

чтобы переходная зона, где нет подвода и отвода тепла, составляла 20—30 мм. Тогда длина зоны конденсации может быть 70—90 мм.

Температурное поле вдоль парогенератора характеризуется изотермичностью в зоне испарения, резким перепадом от рабочей температуры до температуры, которая несколько выше температуры охлаждающей воды в переходной зоне конденсации. С помощью датчика пара цезия установлено, что при изотермичной зоне испарения давление пара цезия, подаваемого в ТЭП, достаточно надежно определяется показаниями термопар, установленных в паровом канале в месте отбора пара. Показания всех остальных термопар, включая термопары, расположенные на доннышке и стенке трубы, а также значения температуры пара ниже отверстия, не определяют давление пара и могут превышать показания контрольной термопары на 15—30 °С. Отметим, что подобные явления могут наблюдаться и в обычных термостатах, нагреваемых снаружи, в результате чего реальное давление пара цезия будет ниже, чем определяемое температурой стенки.

Для проверки возможного выноса пара цезия в вакуумную систему были проведены ресурсные испытания парогенератора при рабочей температуре. После испытаний не обнаружены следы цезия в вакуумном тракте и азотной ловушке. В целом отмечена надежная работа источника пара цезия на основе тепловой трубы с металловолоконистым фитилем до давления пара ~20 мм рт. ст. Предполагается при петлевых испытаниях термоэмиссионных сборок, аналогичных описанным в работе [1], экспериментально проверить работу такого генератора пара цезия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бержатый В. И. и др. «Атомная энергия», 1971, т. 31, вып. 6, с. 585.
2. Шпильрайн Э. Э. и др. Теплофизические свойства щелочных металлов. М., Изд-во стандартов, 1970.
3. Смирнов А. А. Измерение работы адгезии щелочных металлов. Канд. дис. М., МИФИ, 1971.
4. Семена М. Г. и др. «Теплофизика высоких температур», 1975, т. 13, вып. 4, с. 162.

Поступила в Редакцию 11.12.79

УДК 621.039.51.15:621.039.572.22:621.039.526

## Оценка погрешностей расчета коэффициентов критичности и воспроизводства энергетических быстрых реакторов из-за неточности нейтронных данных

АЛЕКСЕЕВ П. Н., МАНТУРОВ Г. Н., НИКОЛАЕВ М. Н.

В работах советских и зарубежных авторов [1—13] оценке точности расчетных предсказаний коэффициентов критичности ( $k_{эф}$ ) и воспроизводства (КВ) для энергетических быстрых реакторов уделяется большое внимание. Установлено, что основной причиной неопределенности результатов расчетных предсказаний этих (и других) физических характеристик быстрых реакторов-размножителей являются погрешности используемых в расчетах нейтронных сечений. Вклады других источников погрешностей (приближенность расчетных методик, технологические допуски изготовления деталей реактора) оказываются существенно меньшими.

Требуемая точность расчетных предсказаний  $k_{эф}$  и КВ быстрых реакторов-размножителей была обоснована в работе [1] и подтверждена более поздними оценками [3]. Эти оценки исходят из допустимой погрешности в расчете критической массы ~1,5% и в  $T_2$  ~ 10% и составляют 0,5% для  $k_{эф}$  и 1,5% для КВ (в работе [1] указываются примерно вдвое большие допустимые погрешности, но там имеется в виду 90%-ный уровень достоверности, а не 67%-ный, как в настоящей работе). Точность расчетов, гарантируемая достиг-

нутой к настоящему времени точностью знания нейтронных данных, значительно хуже: по оценкам работ [2—12] она составляет ~3—5% для  $k_{эф}$  и ~6—8% для КВ. На основе этих оценок были разработаны программы повышения точности нейтронных данных в микроскопических и макроскопических экспериментах [3—7].

Следует отметить, что предыдущие оценки достигнутого уровня точности относились примерно к 1970 г., и расхождение оценок точности расчетных предсказаний связаны прежде всего с различием оценок неопределенностей исходных групповых сечений. Спектр чувствительности  $k_{эф}$  и КВ к различным типам нейтронных сечений в настоящей работе и, например, в работах [4—6], как показывает сравнение, одинаков. Таким образом, изменения в оценках точности расчетных предсказаний  $k_{эф}$  и КВ быстрого реактора-размножителя обусловлены учетом обширной информации, полученной за последнее десятилетие в дифференциальных нейтронно-физических экспериментах. К тому же предыдущие значения достигнутой точности нейтронных сечений имеют во многих случаях качественный характер и базируются на приближенных оценках точности сечений по неко-

торым «рекомендациям», основанным на соглашениях между экспертами [12]. Они не учитывают все источники погрешностей дифференциальных измерений, а также влияние конкретного метода оценки сечений, от которого могут существенно зависеть корреляционные свойства погрешностей групповых сечений.

Оценка точности расчетных предсказаний  $k_{эф}$  и КВ, полученная в настоящей работе, основывается на последних данных дифференциальных нейтронно-физических экспериментов. Возможность такой оценки появилась в связи с разработкой системы групповых сечений БНАБ-78 [13], в основу которой была положена система сечений БНАБ-МИКРО [14], составленная по новым оценкам результатов дифференциальных измерений нейтронных данных. Параллельно с оценкой наиболее вероятных значений этих данных определяли и их погрешности, которые представлялись в виде ковариационной матрицы  $W$  групповых сечений, т. е. в виде, пригодном для практического использования. Важно подчеркнуть, что ковариационная матрица описывает точность групповых сечений БНАБ-МИКРО: в ней учтены погрешности именно тех экспериментов, на основе которых составлялась эта система сечений. Система БНАБ-78 отличается от системы БНАБ-МИКРО учетом результатов макроэкспериментов. Ее использование обуславливает более высокую точность расчетных результатов [14].

При составлении ковариационной матрицы  $W$  учитывали данные о структуре погрешностей измерений, приводимые авторами экспериментальных работ; проводили анализ возможных погрешностей тех или иных методов, применяемых при измерении данного типа сечения в данной области энергии. Реалистичность оценок погрешностей отдельных экспериментов контролировали по разбросу результатов, полученных разными авторами. Особое внимание обращено на оценку корреляций погрешностей оцененных данных. Примерами могут служить оценки погрешностей сечений  $^{238}\text{U}$  в области неразрешенных резонансов [15], а также оценки погрешностей групповых значений  $\alpha = \sigma_c/\sigma_f$  для  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  [16, 17].

Ковариационная матрица погрешностей составлена для сечений всех реакций основных материалов активной зоны быстрых реакторов —  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ , Fe, Cr, Ni, Na, O, C. Для  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  вместо матрицы погрешностей сечений деления была составлена матрица погрешностей отношений сечений деления к сечению деления  $^{235}\text{U}$ , так как результаты измерения именно этих отношений использовались в основном при составлении групповых сечений. Принято, что погрешности этих отношений являются независимыми. По той же причине для  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  вместо погрешностей сечений захвата оценивались погрешности значений  $\alpha = \sigma_c/\sigma_f$ . Для

иллюстрации матрицы  $W$  в табл. 1 и 2 приведены погрешности (стандартные отклонения) и коэффициенты корреляций групповых значений  $\alpha$   $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$ .

При составлении ковариационной матрицы  $W$  погрешности, связанные с неточным знанием спектра неупругорассеянных нейтронов и спектра деления, не учитывались. Погрешности, связанные с многогрупповым приближением (такие, как неопределенность сечений замедления), были отнесены нами к разряду методических и также не учитывались (их влияние рассмотрено, например, в работе [18]). Погрешности оценки факторов самоэкранировки сечений рассматривались только для сечений  $^{238}\text{U}$ , самоэкранировка которых особенно велика. Для конструкционных материалов и делящихся изотопов неопределенности отклонения факторов самоэкранировки от единицы довольно большие, однако эффекты самоэкранирования сечений деления не настолько велики, чтобы повлиять на выводы настоящей работы.

Таблица 1

Погрешности и коэффициенты корреляций ( $\times 100$ ) групповых значений  $\alpha$   $^{235}\text{U}$ 

Границы энергии	Погрешность, %	Номер группы	Номер группы											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2,5–	50,0	1	100											
10,5 МэВ														
1,4–2,5	20,0	2	0 100											
0,4–1,4	12,0	3	0 0 100											
0,2–0,4	9,5	4	0 0 80 100											
0,1–0,2	9,0	5	0 0 75 80 100											
46,5–	8,5	6	0 0 70 75 80 100											
100 кэВ														
21,5–46,5	8,0	7	0 0 60 70 75 80 100											
10–21,5	7,5	8	0 0 55 60 70 75 80 100											
4,65–10	7,0	9	0 0 30 30 30 30 50 70 100											
2,15–4,65	6,5	10	0 0 0 0 0 30 50 70 100											
1–2,15	6,5	11	0 0 0 0 0 10 40 70 70 100											
0–1	6,0	12	0 0 0 0 0 0 10 40 70 70 70 100											

Таблица 2

Погрешности и коэффициенты корреляций ( $\times 100$ ) групповых значений  $\alpha$   $^{239}\text{Pu}$ 

Границы энергии	Погрешность, %	Номер группы	Номер группы											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2,5–	50,0	1	100											
10,5 МэВ														
1,4–2,5	20,0	2	0 100											
0,4–1,4	17,0	3	0 0 100											
0,2–0,4	10,0	4	0 0 80 100											
0,1–0,2	9,5	5	0 0 75 80 100											
46,5–	9,0	6	0 0 70 75 80 100											
100 кэВ														
21,5–46,5	8,5	7	0 0 60 70 75 80 100											
10–21,5	8,5	8	0 0 55 60 70 75 80 100											
4,65–10	8,0	9	0 0 30 30 30 30 50 70 100											
2,15–4,65	8,0	10	0 0 0 0 0 30 50 70 100											
1–2,15	7,5	11	0 0 0 0 0 10 40 70 70 100											
0–1	7,5	12	0 0 0 0 0 0 10 40 70 70 70 100											

Таблица 3

Коэффициенты чувствительности  $k_{эф}$ , КВ и КВА и составляющие их погрешностей за счет неопределенностей групповых сечений

Тип группового сечения $\sigma$	Чувствительности $\frac{\partial F}{F} / \frac{\partial \sigma}{\sigma}$					Составляющие погрешности, %		
	$k_{эф}$	КВ	КВ <sub>x</sub>	КВА	КВА <sub>x</sub>	$k_{эф}$	КВ <sub>x</sub>	КВА <sub>x</sub>
$\sigma_f^9 / \sigma_f^5$	0,42	-0,80	-0,04	-0,83	-0,04	0,7	0,4	0,4
$\sigma_f^{41} / \sigma_f^5$	0,14	-0,20	-0,06	-0,22	0,07	1,0	0,5	0,5
$\sigma_f^8 / \sigma_f^5$	0,08	0,01	0,16	0	0,16	0,1	0,2	0,2
$\sigma_f^{40} / \sigma_f^5$	0,03	0	0,05	0	0,05	0,1	0,2	0,2
$\sigma_f^5$	0,67	-0,99	0,20	-1,05	0,21	0,8	0,6	0,6
$\alpha^9$	-0,04	-0,16	0,23	-0,17	-0,25	0,3	1,5	1,6
$\alpha^{41}$	0	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03	0	0,5	0,6
$\sigma_c^8$	-0,26	0,68	0,22	0,80	0,32	1,4	1,4	1,5
$\sigma_c^{40}$	-0,02	0,07	0,02	0,08	0,04	0,2	0,2	0,3
$\sigma_c^{оск}$	-0,02	0	-0,03	0	-0,04	0,4	0,6	0,8
$\sigma_c^{ст}$	-0,01	0	-0,05	0	-0,05	0,2	1,0	1,0
$\sigma_{in}^8$	-0,06	0,01	-0,09	0,05	-0,06	0,7	1,2	0,9
$\sigma_{in}^{Na}$	-0,01	0	-0,01	0,01	-0,01	0,2	0,4	0,3
$\sigma_{in}^{ст}$	-0,02	0	-0,04	0,01	-0,03	1,0	1,2	1,0
$\sigma_e^{16O}$	-0,07	0,01	-0,11	0,07	-0,06	0,1	0,1	0,1
$\sigma_e^{Na}$	-0,02	-0,02	-0,04	0,01	-0,02	0,2	0,3	0,2
$\sigma_{tr}^8$	0,03	-0,07	0	0	0,06	0,1	0	0,2
$\sigma_{tr}^{16O}$	0,03	-0,06	0	0	0,05	0,1	0	0,2
$\sigma_{tr}^{Fe}$	0,02	-0,03	0	0	0,04	0,1	0	0,2
$\nu^9$	0,64	-0,02	1,12	0,01	1,22	0,6	1,1	1,2
$\nu^{41}$	0,18	0	0,32	0	0,35	0,3	0,6	0,6
$\nu^8$	0,13	0,02	0,26	0	0,26	0,2	0,4	0,4
$\nu^{40}$	0,04	0	0,08	0	0,08	0,1	0,2	0,2
Суммарная дисперсия, %						6,4	11,6	12,0
Суммарная погрешность, %						2,5	3,4	3,5

Оценка точности расчетных предсказаний параметров критичности и воспроизводства проведена на примере двумерной тестовой модели большого энергетического плутониевого реактора-размножителя, предложенной в работе [19]. Коэффициенты чувствительности  $k_{эф}$ , КВ и КВА (коэффициент воспроизводства в активной зоне реактора) рассчитывали с помощью двумерного программного комплекса ТВК-2Д [20] на основе обобщенной теории возмущений [21, 22]. Однородные и неоднородные прямые и сопряженные уравнения обобщенной теории возмущений в комплексе ТВК-2Д решены в диффузионном приближении, применимость которого для расчетов быстрых реакторов больших размеров доказана многими тестами. Уравнение диффузии в RZ-геометрии решается с помощью итерационных сеточных методов: во внутренних итерациях применяются для ускорения сходимости методы неполной факторизации и переменных направлений; внешние итерации ускоряются методом двухслойной чебышевской экстраполяции. Точность внутренних итераций поставлена в оптимальную зависимость от точности внешних итераций. Расчеты проведены с локальным критерием точности потоков и ценностей, равным ~0,01%. Комплекс ТВК-2Д был включен в систему программ НФ-6 [22], с помощью которой проведено управление вычислительным процессом и, в частности, подготовлены 26-групповые константы (на базе системы сечений БНАБ-78).

Дисперсии реакторных функционалов определяются по формуле  $D_F = H_F W H_F^T$ , где  $H_F$  — вектор-столбец коэффициентов чувствительности функционала  $F$  ( $k_{эф}$ , КВ, КВА) к вариациям групповых сечений (в табл. 3 приведены коэффициенты чувствительности к групповым сечениям, дающим заметный вклад в дисперсии функционалов  $k_{эф}$ , КВ и КВА). Для иллюстрации важности компенсации некритичности [24] в табл. 3 приведены чувствительности КВ, КВА, полученные как непосредственно для условно-критического реактора, так и для случая компенсации некритичности за счет вариации обогащения  $x$ :  $H_{кв, ква}^{KB, KBA}(\sigma) = H_{кв, ква}(\sigma) - H_{кв, ква}(x) H_k(\sigma) / H_k(x)$ . Составляющие КВ и КВА анализировались на основе «скомпенсированных» чувствительностей, так как говорить о точности расчета КВ и КВА для некритического реактора не имеет смысла [24].

Полученные оценки погрешности расчетного предсказания КВ и КВА оказались более оптимистичными, чем приведенные в работах [2—12]: ~3,5% по сравнению с 5—8%. Оценка погрешности расчетного предсказания  $k_{эф}$  также несколько выше: 2,5% по сравнению с 3—5%. На основании имеющегося опыта расчетов быстрых реакторов и критических сборок по различным системам констант, а также с учетом сравнения результатов расчетов, выполненных по системам сечений, составленным в разных странах [14], полученная

оценка точности расчета  $k_{эф}$  представляется реалистической. Это может служить косвенным подтверждением и полученной оценки точности расчетов КВ и КВА. В рассматриваемом реакторе КВ ≈ 1,4, а КВА ≈ 1, так что оцененные погрешности в абсолютных единицах составляют ±0,050 для КВ и ±0,035 для КВА.

Основными источниками погрешностей КВ и КВА являются погрешности в  $\alpha^{239}Pu$ , в сечениях захвата осколков деления и конструкционных материалов, в значении  $\nu$ , а также в сечениях неупругого рассеяния. Последнее может показаться, на первый взгляд, странным, однако существенное влияние неопределенностей в неупругом рассеянии проявлялось и ранее (см., например, [4]). При анализе источников погрешностей

в  $k_{эф}$  наблюдается большой вклад неточности значения сечений деления  $^{241}\text{Pu}$ .

Точность расчетных предсказаний характеристик быстрых реакторов можно повысить следующим образом (см. табл. 3):

а) значительная часть источников погрешностей расчета  $k_{эф}$  может быть устранена, если в расчетах использовать групповые сечения, откорректированные по экспериментам на критических сборках. Однако вклад погрешностей сечений  $^{241}\text{Pu}$  и осколков деления при этом не устраняется, и, следовательно, точность расчета  $k_{эф}$  останется много хуже требуемой ( $\sim 1,5\%$  вместо  $0,5\%$ );

б) весьма актуально измерить сечения деления  $^{241}\text{Pu}$  с точностью 3–5%. Для получения дифференциальных данных с подобной точностью особенно полезен учет измерений  $\bar{\sigma}_f(^{241}\text{Pu})/\bar{\sigma}_f(^{235}\text{U})$  на критических сборках;

в) необходимы измерения  $\alpha$   $^{239}\text{Pu}$  на спектрах энергетических быстрых реакторов с точностью  $\leq 3\%$  (на достижение такой точности измерения  $\alpha$  в дифференциальных экспериментах надеяться нет оснований). Уточнение  $\alpha$   $^{241}\text{Pu}$  в подобных экспериментах также будет полезно;

г) важно повысить точность измерения сечений неупругого рассеяния. Первым шагом в этом направлении могли бы быть измерения сечений увода под порог деления  $^{238}\text{U}$  и  $^{237}\text{Np}$  или  $^{240}\text{Pu}$ ;

д) вклад погрешностей сечений осколков едва ли можно понизить без привлечения макроскопических экспериментов на энергетических быстрых реакторах;

е) как и ранее, необходимо повышение точности  $v$ ;

ж) повышение точности средних сечений деления  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  уже не является первоочередной задачей; однако эксперименты по пропусканью, позволяющие непосредственно оценить факторы резонансной самоэкранировки сечений делящихся ядер, сохраняют свою актуальность.

Полученные выводы согласуются с рекомендациями работы [3]. Новым является выяснение роли погрешностей сечений  $^{241}\text{Pu}$  и сечений неупругого рассеяния.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зарицкий С. М., Николаев М. Н., Троянов М. Ф. В кн.: Труды конф. «Нейтронная физика». Ч. 1. Киев, «Наукова думка», 1972, с. 5.
2. Усачев Л. Н., Бобков Ю. Г. Там же, ч. 2, с. 139.
3. Николаев М. Н. В кн.: Труды конф. «Нейтронная физика». Ч. 1. М., изд. ЦНИИАтоминформ, 1976, с. 5.
4. Usachev L. N., Manokhin V. N., Bobkov Yu. G. In: Proc. IAEA Symp. «Nuclear Data in Science and Technology», Paris, 12–16 March 1973, v. 1, p. 129.
5. Воропаев А. И. и др. В кн.: Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы. Вып. 25. М., изд. ЦНИИАтоминформ, 1977, с. 69.
6. Воропаев А. И. и др. Там же, вып. 20, ч. 2, 1975, с. 112.
7. Grebler P. e.a. In: Proc. IAEA Symp. «Nuclear Data for Reactors — 1970». Helsinki, 15–19 June 1970, v. 1, p. 17.
8. Chaudat J. e.a. In: Proc. Intern. Symp. on Physics of Fast Reactors. Tokyo, 16–19 Oct. 1973, v. III, p. 1207.
9. Rowlands J. e.a. Ibid., p. 1133.
10. Yiftah S. e.a. Ibid., p. 1479.
11. Marable J., Weishin C. «Trans. Amer. Nucl. Soc.», 1977, v. 26, p. 542.
12. Ваньков А. А., Воропаев А. И., Юрова Л. Н. Анализ реакторно-физического эксперимента. М., Атомиздат, 1977.
13. Усачев Л. Н., Бобков Ю. Г. В кн.: Труды конф. «Нейтронная физика». Ч. 1. Обнинск, изд. ФЭИ, 1974, с. 87.
14. Абагян Л. П. и др. «Атомная энергия», 1980, т. 48, вып. 2, с. 117.
15. Мантуров Г. Н., Николаев М. Н. В кн.: Резонансное поглощение нейтронов. М., изд. ЦНИИАтоминформ, 1978, с. 175.
16. Кононов В. Н., Полетаев Е. Д. [5], с. 23.
17. Коньшин В. А., Суховицкий Е. Ш., Жарков В. Ф. Препринт Ин-та тепло- и массообмена АН БССР. Минск, 1978.
18. Барыба М. А. и др. [13], с. 175.
19. Зизин М. Н., Кудряшов Л. Н., Николаев М. Н. Препринт НИИАР П-4(270). Димитровград, 1976.
20. Алексеев П. Н., Зарицкий С. М., Шишков Л. К. В кн.: Ядерно-физические исследования в СССР. Вып. 23. М., Атомиздат, 1977, с. 30.
21. Усачев Л. Н. «Атомная энергия», 1963, т. 15, вып. 6, с. 472.
22. Усачев Л. Н., Зарицкий С. М. В кн.: Бюл. информ. центра по ядерным данным. Вып. 2. М., Атомиздат, 1965, с. 242.
23. Зизин М. Н., Савочкина О. А., Чухлова О. П. Препринт НИИАР П-40(334). Димитровград, 1977.
24. Николаев М. Н., Рязанов Б. Г. В кн.: Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы. Вып. 17. М., изд. ЦНИИАтоминформ, 1974, с. 21.

Поступила в Редакцию 22.01.80

## ПОПРАВКИ

В списке авторов статьи «Измерение полных нейтронных сечений  $^{153}\text{Eu}$ ,  $^{154}\text{Eu}$  и  $^{155}\text{Eu}$ » (1979, т. 46, вып. 3, с. 158) пропущена фамилия Мамдуха Аддиба. Авторами этой статьи являются: Ануфриев В. А., Бабич С. И., Колесов А. Г., Нефедов В. Н., Поручиков В. А., Сафонов В. А., Четвериков А. П., Аргамонов В. С., Иванов Р. Н., Калебин С. М., Мамдух Аддиб.

В официальном документе «Требования к размещению атомных станций теплоснабжения...» (1980, т. 49, вып. 2, с. 150) в пункте 1.2 (третий абзац) следует читать: «... не должно превышать 10 бар без учета облучения щитовидной железы и других критических органов и не выше 30 бар для щитовидной железы ребенка ...». В пункте 3.4 (с. 151) вместо слов «сетевого теплоснабжения» следует читать «сетевого теплоносителя».