1,16 для первого и 0,92—0,93 коп/(кВт·ч) для второго блоков. Себестоимость электроэнергии на втором блоке равна средней себестоимости электроэнергии тепловых электростанций такой же мощности в районе Урала, что обеспечило конкурентоспособность второго блока в сравнении с обычными тепловыми электростанциями [7, 9].

Поступила в Редакцию 9/VII 1975 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Доллежаль Н. А. и др.** В сб.: Труды II Женевской конф. 1958. Докл. сов. ученых. Т. 2, М., Атомиздат, 1959, с. 36.
2. **Алещенков П. И. и др.** «Атомная энергия», 1964, т. 16, с. 489.
3. **Novick M. e.a.** In: Proc. III Intern. Conf. Geneva, 1965, v. 6, p. 225.
4. **Hoffmann F., Rickard C.** Ibid., v. 5, p. 101.
5. **Rennie C. A. e.a.** Ibid., v. I, p. 318.
6. **Доллежаль Н. А.** и др. III Женевская конф. 1964, докл. № 309.
7. **Доллежаль Н. А. и др.** В сб.: Опыт эксплуатации АЭС и пути дальнейшего развития атомной энергетики. Т. 1. Обнинск, 1974, с. 149.
8. **Доллежаль Н. А. и др.** «Атомная энергия», 1969, т. 27, вып. 5, с. 379.
9. **Доллежаль Н. А. и др.** «Атомная энергия», 1974, т. 36, вып. 6, с. 432.

УДК 621.039.526:621.039.519.4

Некоторые физические исследования на быстрых критических сборках БФС-1

ДУЛИН В. А., КАЗАНСКИЙ Ю. А., МАМОНТОВ В. Ф., СИДОРОВ Г. И.

В настоящее время точность предсказания основных физических характеристик проектируемых быстрых реакторов еще недостаточна. В связи с этим системы ядерно-физических констант и методы расчета проверяют с помощью интегральных (макроскопических) экспериментов на быстрых критических сборках [1—4].

На последних критических сборках БФС-22; 23; 26; 27; 28; 30 проведен цикл работ по изучению точности расчета некоторых характеристик [5—7]. Были измерены центральные коэффициенты реактивности (ЦКР) основных делящихся элементов (^{235}U, ^{238}U, ^{239}Pu), а также элементов с хорошо известными сечениями поглотителей (^{10}B, ^{197}Au, ^{6}Li) и рассеивателей (^{1}H, ^{12}C, ^{23}Na, Pb). Измерялись отношение ценности рождающихся нейтронов к ценности поглощаемых нейтронов и отношения скоростей реакций ряда делящихся и поглощающих элементов. В критических сборках БФС-26; 27; 28; 30 определялись спектры нейтронов [8, 9]. Приведенные в настоящей работе результаты являются уточнением данных работы [7].

Результаты экспериментов сравнивались с расчетами, в которых использовалась 26-групповая система констант БНАБ-70 [2, 3]. В экспериментальные данные необходимо было внести поправки, связанные главным образом с конечными размерами образцов и гетерогенной структурой критических сборок. Величины этих поправок определялись экспериментальным и расчетным путем. Анализ оцененных экспериментальных данных позволил выявить основные

Таблетки БФС-1 Таблица 1

Материал	Индекс	Толщина, мм
^{235}U	1 2	0,3 5
UO_2*	3	9,5
^{239}Pu **	4	2,4
Na **	5	10
C	6	10
Сталь	7 8	10 5
Al	9 0	10 5

* В оболочке из алюминия толщиной 0,3 мм.
** В оболочке из нержавеющей стали толщиной 0,3 мм.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скорины

причины расхождений между экспериментом и расчетом. Характер расхождения потребовал вполне определенных изменений макроконстант.

В настоящей работе кратко описаны критические сборки БФС, техника эксперимента, проверены методы введения поправок и даны основные экспериментальные результаты, а также результаты гомогенных расчетов.

Подробное описание установки БФС-1 приводилось ранее [10]. Критические сборки собираются из труб, в которых размещены таблетки конструкционных и делящихся материалов диаметром 46 мм. Толщина таблеток варьируется от долей миллиметра до 10 мм (табл. 1). Наличие таблеток ^{235}U малой толщины позволяло создавать критические сборки с разной гетерогенностью в центре активной зоны («гомогенные» вставки). Гомогенные вставки располагались в центре активной зоны и состояли из 57 ячеек (в 19 центральных трубках по три ячейки в каждой).

В табл. 2 приведен состав элементарных ячеек критических сборок. А — ячейка активной зоны, В — ячейка гомогенной вставки. Концентрации ^{235}U и ^{238}U в ячейках типа А и В хорошо известны (не хуже 0,5%) и отличаются между собой не более чем на 3%. В табл. 3 приведены гомогенные ядерные концентрации центральных частей активных зон. Остальные зоны и отражатель критических сборок более подробно описаны в работе [11].

Реактивность, вносимая образцом, определялась посредством измерения двух асимптотических периодов реактора (с образцом и без него). Среднеквадратическая погрешность измерения (1—3) 10^{-7} $\Delta K/K$ при среднем разбросе в отдельном измерении $5\cdot10^{-7}$ $\Delta K/K$.

Для измерения спектральных отношений индексов делящихся элементов использовались камеры деления с ^{235}U, ^{239}Pu и камеры с природным ураном. Захваты в ^{197}Au регистрировались по остаточной γ-активности. Использовались методики калибровки в тепловой колонне.

Отношение $\langle\sigma_c^{197}\rangle/\langle\sigma_f^{239}\rangle$ измерялось также абсолютным методом. Абсолютная скорость захватов в золоте определялась с помощью техники β — γ-совпадений, а также путем определения полного числа взаимодействий в кристалле NaI(Tl). Абсолютное число деления измерялось камерой с известным числом ядер ^{239}Pu и экспериментально определенной эффективностью регистрации делений [12].

Отношение ценности нейтронов деления к ценности нейтронов, поглощаемых в золоте (Φ_x^+/Φ_c^+), определялось путем измерения реактивности ρ_c, вносимой образцом поглотителя (золота), и абсолютной скорости поглощений в золоте N_c, а также псевдореактивности ρ_{cf}^+ источника спонтанных делений ^{252}Cf с известной абсолютной активностью [13]. Активность ^{252}Cf определялась несколькими методами, погрешность ~0,6%.

Одна из целей экспериментов — изучение влияния гетерогенности критических сборок на измеряемые функционалы. Для этого на критических сборках БФС-26; 27; 28 и 30 были сделаны гомогенные вставки, которые позволяли, с од-

Состав элементарной ячейки Таблица 2

Сборка	Ячейка	Индексы материалов *
БФС-22	А	3525355353525353253523 5
БФС-23	А	5354353534535345353543 53
БФС-26	А	6967692676967
	В	161018161018161018160181610118161018
	В	608608608111111111111111111608608608
БФС-27	А	5656526565
	В	115116115116115116115116115
	В	565651111111111111111116565
БФС-28	А	9392393
	В	111911131119111311191113
БФС-30	А	5352353
	В	111511131115111311151113
	В	555111111111111111111333

* См. табл. 1, графа 2.

Гомогенные ядерные концентрации центральных вставок $\times10^{21}$, ядер/см^3 Таблица 3

Сборка	Ячейка	^{235}U	^{238}U	^{239}Pu	^{23}Na	^{12}C	^{61}O	Al	Сталь 1Х18Н9Т
БФС-22	А	1,44	7,76	—	7,29	—	10,5	2,48	14,5
БФС-23	А	—	6,47	1,07	7,29	—	13,0	1,93	16,9
БФС-26	В	1,21	0,14	—	—	28,8	—	12,5	20.9
БФС-27	В	1,57	0,18	—	7,67	24	—	6,57	3,95
БФС-28	В	2,32	6,34	—	—	—	12,3	29,4	—
БФС-30	В	2,30	6,30	—	6,63	—	12,12	9,3	3,14

Примечание. В критических сборках присутствуют следы водорода из-за наличия клея в чехлах натриевых и 5-мм урановых таблеток (см. табл. 1, индекс 2). Максимально возможные концентрации H по отношению к концентрации ^{235}U составляют 3% в БФС-22; 1% в БФС-23 (по отношению к ^{239}Pu); 0% в БФС-26; 1% в БФС-27; 0% в БФС-28; 1% в БФС-30.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скорины

Центральные коэффициенты реактивности Таблица 4

Сборка	Ячейка	^{235}U	^{239}Pu	^{6}Li	^{10}B	^{197}Au	^{1}H	^{12}C	^{23}Na	^{208}Pb
БФС-22	А	4,48±0,03	6,50±0,06	—	—4,93±0,10	—1,22±0,018	—	—	—0,0046±0,0020	—
БФС-23	А	6,05±0,06	8,1±0,13	—	—6,83±0,3	—1,8±0,02	—	—	—	—
БФС-26	$B_{гет}$	8,47±0,14	11,8±0,25	—10,6±0,25	—	—11,3	1,5±0,03	0,156±0,003	—	—
	$B_{гом}$	7,66±0,08	10,35±0,16	—8,45±0,2	—28,0±0,4	—8,88±0,3	2,1±0,07	0,174±0,006	—	—
БФС-27	$B_{гет}$	6,27±0,10	—	—6,45±0,15	—18,5±0,6	—6,22±0,16	2,22±0,06	—	—	—
	$B_{гом}$	6,2±0,1	9,30±0,16	—5,77±0,15	—16,8±0,6	—5,54±0,14	2,24±0,06	0,168±0,003	—	—
БФС-28	$B_{гом}$	8,15±0,04	12,9±0,1	—3,75±0,06	—7,90±0,19	—1,645±0,018	1,73±0,03	0,047±0,001	—	—0,056±0,005
БФС-30	$B_{гет}$	7,3±0,09	—	—3,76±0,08	—7,59±0,08	—	1,83±0,03	0,0703±0,004	—	—0,05±0,01
	$B_{гом}$	7,24±0,08	11,6±0,16	—3,69±0,09	—7,54±0,08	1,70±0,04	1,89±0,03	0,071±0,0015	0,0472±0,002	—0,056±0,005

Отношение средних сечений к сечению деления ^{239}Pu и отношение $\langle\Phi_x^+\rangle/\langle\Phi_c^+\rangle$ Таблица 5

Сборка	Ячейка	^{235}U	^{197}Au	^{238}U	$\langle\Phi_x^+\rangle/\langle\Phi_c^+\rangle$
БФС-22	А	1,00±0,02	0,30±0,01	—	0,97±0,03
БФС-23	А	1,03±0,02	0,37±0,01	0,0240±0,0005	—
БФС-26	$B_{гет}$	—	0,69±0,02	—	—
БФС-26	$B_{гом}$	1,03±0,02	0,60±0,02	0,0227±0,0005	0,765±0,025
БФС-27	$B_{гет}$	0,99±0,02	0,51±0,01	0,0300±0,0006	0,80±0,02
БФС-27	$B_{гом}$	0,98±0,02	0,49±0,01 (0,50±0,01) *	0,0322±0,0006	0,80±0,02
БФС-28	$B_{гом}$	0,915±0,020	0,207±0,005 (0,212±0,003) *	0,0341±0,0008	1,01±0,019
БФС-30	$B_{гет}$	0,91±0,02	0,220±0,005	0,0365±0,0008	—
БФС-30	$B_{гом}$	0,92±0,02	0,218±0,005 (0,222±0,003) *	0,0369±0,0007	0,88±0,015

* Отношение измерялось путем определения абсолютных скоростей захватов в золоте и делений в плутонии.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скорины

ной стороны, существенно уменьшить влияние гетерогенности, а с другой — измерить эффекты, обусловленные гетерогенизацией вставок (см. табл. 2). В табл. 4 и 5 даны результаты измерений в гомогенных и гетерогенных вставках. Из табл. 4 и 5 видно, что в некоторых случаях гомогенные вставки значительно изменяют измеряемые функционалы. Оценки влияния конечных размеров гомогенных вставок и величины гетерогенных эффектов в критических сборках БФС-22 и 23 будут даны позже. Другая цель экспериментов — учет конечных размеров образцов.

Существуют различные способы описания расчетных зависимостей эффектов от размеров образца, основанные на том, что спектр нейтронов в образце отличается от спектра до помещения образца. Для нахождения среднего возмущения потока в образце следует учесть резонансное и нерезонансное поглощение нейтронов, их замедление в образце и размножение (в делящихся образцах). Резонансное поглощение учитывалось по приближению Вигнера [14] с использованием теоремы эквивалентности и коэффициентов резонансной самоэкранировки, принятых в системе БНАБ [2, 3].

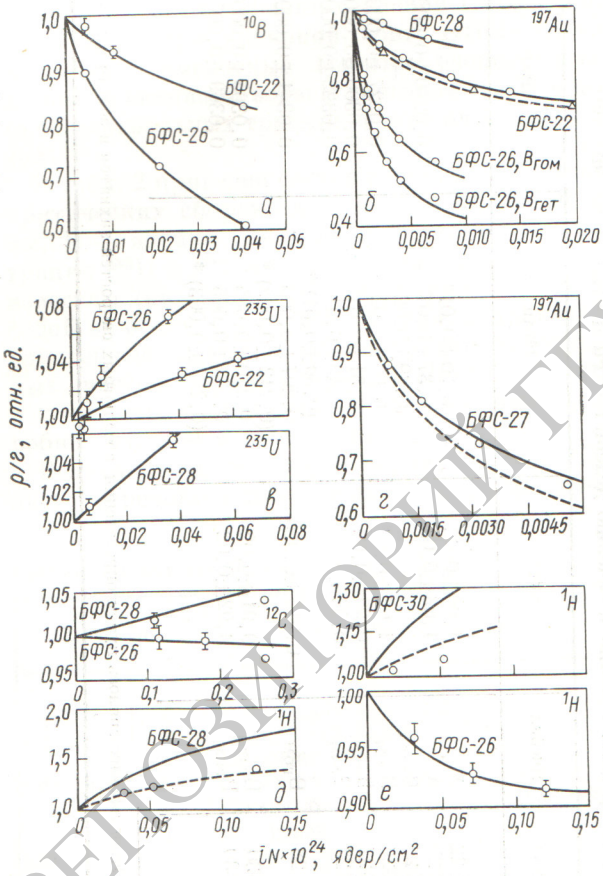
Возмущенный групповой поток нейтронов в образце можно определить как [15]

$$\Phi'_j = \Phi_j \frac{[f_c^j(\sigma_0)\,\sigma_c^j + f_f^j(\sigma_0)\,\sigma_f^j]\,(\sigma_p^j + \sigma_0)}{(\sigma_c^j + \sigma_f^j)\,[f_f^j(\sigma_0)\,\sigma_f^j + f_c^j(\sigma_0)\,\sigma_c^j + f_e^j(\sigma_0)\,\sigma_e^j + \sigma_0]},$$

где σ_c^j, σ_f^j, σ_e^j — средние групповые сечения захвата, деления и упругого рассеяния; f_c^j, f_f^j, f_e^j — соответствующие коэффициенты резонансной самоэкранировки; σ_p — потенциальные сечения рассеяния образца; N — плотность ядер в образце; $\sigma_0 = (lN)^{-1}$; l — средний размер образца. Замедление и размножение нейтронов также учитывалось [15]. Депрессия потока нейтронов вблизи образца учитывалась по методу, описанному в работе [16].

На рисунке представлены измеренные и рассчитанные реактивность и активация различных элементов. Точность расчета зависимости от размера образца обусловлена многими факторами: точностью знания групповых потоков и ценности нейтронов в критической сборке, сечений и коэффициентов резонансной самоэкранировки, правильностью модели описания и т. п. Поэтому формальный подход (без знания экспериментальной зависимости) может привести к ошибкам экстраполяции. Так, на рисунке (*д* и *е*) видно, что для БФС-26 расчетное описание зависимости является хорошим, а для БФС-28 и 30 расхождение весьма заметное. Как будет показано далее, значение реактивности водорода в БФС-28 и 30 плохо предсказывается расчетом. Изменения сечений, приводящие к таким изменениям потока и функции ценности нейтронов, которые уменьшают расхождение между экспериментом и расчетом самих коэффициентов реактивности водорода, способствуют лучшему описанию зависимости образца (пунктир на *д* и *е*) [7].

Таким образом, правильным описанием зависимости от размеров образца является итерационный процесс. Полученные результаты экстраполяций являются, на наш взгляд, надеж-



Зависимость удельной (на единицу массы) реактивности и активации образцов от их размеров:

а — ———, ○ — рассчитанная и экспериментальная реактивности; *б* — ———, ○ — рассчитанная и экспериментальная активации; — — — , △ — рассчитанная и экспериментальная реактивности; *в* — ———, ○ — рассчитанная и экспериментальная реактивности; *г* — ————, ○ — рассчитанная и экспериментальная активации, — — — — расчет активации с увеличенной концентрацией натрия в критической сборке; *д*, *е* — ———, ○ — рассчитанная и экспериментальная реактивности; — — — - расчет реактивности по измененной системе констант

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скорины

Сравнение некоторых расчетных и экспериментальных результатов Таблица 6

Материал	Сборка, ячейка					
	БФС-22	БФС-23	БФС-26	БФС-27	БФС-28	БФС-30
	А		$B_{гом}$			
	$(\rho_i/\rho^{235})_{экс}/(\rho_i/\rho^{235})_{расч}$					
^{239}Pu	1,03	1,035	1,015	1,00	1,05	1,02
^{197}Au	1,27	1,37	1,25	1,43	1,14	1,22
^{10}B	1,27	1,38	1,20	1,20	1,21	1,32
^{6}Li	—	—	1,16	1,12	1,00	1,01
^{1}H	—	—	1,03	1,12	1,64	1,49
^{12}C	—	—	1,11	1,08	4,7	1,85
^{208}Pb	—	—	—	—	—	1,0
^{23}Na	0,33	—	—	—	—	3,8
^{238}U	—	1,08	—	—	—	0,82
	$(\langle\sigma_i\rangle/\langle\sigma_f^{235}\rangle)_{экс}/(\langle\sigma_i\rangle/\langle\sigma_f^{235}\rangle)_{расч}$					
^{239}Pu	1,02	1,03	1,12	1,09	1,06	1,03
^{197}Au	1,17	1,15	1,18	1,29	1,10	1,17
^{238f}U	—	0,99	1,03	0,85	0,94	0,89
	$(\langle\Phi_x^+\rangle/\langle\Phi_c^+\rangle)_{экс}/(\langle\Phi_x^+\rangle/\langle\Phi_c^+\rangle)_{расч}$					
—	0,915	—	1,02	1,01	1,01	0,97

ными с точки зрения интерпретации расхождения между экспериментом и расчетом.

В табл. 4 приведены экспериментальные ЦКР делящихся, поглощающих и рассеивающих элементов (в $\beta_{эф}$/моль основного изотопа), экстраполированные к нулевым размерам образца согласно изложенному способу. Приведенные ошибки включают статистические ошибки и ошибки экстраполяции. Среднеквадратические погрешности измерений указаны на рисунке. Как правило, для образцов наименьших размеров они не превышали 1—1,5%.

В отношениях сечений (см. табл. 5) статистические ошибки не превышали 0,5%, ошибки опорных констант 0,5%, погрешности в изотопном составе природного урана 0,5%, ошибки интегрирования по ячейке 1—1,5% *.

Ошибки в $\langle\Phi_x^+\rangle/\langle\Phi_c^+\rangle$ состоят из ошибок отношения ЦКР золота и псевдореактивности калифорниевого источника, ошибок определения абсолютной скорости поглощений в образце золота, используемом при измерении ЦКР золота, и абсолютной активности калифорниевого источника нейтронов.

В табл. 6 проведено сравнение эксперимента и гомогенного расчета для отношений ЦКР и отношений средних сечений в центре реактора. Расчет выполнен в p_1-приближении. Расхождения между расчетными и экспериментальными данными, как правило, превышают в несколько раз экспериментальные погрешности. Можно полагать, что наблюдаемые расхождения в значительной степени обусловлены неопределенностями в системе групповых констант. Для выявления константной составляющей погрешности необходимо учесть ограниченные размеры гомогенных вставок, остаточную гетерогенность, влияние погрешностей с усреднением сечений и т. п. Анализ причин наблюдаемых расхождений будет приведен во второй части работы.

Поступила в Редакцию 27/XI 1974 г.

* Интегрирование проводилось либо путем помещения в межтрубный зазор образцов с длиной, равной длине ячейки (или перемещением меньших по длине образцов), либо путем использования дисков с диаметром, равным диаметру таблеток БФС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Drake M.** Data Formats and Procedure for the ENDF Neutron Cross Section Library. BNL-5027, 1970.
2. **Абагян Л. П. и др.** Групповые константы для расчета ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1964.
3. **Abagyan L. e.a.** In: Proc. IAEA Symp. «Nuclear Data for Reactors — 1970». Helsinki, 15—19 June 1970, v. II, p. 667.
4. **Rowlands J. e.a.** In: Proc. of Intern. Symp. on Physics of Fast Reactors. Tokyo, 16—19 Oct. 1973, rep. A-30, A-33, B-2.
5. **Воропаев А. И. и др.** Препринт ФЭИ-247. Обнинск, 1971.
6. **Дулин В. А. и др.** Препринт ФЭИ-313. Обнинск, 1972.
7. **Doolin V. e.a.** [4], rep. A-26.
8. **Kazanskii Ju. e.a.** [4], rep. B-19.
9. **Лейпунский А. И. и др.** «Атомная энергия», 1974, т. 36. вып. 1, с. 3.
10. **Бондаренко В. В. и др.** «Атомная энергия», 1968, т. 24, вып. 1, с. 82.
11. **Орлов В. В. и др.** Препринт ФЭИ-306. Обнинск, 1972.
12. **Doolin V., Mozhaev V.** «Nucl. Instrum. and Methods», 1972, v. 105, p. 277.
13. **Дулин В. А. и др.** Препринт ФЭИ-422. Обнинск, 1973.
14. **Дреснер Л.** Резонансное поглощение в ядерных реакторах. М., Госатомиздат, 1962, с. 67 и 77.
15. **Дулин В. А., Мамонтов В. Ф.** Препринт ФЭИ-392. Обнинск, 1973.
16. **Бекурц К., Виртц К.** Нейтронная физика. М., Атомиздат, 1968.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скорины