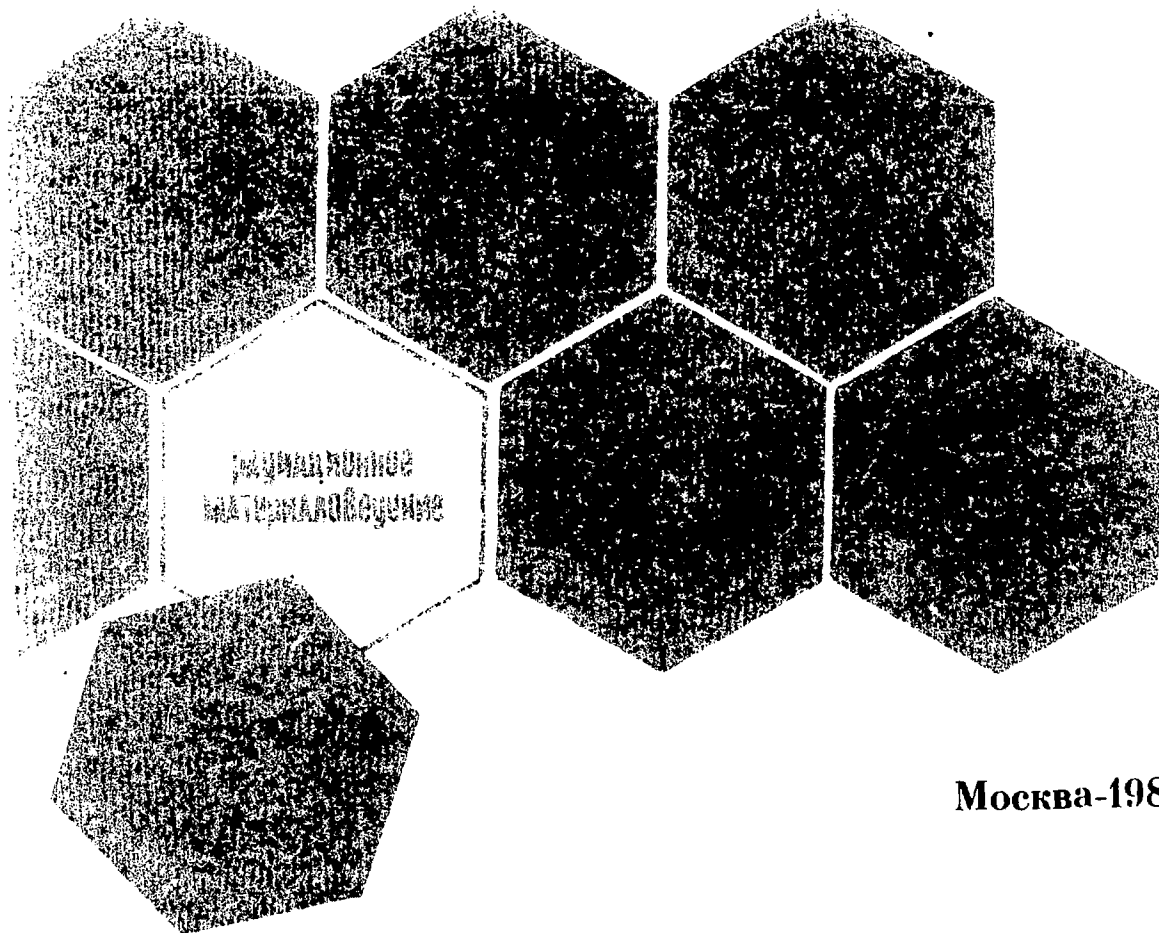


НИИАР-30(676)

Центральный научно-исследовательский институт
информации и технико-экономических исследований
по атомной науке и технике

**Ю.М.Головченко, Е.Ф.Давыдов, А.А.Маёршин,
А.А.Тейковцев, В.А.Цыканов, И.С.Головнин,
Ю.К.Бибилашвили, Р.Б.Котельников, Т.С.Меньшикова,
В.С.Мухин, Г.В.Титов, Б.Д.Рогозкин**

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТВЭЛОВ С КАРБИДНЫМ И КАРБОНИТРИДНЫМ ТОПЛИВОМ



Москва-1985.

УДК 621.039.548:621.039.542.344

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТВЭЛОВ С КАРБИДНЫМ
И КАРБОНИТРИДНЫМ ТОПЛИВОМ: Препринт. НИИАР-30(676)/
К.М.Головченко, Е.Ф.Давыдов, А.А.Маёршин,
А.А.Тейковцев, В.А.Цыканов, И.С.Головнин,
Ю.К.Библашвили, Р.Б.Котельников, Т.С.Меньшикова,
В.С.Мужин, Г.В.Титов, Б.Д.Рогозкин. - М.:ЦНИИАтоминформ,
1985. - 17 с.

Р е ф е р а т

Описаны характеристики, условия испытания и основные результаты материаловедческих исследований твэлов с карбидным и карбонитридным топливом, облученных в реакторе БОР-60 до выгораний 3-10 % при линейной мощности 55-70 кВт/м и температурах оболочки до 720 °С. Установлено, что увеличение диаметра оболочек обусловлено преимущественно давлением распухающего топлива. Рассмотрено влияние исходной эффективной пористости сердечника на деформацию оболочки и стехиометрии топлива на науглероживание стали. Показано, что при данных режимах испытания использование карбидного и карбонитридного топлива с эффективной пористостью 20 % обеспечивает их работоспособность до выгорания 10 %.

Рис.8, табл.4, список лит. - II назв.



Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по атомной науке и технике (ЦНИИАтоминформ), 1985

Ю.М.Головченко, Е.Ф.Давыдов,
А.А.Маершин, А.А.Тейковцев,
В.А.Цыканов, И.С.Головнин,
Ю.К.Бибилашвили, Р.Б.Котельников,
Т.С.Меньшикова, В.С.Мухлин,
Г.В.Титов, Б.Д.Рогозкин

НИИАР-30(676)
УДК 621.039.548:
621.039.542.344

Изучение работоспособности ТВЭЛОВ
с карбидным и карбонитридным топливом

Приведены результаты испытания и исследований ТВЭЛОВ с карбидным и карбонитридным топливом, облученных в реакторе БОР-60. Рассмотрено влияние условий испытания и характеристик топлива на состояние ТВЭЛОВ. Сделан вывод о работоспособности ТВЭЛОВ с карбидным и карбонитридным топливом.

Препринт, 1985

Yu.M.Golovchenko, E.F.Davydov,
A.A.Mayershin, A.A.Teykovtsev,
V.A.Tsykanov, I.S.Golovnin,
Yu.K.Bibilashvili, R.B.Kotel'nikov,
T.S.Men'shikova, V.S.Mukhin,
G.V.Titov, B.D.Rogozkin

RIAR-30(676)
UDC 621.039.548:
621.039.542.344

Studies of the Carbide and Carbonitride Fuel
Element Performance

The results are presented from the tests and investigations of the carbide and carbonitride fuel elements irradiated in the BOR-60 reactor. The effects of both the tests conditions and the fuel characteristics on the fuel element behaviour have been studied. The conclusion has been drawn about the carbide and carbonitride fuel element performance.

Preprint, 1985

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время задача выбора перспективных видов топлива для быстрых реакторов становится все более актуальной с точки зрения достижения высоких показателей эффективности воспроизводства проектируемых АЭС большой мощности с реакторами на быстрых нейтронах. В этой связи значительный интерес представляет карбидное и нитридное топливо, имеющее лучший комплекс теплофизических и ядерных свойств по сравнению с оксидным, что позволяет, согласно оценкам специалистов [1,2], снизить время удвоения примерно в 1,5-2 раза.

Для обеспечения широкого использования карбидно-нитридного топлива в больших быстрых реакторах необходимо успешное решение ряда проблем, в частности, требуется устранить или снизить механическое взаимодействие сердечника с оболочкой, улучшить совместимость топлива с материалами оболочки, а также установить критерии выбора оптимальных параметров топлива и твэлов.

I. ХАРАКТЕРИСТИКА ТОПЛИВА И ТВЭЛОВ, УСЛОВИЯ ИСПЫТАНИЯ

В реакторе БОР-60 были проведены испытания шести экспериментальных сборок с карбидным и карбонитридным топливом. Каждая сборка содержала 19 твэлов с оболочкой из стали ОХ16Н15МЗБ диаметром 6,9 x 0,4 мм. Исходный порошок карбида изготавливался методами газовой карбидизации металлического урана и карботермическим восстановлением

оксидов. Каждый из двух вариантов имеет свои достоинства и недостатки, в частности, оксиды являются относительно дешевым сырьем, а применение металлов позволит, по-видимому, упростить аппаратное оформление технологического процесса и снизить потери делящегося материала. В последнем случае возможен непрерывный технологический процесс с автоматическим регулированием режимов работы аппаратуры [3]. Таблетки топлива изготавливались прессованием с последующим спеканием, а также горячим прессованием [4]. Эффективная плотность (отношение массы топлива к объему внутри оболочки на длине активной части твэла) топлива составляла 10,0–11,6 г/см³, массовое содержание углерода 4,1–5,1 %, UW в $U(CN)$ от 25 до 75 %.

В четырех сборках находилось по три твэла с натрий-калиевой теплопроводящей прослойкой между топливом и оболочкой, остальные твэлы были заполнены гелием. Восемь твэлов имели смешанное топливо с массовым содержанием 15–20 % PuC . Диаметральный зазор топливо-оболочка менялся от 0,12 до 0,4 мм и от 0,2 до 0,6 мм соответственно для твэлов с гелиевой и натрий-калиевой прослойками. Принципиальная схема опытных твэлов показана на рис. I. Параметры испытания экспериментальных сборок представлены в табл. I.

При оценке максимальной температуры сердечника твэлов, соответствующей началу облучения, использовались следующие теплофизические характеристики [2, 5]:

. теплопроводность монооксида урана плотностью 93–97 % от теоретической 20 Вт/(м·°C);

. коэффициент теплопередачи гелиевого зазора 5,0 кВт/(м²·°C);

. коэффициент теплопередачи натрий-калиевого зазора 80 кВт/(м²·°C).

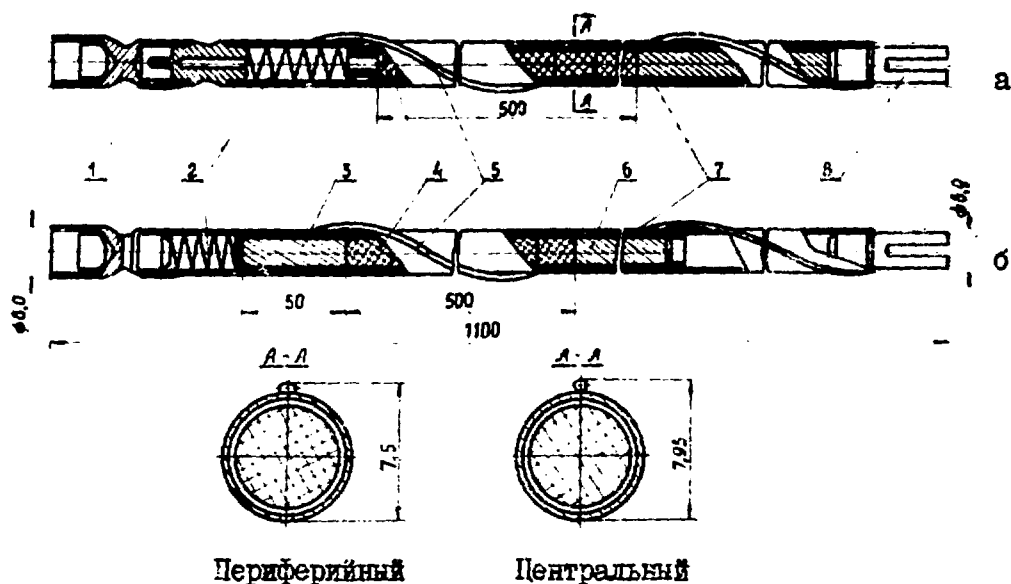


Рис.1. Принципиальная схема опытных твэлов с натрий-калийевой (а) и с галлиевой (б) теплопроводящими прослойками: 1 - верхняя заглушка; 2 - пружина; 3 - верхний отрагатель; 4 - сердечник; 5 - дистанционирующая проволока; 6 - нижний отрагатель; 7 - оболочка; 8 - нижняя заглушка

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Состояние твэлов

Внешнее состояние сборок и твэлов после испытания было удовлетворительным. Повреждений твэлов в процессе эксплуатации не наблюдалось. Изменение внешнего диаметра оболочек твэлов было обнаружено после выгорания 5 % и составило до 2,5 % при максимальном выгорании 10,4 % (рис.2).

Интервал выгорания 5 % при данных условиях испытания, по-видимому, характеризует длительность инкубационного периода, соответствующего заполнению вазора распухающим

Таблица I

Основные параметры испытания экспериментальных сборок с карбидным
и карбонитридным топливом в реакторе БОР-60

Параметр	Сборка					
	I	2	3	4	5	6
Выгорание, %	3,3	4,8	5,1	7,1	8,9	10,4
Флюенс ($E > 0,1$ МэВ), 10^{22} нейтр./см ²	1,7	2,2	2,8	4,1	4,3	6,1
Максимальная линейная мощность, кВт/м	55	61	55	56	65	70
Максимальная температура оболочки, °С	600	720	650	650	720	680
Максимальная расчетная температура центра сердечника твэла, °С:						
с He - прослойкой	1250	1450	1250	1300	1500	1550
с Na-K - прослойкой	800	850	-	830	900	-
Общее время работы на мощности, ч	5760	5200	8570	11500	10100	13600

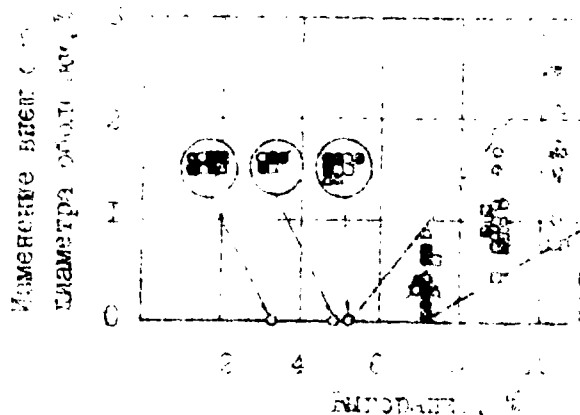


Рис. 3. Изменение внешнего диаметра оболочки топлива в зависимости от % выгорания: \circ — топливо — АС; \square — газовый карбид топлива: \circ — C , \square — SiC ; \circ — таблетки, втулки, таблетки с покрытием, \square — C соответственно; карбо-термическое восстановление: \circ — C , \square — SiC ; \circ — таблетки, втулки, таблетки термического восстановления; \square — таблетки с покрытием и таблетки C соответственно.

Изменение плотности материала оболочки при давлении $6 \cdot 10^{22}$ нейтр./см² ($E > 0,1 \text{ MeV}$) и температуре 1000°C было равно около 3,0%. Остальная часть изменения диаметра оболочек обусловлена радиационной ползучестью стали под действием распухающего сердечника. Таким образом, неупругая деформация оболочки, которая вычислялась как разность между общим изменением диаметра и увеличением диаметра вследствие распухания стали (при условии изотропности распухания изменение диаметра оболочки $\Delta d/d_0$ равно одной трети изменения объема $\Delta V/V_0$) при выгорании 10,4% изменялась от 0 до 1,5%. На рис. 3 показаны общее изменение внешнего диаметра оболочки, увеличение диаметра в результате распухания стали и неупругая деформация по высоте активной части твэла с карбидным топливом (выгорание 10,4%).

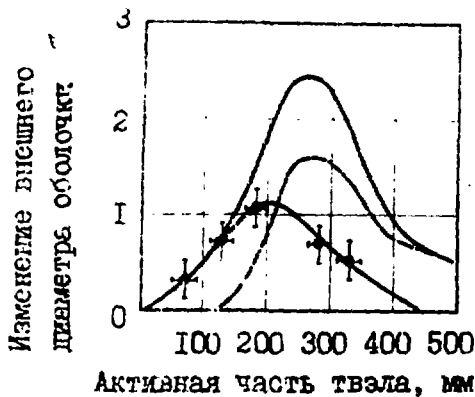


Рис.3. Изменение внешнего диаметра (—), увеличение диаметра в результате распухания стали (—●—) и неупругая деформация (---) оболочки по высоте активной части твэла с карбидным топливом (выгорание 10,4%)

Относительный выход газообразных продуктов деления под оболочку твэлов с урановым карбидным топливом при данных режимах испытания не превышал 13% от теоретического выхода и изменялся в пределах 3-18 и 10-18% в твэлах с карбонитридным урановым и уран-плутониевым карбидным топливом (рис.4).

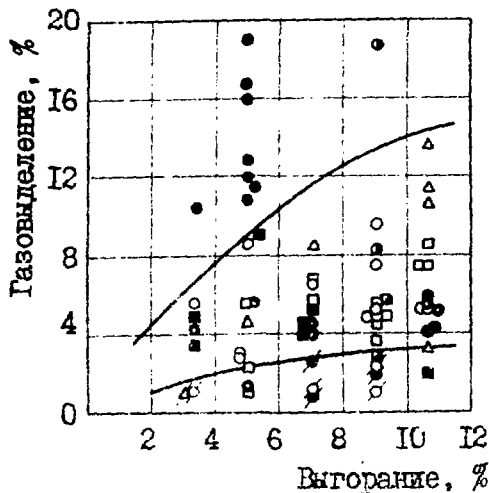


Рис.4. Газовыделение из карбидного топлива: \circ - He; \oslash - Na-K; газовая карбидизация: $\circ, \odot, \ominus, \bullet, \bullet$ - таблетки, втулки, таблетки с покрытием, (UPu)C, UNC соответственно; карботермическое восстановление: $\square, \blacksquare, \triangle, \blacktriangle, \blacklozenge$ - таблетки, втулки, таблетки горячего прессования, таблетки с покрытием и таблетки UNC соответственно

Распухание карбидного и карбонитридного топлива, усредненное по выгоранию и температуре, изменялось в пределах 1,2-2,5 в зависимости от условий испытания и вида композиций (табл.2).

Таблица 2

Распухание карбидного и карбонитридного топлива

Топливо	Выгорание, %	Отношение распухания топлива к выгоранию
UC	10,4	1,2 - 2,5
U(CN)	8,9	1,6 - 2,1
(UPu)C	5,1	1,5 - 1,9

Разброс экспериментальных результатов по газовыделению и распуханию обусловлен различием в исходной плотности топлива, в стехиометрии, в морфологии пористости и уровня температуры сердечника.

2.2. Деформация оболочки

Принимая во внимание, что максимальная неупругая деформация оболочки примерно 1,5 % возникает при выгораниях от 5 до 10 %, получим распухание монокарбида урана, отнесенное к выгоранию в условиях сдерживания оболочкой, равное 0,9. Это значение ниже свободного распухания карбидного топлива при сопоставимых температурах облучения (1,5-2,0 при температурах 1000-1200 °C [6]). Соотношения между выгоранием, пористостью топлива, величиной зазора и

прочностью оболочки настолько сложны, что пока можно сделать только качественные оценки. Для исследования влияния исходных параметров топлива и зазоров на деформацию оболочек был применен регрессионный анализ. Была найдена слабая зависимость величины деформации оболочки от эффективной плотности топлива и не обнаружено влияния таких факторов, как наличие центрального отверстия, технология получения топлива и способ формирования таблеток. Следует отметить, что применение таблеток с центральным отверстием не уменьшает набухания и снижает загрузку топлива. Вследствие этого их использование нецелесообразно.

Наилучшая корреляция деформации оболочки наблюдалась для суммы величины пористости топлива и радиального зазора (рис.5). Из рисунка следует, что для обеспечения нулевой упругой деформации оболочек при выгорании 10 % и данных режимах испытания (линейная мощность 55-70 кВт/м, температура оболочки 600-720 °С) эффективная пористость должна составлять 20 %.

Малая статистика не позволяет произвести дифференциацию между влиянием радиального зазора и пористости топлива на деформацию оболочки, однако, согласно результатам работы [7], для обеспечения безопасной работы звена пористость сердечника должна быть не менее 10 %.

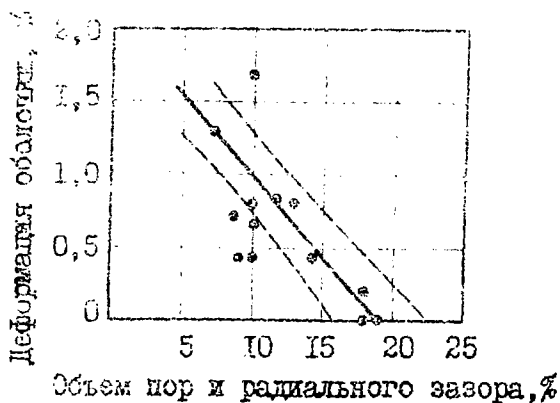


Рис.5. Зависимость упругой деформации оболочки от исходной эффективной пористости (сумма пористости топлива и радиального зазора):
 --- доверительный интервал 0,9; ● - экспериментальные точки

2.3. Поведение топлива

Анализ микроструктуры различных топливных композиций показал, что облучение не привело к заметному росту размера зерен в центральной области сердечника. Это согласуется с расчетной оценкой сравнительно низких температур топлива (табл. I).

Основное изменение структуры топлива заключалось в образовании газовой пористости, характер распределения которой в основном определяется двумя факторами: степенью выгорания и уровнем температуры. Было обнаружено, что поры диаметром 1-5 мкм образуются при температурах 1000-1100 °С. При небольших выгораниях (менее 5 %) они достаточно равномерно распределены по объему зерен. Увеличение температуры выше 1100 °С и выгорания более 5 % приводит к предпочтительному образованию больших пор по границам зерен, а в ряде случаев - к их слиянию (рис. 6, б). В карбонитридном топливе с высоким массовым содержанием нитрида урана (75 %) зона максимального градиента температуры характеризовалась большими, протяженными порами по границам зерен (рис. 6, а).

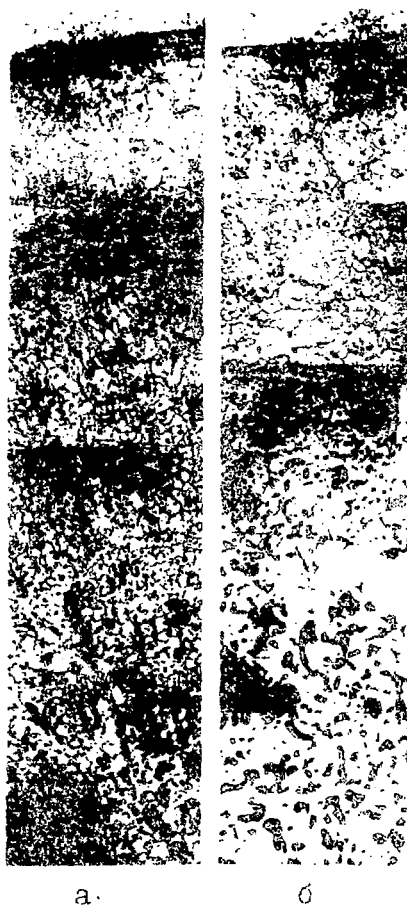


Рис. 6. Микроструктуры карбонитридного (а) и карбидного (б) топлива, х200

Изменение фазового состава застехиометрических карбидных композиций связано с распадом дикарида UC_2 и образованием соединений типа U_2C_3 .

Это обусловлено термодинамической нестабильностью дикарида урана при температурах ниже $1500^\circ C$ и накоплением продуктов деления, связывающих примеси кислорода, который стабилизирует дикарид урана [9]. Процесс распада заканчивается в интервале выгорания 3–5 % и зависит в основном от исходной стехиометрии карбида.

Уменьшение параметра решетки монокарбида на 0,4 % при выгорании 10 % указывает на заметную растворимость в нем продуктов деления (рис.7) [10].

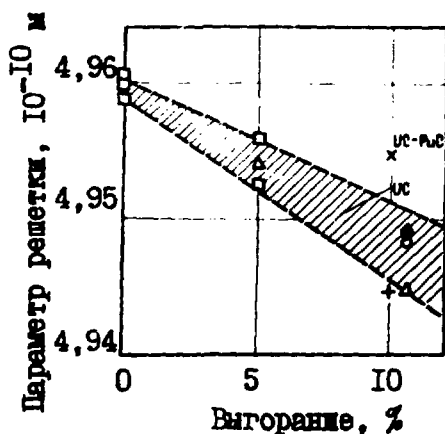


Рис.7. Зависимость изменения параметра решетки карбида урана и плутония от выгорания: O — газовая карбидизация; □ — карботермическое восстановление; Δ — горячее прессование; x, + — имитаторы с 0,3 и >0,5 % O; ◆ — UC+C

2.4. Совместимость топлива и оболочки

Одним из основных и недостаточно изученных вопросов, связанных с переходом к широкому применению карбидного уранового и уран-плутониевого топлива, является обеспечение совместимости с материалами оболочек твэлов, рассчитанных на длительное пребывание в активной зоне реактора. Это вызвано также преимущественным использованием застехиометрических композиций, которые более доступны в изготовлении, чем карбиды стехиометрического состава, облада-

шие, как известно, высокой радиационной стойкостью. Степень взаимодействия (содержание углерода в оболочке и глубина проникновения) в значительной мере зависит от температуры оболочки и топлива, вида теплопроводящей прослойки между сердечником и оболочкой, стехиометрии и содержания примесей в топливе. Проведенные исследования показали [10], что в твэлах с гелиевой прослойкой, проработавших $(10-13) \cdot 10^3$ ч, науглероживание оболочки незначительно, причем заметного влияния стехиометрии топлива в интервале 4,6-5,0 % не обнаружено (табл.3).

Таблица 3

Науглероживание оболочки в твэлах с гелиевой прослойкой (выгорание 10,4 %, температура оболочки 650 °С)

Параметр	Массовое содержание углерода в топливе, %			
	4,6	4,8	4,9	5,0
Максимальная глубина зоны взаимодействия, мкм	150	120	150	150
Микротвердость взаимодействия, ГПа:				
в зоне	3,5	5	3,6	3,5
вне зоны	2,6	3	3	3
Массовое содержание углерода в оболочке, %	0,10	0,14	0,14	0,16

Максимальное содержание углерода в оболочках было почти в два раза меньше предельной массовой концентрации углерода (0,4 %), допустимой для сталей этого класса [11], и не вызвало особых проблем с точки зрения работоспособности твэлов. Глубина зоны взаимодействия в случае уран-углеродистого карбидного топлива (выгорание 9-8 мкд-концентрация урана (выгорание 9 %) и температура 77-78 мка.

При использовании эвтектики натрий-калий в качестве теплопроводящей прослойки между топливом и оболочкой наблюдалось значительное науглероживание оболочки, если массовое содержание углерода в карбиде урана превышало 5%. Металлографическое изучение показало, что дикарбидизация топлива и науглероживание оболочек из нержавеющей стали ОХ16Н15МЗВ вызваны диссоциацией атомов углерода из топлива и их диффузией в оболочку. Максимальная глубина зоны взаимодействия достигала 150 и 50 мкм при эквивалентном массовом содержании в топливе углерода (сумма углерода, азота и кислорода) 5,3% и менее 5,1% соответственно [10].

Использование покрытий на топливе (преимущественно на основе хрома и ниобия) существенно уменьшило степень науглероживания оболочки, при этом глубина зоны взаимодействия была не более 30–40 мкм. Температурная зависимость глубины зоны взаимодействия в твэлах с гелиевой прослойкой при выгорании 10% показана на рис. 8.

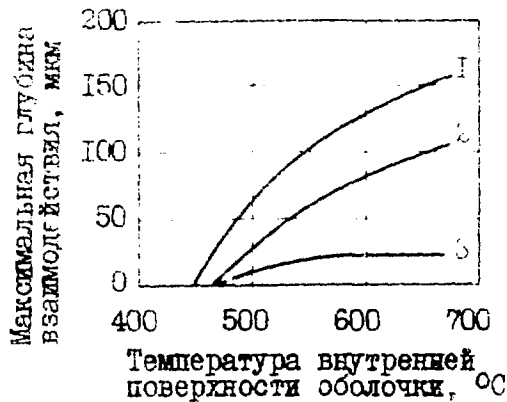


Рис. 8. Зависимость максимальной глубины зоны взаимодействия от температуры оболочки: 1 — карботермическое восстановление; 2 — газовая карбидизация; 3 — таблетки с покрытием

Более высокое значение глубины зоны взаимодействия в оболочках твэлов с топливом, полученным карботермическим восстановлением оксидов урана, обусловлено повышенным содержанием примесей, в частности кислорода, в отличие от карбида, полученного газовой карбидизацией металлического урана.

3. ВЫБОР ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТОПЛИВА И ТВЭЛА

Проведенные испытания экспериментальных сбросов с карбидным и карбонитридным топливом и анализ полученных результатов позволили уточнить основные параметры топлива и твэла, обеспечивающие работоспособность выбранной конструкции твэла до выгорания 10 %. При этом общая концепция вариантов твэлов как с гелиевой, так и с натриевой теплопроводящими прослойками основывалась на условии, что за все время кампании реактора топливный сердечник не вступает в контакт с оболочкой. Основные параметры твэлов представлены в табл.4.

Таблица 4
Основные параметры твэлов с карбидным топливом

Параметр	Варианты твэлов	
	He	Na-K
Диаметр и толщина оболочки, мм	6,9 x 0,4	6,9 x 0,4
Эффективная пористость (сумма пористости топлива и радиального зазора), %	20	15
Эквивалентное массовое содержание углерода ($\Sigma C+O+N$), %	4,6 - 5,0	4,6 - 5,0
Максимальная линейная мощность, кВт/м	65	80
Максимальная температура оболочки, °C	700	700
Максимальная температура центра сердечника, °C	1500	1000

Представленные в табл.4 исходные параметры твэлов являются предварительными и будут уточняться в дальнейшем по мере накопления экспериментальных фактов.

Выбор диаметра оболочки 6,9 мм обусловлен тем, что он соответствует диаметру твэлов реактора БН-600 с оксидным топливом и практически совпадает с интервалом оптимальных значений диаметров твэлов (7-10 мм) с карбидным топливом. Сравнительно невысокая стоимость и простота в изготовлении твэлов с галевой прослойкой и компактным топливом, надежность и высокие эксплуатационные характеристики позволяют рекомендовать этот вариант твэла на первом этапе использования карбидного топлива в быстрых реакторах.

По мере накопления статистических закономерностей влияния вариаций исходных параметров топлива и условий испытания в стационарных и переходных режимах облучения до проектных выгораний на работоспособность твэлов, а также разработки перспективных оболочечных материалов, имеющих допустимые величины распухания при флюенсах $(2-3) \cdot 10^{23}$ нейтр./см², будет осуществлен переход к твэлам с натржевой теплопроводящей прослойкой, которые в максимальной степени позволяют реализовать преимущества карбидно-нитридного топлива.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Успешные испытания в реакторе БОР-60 подтвердили правильность выбранных конструктивных решений и показали реальную возможность достижения выгорания 10 % в твэлах с карбидным и карбонитридным топливом.

Изучение радиационной стойкости карбидно-нитридного топлива и твэлов на его основе при повышенных уровнях тепловых нагрузок и температуры сердечника, проведение массовых испытаний в обоснование оптимальной конструкции твэлов представляют задачу дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование физических показателей эффективности применения различных видов топлива в быстрых реакторах: Предпринт НИИАРа/ Е.А.Грачев и др.- П-39(333). Дивият-ровград, 1977.
2. Noyes R.C. et al. Optimum pin diameter for LMFBR carbide fuels.- Nucl. Tech., 1975, v.26, p.46C-470.
3. Решетников Ф.Г. и др. Технические аспекты получения топлива для различных энергетических реакторов.- Атомная энергия, 1978, т.43, вып.5, с.408.
4. Решетников Ф.Г. и др. Исследование методов изготовления сердечников из монокарбида, мононитрида и карбонитрида урана для твэлов реакторов на быстрых нейтронах.- В сб.: Fuel and Fuel Elements for fast reactors. Vienna, 1974, v.2, p.25.
5. Blank H. On the driving forces for bubble growth and swelling in Mx-type fast breeder fuels.- J. Nucl. Mat., 1975, v.58, p.123-129.
6. Kummerer K. et al. Carbide fuels for fast breeder reactors. KFK-III, 1969.
7. Jang C.I. et al. Sensitivity studies of cladding rupture life with respect to pellet density and cladding thickness for advanced fuel elements.- Trans. Am. Nucl. Soc. 1975, v.22, p.180-181.
8. Лисенко В.А. Результаты исследований твэлов французских реакторов.- Атомная техника за рубежом, 1975, № 8, с.24.
9. Анализ условий получения карбидного горючего повышенной чистоты методом восстановления окислов углеродом и изучение поведения примесей кислорода и углерода в присутствии продуктов деления/ Р.Б.Котельников и др.- Атомная энергия, 1975, т.39, вып.4, с.255.

10. Результаты испытания в реакторе БОР-60 твэлов с карбидным топливом/ В.А.Цуканов и др.- Атомная энергия, 1977, т.42, вып.5, с.378.
11. Nishio G. et al. Estimation of the maximum permissible burnup of uranium carbide fuel pins from the aspect of fuel-clad compatibility under in-pile simulated conditions.- J. Nucl. Engin. and Design., 1972, v.22, p.326.

Рукопись поступила в ОПИНТИ
28.03.83, обработана 24.11.83.
Окончательно подготовлена
авторами 28.06.85.

Юлиан Михайлович Головченко
Евгений Федорович Давыдов
Александр Андреевич Маершин
Александр Алексеевич Тейковцев
Владимир Андреевич Цыканов
Игорь Стефанович Головнин
Юрий Константинович Библиашвили
Рэд Борисович Котельников
Татьяна Сергеевна Меньшикова
Валерий Семенович Мужин
Геннадий Васильевич Титов
Борис Дмитриевич Рогозкин

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТВЭЛОВ С КАРБИДНЫМ
И КАРБОНИТРИДНЫМ ТОПЛИВОМ

Редактор Л.Л.Ляпошкина

Корректор Л.Н.Кривошеева

Подписано в печать 27.09.85. Т-19074. Формат 60x90 1/16.

Печать офсетная. Печ.л. 1,3. Уч.-изд.л. 1,1. Тираж 170 экз.

Зак.тип.№ 1684.

Цена 16 коп.

Индекс 3624.

Отпечатано в Научно-исследовательском институте
атомных реакторов им. В.И.Ленина
433510, Димитровград-10, НИИАР

16 коп.

Индекс 3624

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТВЭЛОВ
С КАРБИДНЫМ И КАРБОНИТРИДНЫМ ТОПЛИВОМ

Препринт. НИИАР-30(676), 1985. 1-17