

2

SIU8505271

Фонд научной литературы Государственной Академии
Институт атомной энергии
Москва, В. Курчатов

А.М. Богомолов, А.С. Каминский,
А.Д. Молодцов, В.А. Павшук, В.М. Талызин,
Л.Я. Тихонов, А.В. Черепанов

ИАЭ-3830/4

**ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ
ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ТВЭЛОВ ВТГР НА КРИТИЧЕСКИХ СБОРКАХ**

Москва 1983

УДК 621.039.54

Ключевые слова: ВТГР, критическая сборка, твэл, микротвэл, исследование, гомогенизация, расчет, эксперимент.

Рассмотрена возможность моделирования твэлов ВТГР на критических сборках без использования микротвэлов и с топливной матрицей из фторопласта-4 вместо графита. Приведены результаты экспериментальных оценок макроскопических сечений взаимодействия нейтронов с фторопластом-4 и данные испытаний образцов из композиции двуокись урана — фторопласт-4 на радиационную стойкость и влагопоглощение.

ВВЕДЕНИЕ

Тепловыделяющий элемент разрабатываемых высокотемпературных реакторов с гелиевым теплоносителем представляет собой топливный сердечник, окруженный оболочкой из графита. Топливный сердечник состоит из графитовой матрицы, в которой диспергированы микротвэлы - шарообразные частицы делящегося вещества, окруженные слоями графита и кремния. Конструктивно твэл выполнен в виде шарового или призматического блячка. Технология производства таких твэлов достаточно сложная, а стоимость их высокая. По этой причине, а также из-за того, что исследования на критстендах опережают окончательное освоение технологии изготовления твэлов, в экспериментах на критических сборках ВТГР целесообразно использовать модели твэлов, которые при обеспечении требуемых нейтронно-физических характеристик были бы более дешевыми и простыми по конструкции и технологии изготовления, чем натурные.

Наиболее просто изготовить модель из однородной смеси урана и графита. Однако при прессовании делящегося вещества с графитом для улучшения механических характеристик композиции необходимо добавлять в смесь связующее вещество - водородосодержащую смолу. Наличие водородосодержащей связки существенно изменяет нейтронно-физические характеристики твэла. Удаление водорода путем нагрева твэла до высоких температур (как это делается с натурными твэлами) усложняет технологию, повышает стоимость изделия. Если в качестве матрицы модели использовать вместо графита фторопласт-4 (политетрафторэтилен, химическая формула CF_2), такая связка не требуется.

По своим нейтронно-физическим свойствам фторопласт-4 близок к графиту, практически не содержит водорода, не смачивается водой

и обладает чрезвычайно низким влагопоглощением, хорошо прессуется [1]. К его недостаткам относится сравнительно невысокая радиационная стойкость: при дозах радиации свыше 10^6 рад фторопласт-4 рассыпается в порошок и выделяет газообразные продукты. Эксплуатация возможна лишь при температурах не выше 100°C , при более высоких температурах может иметь место изменение его свойств [1]. Однако при экспериментах на критсборках указанные предельные дозы радиации и температуры не достигаются. Преимуществом модельных твэлов с топливным сердечником из гомогенной смеси фторопласта-4 и двуокиси урана является то, что технология их изготовления содержит меньшее количество операций (по сравнению с технологией, базирующейся на графите) и позволяет получать более стабильные результаты по плотности, чистоте материалов и геометрическим размерам элементов.

В работе рассмотрена возможность моделирования твэлов ВТГР на критсборках без использования микротвэлов и с матрицей из фторопласта-4, приведены результаты экспериментальных оценок макроскопических сечений взаимодействия нейтронов с фторопластом-4 и данные испытаний образцов из композиции двуокись урана — фторопласт-4 на радиационную стойкость и влагопоглощение.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЭЛОВ ВТГР БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРОТВЭЛОВ

Твэл ВТГР, содержащий микротвэлы, отличается по нейтронно-физическим характеристикам от твэла, в котором микротвэлы гомогенизированы в матрице (при сохранении состава и размеров топливного сердечника), практически только резонансным поглощением нейтронов. Гомогенизация микротвэлов в матрице приводит к увеличению поглощения нейтронов в резонансной области энергий за счет разблокировки резонансов (исключается блокировка резонансных нейтронов в микротвэлах). Обеспечения равенства резонансного поглощения натурному можно достичь соответствующим уменьшением количества замедлителя в топливном сердечнике при гомогенизации в нем микротвэлов, например, путем уменьшения объема топливного сердечника (при сохранении в нем исходного количества топлива) и увеличения объема его графитового окружения для сохранения общего ко-

личества замедлителя в модельном твэле. При этом, поскольку в твэлах ВТГР блокировка нейтронов (кроме резонансной области энергий) слабая (блокировка тепловых нейтронов в топливном сердечнике $\approx 10\%$), такое изменение композиции твэла практически не сказывается на сечениях взаимодействия нерезонансных нейтронов.

Для обоснования возможности использования на критических сборках таких модельных твэлов был выполнен комплекс нейтронно-физических расчетов. Параметры надтепловой области энергий нейтронов определялись (с использованием для расчета резонансного поглощения теорем эквивалентности) по программе НЕКТАР [2]. Константы тепловой области энергий нейтронов получены по программе РИГ [3], которая рассчитывает методом Монте-Карло пространственно-энергетическое распределение медленных нейтронов в системах с произвольной геометрией с учетом особенностей рассеяния медленных нейтронов на графите.

Иллюстрацию возможности реализации нейтронно-физических параметров при гомогенизации микротвэлов в топливном сердечнике выполним на примере твэлов ВГ-400 [4], имеющих следующие параметры.

- диаметр шарового твэла 60 мм;
- толщина внешней графитовой оболочки 5 мм;
- диаметр внутреннего графитового вкладыша 30 мм;
- диаметр микротвэлов 910 мкм;
- диаметр ядер микротвэлов 500 мкм;
- плотность топлива в ядре микротвэлов $8,6 \text{ г/см}^3$;
- плотность графита в шаре $1,65 \text{ г/см}^3$;
- в твэле содержится 6,1 г урана 10% обогащения по урану-235.

Как следует из результатов нейтронно-физических расчетов, при гомогенном размещении в топливном сердечнике такого же количества делящегося вещества, что и в твэле ВГ-400, параметры эквивалентного по нейтронно-физическим свойствам модельного твэла следующие:

- диаметр шарового твэла 60 мм;
- толщина внешней графитовой оболочки 12 мм;
- диаметр внутреннего графитового вкладыша 30 мм;
- плотность графита в оболочке и внутреннем вкладыше $1,65 \text{ г/см}^3$;
- плотность графита в топливном сердечнике $1,5 \text{ г/см}^3$.

Уменьшение объема топливного сердечника компенсировано здесь увеличением толщины внешней графитовой оболочки.

В табл. 1 приведены нейтронно-физические параметры следующих твэлов:

- содержащих микротвэлы;
- с гомогенным размещением материалов микротвэлов и графитовой матрицы в топливном сердечнике (при сохранении его объема и состава);
- с предложенным способом гомогенизации микротвэлов в топливном сердечнике.

Т а б л и ц а 1. Нейтронно-физические параметры твэлов

Параметр	Натурный твэл с микротвэлами	Твэл с гомогенным размещением топлива в матрице	Предлагаемый модельный твэл
Количество урана в твэле, г	6,1	6,1	6,1
Обогащение по урану-235, %	10	10	10
K_{∞}	1,601	1,492	1,601
$I_{эф}$	82,3	117,7	82,3
ρ	0,847	0,788	0,847
μ	1,004	1,004	1,004
$\Sigma_{a,b}^b$	$5,63 \cdot 10^{-4}$	$7,26 \cdot 10^{-4}$	$5,63 \cdot 10^{-4}$
$\nu \Sigma_f^b$	$3,82 \cdot 10^{-4}$	$3,92 \cdot 10^{-4}$	$3,82 \cdot 10^{-4}$
$\Sigma_{ув}^b$	$2,19 \cdot 10^{-3}$	$2,35 \cdot 10^{-3}$	$2,19 \cdot 10^{-3}$
D^b	1,50	1,50	1,50
Σ_a^T	$3,45 \cdot 10^{-3}$	$3,45 \cdot 10^{-3}$	$3,40 \cdot 10^{-3}$
$\nu \Sigma_f^T$	$6,65 \cdot 10^{-3}$	$6,65 \cdot 10^{-3}$	$6,56 \cdot 10^{-3}$
D^T	1,43	1,43	1,43

Анализ данных табл. 1 показывает, что при гомогенном размещении материалов микротвэлов и замедлителя в топливном сердечнике (с сохранением его объема и состава) существенно изменяются

нейтронно-физические параметры твэла. В то же время предлагаемый модельный твэл позволяет сохранить основные нейтронно-физические свойства (см. табл. 1):

- сечения взаимодействия нейтронов;
- эффективный резонансный интеграл и вероятность избежать резонансного захвата;
- транспортные свойства;
- коэффициенты размножения нейтронов;
- спектральные характеристики.

Это обуславливает и совпадение пространственно-энергетического распределения нейтронов в рассматриваемой и натурной системах.

СРАВНЕНИЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИЙ С МАТРИЦАМИ ИЗ ГРАФИТА И ФТОРОПЛАСТА-4

При расчетном исследовании замены графитовой матрицы на близкую по нейтронно-физическим свойствам матрицу из фторопласта-4 композицию ячейки активной зоны ВТГР можно представить в следующем виде: топливо расположено в сердечнике, который окружен графитом. Поэтому для обоснования возможности замены графитовой матрицы на матрицу из фторопласта-4 при сохранении графитового окружения топливного сердечника сравним нейтронно-физические характеристики следующих композиций:

- топливо в графитовой матрице, окруженное графитом;
- топливо в матрице из фторопласта-4, окруженное также графитом.

Приведенные в литературе данные для ВТГР показывают, что отношение ядерных концентраций графита и тяжелых элементов в активной зоне ВТГР может находиться в диапазоне от ~ 200 до ~ 1000 . В табл. 2 представлены возможные ядерные концентрации основных элементов в топливном сердечнике для матриц из графита и фторопласта-4.

Очевидно, если в сравниваемых системах вероятности взаимодействия нейтронов во всем энергетическом диапазоне совпадают, то нейтронно-физические параметры этих систем идентичны. При некотором различии сечений в какой-то энергетической области необходимо исследовать влияние его на коэффициент размножения нейтронов,

спектральные характеристики и пространственно-энергетическое распределение нейтронов в рассматриваемых системах.

Таблица 2. Ядерные концентрации элементов в топливном сердечнике, $\times 10^{-24}$

Элементы	Топливо в графитовой матрице ($UO_2 + C$)	Топливо в матрице из фторопласта-4 ($UO_2 + CF_2$)
C	$\sim 8 \cdot 10^{-2}$	$\sim 2,5 \cdot 10^{-2}$
F	-	$\sim 5 \cdot 10^{-2}$
UO_2	$\sim (0,3 \div 1) \cdot 10^{-3}$	$\sim (0,3 \div 1) \cdot 10^{-3}$

Сравнение ядерно-физических данных углерода (атомная масса 12) и фтора (атомная масса 19) показывает, что наблюдается некоторое отличие замедляющих и транспортных свойств углерода и фтора. В тепловой и эпитепловой областях энергий нейтронов для рассматриваемых топливных сердечников поглощение нейтронов углеродом и фтором мало по сравнению с поглощением нейтронов ураном. Следовательно, для этой области энергий нейтронов поглощения в обеих системах будут практически совпадать. Однако в быстрой области энергий нейтронов (> 3 МэВ) имеет место существенный вклад фтора в поглощение нейтронов. В то же время, поскольку фторопласт-4 содержит наряду с атомами фтора и атомы углерода, а в обеих рассматриваемых композициях топливные сердечники окружены также графитом, нейтронно-физические свойства в них должны быть близки.

При сравнении нейтронно-физических характеристик рассматриваемых композиций использовались программы WIMS-D [5] и ПЕНАП [6]. Расчет ячеек проведен по программе WIMS-D. Нейтронно-физический расчет аппарата с использованием гомогенизированных констант, полученных по программе WIMS-D, выполнен по двумерной программе ПЕНАП.

Программа WIMS-D проводит нейтронно-физический расчет двумерной (или трехмерной) ячейки для всей области энергий нейтронов. Вначале методом вероятности столкновений решается уравнение пере-

носа в интегральной форме для расчета детального спектра в 69 энергетических группах (42 группы в тепловой области энергий нейтронов и 27 групп в быстрой и промежуточной областях энергий нейтронов) в каждой зоне ячейки. Затем осуществляется свертка сечений в заданное число групп и методом дискретных ординат или методом вероятности столкновений рассчитывается детальное пространственное распределение нейтронов в ячейке, после чего вычисляются гомогенизированные макросечения и различные функционалы. Для расчета резонансного поглощения используются теоремы эквивалентности с уточнением при помощи λ -множителей.

В программе ПЕНАП проводится многогрупповой конечно-разностный расчет реактора в P_1 -приближении итерационным методом переменных направлений.

Сравнение нейтронно-физических характеристик композиций с матрицами из графита и фторопласта-4 выполним на примере модельного твэла ВГ-400 (см. предыдущий раздел). Представляет интерес сравнить для данных композиций макроконстанты в зависимости от энергии нейтронов. Для иллюстрации приведены четырехгрупповые константы. Границы энергетических групп представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Границы энергетических групп

Номер группы	Энергетический интервал
1	10 МэВ – 183 кэВ
2	183 кэВ – 906,898 эВ
3	906,898 – 0,91 эВ
4	< 0,91 эВ

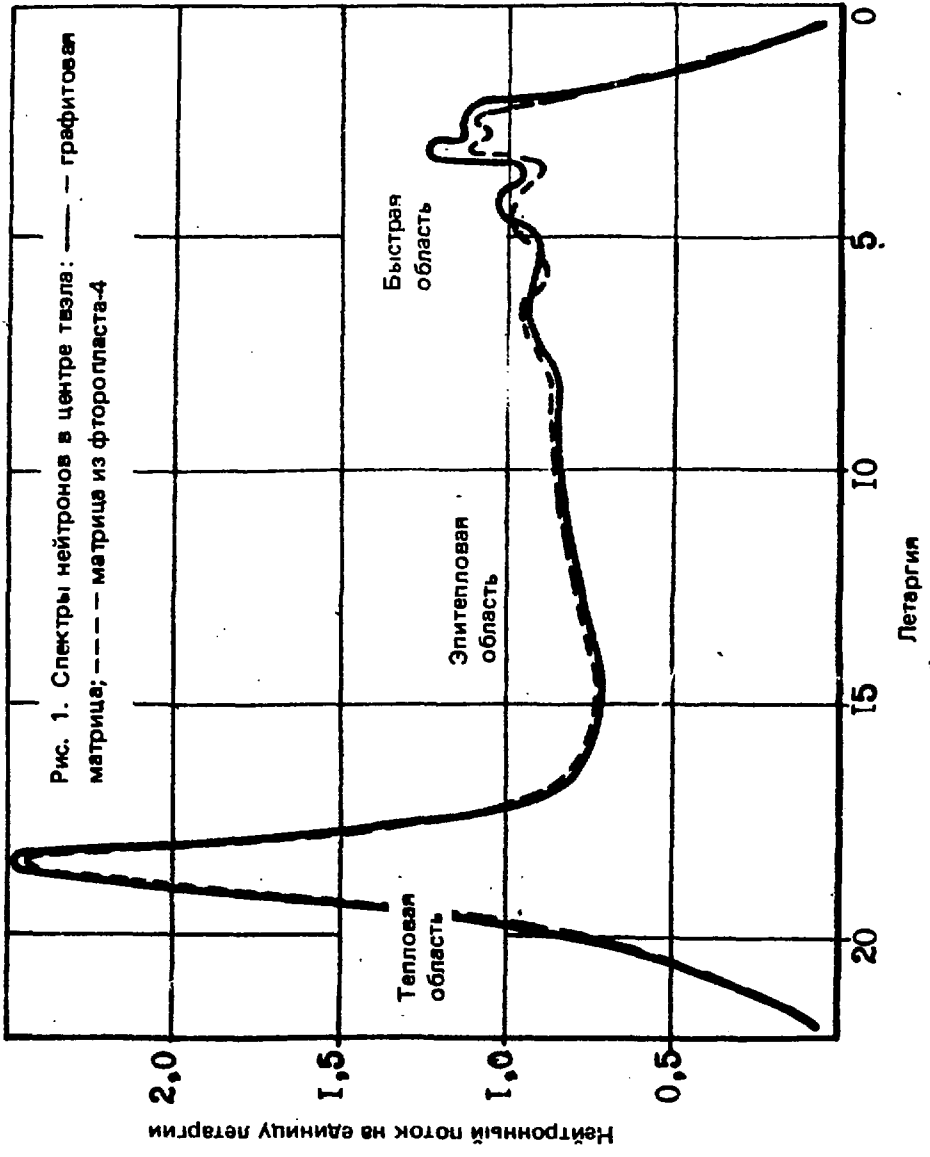
Первая группа содержит почти всю область деления, вторая охватывает замедляющую область. Почти все резонансное поглощение урана-238 осуществляется в третьей энергетической группе. Четвертая охватывает тепловую область нейтронов. В табл. 4 приведены макросечения композиций с матрицами из графита и фторопласта-4 для указанных выше энергетических групп.

Как видно из табл. 4, нейтронно-физические константы композиций с матрицами из графита и фторопласта-4 близки для всех энер-

Таблица 4. Макроскопические сечения композиций с матрицами из графита и фторопласта-4

Параметр	Группа	Графитовая матрица	Матрица из фторопласта-4
Σ_a	1	$3,61 \cdot 10^{-3}$	$6,22 \cdot 10^{-5}$
	2	$9,66 \cdot 10^{-5}$	$9,81 \cdot 10^{-5}$
	3	$1,11 \cdot 10^{-3}$	$1,09 \cdot 10^{-3}$
	4	$3,40 \cdot 10^{-3}$	$3,39 \cdot 10^{-3}$
$\nu \Sigma_f$	1	$6,80 \cdot 10^{-5}$	$6,75 \cdot 10^{-5}$
	2	$7,69 \cdot 10^{-5}$	$7,75 \cdot 10^{-5}$
	3	$6,01 \cdot 10^{-4}$	$5,99 \cdot 10^{-4}$
	4	$6,56 \cdot 10^{-3}$	$6,52 \cdot 10^{-3}$
$\frac{\nu \Sigma_f}{\Sigma_a}$	1	1,884	1,065
	2	0,796	0,790
	3	0,541	0,550
	4	1,929	1,923
D	1	2,88	2,86
	2	1,56	1,57
	3	1,50	1,53
	4	1,43	1,45

гетических групп нейтронов, кроме первой. Отличие констант во второй, третьей и четвертой группах не превышает 2%. В высокоэнергетической области нейтронов сильное поглощение фтора обуславливает более заметное различие макроскопических сечений поглощения нейтронов в рассмотренных системах ($\sim 72\%$). Однако такое различие макроскопических сечений поглощения в высокоэнергетической области нейтронов слабо влияет на коэффициент размножения и спектры нейтронов в данных системах на тепловых нейтронах. Коэффициенты размножения нейтронов в рассмотренных ячейках различаются менее чем на 0,1% $\Delta K/K$. Наблюдается хорошее совпадение спектров нейтронов в центре твэла с матрицами из графита и фторопласта-4 (см. рис. 1). Как следует из результатов расчетов, различие пространствен-



ного распределения энерговыделения в активных зонах с рассмотренными композициями ячеек не превышает 1%.

Таким образом, выполненное исследование показывает возможность использования матрицы из фторопласта-4 вместо графитовой при моделировании нейтронно-физических характеристик ВТГР на критических сборках.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФТОРОПЛАСТА-4

По технологии изготовления модельных элементов фторопласт, входящий в их состав, может иметь микропримеси ряда элементов, что, естественно, отразится на его свойствах, и в частности на сечениях взаимодействия с нейтронами. Результаты количественного определения содержания микропримесей с помощью оптико-спектрального метода показали, что содержание их составляет величины ниже предела обнаружения этим методом. С помощью метода искровой масс-спектрографии определено, что содержание бора и кадмия во фторопласте-4 составляет менее 10^{-5} вес.%. Аналогичные результаты были получены при анализе образцов композиции двуокись урана — фторопласт. Чувствительность определения остальных элементов повысить не удалось из-за сильного наложения линий спектра фторопласта на аналитические линии определяемых элементов. Таким образом, расчет сечений фторопласта по результатам элементного анализа дает лишь предельное значение. В связи с этим представляет интерес прямое экспериментальное определение сечений по известному методу.

Суть метода заключается в следующем. Помещая образец в бесконечную однородную диффузионную среду с равновесным полем тепловых нейтронов, мы искажаем это поле во всех точках пространства. Во-первых, вследствие поглощения нейтронов в образце, а во-вторых, за счет их рассеяния, если поле нейтронов отличается от изотропного. Это вызовет изменение показаний индикатора плотности нейтронов, расположенного в какой-либо точке среды, пропорциональное сечениям поглощения и рассеяния образца, если самоэкранированием нейтронов в образце можно пренебречь. Можно показать, что изменение показаний индикатора при внесении образца объема V будет даваться параметрическим уравнением

$$\Delta J = \{ \alpha_1 \Sigma_a + \alpha_2 \Sigma_s \} V. \quad (1)$$

где α_1 и α_2 — некоторые коэффициенты.

Первое слагаемое в квадратных скобках соотношения (1) характеризует исчезновение нейтронов в области расположения индикатора за счет поглощения и рассеяния образцом нейтронов, идущих вверх (индикатор установлен вверху), а второе — появление из-за рассеяния нейтронов, идущих вниз, минус те, которые поглощаются в образце. Таким образом, последовательно помещая в фиксированную точку нейтронного поля образцы одинаковой геометрии и измеряя с помощью любого индикатора происходящие при этом изменения плотности нейтронов, можно получить коэффициенты α_1 и α_2 (или их соотношение). Затем, внося в ту же точку исследуемый образец, по форме и размерам такой же, как предыдущие, и измеряя эффект от него, можно получить параметрическое уравнение относительно сечений поглощения и рассеяния. Полагая одну из них известным, можно получить другое.

Измерения проводились в тепловой колонне реактора Ф-1, представляющей собой графитовую призму размером 120x120x240 см (много больше размеров образцов и используемого индикатора, так что вопрос об их неточности снимается) и примыкающей к графитовому отражателю реактора. Образцы были выполнены в виде цилиндров диаметром 6 см различной длины (минимум 2 см). В качестве эталонных служили образцы из графита и алюминия, близких по своим рассеивающим свойствам к фторопласту.

Табличные данные по используемым образцам приведены в табл. 5.

Т а б л и ц а 5. Параметры используемых образцов ($v_n = 2200$ м/с)

Образец	C	CF ₂	Al
Плотность, г/см ³	1,6	2,15*	2,7
Σ_a , см ⁻¹	$3 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$ ($\sigma_a^F = 10^{-2} \sigma$)	0,0145
Σ_s , см ⁻¹	0,435	0,368	0,0951

*) Значение взято из паспортных данных на образец из фторопласта-4.

В качестве индикатора плотности тепловых нейтронов использовалась ионизационная камера (измерительная камера), установленная в графитовой призме на расстоянии ~ 90 см от места расположения образцов в экспериментальном канале. Выделение малого эффекта изменения тока измерительной камеры при внесении образца осуществлялось методом исключения основного тока (т.е. тока в отсутствие образца) путем его компенсации камерой (компенсационной), расположенной у реактора, в 5 – 6 м от тепловой колонны. Обе камеры были подсоединены к выходу прибора ПИР-2М, с помощью которого измерялась разность токов этих камер. Величина токового сигнала снималась с диаграммной ленты самописца, подключенного к выходу прибора ПИР-2М. Экспериментально полученная зависимость изменения тока ΔJ от объема образца V обрабатывалась методом наименьших квадратов. Было проведено три серии измерений на разных уровнях мощности. На рис. 2 показана зависимость ΔJ от объема для различных типов образцов (вторая серия). На графиках нанесены экспериментальные точки и прямые, полученные обработкой этих точек методом наименьших квадратов. Результаты других серий отличаются лишь наклоном прямых (обуславливается уровнем мощности). Из данных измерений эталонных и исследуемых образцов рассчитывались значения погрешности сечений τ с помощью параметрических уравнений (1), при этом использовались значения сечений, представленные в табл. 5. Результаты по определению сечения приведены в табл. 6. Расчетная оценка коэффициентов самоэкранирования тепловых нейтронов образцами разного типа и объема с учетом рассеяния [7] показала, что даже в самом неблагоприятном случае самоэкранирование мало и не превосходит 2 – 3%. Эксперименты с образцами различного объема подтвердили справедливость этой оценки и предположение, что изменение тока линейно зависит от объема. Так как используемые материалы близки по своим рассеивающим свойствам и атомному весу, угловые распределения рассеянных нейтронов и коэффициенты α_1 и α_2 практически совпадают для различных образцов. Поскольку при обработке приходится оперировать разностью двух близких величин при вычислении сечения поглощения, то ошибка в его значении в отдельных измерениях достигает 100% и даже более. Для снижения погрешности было проведено три серии измерений и оценкой величины сечения служило среднее значение. В качестве погрешности использовались среднеквадратические ошибки.

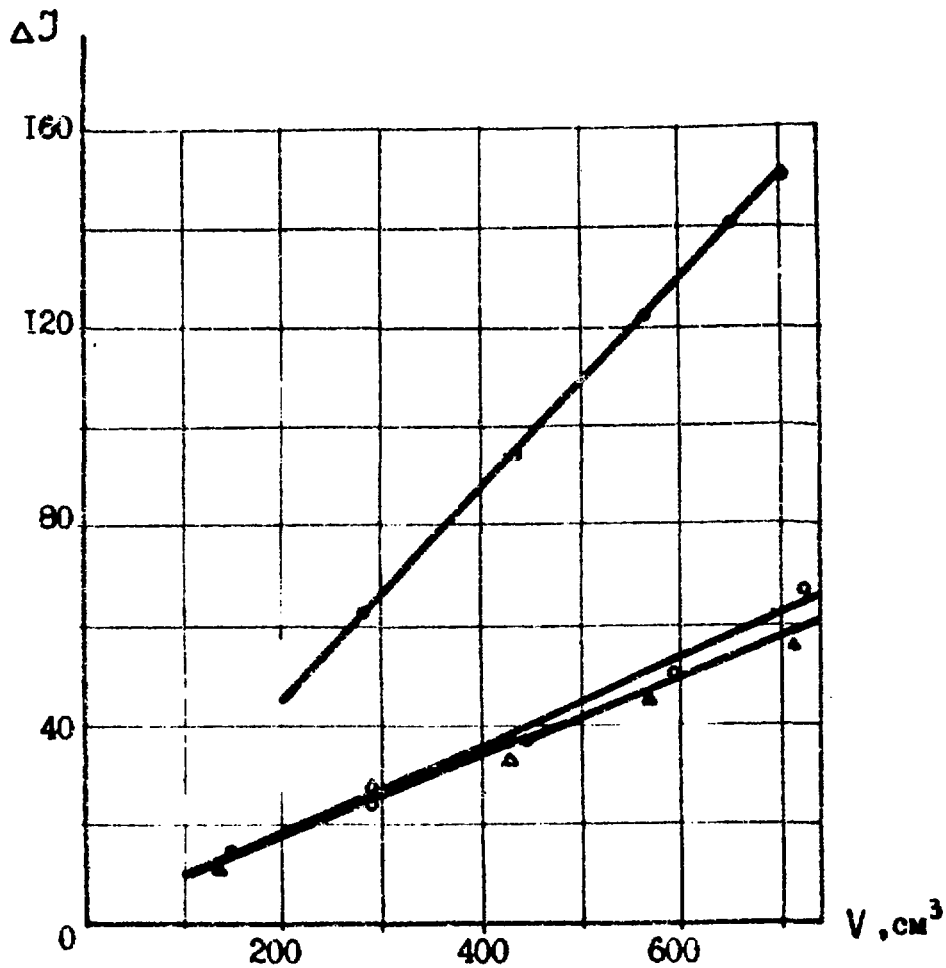


Рис. 2. Зависимость изменений тока от объема различных образцов: ● — алюминий; ○ — графит; Δ — фторопласт

Т а б л и ц а 6. Результаты оценок сечений взаимодействия фторопласта-4 в трех сериях экспериментов

Сечение	1-я серия	2-я серия	3-я серия	Среднее значение
$\Sigma_a, \text{см}^{-1}$	$(2,7 \pm 3,3) \cdot 10^{-4}$	$(9,7 \pm 4,3) \cdot 10^{-4}$	$(7,2 \pm 3,0) \cdot 10^{-4}$	$(6,5 \pm 2,2) \cdot 10^{-4}$
$\Sigma_s, \text{см}^{-1}$:				
при $\sigma_a^F = 10^{-3}$	$0,359 \pm 0,032$	$(0,408 \pm 0,039)$	$(0,443 \pm 0,045)$	$(0,403 \pm 0,024)$
при $\sigma_a^F = 10^{-2}$	$0,321 \pm 0,032$	$(0,377 \pm 0,039)$	$(0,356 \pm 0,023)$	$(0,365 \pm 0,023)$

Полученные оценки свидетельствуют об отсутствии сильно поглощающих нейтроны примесей во фторопласте-4 и в пределах 10% согласуются с табличными значениями сечений.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ ИМИТАТОРА

Невысокая стойкость фторопластов к излучению, отсутствие каких-либо данных по радиационной стойкости композиции $UO_2 - CF_2$ вызвали необходимость экспериментального изучения возможности эксплуатации модельных элементов под воздействием излучений, возникающих при работе критической сборки. Главную роль при этом играло изменение прочности элемента под воздействием радиации. Поскольку в распоряжении имелись лишь опытные образцы малых размеров, то проведение гостированных испытаний на прочность оказалось невозможным. Проверка возможности практической эксплуатации модельных элементов в критической сборке производилась путем испытания на сжатие необлученных образцов и облученных различными дозами радиации, близкими к ожидаемым для такого рода установок, и сравнения полученных результатов с максимально возможными нагрузками на элемент при его эксплуатации в критической сборке ВТГР. Облучение образцов из гомогенной смеси двуокиси урана и фторопласта-4 осуществлялось на исследовательском реакторе ВВР. Критерием выбора условий облучения служило равенство флюенсов нейтронов (и поглощаемой дозы по осколкам деления) соответствующим параметрам при использовании модели в критической сборке. Условия эксплуатации модели (характерные для работы всех аналогичных установок) в критсборке представлены в табл. 7.

Т а б л и ц а 7. Условия эксплуатации модели в критсборке стенда ГРОГ

Полное время эксплуатации	Количество пусков в неделю	Длительность одного пуска	Мощность критсборки	Флюенс нейтронов	Интегральная доза по осколкам деления
10 лет	2	3 ч	100 Вт	10^{15} нейтр./см ²	$2,5 \cdot 10^7$ рад

Опытные образцы были выполнены в виде прямоугольных параллелепипедов. Испытывались образцы с 10%-ным обогащением по урану-235 и с естественным ураном. Характеристики, усредненные по 11 опытным образцам, даны в табл. 8.

Т а б л и ц а 8. Характеристики опытных образцов

Средние размеры образца	Площадь приложения нагрузки	Вес образца	Общее [†] содержание урана
5 x 10 x 20 мм	1 см ²	2,8 г	4,5 г

[†] Значения взяты из паспортных данных.

При расчетах на прочность использовались точные размеры каждого испытываемого образца. Для выбора условий облучения и оценок полученных образцами доз была определена абсолютная плотность потока тепловых нейтронов в точках расположения образцов в экспериментальном канале ВВР. Абсолютная плотность потока тепловых нейтронов определялась по измерению активности золотых индикаторов методом β - γ совпадений [9]. Скорость деления в образце оценивалась исходя из теоретической модели Весткотта [9] при температуре нейтронного газа, равной $\sim 47^\circ \text{C}$ (температура замедлителя 40°C), полученной из расчета на ЭВМ. Необходимые коэффициенты и поправки также взяты из работы [9]. Облучению подвергались два типа образцов с обогащением 10%, несколько отличающиеся по технологии изготовления (тип I и тип II). Образцы типа I прошли полимеризационный отжиг, а образцы типа II — нет. Ожидалось, что отожденные образцы обладают большей прочностью. Визуальный осмотр образцов не выявил каких-либо нарушений. Испытания на прочность (на сжатие) проводилось на силовой установке ПРВ-302. Испытания велись при температуре 20°C до разрушения образца (разрушение образцов с естественным обогащением не было достигнуто). Типичные диаграммы испытаний показаны на рис. 3. По полученным данным были рассчитаны:

— предел прочности σ_B (кг/см²) — условное напряжение, которое выдерживает образец до разрушения (появления первой трещины);

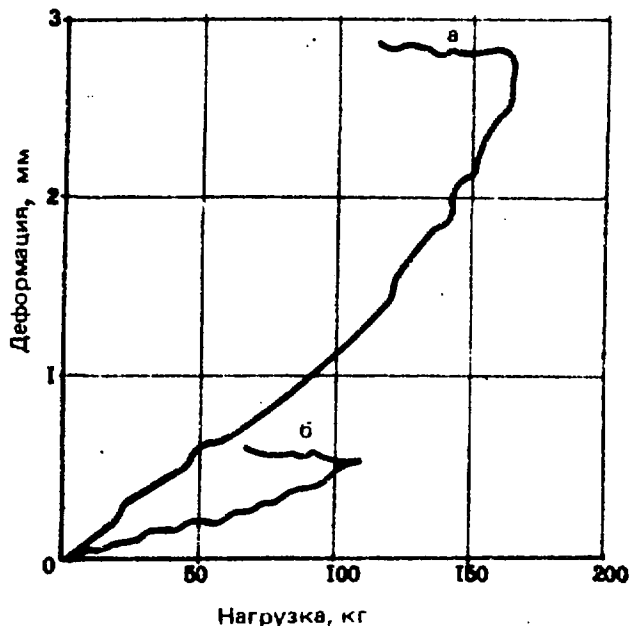


Рис. 3. Типичные диаграммы испытаний: а — тип I (с отжигом); б — тип II (без отжига)

— предел текучести $\sigma_{0,2}$ (кг/см²) — условное напряжение, при котором остаточная деформация равна 0,2%;

— условный предел упругости $\sigma_{0,002}$ — напряжение, при котором появляются первые признаки остаточной деформации (обычно принимается остаточная деформация, равная 0,002%);

— допускаемое напряжение $[\sigma]$ — отношение напряжения, соответствующего пределу текучести, к заданному коэффициенту запаса n . Коэффициент запаса отражает условия эксплуатации изделия: срок службы, особенности конструкции, достоверность определения нагрузок и напряжений и др. Величина коэффициента запаса колеблется при оценках прочности в диапазоне 1,3 — 6. В данной работе было выбрано максимальное из рекомендованного диапазона значение коэффициента запаса $n = 6$ для образцов типа I, а для образцов типа II $n = 10$. Последнее связано с тем, что образцы типа II (не прошедшие отжиг) не имеют области пластичной деформации и для них можно определить только предел прочности σ_B (а не предел текучести), который и использовался при расчете допустимого напряжения. Результаты обработки диаграмм испытаний и определение вышеупомянутых параметров в зависимости от дозы облучения даны в табл. 9.

Т а б л и ц а 9. Результаты оценок прочностных характеристик образцов из гомогенной смеси $UO_2 - SF_2$

Флюенс нейтронов, нейтр./см ²	Интегральная доза по осколкам деления, рад	Естественная смесь				Обогащение 10%							
		Типа I		Тип II		Типа I		Тип II		Типа I		Тип II	
		$\sigma_{фz},$ кг/см ²	$\sigma_{ф002},$ кг/см ²	$[\sigma],$ п = 6 кг/см ²	$\sigma_{в'},$ кг/см ²	$\sigma_{фz},$ кг/см ²	$\sigma_{ф002},$ кг/см ²	$[\sigma],$ п = 6 кг/см ²	$\sigma_{в'},$ кг/см ²	$[\sigma],$ п = 6 кг/см ²	$[\sigma],$ п = 10 кг/см ²	$\sigma_{в'},$ кг/см ²	$[\sigma],$ п = 6 кг/см ²
0	0	160	145	27	215	99	94	16,5	180	18			
$1,2 \cdot 10^{14}$	$0,25 \cdot 10^7$	-	-	-	200	114	102	19	170	17			
$6 \cdot 10^{14}$	$1,3 \cdot 10^7$	-	-	-	197	94	89	15,7	145	14,5			
$8,9 \cdot 10^{14}$	$2 \cdot 10^7$	150	140	25	195	100	89	16,5	170	17			

Дозы по нейтронам и γ -квантам не оценивались, но они, с одной стороны, явно меньше, чем доза по осколкам деления, а с другой, не меньше тех, которые получит топливо при использовании в критической сборке.

Погрешность определения нагрузок с диаграммы (а следовательно, и расчета величин напряжений) весьма значительна и достигает 25 - 30 кг из-за вида кривой нагрузка - деформация и небольшого масштаба диаграммы. Но представленные в таблице значения оценивались таким образом, чтобы получить заведомо заниженные величины допустимых напряжений. Окончательно при флюенсах нейтронов 10^{15} нейтр./см² и дозах по осколкам до $2 \cdot 10^7$ рад предел прочности и допускаемое напряжение не меньше следующих значений:

Естественная смесь	Обогащение 10%	
	Тип I	Тип II
150 кг/см ²	190 кг/см ²	140 кг/см ²
25 кг/см ²	15 кг/см ²	14 кг/см ²

Как правило, максимально возможная нагрузка на элемент в критической сборке ВТГР не превышает 20 кг, а соответствующее напряжение - 1,5 кг/см², что по крайней мере в 10 раз меньше допустимого для всех типов образцов.

Преимуществом образцов типа II является меньшее количество операций при их изготовлении, а недостатком - хрупкость (отсутствует область пластичной деформации). Из этого следует, что эти образцы могут разрушаться даже при воздействии небольших ударных нагрузок.

Кроме испытаний на прочность были выполнены оценки влагопоглощения опытных образцов модельных элементов. Для этого облученный и необлученный образцы взвешивались, затем погружались в воду и выдерживались в течение 30 сут., после чего снова взвешивались. Взвешивание производилось на аналитических весах типа ВЛАО. В пределах ошибки взвешивания (около $10^{-3}\%$) изменение веса образцов до и после погружения в воду не обнаружено.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведено расчетно-экспериментальное обоснование предложенного метода физического моделирования твэлов ВТГР на критической сборке. При этом вместо твэлов, содержащих микротвэлы, исполь-

зуются модельные твэлы с гомогенным размещением заданного количества делящегося вещества в уменьшенной топливной зоне (сердечнике).

2. Использование в качестве матрицы фторопласта-4 вместо графита обеспечивает стабильные результаты по чистоте, плотности и геометрическим размерам элементов, устраняет такой недостаток графита, как сильное влагопоглощение при эксплуатации. Замена матрицы из графита на матрицу из фторопласта-4 практически не влияет на нейтронно-физические параметры твэла. Так, изменения сечения деления на тепловых нейтронах не превышают 0,6%, а отношение $\nu\Sigma_f/\Sigma_a = 0,3\%$.

3. Экспериментально оцененные значения сечений взаимодействия нейтронов с фторопластом-4 близки к величинам, полученным по табличным данным, что подтверждает правильность выбора исходных данных для расчета.

4. Механические свойства композиции двуокись урана — фторопласт-4, исследованные на опытных образцах, удовлетворяют требованиям эксплуатации в максимально ожидаемых дозах радиации (более $2 \cdot 10^7$ рад) при нагрузках, соответствующих напряжениям не менее 14 кг/см^2 .

Список литературы

1. Справочник по пластическим массам. М.: Химия, 1975, т. 1.
2. Гольцев А.О., Карпов В.А. НЕКТАР -- программа расчета физических характеристик графитовых реакторов с учетом термализации нейтронов и выгорания топлива. Препринт ИАЭ-2795, 1977.
3. Каминский А.С., Майоров Л.В. Программа расчета пространственно-энергетического распределения медленных нейтронов в системах с произвольной геометрией (PIT). Препринт ИАЭ-2777, 1977.
4. Комаров Е.В. и др. Атомная энерготехнологическая установка ВГ-400. Возможные конструкции активной зоны. — Атомная энергия, 1979, т. 47, вып. 2, с. 79 — 83.
5. Askew J.R. et al. A general description of the lattice code WIMS. — J. Nucl. Energy, Oct. 1966, p. 564.
6. Алексеев П.Н., Зарицкий С.М., Шишков Л.Н. Программа расчета

- многогруппового потока и ценности нейтронов и интегралов теории возмущений для двумерной модели реакторов (Программа ПЕНАП-ДТВ). -- Ядерно-физические исследования в СССР, М.: Атомиздат, 1977, вып. 23.
7. Гордеев И.Я. и др. Ядерно-физические константы. М.: Госатомиздат, 1963.
8. Крамер-Агеев Е.А. и др. Активационные методы спектрометрии нейтронов. М.: Атомиздат, 1971.
9. Westcott С.Н. AECL-1101, 1960.

Редактор О.В. Базанова
Технический редактор Н.А. Малькова
Корректор В.П. Горячева

Т-03914. 11.04.83. Формат 60x90/16. Учизд.л. 1,3.
Тираж 136. Индекс 3624. Заказ 1493

Отпечатано в ИАЭ

РУБРИКАТОР ПРЕПРИНТОВ ИАЭ

1. Общая теоретическая и математическая физика
2. Ядерная физика

3. Общие проблемы ядерной энергетики
4. Физика и техника ядерных реакторов
5. Методы и программы расчета ядерных реакторов

6. Теоретическая физика плазмы
7. Экспериментальная физика плазмы и управляемый термоядерный синтез
8. Проблемы термоядерного реактора

9. Физика конденсированного состояния вещества
10. Физика низких температур и техническая сверхпроводимость
11. Радиационная физика твердого тела и радиационное материаловедение

12. Атомная и молекулярная физика
13. Химия и химическая технология

14. Приборы и техника эксперимента
15. Автоматизация и методы обработки экспериментальных данных
16. Вычислительная математика и техника

Индекс рубрики дается через дробь после основного номера ИАЭ.

25 коп.

Индекс 3624

Препринт ИАЭ-3830/4. М., 1983