages, 5 tables, 5 illustrations. – References – 5 titles.

Statistical analysis of experimental and theoretical data obtained with eight models for nuclei-nuclei interactions is executed as stage of establishment of neutron library of activation files «IEAF-2005» (The Intermediate Energy Activation File). Authors held a factor, correlation and least-square analyses for chosen of the best model describing experimental data. Analyses were made by using of EXFOR open experimental data of 2006 and 2007.

#### УДК 621.039.54

*Regular Burnup Compensations Method to Locate Defected Fuel Assemblies on BN-600 Sodium Cooled Fast Reactors* \ A.O. Skomorokhov, D.A. Lukyanov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 10 pages, 2 tables, 5 illustrations. – References – 5 titles.

The paper describes the method to locate failed fuel elements by using regular burnup compensations on BN-600 and BN-800 sodium cooled fast reactors. The functioning algorithms of FLUT-600 system on BN-600 reactor and the operation testing results are given.

#### УДК 621.039.51

*Physics of fast reactor cores* \ M.F. Troyanov, V.I. Matveev, M.N. Nickolaev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 15 pages. – References – 9 titles.

At present a new engineering science arose on the basis of numerous studies and developments in the area of fast reactors, which might be termed "Technical physics of fast reactor" based on fast reactor physics.

The paper gives a brief review of the main sections of this science including brief description of nuclear data and energy-group constants, based on neutron-physics characteristics of fast reactors BN-250, BN-600, BN-800, possibility of utilization of radioactive waste of nuclear power in fast reactors and oth.