

УДК 621.039.542.344

Испытания экспериментальных твэлов с карбидным горючим в реакторе БОР-60 до выгорания 3 и 7%

ДАВИДОВ Е. Ф., МАЕРШИН А. А., СЮЗЕВ В. Н., БИБИЛАШВИЛИ Ю. К., ГОЛОВНИН И. С., МЕНЬШИКОВА Т. С.

Опыт эксплуатации карбидной зоны реактора БР-5 и некоторых зарубежных реакторов показал реальную возможность использования карбидного горючего в быстрых реакторах [1—3]. Однако сложность получения монокарбида урана стехиометрического состава, обладающего, как известно, высокой радиационной стойкостью, и недостаточная изученность его свойств — основные препятствия при использовании этого вида горючего. Наряду со стехиометрическим монокарбидом урана большой интерес вызывает применение более простых в изготовлении до- и застехиометрических композиций. Для реализации преимуществ, которыми обладает карбид урана по сравнению с окисным горючим, и создания оптимальной конструкции твэла требуется тщательное экспериментальное изучение ряда вопросов, в частности распухания горючего, газовыделения, совместимости горючего с оболочкой и др.

В настоящей работе представлены результаты материаловедческих исследований твэлов двух сборок, облученных в реакторе БОР-60

до выгораний 3,3 и 7,1% тяжелых атомов. Максимальная линейная мощность, снимаемая с твэлов, не превышала 550 Вт/см; наибольшая температура оболочки составляла 650°С, центра сердечника для твэлов с гелиевым наполнением 1100—1200°С, а с натрий-калиевым наполнением 900—950°С.

Конструкция сборки и твэлов

Сборки содержали 49 твэлов, заключенных в шестигранный чехол из нержавеющей стали 1Х18Н10Т размером «под ключ» 38,0 мм и толщиной стенки 0,8 мм. Твэл представлял собой трубку из нержавеющей стали ОХ16Н15МЗБ наружным диаметром 6,9 мм с толщиной стенки 0,4 мм. В трубку на длину 500 мм загрузались таблетки горючего в виде втулок или брикетов.

Диаметральный зазор между горючим и оболочкой менялся в пределах 0,15—0,4 мм для твэлов с гелиевым наполнением и 0,25—0,6 мм для твэлов с натрий-калиевым наполнением. В нижней части твэлов с гелием и в верхней

Исходные характеристики и результаты исследований твэлов

Номер сборки	Содержание углерода в горючем, вес. %	Вид сердечника	Плотность горючего, г/см ³	Диаметральный зазор, мм	Среда	Газовыделение, % от теоретического	Изменения внешнего диаметра оболочки, %	Скорость распухания горючего, %
Первая (выгорание 3,3% тяжелых атомов)	4,68	Втулка	12,5	0,2—0,4	He	2,3	0	0,5
	4,7	Брикет	12,4	0,2—0,4	He	8,8	0	—
	4,8	Втулка	12,9	0,15—0,25	He	4,3	0	1,2
	4,8	Брикет	12,9	0,15—0,25	He	5,8	0	1,2
	4,91—5,0	Втулка	12,6	0,2—0,4	He	2,3	0	—
	4,91	Брикет	12,6	0,2—0,4	He	10	0	—
	4,9	»	12,5	0,6	Na—K	1,7	0	—
	5,1	»	12,8	0,25	Na—K	1,2	0	—
Вторая (выгорание 7,1% тяжелых атомов)	4,68	Втулка	12,5	0,2—0,4	He	4,0	0	0,9
	4,7	Брикет	12,4	0,2—0,4	He	6,8	0	—
	4,8	Втулка	12,9	0,15—0,25	He	4,6	0,2—0,6	1,6
	4,8	Брикет	12,9	0,15—0,25	He	6,0	0,3—0,7	—
	4,91—5,0	Втулка	12,6	0,2—0,4	He	4,5	0,2—0,4	1,5
	4,91	Брикет	12,6	0,2—0,4	He	9,0	0,4	—
	4,8	»	12,8	0,5	Na—K	1,0	0,4	—
	4,95	»	12,8	0,25	Na—K	3,0	0,3	—
	5,0	»	12,8	0,5	Na—K	1,1	0,3	—

части твэлов с натрий-калием предусмотрен компенсационный объем для сбора газообразных продуктов деления. Содержание углерода в горючем менялось от 4,68 до 5,1 вес.%. Обогащение горючего по ^{235}U составляло 90%. Плотность горючего была равна 90—96% от теоретической.

Исследование твэлов

Первичные исследования. При осмотре сборок наружных повреждений не замечено; все твэлы оказались герметичными.

Наружный диаметр оболочек твэлов первой сборки (см. таблицу) остался прежним, а у твэлов второй сборки был в пределах 6,88—6,94 мм. При этом максимальное увеличение диаметра наблюдалось в центре столба горючего, т. е. в зоне максимального выгорания, и уменьшалось к его концам. Наибольшая деформация оболочки не превышала 0,8%.

Количество газообразных осколков деления, выделившихся под оболочку, незначительно и составило 1—3% при температуре центра сердечника $\sim 1000^\circ\text{C}$ (твэлы с натрий-калиевым наполнением) и 4—10% от теоретического при температурах ~ 1100 — 1200°C (твэлы с гелиевым наполнением). Малый выход газообразных осколков деления свидетельствует о высокой удерживающей способности карбидного горючего при температурах меньше температуры рекристаллизации.

Полученные результаты по определению газообразования, изменения внешнего диаметра оболочки, а также данные по распуханию горючего представлены в таблице.

Изучение распределения осколков деления по высоте активной части твэлов показало, что они не мигрируют в направлении оси. Типичные результаты показаны на рис. 1 (плотность горючего $12,6\text{ г/см}^3$, содержание углерода 5,0 вес.%, выгорание 7,1% тяжелых атомов).

Металлографическое исследование горючего проводилось на образцах, вырезанных в различных сечениях по высоте активной части твэла. Установлено, что в процессе работы происходит растрескивание таблеток (рис. 2) в результате термических напряжений, возникающих при остановках реактора.

Высокая способность карбида урана удерживать газообразные осколки деления газа приводит к образованию пористости преимущественно в центральной части сердечника. Крупные поры, расположенные по границам зерен, образуют как строчечную конфигурацию, так и при

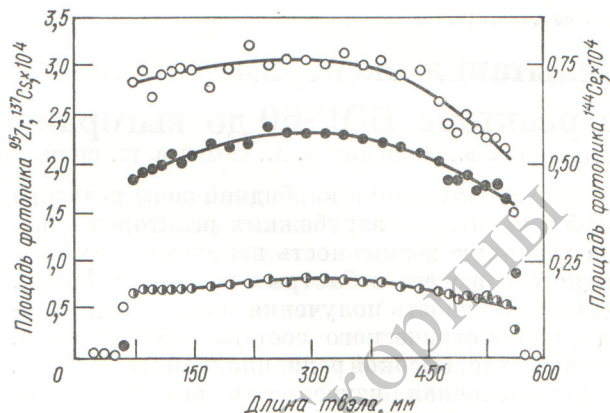


Рис. 1. Распределение осколков деления по длине активной части твэла (○ — ^{137}Cs ; ● — ^{97}Zr ; ◐ — ^{144}Ce)

слиянии вытянутые полости, а мелкие — локализованы в теле зерна (рис. 3).

Горючее достехиометрического состава с исходной крупнозернистой структурой, характеризующейся небольшим числом крупных пор по границам и скоплением мелких пор внутри зерен, при температурах центра сердечника ~ 1100 — 1200°C претерпевает дополнительное спекание, в результате которого размер внутренней полости сердечника увеличивается от 1,8 до 2,5 мм (см. рис. 2, а). Это согласуется с данными других авторов [4]. Распухание такого горючего в указанных условиях не превышает 1,0% на 1% выгорания.

Поведение горючего застехиометрического и стехиометрического составов в отношении изменений размеров зерен и характера распределения пористости практически одинаково. Наблюдалось некоторое увеличение размера зерна в центральной части сердечника. В периферийной области мелкие поры расположены как по границам, так и внутри зерен. При температурах выше 1050°C происходит укрупнение пор [4] и мелкозернистая структура характеризуется наличием «линзовидных» пор на более «горячих» границах зерен (рис. 4). Распухание сердечников из горючего застехиометрического и стехиометрического составов, определенное гидростатическим методом и количественным металлографическим анализом, составило в среднем $1,5 \pm 0,5\%$ на 1% выгорания.

Взаимодействие оболочки с горючим. Известно, что взаимодействие образующихся осколков деления с оболочкой твэла не играет определяющей роли в твэлах с карбидным горючим. Взаимодействие характеризуется главным образом науглероживанием оболочки со стороны

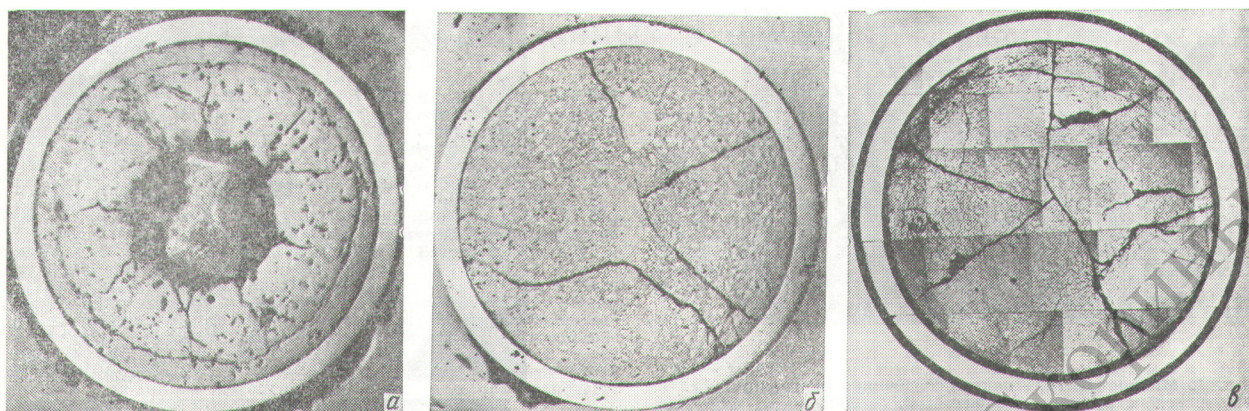


Рис. 2. Макроструктура горючего (выгорание 7,1% тяжелых атомов; $\times 10$):
 а — 4,68 вес. % С, среда He; б — 4,9 вес. % С, среда He; в — 5,0 вес. % С, среда Na — К

сердечника (при содержании углерода в горючем более 4,8 вес. %), в результате чего по границам зерен выделяются карбидные фазы и снижается пластичность оболочки.

Использование эвтектической смеси натрий-калий в качестве теплопроводящей прослойки между горючим и оболочкой имеет и отрицательные стороны. В частности, в результате переноса углерода наблюдалось значительное науглероживание оболочки при содержании углерода в монокарбиде урана выше 5 вес. %. Глубина зоны взаимодействия зависит как от содержания углерода в горючем, так и от условий эксплуатации, т. е. температуры оболочки и сердечника, и времени работы в реакторе [5]. Типичная картина такого взаимодействия показана на рис. 5, а. Видно, что при температуре

оболочки 650° С и содержании углерода в горючем 5,1 вес. % глубина зоны взаимодействия составляет 100—150 мкм, а микротвердость (в принципе она может служить критерием изменения пластичности материала оболочки) для этой зоны равна ~ 700 кг/мм². Для участков вне зоны взаимодействия она составляет ~ 300 кг/мм². Увеличение микротвердости вызвано значительным науглероживанием (до 0,7 вес. %) внутренней поверхности оболочки. Ранее отмечалось [1], что подобные зоны взаимодействия наряду с углеродом содержат уран и осколки деления в количестве 10^{-4} — 10^{-5} вес. %.

При использовании монокарбида урана с < 5 вес. % углерода науглероживание оказывается незначительным. В средних и верхних

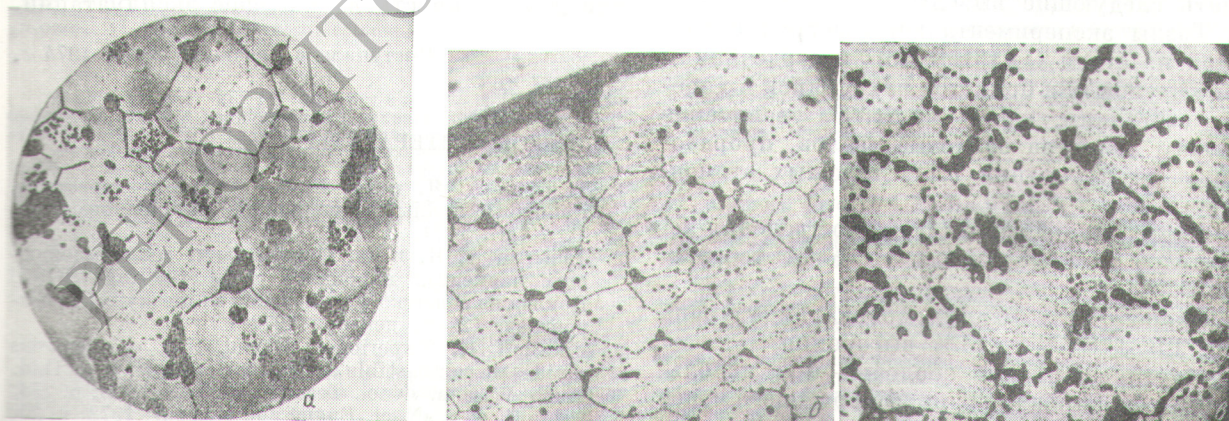
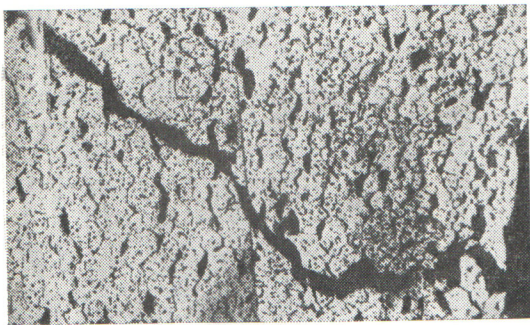


Рис. 3. Микроструктура горючего (4,91 вес. % С, $\times 200$):
 а — исходная; б — периферия, выгорание 7,1% тяжелых атомов; в — центр, выгорание то же



Р и с. 4. Микроструктура центра сердечника (выгорание 7,1% тяжелых атомов; 5,0 вес.% С, $\times 200$)

сечениях твэлов с гелиевым наполнением на внутренней поверхности оболочек наблюдалась темная зона повышенной травимости границ зерен. Идентифицировать эту зону шириной не более 50 мкм не удалось, однако есть сведения [6], что содержание углерода и хрома в ней увеличено примерно на 1—2%.

Из 15 исследованных твэлов только в одном обнаружено взаимодействие, вызванное непосредственной диффузией углерода в оболочку при наличии плотного контакта между ней и горючим (рис. 5, б). Глубина зоны взаимодействия не превышала 50 мкм, а микротвердость составляла ~ 450 кг/мм².

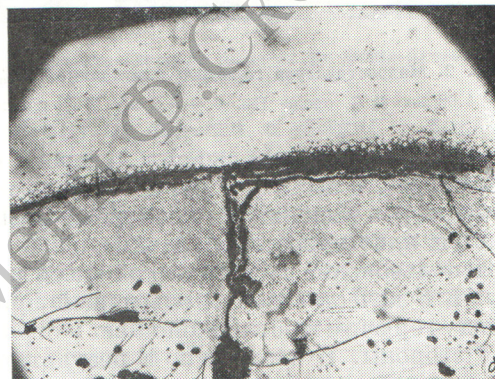
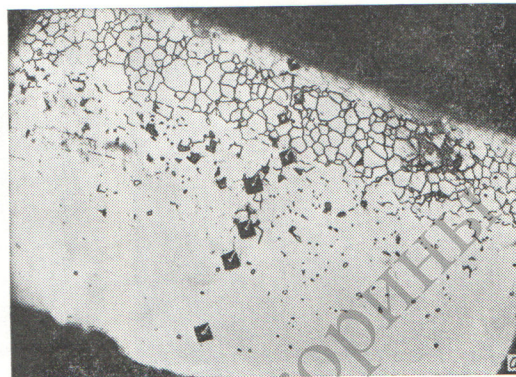
Таким образом, на основании результатов материаловедческих исследований твэлов двух экспериментальных сборок, облученных в реакторе БОР-60 до выгораний 3,3 и 7,1% тяжелых атомов при линейной мощности 450—550 Вт/см и температурах оболочки 550—650° С, можно сделать следующие выводы.

1. Твэлы экспериментальных сборок с оболочкой из стали ОХ16Н15МЗБ и сердечником в виде втулок или брикетов находились в хорошем состоянии. Максимальное увеличение внешнего диаметра оболочки твэлов, проработавших до выгорания 7,1% тяжелых атомов, не превышало 0,8%.

2. Выход газообразных осколков деления незначителен и составляет 1—10% от теоретического.

3. Скорость распухания монокарбида урана равна $1,5 \pm 0,5\%$ на 1% выгорания.

4. Науглероживание оболочки при использовании монокарбида урана, содержащего менее 5 вес.% углерода, происходит на глубину не более 50 мкм и не влияет на свойства материала оболочки.



Р и с. 5. Взаимодействие горючего с оболочкой:

а — выгорание 3,3% тяжелых атомов, среда Na—К, $\times 200$; б — выгорание 7,1% тяжелых атомов, среда He, $\times 100$

5. Анализ состояния исследованных твэлов показал их удовлетворительную работоспособность при рассмотренных параметрах облучения и возможность дальнейшей эксплуатации.

Поступила в Редакцию 23/IX 1974 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ладыгин А. Я. и др. В сб.: Атомная энергетика, топливные циклы, радиационное материаловедение. Т. 2. М., 1971, с. 314.
2. Ладыгин А. Я. и др. Исследование тепловыделяющих элементов карбидной зоны реактора БР-5. Доклад на советско-французском симпозиуме (Дмитровград, 12—15 декабря 1972 г.).
3. Mikailoff H. Experience d'irradiation en neutrons rapides de combustible carbide a joint sodium. — Ibid.
4. Chubb W. e. a. «Nucl. Techn.», 1973, N 18(3), p. 231.
5. Nishio G. e. a. «Nucl. Engng and Design», 1972, v. 22, p. 326.
6. Strasser A. «Trans. Amer. Nucl. Soc.», 1971, v. 14, p. 40.