

Новые данные по дифференциальным измерениям отношения α Pu^{239}

С. И. СУХОРУЧКИН

УДК 546.799.4:539.172.4.162.2

Появившиеся в 1967—1968 гг. данные экспериментов по прямому измерению величины $\alpha = \sigma/\sigma_f$ Pu^{239} в области до 20 кэв [1] поставили под сомнение справедливость констант, применявшихся ранее при расчетах быстрых энергетических реакторов. Это уже отмечалось в работе [2].

В течение 1968—1970 гг. проводились измерения в нейтронных и реакторных лабораториях многих стран. В результате этих исследований были получены новые дифференциальные и интегральные данные, которые обсуждались на проходившем в Студсвике (Швеция, 10—12 июня 1970 г.) совещании экспертов МАГАТЭ, на Второй конференции по ядерным данным для реакторов (Хельсинки, 15—19 июня 1970 г.) и на Третьей конференции по нейтронным сечениям в Ноксвилле (США, 15—17 марта 1971 г.).

Наметившаяся в новых данных тенденция к взаимосогласованию позволяет предполагать, что уже сейчас получающиеся «средние» дифференциальные величины, вероятно, не очень сильно отличаются от реальных значений α и поэтому могут применяться для некоторых оценок.

Одновременно на совещаниях МАГАТЭ были замечены пути дальнейшего уточнения этой важной реакторной константы.

В литературе данные интегральных экспериментов часто сопоставляются с различными предварительными данными дифференциального характера, т. е. полученными при высоком энергетическом разрешении нейтронов. Ввиду этого обзор новых дифференциальных данных по α представляет в настоящее время определенный интерес; ниже рассмотрено современное состояние измерений этой величины в различных энергетических областях, а также содержание большинства рекомендаций совещаний экспертов МАГАТЭ.

Резонансная область сечений

В табл. 1 приведены экспериментальные условия дифференциальных измерений величины α , выполненных в различных институтах и лабораториях: 1) в Харуэлле (Великобритания) [1, 3]; 2) в Ренселеровском политехническом институте (РПИ) группой сотрудников этого института совместно с группой из Ок-Риджа (ОР), США [4]; 3) в Ливерморской радиационной лаборатории (ЛРЛ), США [5]; 4) в Дубне группой из Объединенного института ядерных исследований [6, 7]; 5) совместно группами из ОИЯИ и Физико-энергетического института [7]; 6) на спектрометре (по времени пролета) с импульсным циклотроном Института теоретической и экспериментальной физики [8]; 7) в Институте атомной энергии (для U^{235}) [9]; 8) в Лос-Аламосе (США) с использованием подземного ядерного взрыва в качестве импульсного источника нейтронов [10]. Из табл. 1 видно, что в этих работах применялись весьма разнообразные детекторные устройства, разные толщины образцов и неодинаковые разрешения селекторов, а также различные источники нейтронов: от импульсного реактора ОИЯИ до линейных ускорителей электронов (в большинстве работ). Сопоставление таких результатов представляет интерес, поскольку в них можно ожидать различные систематические погрешности, что позволит в конце концов найти наиболее достоверные значения.

Прежде чем сравнивать полученные результаты, следует отметить, что во всех примененных методах получения величины α Pu^{239} существовало ограничение, вызванное тем, что эффект, соответствующий радиационному захвату σ_c , определялся по γ -излучению, и из-за большого числа γ -квантов, сопровождающих деление, наряду с захватом регистрировались также акты деления σ_f . Суммарный «радиацион-

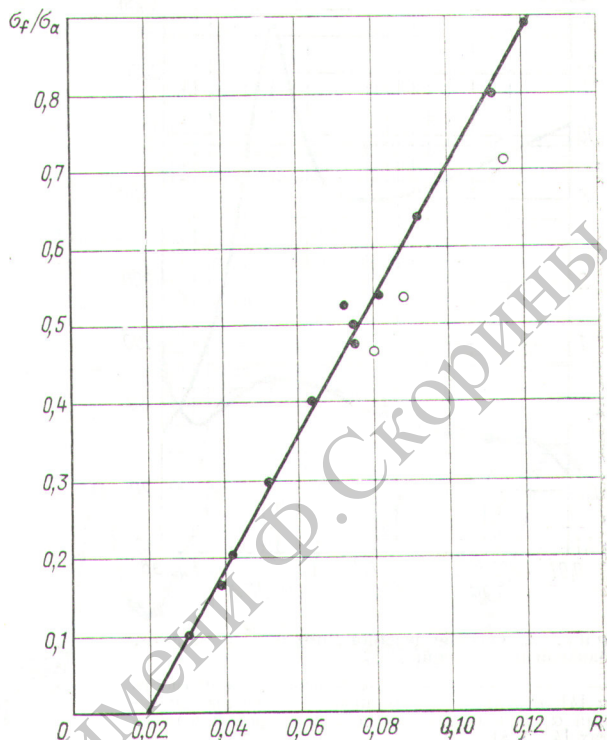
Условия экспериментов по измерению α

Лаборатория (авторы)	База, источ- ник	Длительность импульса нейтронов	Примесь Pu ²⁴⁰ , %	Вес и тол- щина образ- цов (атом/барн)	Фильтры для опре- деления фона	Нормировка результатов	Детектор делений	Детектор захвата
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Харуэлл (Со- верби и др.)	35 м ЛЭУ	~ 200 нсек	0,7—1,8	0,0012— 0,0044	Mn, Mo, Ta, Na, Al	На резо- нансы	Разделение по форме им- пульса в жидком сцинтилля- торе	Совпадения в двух жид- ких сцинтил- ляторах
ОР — РПИ (Гвин и др.)	25 м ЛЭУ	~ 100 нсек		5—20 г	Al, Co, Na, Mn	На тепло- вую об- ласть	Сцинтиллятор с высокой дискримина- цией по γ - квантам и камера деле- ния	Сцинтиллятор с низкой дискримина- цией по γ - квантам
ЛРЛ (Ксирр и др.)	11 м ЛЭУ	~ 500 нсек	0,87	0,00043	Na, Ta, Co, Cd	Энергия 0,08 и 15,5 эв	Разделение по форме им- пульса в жидком сцинтилля- торе	Разделение по форме им- пульса в жидком сцинтилля- торе
ОИЯИ (Рябов и др.)	1000 м ИР	~ 40 мксек ~ 4 мксек	1,5	0,0027÷ ÷0,000285	Ag, Co, Mn	На резо- нансы	Двойные за- держанные совпадения в жидком водородсо- державшем сцинтилля- торе с кад- мием	Без совпадений в этом же сцинтилля- торе
ОИЯИ — ФЭИ (Рябов и Кононов и др.)	250 м ИР	~ 40 мксек ~ 4 мксек	1,5	0,0007	Al, Na, Mn, Co, Ag	На резо- нансы	Камера деле- ния	Жидкий сцин- тиллятор
ИТЭФ (Беляев и др.)	14,5 м Цик- лотрон	~ 4 мксек	1,8	0,0022	Ag, Mn, Na	На тепло- вую об- ласть	Парафин с ZnS- сцинтилля- тором и стильбен с разделением по форме импульса	NaI-сцинтил- лятор и стильбен с разделением по форме им- пульса
ИАЭ (Мура- дян и др.)	ЛЭУ	200 нсек	—	« 1 г	Al	На резо- нансы	Камера деле- ния с ~ 95% эффектив- ностью	NaI-сцинтил- ляторы в ре- жиме анти- совпадения с камерой деления
Лос-Аламос (Фаррелл и др.)	245 м Взрыв		5,3	0,00088		На резо- нансы	Кремниевый детектор	Типа Моксон- Рэя

Примечание. ЛЭУ — линейный электронный ускоритель; ИР — импульсный реактор ОИЯИ.

Рис. 1. Экспериментально определяемое отношение R эффектов при высокой и низкой дискриминациях (см. табл. 1) в зависимости от величин σ_f/σ_a для хорошо разрешаемых резонансов Pu^{239} (данные работы [4]).

(●) — нормировочная линейная зависимость; ○ — величины, не использованные при нормировке.



ный эффект» оказывается пропорциональным $\sigma_c + \sigma_f \varepsilon$, где ε — величина порядка единицы. Радиационный эффект сравнивается с «чистым» делительным эффектом, однако для выделения σ_c из суммы (чтобы получить «чистый» захват и отношение $\alpha = \sigma_c/\sigma_f$) необходимо знать ε , поэтому приходится применять процедуру нормировки данных на резонансы (или области) с известными отношениями σ_c/σ_f (или Γ_γ/Γ_f). На рис. 1 в качестве примера, иллюстрирующего нормировку результатов, приведена зависимость экспериментально измеряемого отношения делительного и радиационного эффектов (по горизонтальной оси) от величины $\sigma_f/\sigma_f + \sigma_c$ для нескольких резонансов [4]. Видно, что часть точек отклоняется от идеальной линейной зависимости, — такого сорта отклонения можно ожидать в случае разного числа γ -квантов при захвате на разные резо-

Сравнение α , принятых для нормировки (со звездочкой), с величинами, измеренными в разных экспериментах

Таблица 2

Энергия E_0 , эв	ЛРЛ [5]	ОР — РПИ (разные серии) [4]	Сагле [4]	ИТЭФ [8]	Харуэлл [3]	ОИЯИ [11]
0,025	0,3653 *	0,359 *	—	0,359 *	—	—
0,07—0,09	0,460 *	—	—	—	—	—
0,30	0,675	0,66 *	—	0,66	—	0,64
7,85	0,819	0,85	0,85±0,09	0,86	0,86 *	0,87
10,98	0,26	0,27	0,38±0,08	—	0,33 *	0,27
11,93	1,57	1,56	1,70±0,25	—	1,52 *	1,38
14,30	—	0,55	0,50±0,14	—	0,56 *	0,67
14,70	1,09	1,13	1,27±0,07	—	1,18 *	1,25
15,46	—	0,14	(0,03)	—	0,11 *	0,05
15,5—16,0	0,092 *	—	—	—	—	—
17,70	1,04	1,14	1,15±0,02	1,14	1,13 *	0,92
22,30	0,625	0,64	0,71±0,07	0,60	0,66 *	0,71
26,30	0,879	0,91	0,83±0,17	0,99	0,90	0,67
32,30	—	0,43	0,39±0,10	—	—	—
44,48	9,79	9,52	9,28±0,40	9,60	8,94 *	4,55
47,60	0,188	—	(0,31)	—	—	—
50,10	1,94	2,45	3,50±0,40	—	2,27 *	1,48
52,60	4,99	5,22	5,25±0,20	—	4,92 *	4,06
65,80	0,827	0,88	0,67±0,08	—	0,91 *	—
74,10	—	1,05	1,13±0,20	—	—	—
74,90	0,533	0,40	0,49±0,03	—	—	—
85,50	—	1,16	—	—	—	—
90,80	3,57	4,15	4,50±0,43	—	4,08 *	—

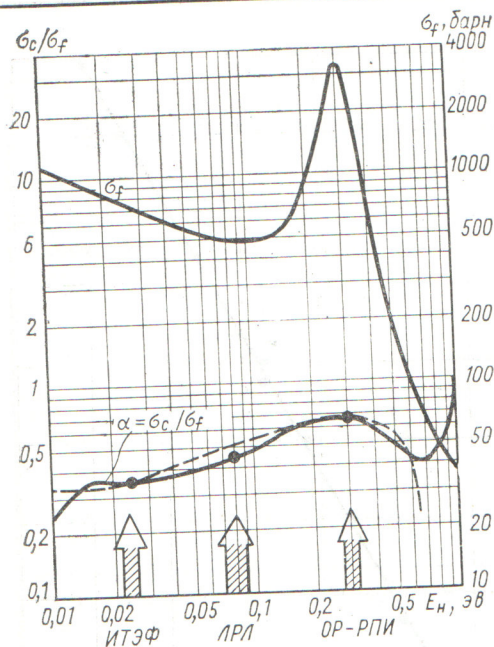


Рис. 2. Сечение деления Pu^{239} и α в области, близкой к тепловой:

— — — ранее опубликованная зависимость α [4]; стрелками и кружками отмечены значения α , использованные для нормировок в работах [4, 5, 8].

нансы, при недостаточном разделении резонансов и по другим причинам. Надежность нормировки данных повышается, если в ней используется достаточно хорошо изученная область тепловых энергий. На рис. 2 [4] показана эта область энергий вместе с данными по α , применяемыми для нормировки в работах [4, 5, 8]. Однако полная независимая нормировка данных на тепловую область энергий была проведена лишь в работах [6, 8].

Другим источником систематических ошибок в α (из-за нормировки) могут быть сами величины σ_c/σ_f , принимаемые при нормировке. В табл. 2 приведены отношения σ_c/σ_f из различных экспериментальных работ. Из сопоставления данных видно, что в некоторых случаях они различаются на 20% и больше. Из-за малого числа крайних значений ($\alpha < 0,5$ и $\alpha > 4$), которые и определяют в решающей степени наклон нормировочной кривой, ошибка в нормировке может составлять до ~10%. Разброс данных может приводить к дополнительным трудностям при сопоставлении различных результатов. Учитывая это, еще в 1969 г. совещание экспертов МАГАТЭ рекомендовало разработать единые условия нормировки всех данных по α , при этом стандартные величины σ_c/σ_f должны быть связаны с тепловой обла-

стью энергий (см. выше). Попытка создания такого набора параметров была сделана Соверби [3] (см. табл. 2), однако на совещании экспертов в Студсвике было высказано предположение, что высокие значения α в этом наборе рекомендованных величин немного занижены. В частности, это касается величины α для резонанса при 44,5 эв (см. табл. 2): рекомендованная величина несколько ниже остальных, за исключением значения из работы [11]. В этой работе, возможно, имелся некоторый систематический эффект при больших значениях α . Например, из-за регистрации захватного γ -излучения в делительном канале сцинтилляционного бака, т.е. делительный эффект переставал быть чистым, что заметно сказывалось бы при высоких α , когда сам делительный эффект мал; в этом случае нормировочная прямая (см. рис. 1) превращается в более сложную зависимость и для проверки правильности получающихся величин α используется анализ средних сечений деления (см. ниже).

При точном определении параметров нейтронных резонансов часто возникает необходимость в учете следующих систематических эффектов.

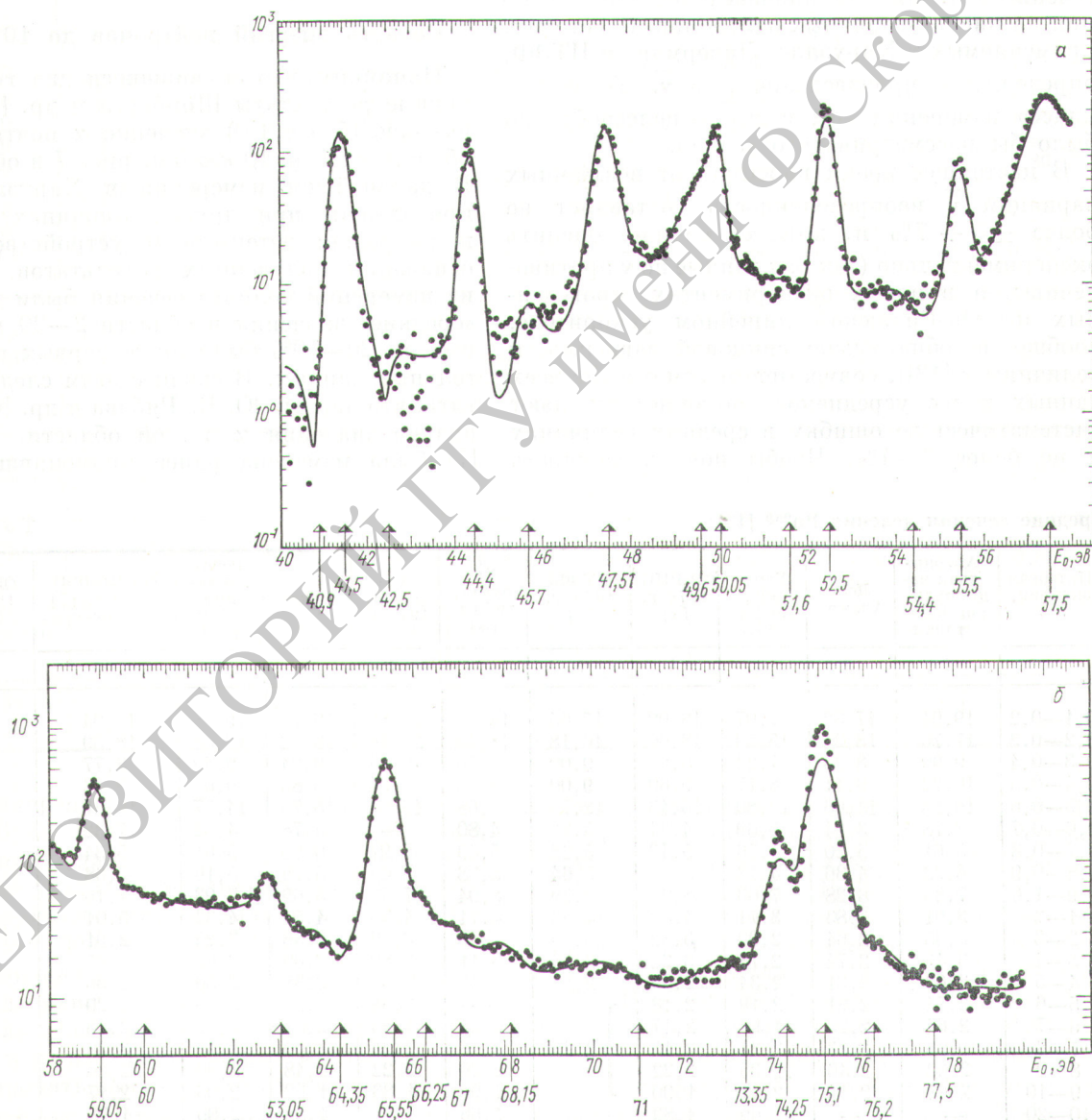
1. По данным некоторых работ в величинах сечения деления (и α) между резонансами наблюдается систематическое различие: данные из Сакле оказываются выше, а из Лос-Аламоса ниже значений σ_f , полученных в Ок-Ридже [4]. Сечение между резонансами может существенно повлиять на многоуровневую подгонку σ_f , которую приходится учитывать при решении вопроса о том, одиночный ли данный резонанс или это группа резонансов. На рис. 3, а, б приведен пример подгонки сечения деления, выполненной в работе [12]; стрелками отмечены положения резонансов. Видно, что часть резонансов маскирует более слабые соседние уровни, поэтому для надежной нормировки на резонансы необходимы высокие энергетическое разрешение, тонкие образцы и корректный учет фона между резонансами. Пока такому требованию удовлетворяют только некоторые изолированные резонансы с $E_0 < 80$ эв.

2. В случае чувствительности детектора γ -излучения к вариациям формы спектра излучения дополнительная ошибка может достигать ~10% [5]. Положение облегчается, когда измерения проводятся детекторами с различными чувствительностями, а возможные изменения формы амплитудных спектров одновременно анализируются многомерным анализатором

[8] и корректируются [5]. Еще более кардинальное решение сводится к исключению всякой зависимости результатов от спектров γ -излучения, что может быть сделано, например, при использовании метода антисовпадений [9]. Метод большого жидкого сцинтиллятора [4] также не очень чувствителен к формам спектра γ -излучения. Это обстоятельство особенно важно при переходе из области малых энергий нейтронов (где и осуществляется нормировка) в область десятков килоэлектронвольт. В этой области существен захват нейтронов с отлич-

ными от нуля орбитальными моментами, это следует учитывать при оценке реальной точности дифференциальных экспериментов разного типа. Изменения числа $\bar{\nu}$, угловой анизотропии разлета осколков и другие систематические эффекты могут также существенно повлиять на точность измерения α в этой области.

3. Ошибка, составляющая 3%, может возникнуть из-за спиновой зависимости числа вторичных нейтронов $\bar{\nu}$ для отдельных ней-



Р и с. 3. Сечение деления Pu^{239} и его многоуровневая аппроксимация в рамках формализма Адлер — Адлера [12].

тронных резонансов [2]. К настоящему времени программа по взаимному согласованию нормировочных значений, используемых в различных экспериментах (см. выше), близка к выполнению (в результате этого ошибка в α от нормировки может быть оценена величиной менее 5%). Необходимо выяснить, существует ли зависимость числа $\bar{\nu}$ для разных спиновых состояний уровней Pu^{239} или нет. Если такая зависимость существует и разница составляет $\sim 3\%$, то нужно определить, какая величина измеряется в том или ином эксперименте: сечение деления или произведение этого сечения на число вторичных нейтронов. В методах, применяемых в Харуэлле, Ливерморе и ИТЭФ, определяется произведение σ_f и $\bar{\nu}$. Тогда два класса измерений — α и $\alpha/\bar{\nu}$ — целесообразно было бы рассматривать отдельно.

В настоящее время вносимая от возможных вариаций $\bar{\nu}$ неопределенность составляет не более $\pm 5 \div 7\%$ и, хотя ее сложно оценить экспериментально (так как данные по $\bar{\nu}$ противоречивы, а в новых экспериментах, проведенных на Ок-Риджском линейном ускорителе, вообще не обнаружено спиновой зависимости величины $\bar{\nu}$ [13]), совместное рассмотрение всех данных и их усреднение, по-видимому, дают систематическую ошибку в средних величинах α не более 3—4%. Чтобы понять важность

знания спиновой зависимости $\bar{\nu}$ для определения α , следует вспомнить, что для s -волновых резонансов существует и спиновая зависимость средней делительной ширины (а следовательно, и α). Уровни с $J = 0^+$ имеют, как правило, низкие значения α . В то же время низкие α в киловольтной области, где преобладают p -уровни, соответствуют уровням с другими спиновыми состояниями, а возможно, совсем с другим средним $\bar{\nu}$ и с физическими свойствами, отличными от свойств s -уровней, с $J = 0^+$, данные по которым применяются в нормировке.

Область энергий нейтронов до 10 кэв

Напомним, что появившиеся два года назад первые результаты Шомберга и др. [1] давали высокое (более 1,0) значение α почти во всей области от 1 до 10 кэв (см. рис. 7 в обзоре [2]). В дальнейшем измерения в Харуэлле были продолжены при других толщинах образцов и на новом детекторном устройстве [3], на основании полученных результатов, а также из измерений полного сечения были получены «средние» значения в области 2—20 кэв, которые на 20—50% были ниже первых предварительных данных. В связи с этим следует отметить, что данные Ю. В. Рябова и др. [6] давали низкие значения α в этой области. В работе [7] была изменена ранее применявшаяся ме-

Таблица 3

Средние сечения деления Pu^{239} [13]

Интервал энергии, кэв	Аргоннская национальная лаборатория	Лос-Аламо	Харуэлл, 1968 г.	ОР-РПИ, 1970 г. [4]	ИТЭФ, 1970 г. [8]	Харуэлл, 1970 г. [3]	Харуэлл, 1970 г.	Сакле	Рекомендации работы [13]	ОИЯИ-ФЭИ, 1970 г. [7] (220 нсек/м)	ОИЯИ-ФЭИ, 1970 г. [7] (15 нсек/м)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,1—0,2	19,94	17,82	17,07	18,09	17,65	18,55	21,80	19,18	19,88	18,94	21,63
0,2—0,3	17,76	18,25	15,59	18,06	16,18	18,43	20,46	18,02	18,38	18,39	17,88
0,3—0,4	9,99	8,35	7,22	8,63	9,09	8,76	10,54	9,04	9,49	8,77	7,30
0,4—0,5	10,22	9,11	8,17	9,60	9,00	9,75	9,94	9,85	9,62	9,38	12,30
0,5—0,6	10,93	14,66	13,80	15,43	12,77	15,68	16,93	15,75	14,77	15,61	18,33
0,6—0,7	3,78	3,94	3,69	4,54	5,29	4,80	—	4,78	4,32	7,32	7,34
0,7—0,8	5,61	5,20	4,76	5,43	5,28	5,49	5,97	6,03	5,61	5,34	6,57
0,8—0,9	6,32	4,36	4,12	5,13	5,64	5,38	5,05	5,19	5,16	5,68	7,03
0,9—1,0	7,83	8,28	7,03	8,28	6,29	8,04	7,42	8,69	7,93	7,16	10,93
1—2	3,91	3,83	3,71	4,49	4,33	4,71	4,25	4,54	4,32	5,01	5,56
2—3	3,35	2,64	2,90	3,32	3,20	3,43	3,29	3,36	3,25	2,91	3,61
3—4	3,45	2,74	2,78	3,22	2,76	3,11	2,80	3,09	3,07	2,95	3,65
4—5	2,62	2,31	2,34	2,39	2,58	2,43	2,51	2,38	2,50	2,36	2,65
5—6	2,74	2,71	2,19	2,18	} 2,23	—	2,38	2,21	2,53	2,20	2,36
6—7	2,64	2,20	1,98	2,17		2,03	1,95	2,01	2,17	2,18	2,13
7—8	1,86	2,23	2,21	2,15		2,16	2,24	2,00	2,12	2,39	2,55
8—9	2,02	2,46	2,35	2,22		2,20	2,22	2,48	2,30	2,26	2,32
9—10	2,28	2,14	2,01	1,90		1,90	1,83	1,98	2,03	2,17	2,22
10—20	—	—	1,69	1,82		1,66	1,71	1,88	2,06	1,78	2,09

Таблица 4

Результаты измерений α Pu^{239}

$E, \text{кэВ}$	ОИЯИ-1 (Рябов) [6]	ОИЯИ-2 (Рябов) [7]	Харуэлл (Соверби) [3]	ОР—РПИ (Гвин) [4, 15]	ИТЭФ (Бея- ев) [8]	ЛРЛ (Ксирр) [5]	Лос-Аламос (Фаррелл) [10]	Среднее значение $\langle \alpha \rangle$
	1	2	3	4	5	6	7	8
0,1—0,2	1,13	0,85	0,96	0,96	0,88	0,76	0,67	0,85
0,2—0,3	1,26	1,00	0,79	1,06	1,07	1,01	0,67	0,93
0,3—0,4	} 1,97	1,00	1,13	1,34	1,23	0,84	0,94	1,08
0,4—0,5		0,89	0,44	0,48	0,45	0,53	0,57	0,56
0,5—0,6		0,84	0,63	0,78	0,75	0,70	0,64	0,72
0,6—0,7		1,44	1,44	1,87	1,72	1,47	1,68	1,60
0,7—0,8		1,31	0,94	1,00	0,94	1,03	0,85	1,01
0,8—0,9		1,15	0,53	1,07	0,78	0,66	0,79	0,83
0,9—1,0		1,21	0,55	0,77	0,71	0,65	0,70	0,76
1,0—2,0	} 0,79	1,04	0,69	0,92	1,02	0,89	1,17	0,95
2,0—3,0		1,09	0,92	1,38	1,23	1,02	1,34	1,16
3,0—4,0	} 0,36	0,96	0,73	1,26	0,96	0,90	0,95	0,96
4,0—5,0		0,78	0,72	0,98	0,83	0,81	0,90	0,84
5,0—6,0		0,82	0,80	0,91	} 0,67	0,82	0,93	0,86
6,0—7,0		0,75	0,69	0,88		0,86	0,86	0,81
7,0—8,0		0,60	0,59	0,71		0,63	0,68	0,64
8,0—9,0		0,50	0,56	0,58		0,56	0,58	0,56
9,0—10,0		0,43	0,64	0,64		0,56	0,74	0,60
10,0—15,0	} 0,37	} 0,37	0,52	0,58	} 0,45	} 0,60	} 0,48	
15,0—20,0			0,46	0,45				
20,0—30,0			0,39	0,39				
$\Sigma (0,1-1,0)$ 9	1,0	1,08	0,83	1,04	0,95	0,85	0,83	0,927
$\Sigma (1,0-10,0)$ 9	0,6	0,77	0,70	0,92	0,82	0,78	0,90	0,820
Отклонения от $\langle \alpha \rangle$	(0,54)	0,48	0,13	0,17	0,08	0,06	0,14	
Отклонения от $\bar{\alpha}$				0,09	0,05	0,09		

тодика измерения σ_f и α , и значения α в обла-
сти 2—10 кэВ оказались систематически выше
предыдущих данных. При сравнительной
оценке результатов различных работ полез-
ную информацию можно получить уже из со-
поставления делительных эффектов, т. е. ве-
личин, близких к $\bar{\sigma}_f$ — дифференциальным се-
чениям деления, усредненным по широким
интервалам энергий нейтронов (например,
1—2 кэВ и т. д.). Таким образом удается про-
контролировать одну из двух экспериментально
определяемых частей отношения $\alpha = \bar{\sigma}_c / \bar{\sigma}_f$.
В табл. 3 приведены величины σ_f из несколь-

ких экспериментальных работ [7, 8] и обзоров
[14]. Видно, что большинство значений удовле-
творительно согласуются между собой (кроме
данных работы [7]). Высокие значения σ_f
в работах [6, 7] для $E > 0,6 \text{кэВ}$ обычно не учи-
тываются при составлении средних и реко-
мендованных величин σ_f (см. табл. 3, колонку
9 [14]). В обзоре В. Коньшина [15], подготов-
ленном к совещанию экспертов МАГАТЭ
в 1970 г., было выдвинуто предположение, что
высокие σ_f неслучайно скоррелированы с си-
стематическим снижением α в этих работах (од-
нако такого соответствия может и не быть [7]).

Средние рекомендованные значения величин α Pu^{239}

Таблица 5

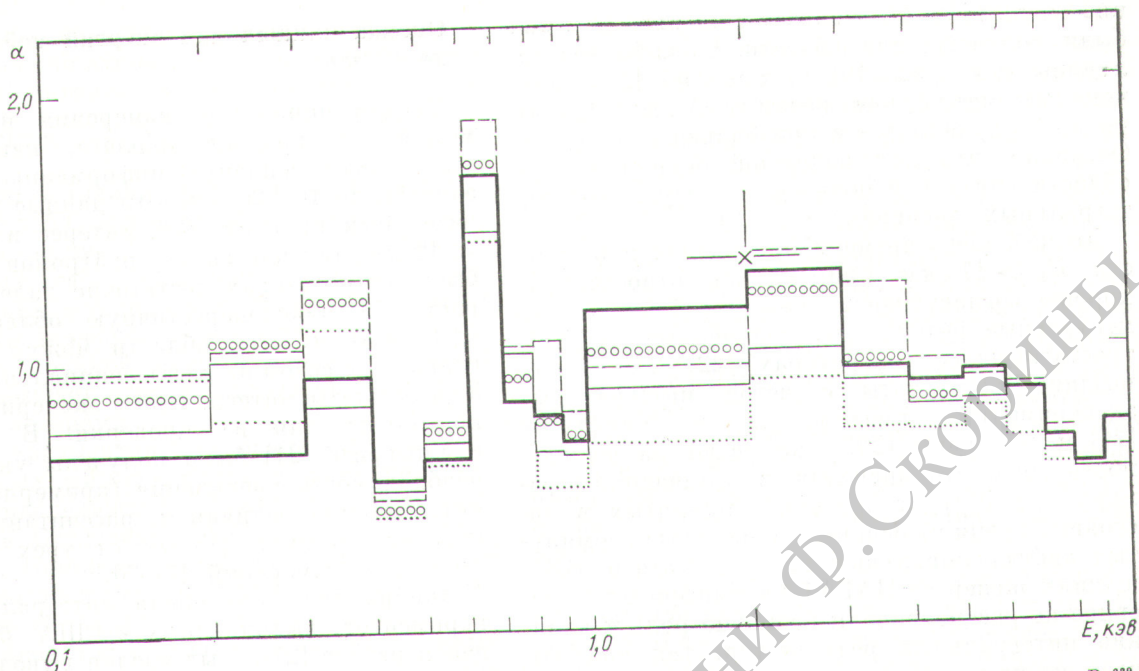
$E, \text{кэВ}$	ОИЯИ—ФЭИ 15 нсек/м [7]	ОИЯИ—ФЭИ 220 нсек/м [7]	$\bar{\alpha}$ [4, 5, 8]	Примечание	$\{\alpha\}$	$\frac{\bar{\alpha} + \{\alpha\}}{2 \{\alpha\}}$
	1	2	3	4	5	6
0,1—0,2	0,71	0,73	0,87	Различие в сериях [15]	0,78	0,95
0,2—0,3	1,31	0,72	1,05		0,84	0,90
0,3—0,4	1,71	0,82	1,14	Различие в сериях [15]	1,12	0,99
0,4—0,5	0,48	0,60	0,49	Отличие от $\langle \alpha \rangle$ Различие в сериях [15]	0,64	1,15
0,5—0,6	0,68	0,70	0,74		0,70	0,97
0,6—0,7	0,75	0,92	1,69		1,24	0,81
0,7—0,8	1,03	0,70	0,99		0,97	0,99
0,8—0,9	0,68	0,63	0,80		0,76	0,97
0,9—1,0	0,48	0,65	0,71		0,72	1,01
1,0—2,0	0,65	0,78	0,94	Различие в сериях	0,87	0,96
2,0—3,0	0,89	0,83	1,21		1,01	0,92
3,0—4,0	0,67	0,77	1,04		0,82	0,89
4,0—5,0	0,95	0,71	0,87		0,81	0,96
5,0—6,0	0,90	0,65	0,87		0,74	0,92
6,0—7,0	0,97	0,59	0,87		0,77	0,94
7,0—8,0	0,46	0,44	0,67		0,55	0,91
8,0—9,0	0,49	0,43	0,57		0,41	0,86
9,0—10,0	0,43	0,46	0,60		0,54	0,95
$\frac{\Sigma(0,1-1,0)}{9}$	0,87	0,72	0,945	Отношение столбцов 2 и 3 равно 0,76	0,865	0,96
$\frac{\Sigma(1,0-10,0)}{9}$	0,71	0,63	0,841	Отношение столбцов 2 и 3 равно 0,74	0,744	0,94 и 0,92 (для 1,0—5,0 и 5,0—10 кэВ)
Отклонение от $\langle \alpha \rangle$	0,22	0,19				

В табл. 4 и 5 (колонки 1, 2) приведены все, имеющиеся к началу 1971 г., результаты по дифференциальным измерениям α . Большинство из них обсуждалось на совещании экспертов МАГАТЭ в Студсвике и на конференции в Хельсинки [15, 16] (данные работы [6] приведены для сравнения). В последнем столбце табл. 4 представлены среднеарифметические значения по шести наборам экспериментально измеряемых величин α [3—5, 7, 8, 10], причем при усреднении всем измерениям был придан одинаковый вес, так как в большинстве работ систематические ошибки превалировали над статистическими неопределенностями. Большинство из этих экспериментальных данных показано на рис. 4, взятом из обзора М. Мора, представленного на Третью конференцию по

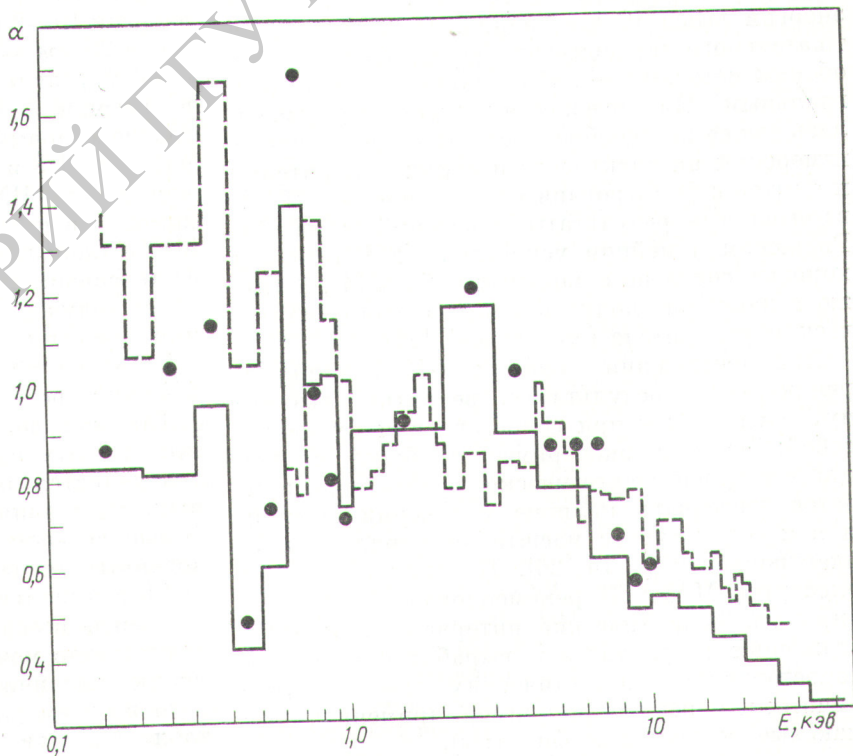
нейтронным сечениям и технологии [17]. Наряду с дифференциальными данными на рис. 4 приведено значение α , полученное в работе [18] для нейтронов с энергией ~ 2 кэВ (реакторный пучок со скандиевым фильтром).

Область энергий нейтронов выше 10 кэВ

Расхождения в значениях α между различными данными при энергиях больше 10 кэВ достигают $\sim 30\%$, как это видно на рис. 4 или из сравнения колонок табл. 4. Весьма сильно различаются в этой области и оценки величин α на основании анализа полного сечения, сечения деления и резонансных параметров. Первые оценки, сделанные свыше двух лет назад, приводились в работе [2]. Более позд-



Р и с. 4. Сравнение экспериментальных данных [17] из различных дифференциальных измерений величин α Pu^{239} .
 — Лос-Аламос [10]; — — — — Ок-Ридж [4]; — · — Ливермор [5]; · · · · Англия [3]; oooo — СССР, ИТЭФ [8]; * — «Айдахо Корпорейшн» [18].



Р и с. 5. Сравнение оценок работ [19] и [20] (— — —) с результатами настоящего обзора (● — данные табл. 5, рисунка 3).

ние оценки [19, 20] показаны на рис. 5, в них были получены для области $E_n \approx 10$ кэв величины $\alpha \approx 0,52$ [19] и $\alpha \approx 0,65$ [20], причем систематическая разница $\Delta\alpha \approx 0,1$ (порядка 20%) остается и при больших энергиях. Очевидно, что для надежной оценки в этой области следует использовать результаты интегральных экспериментов [21].

До недавнего времени при оценке α в области $E_n > 17$ кэв применялись относительно хорошо согласующиеся между собой экспериментальные результаты, полученные на электростатических генераторах [22, 23]. Более поздние результаты обчетов интегральных экспериментов, проведенных в Уинфрите [21] и Кадараше [24], указывают на возможность того, что значения α отличаются примерно на 10% от значений, принятых в настоящее время на основе анализа вышеупомянутых дифференциальных данных. Хотя на совещаниях экспертов МАГАТЭ в Уинфрите и Студсвике не рассматривали подробно роль и влияние интегральных результатов, так как выводы из них считались еще недостаточно обоснованными (так как имеется неопределенность в других величинах, например в $\bar{v}$, а также и в методиках самих обчетов интегральных экспериментов), вся область значений α для энергий выше 10 кэв должна стать предметом тщательного экспериментального исследования обоими методами — дифференциальным и интегральным. На совещаниях экспертов отмечалась также целесообразность проведения новых измерений на электростатических ускорителях и опытов с фильтрованными нейтронами. Предварительные результаты измерений α на Ок-Риджском линейном ускорителе [25] показали хорошее согласие с данными работы [4], а также с данными, полученными на электростатическом ускорителе (до 400 кэв) [22].

При достижении точности $\sim 10\%$ в дифференциальных результатах, вероятно, возникнут трудности и при сопоставлении их между собой: если в экспериментах будет сильно отличающееся энергетическое разрешение, придется учитывать наличие в сечении деления и в α «структур» с масштабом порядка килоэлектронвольт [2, 14, 26]. Поэтому совещание экспертов МАГАТЭ рекомендовало стандартизировать энергетические интервалы при представлении результатов и выработать меры по сопоставлению энергетических шкал в различных измерениях (например, применять одинаковые резонансные фильтры).

Оценка данных для энергий нейтронов до 10 кэв

Дифференциальные измерения на спектрометрах по времени пролета, как отмечено выше, дают основную информацию в области энергий до 10–20 кэв. Эти данные имеют значительный практический интерес и для $E_n < 10$ кэв, так как спектр нейтронов в больших быстрых реакторах достаточно далеко простирается в низкоэнергетичную область ($E_n < 10$ кэв). В этой области можно опираться главным образом на дифференциальные данные, а результаты интегральных экспериментов использовать для их проверки. В частности, в Уинфрите [21] были получены указания на необходимость увеличения (примерно на 10%) интегральных величин α , рассчитанных на основании средних данных от трех дифференциальных измерений [3–5].

Анализ большого числа интегральных экспериментов, выполненных в США, был проведен в работе [27]. Был сделан вывод, что оцененные величины α , входящие в набор ENDF/B-Version II и основывавшиеся на дифференциальных измерениях 1968–1969 гг., должны быть увеличены следующим образом: для энергий ниже 10 кэв — в среднем на 8%, для энергий 10–25 кэв — на 10–20%, для энергий выше 25 кэв — в среднем на 7%. В работе [28] описан результат интегрального эксперимента в Аргонне (США), показавшего хорошее согласие с новыми дифференциальными данными работ [4, 15] и занижение величин α как в старом наборе ENDF/B-Version II, так и, по-видимому, в новых данных Шомберга и Соверби [3]. Наконец, в работе [29], выполненной на фильтрованном потоке Брукхейвенского реактора, получена интегральная величина α (средняя энергия эффекта деления составляла 0,1 кэв) на 8% выше данных работы [3] и на 5% ниже результатов [4, 15].

Так как вопрос уточнения дифференциальных данных путем интегральных экспериментов является завершающей фазой оценки данных, совещания экспертов МАГАТЭ посвятили большую часть времени получению рекомендованных значений, исходя только из прямых дифференциальных данных.

Прежде всего для анализа общего состояния результатов можно рассмотреть степень отклонения различных измерений от $\langle\alpha\rangle$ — среднего по всем данным (см. последнюю колонку табл. 4). Для этого определим для каждого

эксперимента величину среднего относительного отклонения данных от $\langle \alpha \rangle$ по всем 18 энергетическим интервалам области 0,1—10 кэв,

т. е. найдем $\frac{1}{n} \sum_n (|1\alpha - \langle \alpha \rangle| : \langle \alpha \rangle)$, где $n = 18$. Эта величина приведена в предпоследней строке табл. 4 и последней строке табл. 5. Видно, что кроме старых данных еще две серии данных (табл. 5, колонки 1 и 2), не использованных в усреднении, сильно отличаются от среднего значения, причем величина отклонения (по крайней мере в одной из серий) часто превышает относительную ошибку, приводимую авторами.

Иногда аргументом для исключения каких-либо данных из усреднения служит внутренняя противоречивость результатов. Так, совещание в Студсвике согласилось с рекомендацией В. Коньшина исключить на этом основании некоторые значения из вышеупомянутых данных по α , полученные в работе [7].

В колонках 1 и 2 табл. 5 приведены данные двух серий измерений этой работы, которые действительно в ряде энергетических интервалов за пределами ошибок отличаются друг от друга, а также от средних по другим данным (см. примечания в табл. 5). Особенно заметно удивительное различие в области $E \approx 0,65$ кэв, где, с одной стороны, в шести измерениях (см. табл. 4, колонки 2—7) получены высокие значения (1,44—1,87), а в обеих сериях работы [7] получены величины меньше 1,0. Такая неповторяемость надежно установленной структуры в значениях α свидетельствует о слабой чувствительности применяемого метода к истинным вариациям α , т. е. указывает на необходимость дополнительных поправок (например, на эффект самоблокировки резонансов и т. д.). В новых экспериментах ОИЯИ-2 (см. табл. 4, колонка 2) при $E = 0,65$ получено значение $\alpha = 1,44$, совпадающее с большинством других данных, но в то же время при E , равных 0,45; 0,75; 0,85 и 0,95 кэв, величины α (из этой работы) намного превышают данные всех шести остальных групп, т. е. в новых данных частично наблюдается та же тенденция к завышению величины α в области 0,4—1,0 кэв, существовавшая раньше [6].

Выше отмечалось, что анализ величин σ_f , полученных в различных лабораториях в 1968—1970 гг. (см. табл. 3, колонки 4—8), показывает хорошее согласие со средним значением σ_f в пределах $\sim 5\%$ [13]. Исключение из усреднения σ_f [14] данных (см. табл. 3, колонки

10, 11), которые намного хуже согласуются со средним $\bar{\sigma}_f$, является с этой точки зрения вполне обоснованной операцией, улучшающей точность средних значений. Данные Беляева, Гвина и Соверби [8, 4, 3] по величинам $\bar{\sigma}_f$ хорошо согласуются со средними $\bar{\sigma}_f$, полученными Джеймсом (см. табл. 3). В то же время эти величины получались в эксперименте по измерению α . На совещании экспертов МАГАТЭ в Студсвике отмечалась целесообразность сопоставления величин σ_f , получающихся при измерениях α . Следует отметить, что в некоторых методах значения σ_f представляют собой лишь эффективные сечения — они получаются на образцах конечной толщины. Сравнение этих величин с истинными сечениями, полученными на камерах деления, проводится с целью проверки методики измерения отношения α .

В табл. 4 (колонки 2, 3), где приведены окончательные данные, видно, что в интервале энергий 0,4—2,0 кэв данные Соверби и др. часто в два раза ниже данных Рябова и др. Но так как значения σ_f , полученные в Харуэлле, известны (и близки к σ_f , см. табл. 3, колонки 6, 9), то знание величин сечений делений из работы Рябова и др. позволило бы установить возможный источник различия. Таким образом, вопрос внутреннего согласования данных весьма существен.

Выше приведено лишь несколько примеров наиболее очевидных систематических отклонений, обсуждавшихся в работе [15]. Наверняка в каждой экспериментальной работе по измерению α в той или иной мере имеются систематические ошибки. Совещание в Студсвике рекомендовало авторам разделять статистические и систематические ошибки при представлении своих данных, отдельно указывать нормировку и связанную с ней ошибку и т. д. Центр по ядерным данным в Вене будет продолжать координировать как работу по обмену числовыми данными (σ_f , α , нормировочные параметры и т. д.), так и работу по оценке данных. Различие значений σ_f и противоречивость некоторых результатов позволяют предположить, что в методах с большими жидкостными сцинтилляторами имеются методические трудности, которые, возможно, еще не всегда можно полностью преодолеть. Проявление их в случае измерения α Pu^{239} вызвано тем, что флуктуации α именно у этого изотопа (в отличие от U^{235}) весьма значительны, и для детектирования резких колебаний α необходимо очень

надежно разделять эффекты деления, рассеяния и захвата нейтронов.

В заключение следует отметить необходимость экспериментального и теоретического изучения эффекта самоэкранировки резонансов. Этот эффект может привести к зависимости величин α , например от толщины образца. Хотя в работе [7] такой зависимости не обнаружено, ее необходимо проверить при помощи других методов.

Точность оценки данных

Вопрос о реальной точности дифференциальных данных достаточно сложен. Обычно он является предметом обсуждения на международных совещаниях и конференциях, причем при оценке данных и расчетов реакторов часто подвергаются сомнению приводимые в экспериментальных работах погрешности. Это происходит вследствие того, что на протяжении двух лет данные по α изменились более чем в два раза, а обстоятельного анализа ошибок (кроме [3]) проведено не было. Поэтому в настоящем обзоре умышленно не рассматриваются статистические ошибки в экспериментальных результатах и проведено усреднение без учета статистического веса измерений. Это в данном случае оправдано, так как систематические ошибки в результатах труднее всего исправить, и они могут очень сильно повлиять на интегральный эффект и реакторный параметр. Чтобы проиллюстрировать это, в табл. 4 и 5 приводятся «суммарные средние» значения $\sum \alpha$ по интервалам 0,1—1,0 и 1—10 кэВ. Видно, что величины ОИЯИ—ФЭИ и Харуэлла в наибольшей степени отличаются от этих средних (см. табл. 4 и 5). В то же время данные Харуэлла изменились очень сильно за один-два года, поэтому можно сделать заключение, что в методе имела некоторая неустойчивость (возможно, систематического характера), и для получения наиболее достоверных значений такие данные, по-видимому, следует брать с несколько меньшим весом. Так как результаты Фаррела (Лос-Аламос) носят предварительный характер и служат, главным образом, для оценки нового метода измерений [10], то из предварительного усреднения $\bar{\alpha}$ можно исключить данные трех лабораторий (ОИЯИ, Харуэлла, Лос-Аламоса), учитывая результаты новых измерений в Ок-Ридже и данные интегральных опытов (см. выше). Поэтому кажется целесообразным принять среднеарифметиче-

ские значения из данных трех лабораторий (Ок-Ридж, Ливермор и ИТЭФ — значения α см. табл. 5, колонка 3 и рис. 5) за предварительный рекомендованный набор значений α (по данным на середину 1970 г.), приняв ошибку в них равной $\pm 10\%$. Это и есть тот уровень достоверности, который можно приписать интегральной величине (для широкого спектра нейтронов $E_n < 10$ кэВ), полученной из дифференциальных данных. Эта грубая оценка следует из сравнения приведенных в нижней строке табл. 4 относительных отклонений трех серий данных от средних величин $\bar{\alpha}$. Величина $\pm 10\%$ отражает примерное соответствие данных четырех лабораторий [4, 5, 8, 10] в области энергий выше 1 кэВ (см. рис. 4). Представленные пунктиром английские данные [3] систематически оказываются ниже других дифференциальных данных и ниже значения α для скандиевого фильтра. Данные ОИЯИ—ФЭИ также не согласуются с величиной $\alpha = 1,32 (\pm 20\%)$ [18] для скандиевого фильтра, как это видно из табл. 5.

Теперь определим среднее значение $\{\alpha\}$ по величинам, не вошедшим в $\bar{\alpha}$. Хотя имеются некоторые основания не включать часть этих значений в среднее значение, причем следует отметить, что основания для «невключения» данных базировались на анализе хода α в области до 2 кэВ [15], можно поставить вопрос: насколько отличается «среднее по всем лабораториям» от рекомендованных выше $\bar{\alpha}$. Их отношение приведено в табл. 5 (колонка 5); видно, что в области 0,1—1,0 кэВ различие, вносимое от «менее достоверных» данных, составляет 4%; для интервала 1,0—5,0 кэВ это различие увеличивается до 6% и для 5,0—10,0 кэВ оно составляет 8% (систематически в сторону снижения величин $\{\alpha\}$, особенно за счет второй серии измерений ОИЯИ—ФЭИ, отличие которой достигает 25% — см. примечание к табл. 5). Таким образом, хотя была проведена правильная (грубо ориентировочная) оценка точности рекомендации по величинам α в области до 10 кэВ ($\pm 10\%$), эта рекомендация базируется в значительной степени на результатах трех-четырех лабораторий и можно только строить предположения, почему расхождение данных других лабораторий в области до 1 кэВ и отличие от результатов со скандиевым фильтром привели в среднем к систематическому эффекту в области 1—10 кэВ.

Теперь коснемся вопроса о том, насколько важно такое различие. В докладе Гриблера

и др. [30] оценивалось влияние 20%-ного различия в значениях α , т. е. в захвате Pu^{239} (в области 0,1—500 кэв), на неопределенность в ожидаемой стоимости электроэнергии быстрого реактора-размножителя; была получена величина порядка 0,045 долл./Мвт·ч. Величина α существенно влияет на проектную величину времени удвоения горючего в реакторе. Принимая для электростанции мощностью 1000 Мвт (на основании существующих данных) время удвоения равным 9,1 года, авторы работы [30] получили неопределенность (из-за неточности ядерных данных) во времени удвоения от 5,8 до 11,5 лет. Эти оценки подтверждают необходимость в дальнейших измерениях и уточнениях α Pu^{239} . Авторы работы [30] считают, что для решения вопроса о конкурентоспособности и рентабельности различных типов быстрых реакторов-размножителей требуется сократить к 1975 г. неопределенность в величине α Pu^{239} до $\pm 3\%$.

* * *

В результате интенсивных исследований в различных лабораториях и международного сотрудничества в области изучения ядерных данных ранее имевшаяся большая неопределенность в величине α стала постепенно уменьшаться. Если ограничиться опубликованными к началу 1971 г. дифференциальными данными и принять за основу оценки совещаний экспертов МАГАТЭ в отношении некоторых эффектов, а также учесть результаты по скандиевым фильтрам и предварительные данные из Ок-Риджа, то можно получить набор значений α (см. табл. 5, колонка 3) с ориентировочной интегральной точностью α Pu^{239} порядка 10% (для $E < 10$ кэв). Эта точность и область энергии, несомненно, должны быть повышены, чтобы отвечать современным требованиям реакторостроения. Несмотря на предварительный характер большинства интегральной информации об энергетической зависимости α в области до 10—15 кэв, все данные в общем согласуются с дифференциальными результатами и подтверждают необходимость существенно изменить ранее принятые в групповых реакторных расчетах низкие значения α , базировавшиеся на старых экспериментальных данных и теоретических оценках [31]. Когда интерпретация интегральных экспериментов станет более однозначной, это позволит провести оценки величины α для области энергий выше 5—10 кэв, где пока имеются неопределенности

в различных дифференциальных данных (проведение измерений здесь затруднено малостью сечения захвата и методической сложностью выделения радиационного эффекта). Лишь широкий фронт совместных экспериментальных работ (как интегральных, так и дифференциальных), а также их оценка могут решить поставленную задачу — достижение высокой ($\sim 3\%$) точности в величинах α Pu^{239} .

Автор благодарит М. Н. Николаева и В. Н. Кононова за внимательное прочтение рукописи и замечание.

Поступил в Редакцию 29/IX 1969 г.
В окончательной редакции 29/IV 1971 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. Schomberg et al. Report SM-101/41, AERE Harwell, (1967).
2. С. И. Сухоручкин. «Атомная энергия», 28, 38 (1970).
3. M. Schomberg, M. Sowerby, D. Boyse. Доклад № 33 на II Конференции МАГАТЭ по ядерным данным для реакторов. (Хельсинки, 1970). Nuclear Data for Reactors, Vienna, IAEA, 1970, Vol. 1, p. 315.
4. R. Gwin et al. ORNL-TM-2598 (1969); Nucl. Sci. and Engng, 40, 306 (1970); ORNL-4592 (1970). См. также [15, 16].
5. J. Gzirr, J. Lindsey. Доклад № 47 на II Конференции МАГАТЭ по ядерным данным для реакторов (Хельсинки, 1970). См. также ссылку 15.
6. Ю. В. Рябов и др. «Атомная энергия», 24, 351 (1968).
7. М. А. Куров и др. См. [3], стр. 345, доклад № 124.
8. Ф. Н. Беляев и др. Там же, стр. 339, доклад № 89.
9. Г. В. Мурадян и др. Там же, стр. 357, доклад № 121.
10. J. Farrell et al. Там же, стр. 543, доклад № 46.
11. Ю. В. Рябов и др. Препринт ОИЯИ РЗ-4992. Дубна, 1970.
12. P. Lambropoulos. Nucl. Sci. and Engng, 40, No. 2, 342 (1970).
13. L. Weston, J. Todd. Third Conference on Neutron Cross Sections and Technology, March 15—17, 1971, Knoxville, Tennessee, USA, Report VI—9.
14. G. James. См. [3], стр. 267, доклад № 107, G. James, M. Schomberg. AERE-M 2157 (Harwell, 1969).
15. V. Konshin, T. Byer. Review of fission cross section and α -values for Pu^{239} INDC (NDS)—17/N. Vienna IAEA, 1970.
16. С. И. Сухоручкин. См. [3], стр. 307, обзорный доклад № 127.
17. M. Moore. См. [13]. Report VI—1. Status and Comparison of Techniques for Resonance Measurements.
18. J. Smith, S. Reeder. Trans. Amer. Nucl. Soc., 13, 300 (1970).

19. T. Pitterle et al. Proc. Conf. on Neutron Gross Sections and Technology (Washington, 1968), vol. 2, p. 1243.
20. C. Durston, S. Katsuragi, JAERI-1162 (1968).
21. C. Campbell, J. Rowlands. См. [3], стр. 391, доклад № 116.
22. G. de Saussure et al. IAEA Conf. on Nucl. Data for Reactors (Paris, 1966), vol. 2, p. 233.
23. J. Hopkins, B. Diven. Nucl. Sci. and Engng, 12, 169 (1962).
24. J. Barre, J. Bouchard. См. [3], стр. 465, доклад № 73.
25. R. Gwin et al. См. [13], Report II—24. Measurement of the Capture — to — Fission Ratio, α , for Pu^{239} over the Energy Region from 0,02 ev to 400 kev.
26. J. Lynn. Proc 2-nd IAEA Symp. on Phys. and Chem. Fissions (1969). Vienna, IAEA, 1969, p. 249.
27. T. Pitterle et al. См. [13], Report I—6. Evaluation of Modifications to ENDF/B Version II Data; Integral Testing of Modifications to ENDF/B Version II Data.
28. W. Kato et al. Nucl. Sci. and Engng (to be published). An Integral Measurement of Pu^{239} and U^{233} Alpha (Oct. 1970, ANL.)
29. H. Takahashi, E. Weinstock. Trans. Amer. Nucl. Soc., 13, 754 (1970).
30. P. Greebler et al. См. [3], стр. 17, доклад № 102.
31. А. П. Абагян и др. Групповые константы для расчетов реакторов. М., Атомиздат, 1964.

КНИГИ АТОМИЗДАТА в 1972 г. (продолжение, начало на стр. 236)

5. Техническая электроника и радиоэлектронная аппаратура. Электроннофизическое приборостроение

- Ю. И. Гальперин, Л. С. Горн, Б. И. Хазанов. Измерение радиации в космосе. 2 р. 80 к.
- Б. Г. Егиазаров, Л. А. Корытко, Ю. П. Сельдяков. Измерительная техника в инструментальном нейтронноактивационном анализе. 1 р. 70 к.
- Е. Ковальский. Ядерная электроника. Перев. с англ. Под ред. И. В. Штрауха. 2 р. 70 к.
- А. А. Курашов. Идентификация импульсов от детекторов излучения. 1 р. 70 к.
- С. А. Паньков. Ремонт и настройка электронных приборов ядерной физики. 55 к.

Серия «Эксплуатация и ремонт аппаратуры для измерения ионизирующих излучений»

- Вып. 1. Многоканальные системы радиационного контроля. 30 к.
- Вып. 2. Радиометры. 25 к.
- Вып. 3. Дозиметры. 25 к.
- Вып. 4. Блоки детектирования ионизирующих излучений. 25 к.

6. Нейтронная физика. Теория и физика ядерных реакторов

- Вычислительные методы в физике реакторов. Сб. статей. Под ред. Х. Гринспена, К. Келбера. 4 р. 40 к.
- Дж. Льюинс. Ценность. Сопряженная функция. Перев. с англ. 1 р. 40 к.
- Дж. Спанье, Э. Гелбард. Метод Монте-Карло и задачи переноса нейтронов. Перев. с англ. Под ред. А. Д. Франк-Каменецкого. 1 р. 66 к.

Теоретические и экспериментальные проблемы нестационарного переноса нейтронов. Сб. статей. Под ред. В. В. Орлова и Э. А. Стумбура. 2 р. 30 к.

7. Ядерная энергетика

- Р. Р. Ионайтис, В. Н. Стобецкий. Гидравлика СУЗ ядерных реакторов. 1 р. 00 к.
- А. И. Клемин. Инженерные вероятностные расчеты при проектировании ядерных реакторов. 2 р. 20 к.
- Н. П. Мельников. Конструктивные формы и методы расчета ядерных реакторов. Изд. 2. 4 р. 00 к.
- Н. М. Синев, П. М. Удовиченко. Бессальниковые водяные насосы. Изд. 2. 3 р. 60 к.
- Эксплуатация реакторных установок Ново-Воронежской АЭС. 1 р. 90 к.

8. Геология. Минералогия. Сырье

- Геология постмагматических ториево-редкометаллических месторождений. 2 р. 70 к.
- И. М. Липова. Природа метамиктных цирконов. 90 к.
- Условия образования месторождений урана в вулканических депрессиях. Под ред. чл.-кор. АН СССР А. И. Тугаринова. 2 р. 20 к.
- Н. И. Чесноков, А. А. Петросов. Системы разработки месторождений урановых руд. 2 р. 10 к.
- В. Л. Шашкин. Опробование радиоактивных руд по гамма-излучению. 1 р. 40 к.
- Ю. А. Шуклюков, Л. К. Левский. Геохимия и космохимия изотопов благородных газов. 1 р. 70 к.

(продолжение см. на стр. 276)