

УДК 621.039.542.344

Результаты испытания в реакторе БОР-60 ТВЭЛОВ с карбидным топливом

ПЫКАНОВ В. А., ГРЯЗЕВ В. М., ДАВИДОВ Е. Ф., КУЗЬМИН В. И., МАЁРШИН А. А., СЮЗЕВ В. Н., ГОЛОВНИН И. С., МЕНЬШИКОВА Т. С., БИБИЛАШВИЛИ Ю. К., КОТЕЛЬНИКОВ Р. Б., МУХИН В. С., КАЛАШНИК Г. В.

В последнее время большое внимание уделяется исследованию карбидного топлива для энергетических быстрых реакторов с более высокой теплопроводностью и большим количеством тяжелых атомов по сравнению с окисным горючим, что позволяет уменьшить время удвоения, увеличить коэффициент воспроизводства и тем самым повысить эффективность использования быстрых реакторов. В настоящей работе представлены некоторые результаты изучения поведения под облучением карбидного топлива и ТВЭЛОВ на его основе, проработавших в реакторе БОР-60 до выгорания 10% тяжелых атомов (т. а.).

Характеристика пакетов и ТВЭЛОВ. Каждый из четырех облученных пакетов содержал 19 ТВЭЛОВ. В двух пакетах было по три ТВЭЛА с натрий-калиевым подслоем. Зазор между оболочкой и сердечником в остальных ТВЭЛАХ заполнен гелием. Подробно конструкция пакета и ТВЭЛОВ описана ранее [1]. Плотность таблеток топлива составляла 90—96% теоретической, содержание углерода 4,7—5,1 мас.%. С учетом содержания кислорода и азота мольное отношение $(C + O + N)/U$ составляло от 0,98 до 1,08. Сердечники изготовлялись прессованием и спеканием, а также горячим прессованием исходных порошков карбида, полученных методом газовой карбидизации порошка урана и карботермическим восстановлением двуокиси урана [2—4]. Два ТВЭЛА имели смешанное топливо с содержанием ~45 мас.% PuC. Диаметральный зазор между таблетками и оболочкой изменялся от 0,12 до 0,4 и от 0,2 до 0,6 мм соответственно для ТВЭЛОВ с гелиевым и натрий-калиевым подслоем. Обогащение по ^{235}U составляло 90%. Оболочка изготовлялась из нержавеющей стали 0X16H15M3B наружным диаметром 6,9 и толщиной стенки 0,4 мм. В пяти ТВЭЛАХ таблетки топлива имели покрытия на основе хрома и ниобия.

Параметры испытания. Все пакеты испытывались в пятом ряду активной зоны реактора БОР-60 (табл. 1). Распределение нейтронного потока и максимальной температуры оболочки для различных уровней мощности реактора по высоте активной зоны показано на рис. 1.

Параметры испытания ТВЭЛОВ с карбидным топливом Таблица 1

Максимальный режим облучения	Пакет			
	I	II	III	IV
Выгорание, % т.а.	3,5	5,1	7,1	10,4
Флюенс нейтронов $\times 10^{-22}$, нейтр./см ²				
при $E > 0$ МэВ	2,1	3,5	5,1	7,6
при $E > 0,1$ МэВ	1,7	2,8	4,1	6,1
Линейная мощность, Вт/см	550	550	560	700
Температура оболочки, °С	600	600	650	680
Расчетная температура в центре ТВЭЛА с гелиевым подслоем, °С*	1120	1120	1160	1300
Время работы на мощности, ч	5760	8570	11500	13600

* Теплопроводность топлива принималась равной 0,15 Вт/см²·°С, проводимость контакта топливо — оболочка 1 Вт/см²·°С.

Состояние ТВЭЛОВ. Состояние ТВЭЛОВ и пакетов после испытания удовлетворительно. Все ТВЭЛЫ сохранили герметичность. Изменение внешнего диаметра оболочки наблюдалось после выгорания 5% т. а. и составляло при максимальном выгорании 10,4% т. а. 0,8—2,5% (рис. 2).

Оценки, проведенные по изменению плотности оболочки стали методом гидростатического взвешивания, показали, что при флюенсе быстрых нейтронов $6 \cdot 10^{22}$ нейтр./см² ($E > 0,1$ МэВ) увеличение диаметра в результате распухания оболочки (при изотропном распухании $\Delta d/d = 1/3 \Delta V/V$) составляло $(0,8 \div 1,0) \pm \pm 0,2\%$ (температура оболочки 500 °С). Остальная часть изменений диаметра оболочки обусловлена, по-видимому, деформацией стали под давлением распухающего топлива.

Пластическая деформация оболочки, которая вычислялась как разность общего изменения диаметра и прироста диаметра вследствие распухания материала оболочки при выгорании 10,4% т. а., равнялась 0—1,5%, т. е. составля-

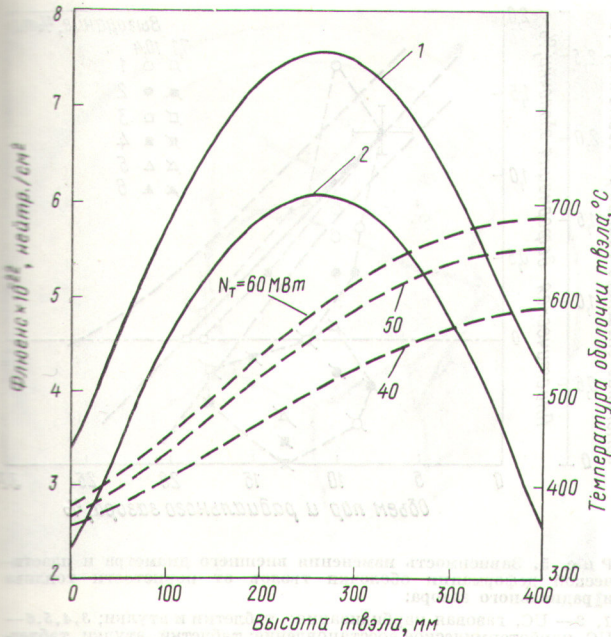


Рис. 1. Распределение нейтронного потока при $E > 0$ (1) и $E > 0,1$ МэВ (2) и максимальной температуры оболочки твэлов по высоте активной зоны

да до 60% общего изменения диаметра оболочки твэла. Изменение внешнего диаметра вследствие распухания материала оболочки и пластической деформации оболочки по высоте активной части твэла, проработавшего до выгорания 10,4% т. а., показано на рис. 3.

Относительный выход осколочных газов из топлива под оболочку твэлов при температуре сердечника менее 1300 °C составил 2—12 и 1—3% для твэлов с гелиевым и калий-натриевым подслоями соответственно (рис. 4) и несколько увеличивался с ростом выгорания.

Баланс изменения объемов в твэле при облучении. Данные об изменении объемов при облучении твэлов с различными карбидными сердечниками приведены в табл. 2.

Деформация оболочки. Экспериментальные данные о деформации оболочек твэлов были исследованы методом регрессионного анализа. Изучалась зависимость относительной деформации от различного вида свободных объемов в твэле, наличия осевого отверстия, особенностей технологии получения карбида и сердечника. Анализ проводился для твэлов, облученных до выгорания

Баланс изменения объемов в твэлах при облучении до выгорания 10,4% т. а. в % к исходному объему внутри оболочки твэла на длине активной части

Часть твэла	До облучения	После облучения	Изменение объема
Оболочка	100/100	104,6/105,2	+4,6/5,2
Сердечник,	88,6/85,8	104,6/105,2	+16,0/19,4
в том числе:			
топливо	73,8/79,7	75,2/81,1	+1,4/1,4
поры	4,8/5,1	17,9/23,9	+13,1/19,7
трещины	0/0	0,6/0,7 **	+0,7/0,7
центральное отверстие	10,1/0	10,9/0	+0,8/0
Зазоры,	11,2/14,0	0/0	-11,2/14,0
в том числе:			
радиальный	6,3/9,1	0/0	-6,3/9,1
осевой	4,9/4,9	0/0	-4,9/4,9

* В числителе — данные для твэлов с втулочным сердечником, в знаменателе — с таблеточными сердечниками.
** Оценка.

7,1 и 10,4% т. а. Для построения регрессионных моделей был применен наиболее эффективный шаговый метод [5]. Для твэлов, облученных до выгорания 10,4% т. а., была найдена слабая зависимость деформации оболочки от эффективной плотности топлива (эффективная плотность — отношение массы топлива к объему внутри оболочки на длине активной части твэла) и не обнаружено влия-

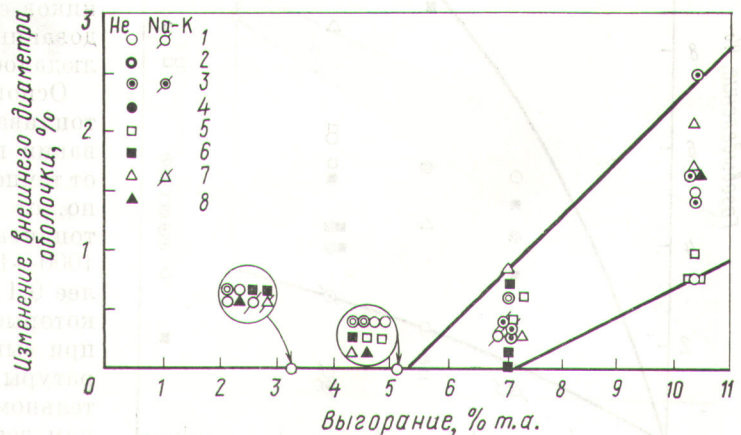
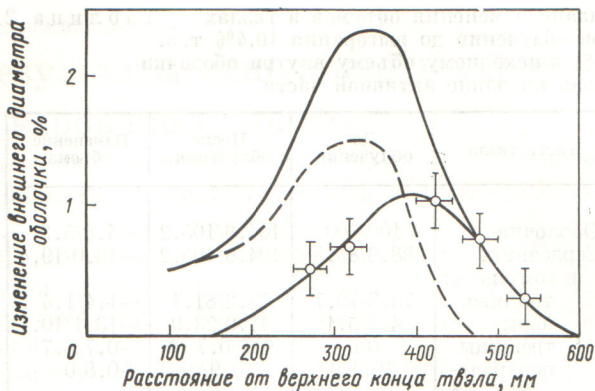


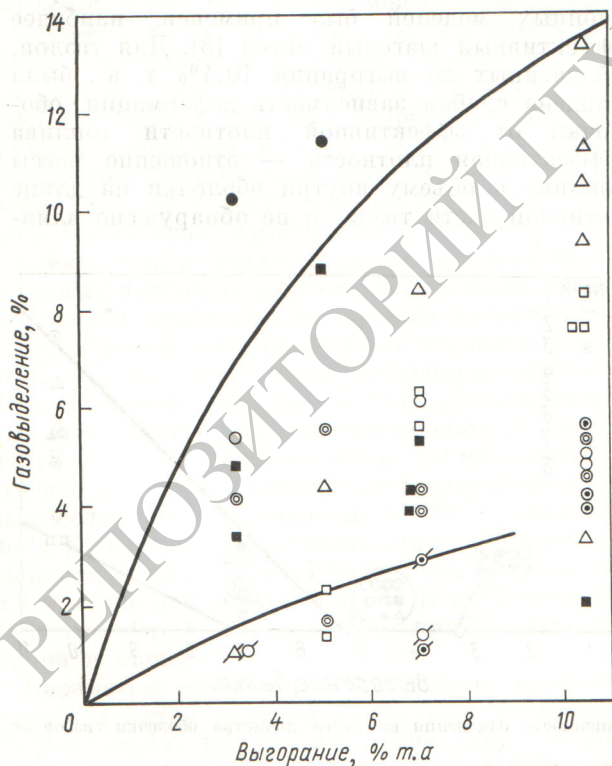
Рис. 2. Зависимость изменения внешнего диаметра оболочки твэлов от выгорания:

1, 2, 3, 4 — газовая карбидизация: таблетки, втулки, таблетки с покрытием и с UC—PuC соответственно; 5, 6, 7, 8 — карботермическое восстановление: таблетки, втулки, таблетки горячего прессования и таблетки с покрытием соответственно

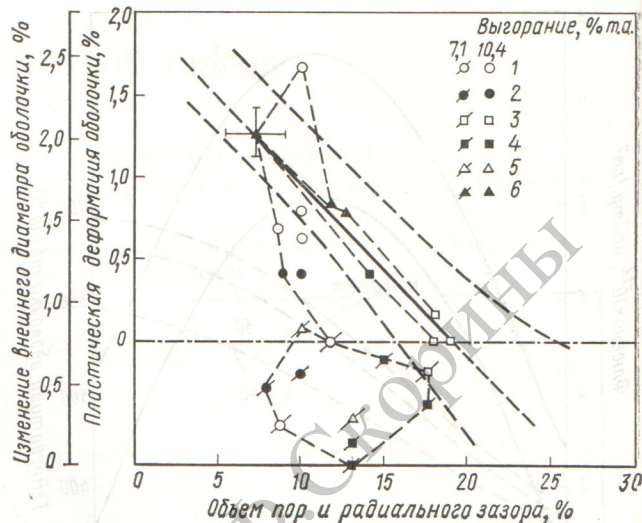


Р и с. 3. Изменение внешнего диаметра (—), пластической деформации (---) и диаметральное распухание оболочки (—○—) по высоте активной зоны твэлов

ния центрального отверстия и технологии получения карбида и сердечников. Наилучшая корреляция наблюдалась для суммы величин пористости топлива и радиального зазора (рис. 5). Как следует из рис. 5, для достижения нулевой пластической деформации (---) при данных условиях облучения суммарный объем пор



Р и с. 4. Зависимость относительного выхода газовых осколков из топлива от выгорания (обозначения см. на рис. 2)



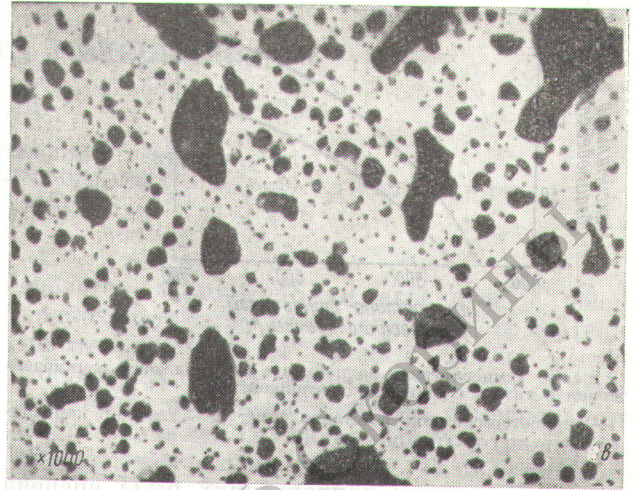
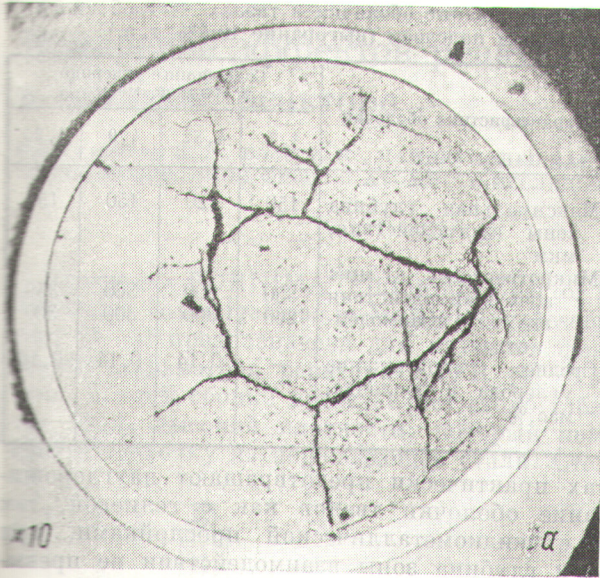
Р и с. 5. Зависимость изменения внешнего диаметра и пластической деформации оболочки твэлов от пористости топлива и радиального зазора:

1, 2 — УС, газовая карбидизация: таблетки и втулки; 3, 4, 5, 6 — УС, карботермическое восстановление: таблетки, втулки, таблетки и втулки горячего прессования, соответственно; + — доверительный интервал 0,9; --- — границы области достоверных значений

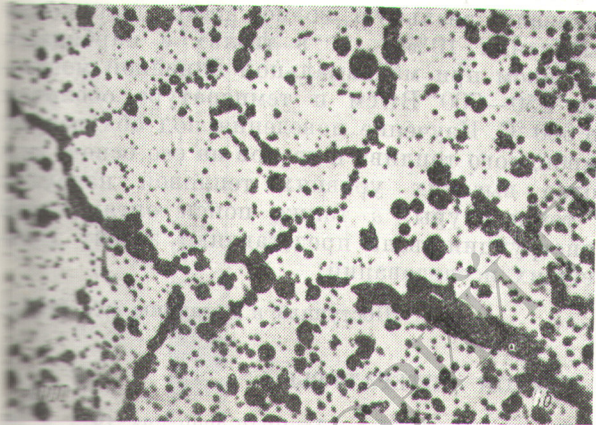
в топливе и радиального зазора должен составлять ~20%.

Изменение структуры топлива. Типичная структура облученного топлива (рис. 6) свидетельствует об отсутствии заметного роста зерен, что согласуется с расчетной оценкой сравнительно низкой температуры топлива (1300 и 1150° С для таблеточных и втулочных сердечников соответственно). В большей части исследованных сечений твэлов после облучения наблюдалось растрескивание сердечника.

Основное изменение структуры карбидного топлива под облучением заключается в образовании пористости. Зависимость этого процесса от температуры облучения, выгорания и, вероятно, от величины зерна и химического состава топлива очень сложна. При температуре выше 1000—1100° С образуются поры диаметром более 0,1 мкм, видимые в оптический микроскоп, которые гомогенно распределяются по зерну при выгорании до 5% т. а. Увеличение температуры и выгорания приводит к предпочтительному образованию крупных пор по границам зерен, а в ряде случаев — к их слиянию на границах, ориентированных перпендикулярно к термическому градиенту (рис. 6, б). При температуре ~1300° С и выгорании 10% т. а. наблюдалось превращение взаимосвязанной по-



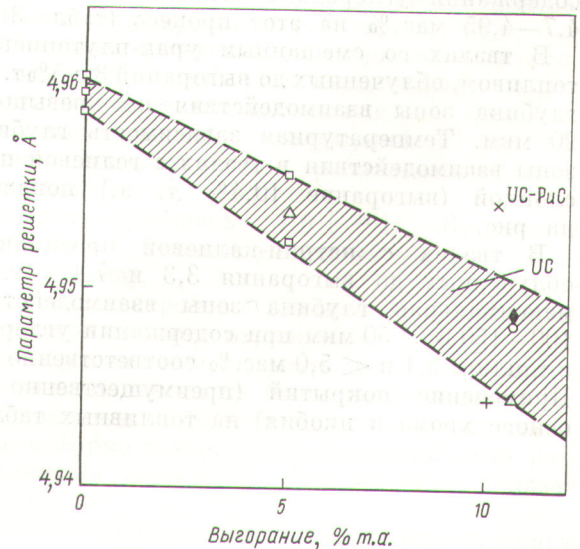
Р и с. 6. Макро- (а) и микроструктура (б, в) топлива после облучения до выгорания 10,4% т. а.



ричности в изолированную (рис. 6, в). Металлографическое исследование облученного топлива не выявило фазы, содержащие продукты деления, что, по-видимому, объясняется их высокой дисперсностью вследствие сравнительно низкой температуры облучения.

Дикарбид урана, который присутствовал в стехиометрическом топливе в виде многочисленных включений, растворялся под облучением. Это, возможно, связано с тем, что кислород, стабилизирующий дикарбид, связывается кислотными элементами [6]. Уменьшение параметра решетки монокрибида (рис. 7) на 0,4% при выгорании 10% т. а. указывает на заметную растворимость в нем продуктов деления (бария, молибдена и др.).

Распухание топлива. Распухание топлива определялось по изменению плотности и геометрических размеров брикетов топлива. При температуре центра сердечника $1200 \pm 50^\circ\text{C}$ средняя скорость распухания составила $1,5 \pm 0,2$ и $1,2 \pm 0,4\%$ на 1% выгорания по изменению плотности и геометрических размеров соответственно. На основании данных по изменению размеров топливного столба в осевом



Р и с. 7. Изменение параметра решетки монокрибида урана в результате облучения:

○ — газовая карбидизация; □ — карботермическое восстановление; △ — горячее прессование; ×, + — имитаторы с 0,3 и > 0,5% O; ◆ — UC + Cr

Науглероживание оболочки в твэлах с гелиевым подслоем (выгорание 10,4% т. а.) Таблица 3

Характеристики оболочки	Содержание углерода в топливе, мас. %			
	4,7	4,82	4,9	4,95
Максимальная глубина зоны взаимодействия, мкм	150	120	150	150
Микротвердость, кг/мм ² : зона взаимодействия вне зоны взаимодействия	350 260	500 300	360 300	350 300
Среднее содержание углерода в оболочке, мас. %	—	0,14	0,14	0,16

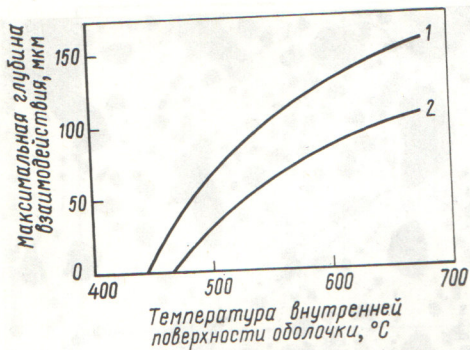


Рис. 8. Температурная зависимость глубины зоны взаимодействия в твэлах с гелиевой прослойкой: 1 — карботермическое восстановление; 2 — газовая карбидизация

и диаметральных направлениях была оценена степень анизотропии распухания, равная 1,3. Среднее значение коэффициента анизотропии показывает, что в радиальном направлении сердечник распухает несколько больше, чем в осевом.

Совместимость топлива и оболочки. Науглероживание оболочки — одна из проблем при использовании карбидного топлива — наиболее опасно в случае применения жидкометаллической теплопроводящей прослойки между топливом и оболочкой. При использовании гелиевой прослойки науглероживание незначительно, причем не обнаружено заметного влияния содержания углерода в топливе в интервале 4,7—4,95 мас. % на этот процесс (табл. 3).

В твэлах со смешанным уран-плутониевым топливом, облученных до выгорания 3 и 5% т. а., глубина зоны взаимодействия не превышала 20 мкм. Температурная зависимость глубины зоны взаимодействия в твэлах с гелиевой прослойкой (выгорание 10,4% т. а.) показана на рис. 8.

В твэлах с натрий-калиевой прослойкой, облученных до выгорания 3,3 и 7,1% т. а., максимальная глубина зоны взаимодействия 100—150 и < 50 мкм при содержании углерода в топливе 5,4 и < 5,0 мас. % соответственно [1]. Применение покрытий (преимущественно на основе хрома и ниобия) на топливных таблет-

ках практически предотвращают науглероживание оболочки твэлов как с гелиевой, так и с жидкометаллической прослойками, при этом глубина зоны взаимодействия не превышает 30 мкм.

Таким образом, испытания в реакторе БОР-60 показали реальную возможность достижения выгорания 10% т. а. в твэлах с карбидным топливом при максимальной линейной мощности 550—700 Вт/см и температуре оболочки до 680 °С. Изучение поведения под облучением карбидного топлива и твэлов на его основе при более высоких уровнях тепловой нагрузки и температуры, а также поиск оптимальной конструкции твэла представляют задачу дальнейших исследований.

Поступила в Редакцию 4/Х 1976 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Давыдов Е. Ф. и др. «Атомная энергия», 1975, т. 39, вып. 1, с. 33.
2. Меерсон Г. А. и др. «Атомная энергия», 1960, т. 9, вып. 6, с. 387.
3. Решетников Ф. Г. и др. «Атомная энергия», 1973, т. 35, вып. 6, с. 377.
4. Головин И. С. и др. «Атомная энергия», 1971, т. 30, вып. 2, с. 211.
5. Дрейбнер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М., «Статистика», 1973.
6. Котельников Р. Б. и др. «Атомная энергия», 1975, т. 39, вып. 4, с. 255.