

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ТОПЛИВА РЕАКТОРОВ НА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНАХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО- ЗОНДОВОГО МИКРОАНАЛИЗА

*Ф.Н. Крюков, Г.Д. Лядов, О.Н. Никитин
ФГУП ГНЦ РФ НИИАР, г. Димитровград, Россия*

Представлены результаты исследования трех групп твэлов: после облучения в энергетических реакторах ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 до максимального выгорания 60 МВт*сут/кг урана; после дополнительного облучения в реакторе МИР до максимального выгорания 70 МВт*сут/кг урана; после облучения в исследовательском реакторе с целью обоснования его эксплуатационной надежности в переходных режимах. Определены особенности выгорания топлива с Gd. Проведен анализ поведения газовых продуктов деления и цезия в топливе реакторов ВВЭР. Вид радиальных распределений свидетельствует, что перемещение цезия при реальных условиях эксплуатации ВВЭР-440, и ВВЭР-1000 отсутствует. Исследовано влияние способов облучения в экспериментальных реакторах на поведение ксенона и цезия. Установлены закономерности поведения ксенона и цезия при скачках мощности. Исследовано накопление и радиальное распределение плутония в твэлах реакторов ВВЭР.

ВВЕДЕНИЕ

Для изучения свойств топлива реакторов ВВЭР и обоснования его работоспособности при повышенных уровнях выгорания в ГНЦ РФ НИИАР проводятся систематические исследования твэлов после эксплуатации в энергетических реакторах, а также твэлов после дополнительного облучения в исследовательском реакторе до повышенного выгорания и после реакторных экспериментов по испытанию высоко выгоревшего топлива в переходных режимах. Распухание топлива, выход газа под оболочку, увеличение давления внутри твэла, изменение теплопроводности – явления, находящиеся в тесной взаимной связи, во многом определяются накоплением и поведением газовых продуктов деления (ГПД), основным из которых является ксенон. Установление корреляции между локальным содержанием газа, структурными особенностями топливной композиции и параметрами облучения необходимо для обоснования работоспособности топлива и твэлов, разработки рекомендаций по условиям их эксплуатации.

В настоящей работе представлены результаты изучения структуры, радиального распределения ксенона и цезия в твэлах ВВЭР после штатной эксплуатации и после дополнительного облучения в реакторе МИР в режиме переменной мощности.

ХАРАКТЕРИСТИКА ТВЭЛОВ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В табл. 1 приведены основные характеристики и параметры облучения исследованных твэлов, влияющие на накопление и распределение продуктов деления. Особенностью ТВС ВВЭР-1000 (см. табл. 1) было наличие в ней твэлов с уран-гадолиниевым топливом в комбинации со штатными. Определение элементного состава облученного топлива проводили методом электронно-зондового рентгеноспек-

трального микроанализа на приборе MAP-4 [2]. Для определения массовой доли элементов в качестве стандартных образцов сравнения были использованы соответственно необлученный оксид урана UO_2 , смешанный оксид $(U,Pu)O_2$ с массовой долей плутония 7,35%, чистый неодим, йодид цезия (CsI) и чистый теллур для анализа ксенона по методике [3]. Измеренные значения содержания неодима в топливе были использованы для расчета локального выгорания и построения радиального профиля выгорания по методике, изложенной в работе [4]. Изучение радиального распределения изотопов гадолиния в экспериментальных твэлах проводилось методом лазерной масс-спектрометрии на приборе ЭМАЛ-2 [5].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫГОРАНИЯ ПРИ МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ТОПЛИВА

Выгорание является одной из важнейших характеристик облученного топлива, по значению выгорания можно рассчитать количества наработанного ксенона и цезия, которые в сравнении с экспериментально определенными значениями используются для анализа их поведения, включая выход из матрицы топлива в периферийной зоне и в центральной зоне таблеток. Для расчета локального выгорания были использованы измеренные значения содержания неодима в топливе [4]. На рис. 1 показаны результаты, полученные при исследовании твэлов ВВЭР-440 с минимальным и максимальным выгоранием (51 и 7 МВт*сут/кг урана).

В табл. 2 приведены рассчитанные средние значения выгорания для ряда твэлов в сравнении со значениями, полученными другими методами. Результаты, полученные всеми представленными методами, совпадают в пределах нескольких процентов.

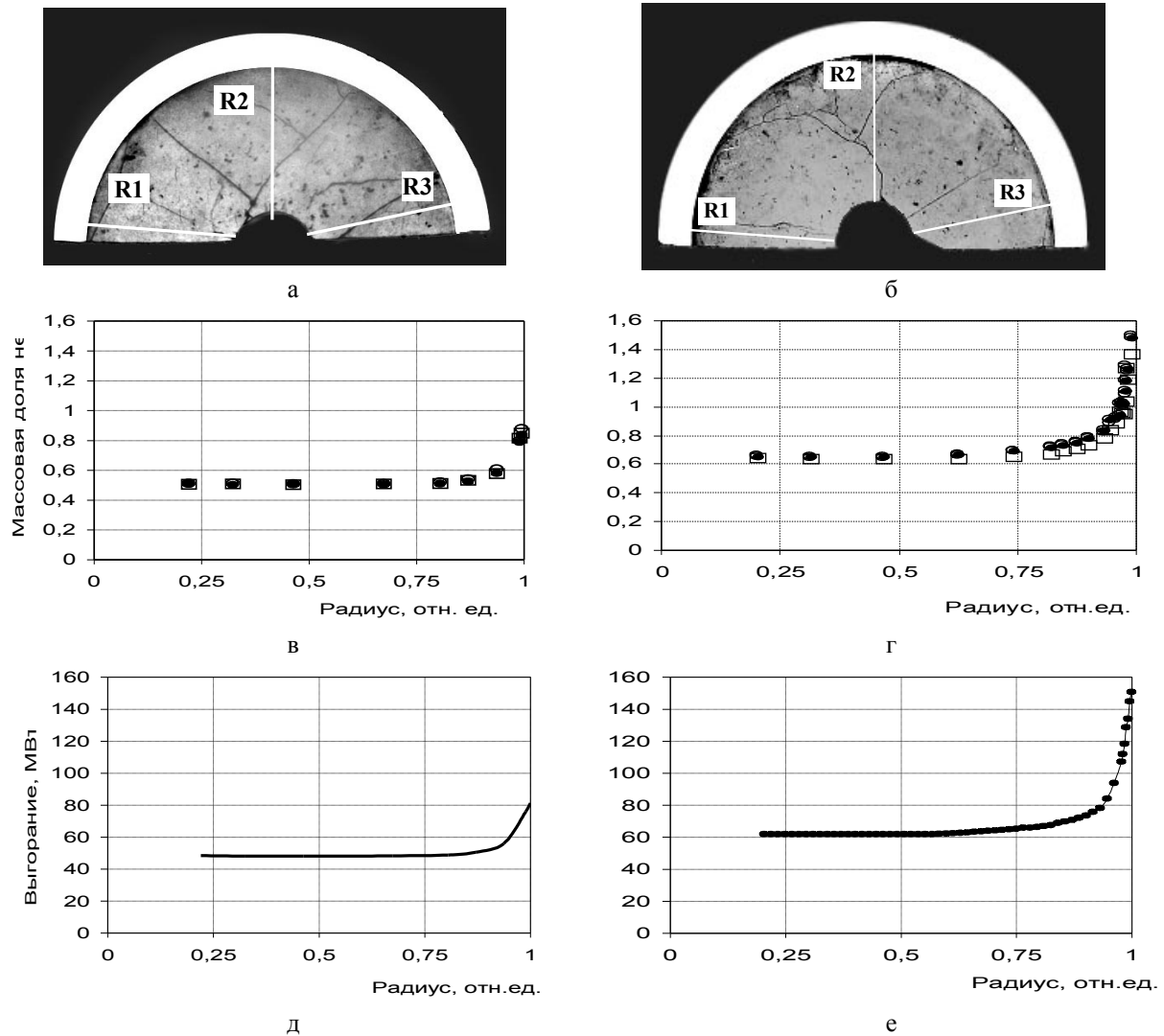


Рис. 1. Макроструктура и радиальное распределение неодима и выгорания в образцах топлива ВВЭР-440 после облучения до среднего по сечению выгорания 51 МВт*сут/кг урана (а, в, д) и 70 МВт*сут/кг урана (б, г, е); R1, R2, R3 – радиальные маршруты исследования

Таблица 1

Основные характеристики и параметры облучения исследованных ТВЭЛОВ

Реактор	№ ТВС	№ твэла	Длительность эксплуатации, топ. цикл.	Максимальное выгорание, МВт сут/кг урана	Примечание
ВВЭР-440	198	96	4	51	Штатный режим
ВВЭР-440	228	68	5	61	То же
ВВЭР-440	228	34	5	60	—«—
ВВЭР-440	222	111	5	60	—«—
ВВЭР-440	222	35	5	59	—«—
ВВЭР-440	222	24	5+дооблучение в реакторе МИР	70	—«—
ВВЭР-1000	325	148	4	58	—«—
ВВЭР-1000	325	96	4	54	—«—
ВВЭР-1000	4108	177	3+дооблучение в реакторе МИР	60	—«—
МИР	ЭТВС			50	
ВВЭР-440	198	РФТ 51	4	50	FGR-2
ВВЭР-440	222	РФТ 50	5	58	То же
ВВЭР-440	228	111	5	60	RAMP-11
ВВЭР-440	222	РФТ 31	5+дооблучение в реакторе МИР	70	То же
ВВЭР-1000	4108	РФТ 34	3+дооблучение в реакторе МИР	60	То же
ВВЭР-440	222	Р62 (102)	5+дооблучение в реакторе МИР	60	Циклирование мощности
ВВЭР-440	228	Р61 (86)	5+дооблучение в реакторе МИР	52	То же
ВВЭР-1000		40	3	47	Штатный режим

ВВЭР-1000		30	3	37	Штатный режим, уран-гадолиниевое топливо
-----------	--	----	---	----	--

Таблица 2

Среднее по сечению таблеток выгорание в исследованных образцах

ТВэл (ТВС)	Выгорание, определенное различными методами, МВт сут/кг урана			
	γ-спектрометрия	Масс-спектрометрия	По энергосвыработке	РСМА
96(198)	50,6			51,74±1,87
111(222)	59,2			61,86±1,24
24(222)	70,0 (69,8)*	68,2±1,4	71,8	70,43±1,17
96(325)	54,0			55,40±1,31
148(325)	57,8			57,19±0,86
177(4108)	59,5 (58,3)	58,1±1,3	62,6	60,85±1,13
111(228)	60,3			60,6; 62,5**
34(228)	60,2			60,86±1,08
РФТ31(222)	69,1 (69,5)		72,4	72,1±1,6
РФТ34(4108)	59,5 (58,5)		62,9	62,2±0,9

* В скобках указаны значения выгорания, полученные относительным методом.

** Представлены крайние значения по различным радиусам

Таким образом, рентгеноспектральный микроанализ как метод определения выгорания топлива не уступает в точности другим методам, являясь при этом единственным из доступных методов определения локального выгорания.

**ОСОБЕННОСТИ ВЫГОРАНИЯ
УРАН-ГАДОЛИНИЕВОГО ТОПЛИВА**

Уран-гадолиниевое топливо рассматривается в качестве перспективного для реакторов ВВЭР. В связи с этим представляет практический интерес

знание особенностей выгорания топлива, содержащего гадолиний, а именно: как отличаются средние по радиусу значения выгорания уран-гадолиниевое топлива и топлива без гадолиния при одинаковой длительности эксплуатации; как влияет наличие добавки гадолиния на радиальный профиль выгорания топлива.

Для поперечных сечений твэлов с гадолинием и без гадолиния были определены радиальные профили выгорания и его средние по радиусу таблетки значения (рис. 2 и 3).

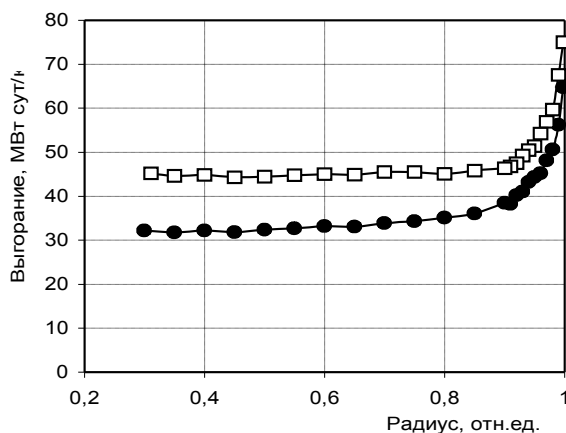


Рис. 2. Радиальное распределение выгорания в твэлах ТВС ВВЭР-1000 (□, ● - без гадолиния и с гадолинием соответственно)

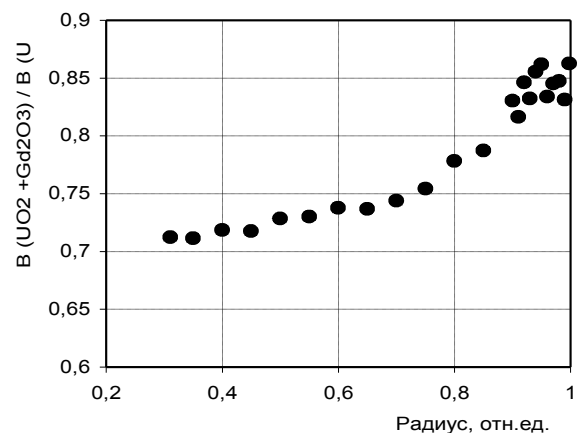


Рис. 3. Радиальное распределение отношения локального выгорания уран - гадолиниевое топлива к выгоранию уранового топлива в твэлах ТВС ВВЭР-1000

Для интерпретации полученных результатов целесообразно воспользоваться экспериментальными данными, полученными ранее при исследовании радиального распределения изотопов гадолиния в экспериментальных твэлах с аналогичной топливной композицией, облученных в реакторе МИР до выгорания 1,3; 3,2 и 6,4 МВт*сут/кг урана. Исследование было выполнено методом лазерной масс-спек-

трометрии на приборе ЭМАЛ-2. Результаты исследования для выгорания 1,3 и 6,4 МВт*сут/кг урана показаны на рис. 4, 5, из чего следует: выгорание изотопов ¹⁵⁵Gd и ¹⁵⁷Gd и их превращение в изотопы ¹⁵⁶Gd и ¹⁵⁸Gd происходит неравномерно по радиусу таблетки, что объясняет радиальный профиль относительного выгорания двух видов топлива, приведенный на рис. 4. Кинетика трансмутации изотопов

^{155}Gd и ^{157}Gd такова, что уже при выгорании топлива 1,3 МВт*сут/кг урана их относительные доли (средние по радиусу значения) составляют соответственно 5 и 1 %, а при выгорании 6,4 МВт*сут/кг урана –

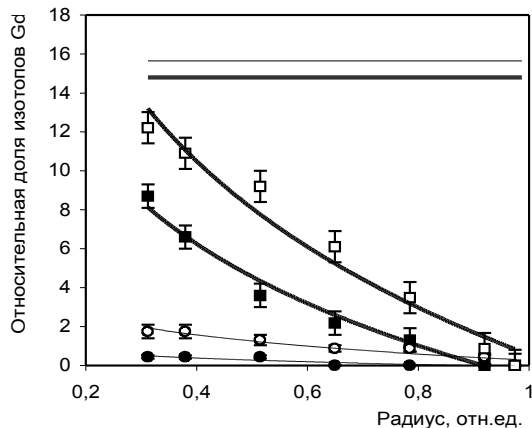


Рис. 4. Радиальное распределение изотопов ^{155}Gd и ^{157}Gd : исходное (—, —); выгорание 1,3 МВт*сут/кг урана (□, ○); выгорание 6,4 МВт*сут/кг урана (■, ●)

2 и 0,3% (исходные значения соответственно составляют 14,80 и 15,65 %), таким образом, наличие гадолиния в топливе сказывается только на начальном этапе облучения.

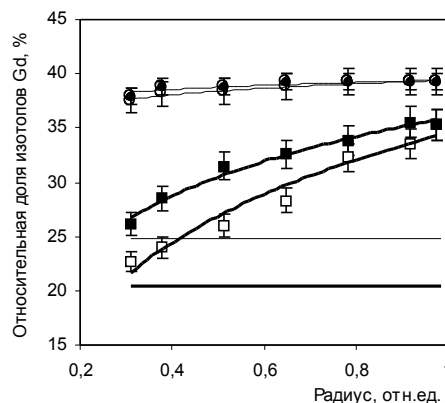


Рис. 5. Радиальное распределение изотопов ^{156}Gd и ^{158}Gd : исходное (—, —); выгорание 1,3 МВт*сут/кг урана (□, ○); выгорание 6,4 МВт*сут/кг урана (■, ●)

АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ГАЗОВЫХ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ В ТОПЛИВЕ РЕАКТОРОВ ВВЭР

С точки зрения поведения топлива при повышении выгорания и уровня тепловой нагрузки представляют интерес следующие характеристики: зна-

чение локального выгорания в краевой зоне (rim-зоне) и динамика формирования структуры краевой зоны; доля газа, вышедшего из матрицы топлива, в зависимости от линейной мощности твэла.

На рис. 6,7 приведены результаты определения содержания ксенона в топливе.

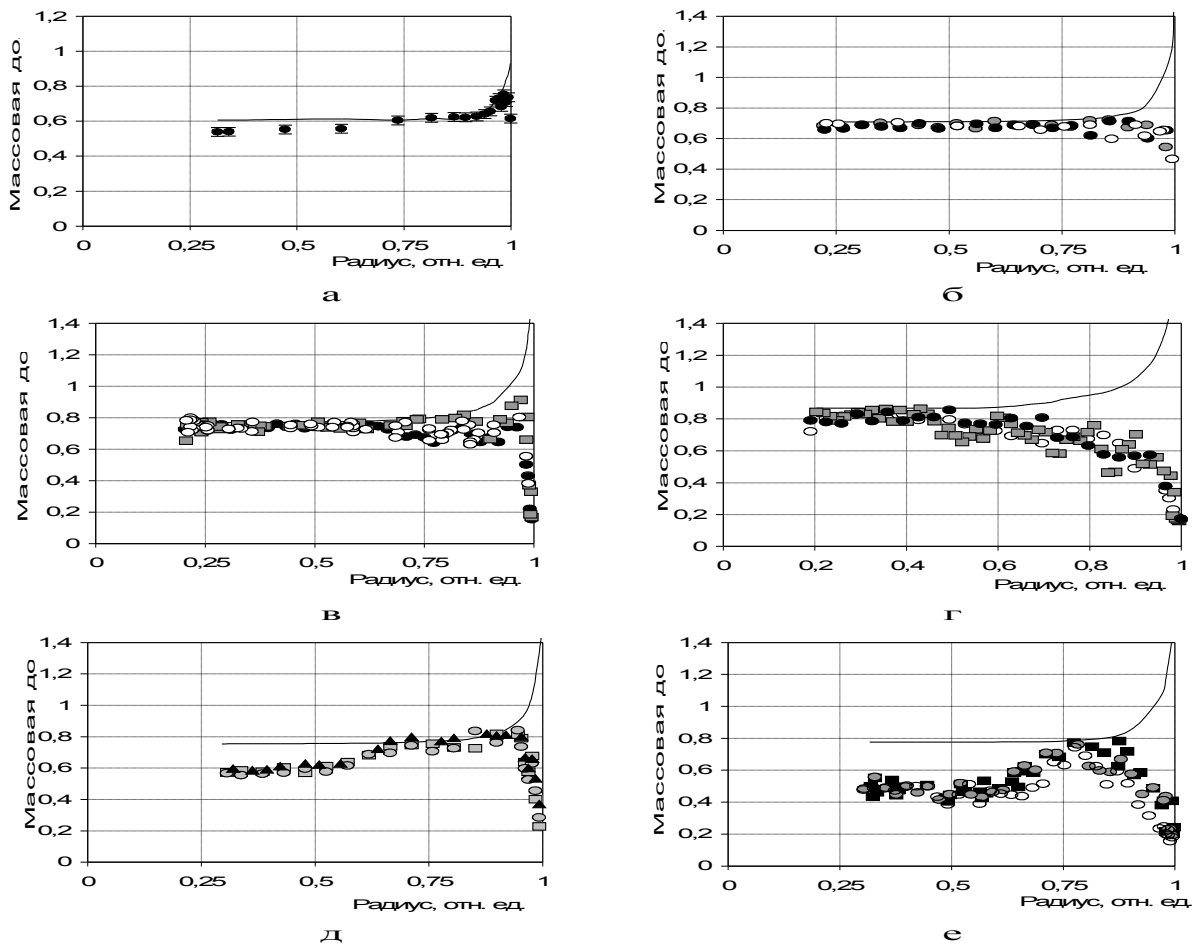


Рис. 6. Распределение ксенона по радиусу топливных таблеток после облучения: в реакторе МИР до выгорания 44 МВт*сут/кг урана (а); ВВЭР-440 до выгорания 51, 59 и 70 МВт*сут/кг урана (соответственно б, в, г); ВВЭР-1000 до выгорания 54 и 60 МВт*сут/кг урана (соответственно д, е)

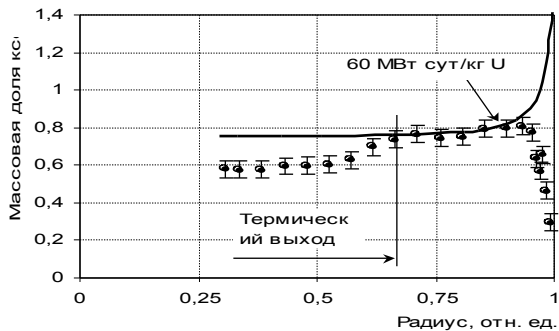


Рис. 7. Радиальное распределение ксенона в твэле 96 ТВС 325 ВВЭР-1000 (среднее по радиусу выгорание 54 МВт*сут/кг урана)

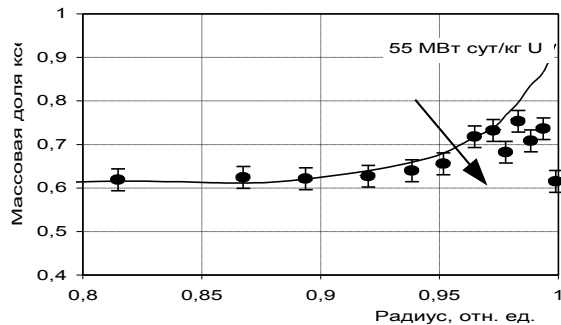
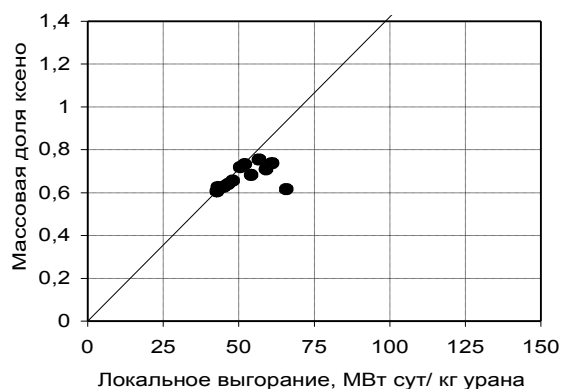


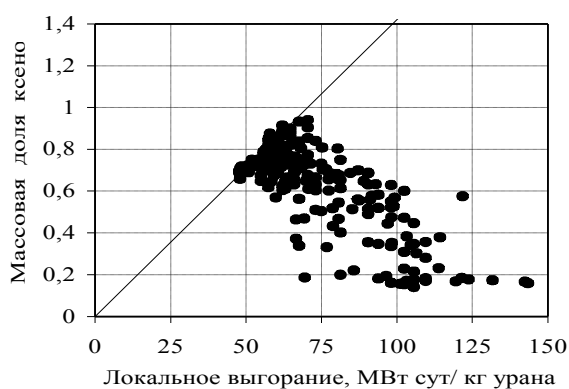
Рис. 8. Радиальное распределение ксенона в твэле экспериментальной ТВС реактора МИР (среднее по радиусу выгорание 44 МВ*сут/кг урана)

Распределение ксенона имело следующие особенности. Во-первых, содержание ксенона в твердом растворе топлива во всех твэлах в наружной части таблеток ниже расчетного накопления, что обусловлено выходом части его атомов из твердого раствора в поры диаметром более 0,5... 1,0 мкм на границы зерен и в свободный объем твэла. Во-вторых, в центральной части таблеток из твэлов реактора ВВЭР-1000 с выгоранием 54 и

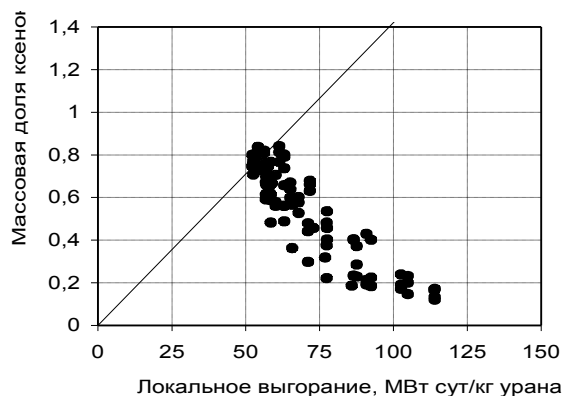
60 МВт*сут/кг урана (твэлы № 96 и 177) содержание ксенона в твердом растворе существенно снизилось по сравнению с образовавшимся в результате облучения. На рис. 8 представлена внешняя часть радиального распределения ксенона в топливе после облучения в реакторе МИР, а содержания ксенона в матрице топлива в зависимости от локального выгорания в краевой зоне для разных групп твэлов показаны на рис. 9.



а



б



в

Рис. 9. Содержание ксенона во внешней зоне топливных сердечников между $r/r_0 = 0,7$ и краем таблеток как функция локального выгорания:
а, б, в – реакторы МИР, ВВЭР-440, ВВЭР-1000.
Сплошной линией показано расчетное накопление

Из совокупности всей имеющейся информации следует, что начало формирования g_{im} -зоны происходит при локальном выгорании 55...70 МВт*сут/кг урана. Полученные результаты позволяют сделать следующие предположения. Эволюция состояния топлива в краевой зоне проходит ряд фаз. Первая фаза, инкубационная, продолжается до выгорания 55...70 МВт*сут/кг урана. В течение этой фазы в кристаллической решетке UO_2 осуществляется накопление радиационных дефектов, вторичного плутония и продуктов деления, в том числе ксенона. Вторая фаза связана с гетерогенным процессом зарождения реструктуризированных микрообластей, их ростом, объединением и в конечном итоге формированием полностью реструктуризированной зоны. Эта фаза состояния топлива соответствует интервалу локального выгорания от 55...70 до 120...125 МВт*сут/кг урана. При локальном выгорании более 125 МВт*сут/кг урана весь объем топлива имеет обновленную структуру, представляющую собой совокупность газонаполненных пор диаметром до нескольких микрометров, окруженных новыми мелкими зернами размером менее 1 мкм. При локальном выгорании 125 МВт*сут/кг урана наработанное содержание ксенона соответствует массовой доле 1,75 %, из которых только 0,2% находится в твердом растворе. Если остальная часть наработанного ксенона находится в порах, относительный объем которых при указанном локальном выгорании равен 17...20 %, то давление в них при 800 К (в приближении идеального газа) составляет около

40 МПа.

Напряжение в материале, обусловленное давлением в поре, зависит от величины давления, поверхностной энергии, радиуса поры и имеет максимальное значение на поверхности поры, которое рассчитывается для UO_2 [7] ~ 36 МПа. В соответствии с литературными данными [7], радиационная ползучесть UO_2 в рабочем интервале температуры проявляется при напряжении выше 100 МПа. Таким образом, при локальном выгорании более 125 МВт*сут/кг урана (т.е. когда процесс реструктуризации закончился) в состоянии g_{im} -зоны наступает третья фаза, которую можно назвать фазой динамического равновесия, – новые поры не образуются; количество ксенона, накапливающегося в результате деления, равно его количеству, диффундирующему в существующие поры. На этой стадии скорость распухания краевой зоны должна замедлиться. Такое состояние краевой зоны обязано сохраняться до достижения давления в порах, при котором напряжение на их поверхности обуславливает проявление радиационной ползучести. После этого можно ожидать наступления четвертой фазы в состоянии краевой зоны, связанной с ростом пор в результате радиационной ползучести и, как следствие, увеличением скорости распухания топлива.

АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ЦЕЗИЯ В ТОПЛИВЕ РЕАКТОРОВ ВВЭР

Вид радиальных распределений свидетельствует о том, что миграция цезия при реальных условиях

эксплуатации твэлов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 отсутствует (рис. 10). Содержание цезия как функция локального выгорания топлива изображено на рис. 11. Таким образом, полученные результаты показывают, что при реструктуризации топлива в *rim*-зоне цезий в отличие от ксенона не поступает в образующиеся поры.

Существует мнение [1], что в этой зоне цезий

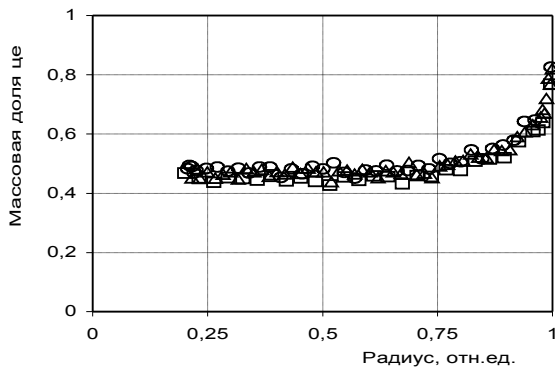


Рис. 10. Распределение цезия по радиусу топливной таблетки после облучения в реакторе ВВЭР-1000 до выгорания 60 МВт*сут/кг урана

выходит из кристаллической решетки UO_2 , но концентрируется не в порах, а на границах новых мелких зерен. Поскольку при анализе рентгеноспектральным методом объем анализируемой области составляет обычно около 10 мкм^3 , что соответствует количеству новых зерен от нескольких сотен до тысяч, концентрация цезия на их границах не сказывается на получаемых результатах.

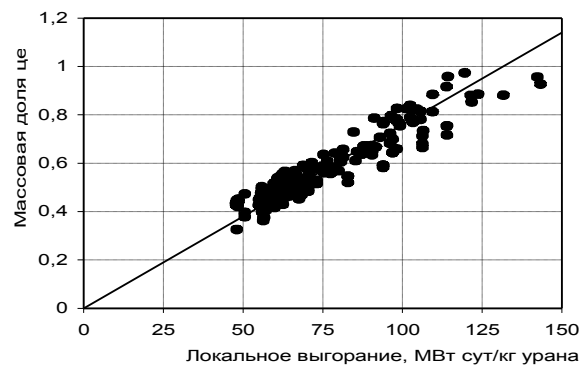
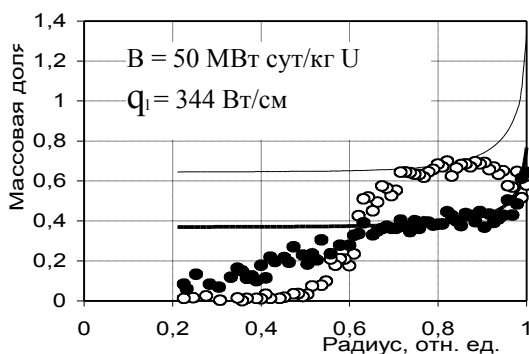


Рис. 11. Зависимость содержания цезия в облученном топливе реакторов ВВЭР от локального выгорания (сплошная линия – расчетное содержание)

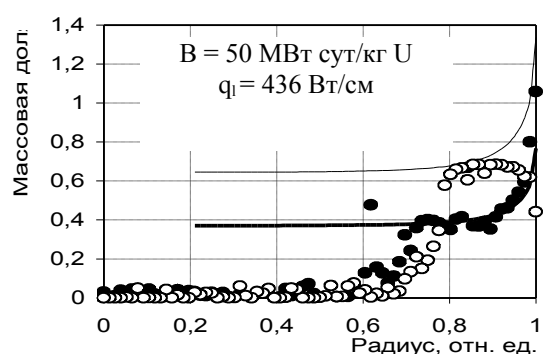
ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ОБЛУЧЕНИЯ В РЕАКТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА ПОВЕДЕНИЕ КСЕНОНА И ЦЕЗИЯ

Эксперимент FGR-2. Подъем максимальной линейной мощности твэлов РФТ-50 и РФТ-51 (см. табл. 1) во время эксперимента доходил до 440 Вт/см. Твэл 35 был свидетелем и вырезался из области с пониженной линейной мощностью.

Радиальные распределения ксенона и цезия в указанных сечениях твэлов после эксперимента показаны на рис. 12. Полученные результаты позволяют посчитать локальный термический выход ксенона и цезия из топлива при конкретных максимальных значениях линейной мощности (табл. 3).



а



б

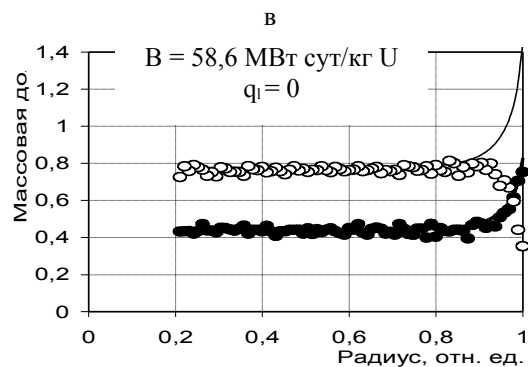
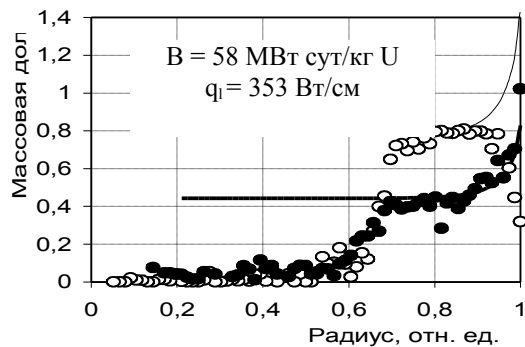
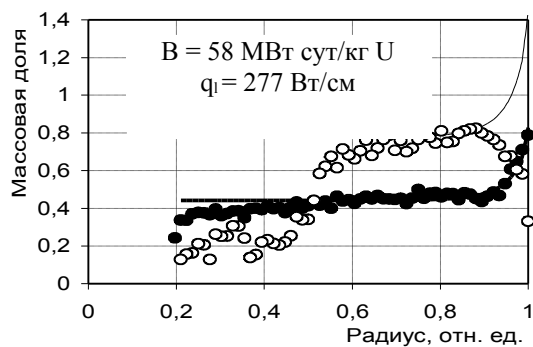


Рис. 12. Радиальное распределение ксенона и цезия в топливе после эксперимента FGR-2: а, б – твэл РФТ-51; в, г – твэл РФТ-50; д – твэл 35
○, ● – ксенон и цезий (измеренные значения);
—, — — ксенон и цезий, наработанные в результате деления и трансмутации (расчет)

Таблица 3

Выход Xe и Cs из топлива в исследованных сечениях твэлов в эксперименте FGR-2

Твэл	Выгорание, МВт сут/кг урана	Максимальная локальная линейная мощность, Вт/см	Выход, %	
			Ксенон	Цезий
РФТ-51	50	344	32	16
РФТ-51	50	436	49	39
РФТ-50	58	277	18	6
РФТ-50	58	358	38	38

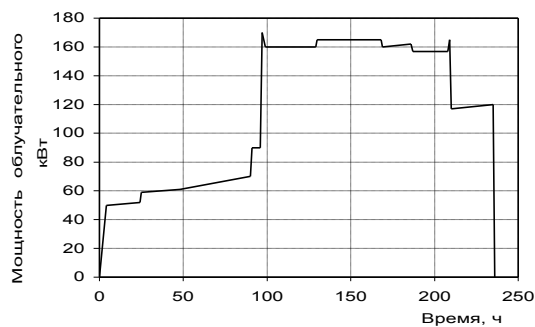


Рис. 13. Изменение мощности облучательного устройства в эксперименте RAMP - 11

Эксперимент RAMP-11. Изменение мощности облучательного устройства во время эксперимента

RAMP – 11 показано на рис. 13. Радиальные распределения ксенона и цезия в сечениях исследованных твэлов изображены на рис. 14, рассчитанные по этим распределениям относительные значения термического выхода продуктов деления из топлива приведены в табл. 4. Полученные результаты показывают, что выход из топлива и радиальное распределение указанных продуктов деления зависят не только от линейной мощности, но и от выгорания и геометрических характеристик топливной таблетки.

При более высоком выгорании (~ 60 МВт*сут/кг урана) различие в поведении ксенона и цезия наблюдается только при относительно низких значениях линейной мощности (277 Вт/см).

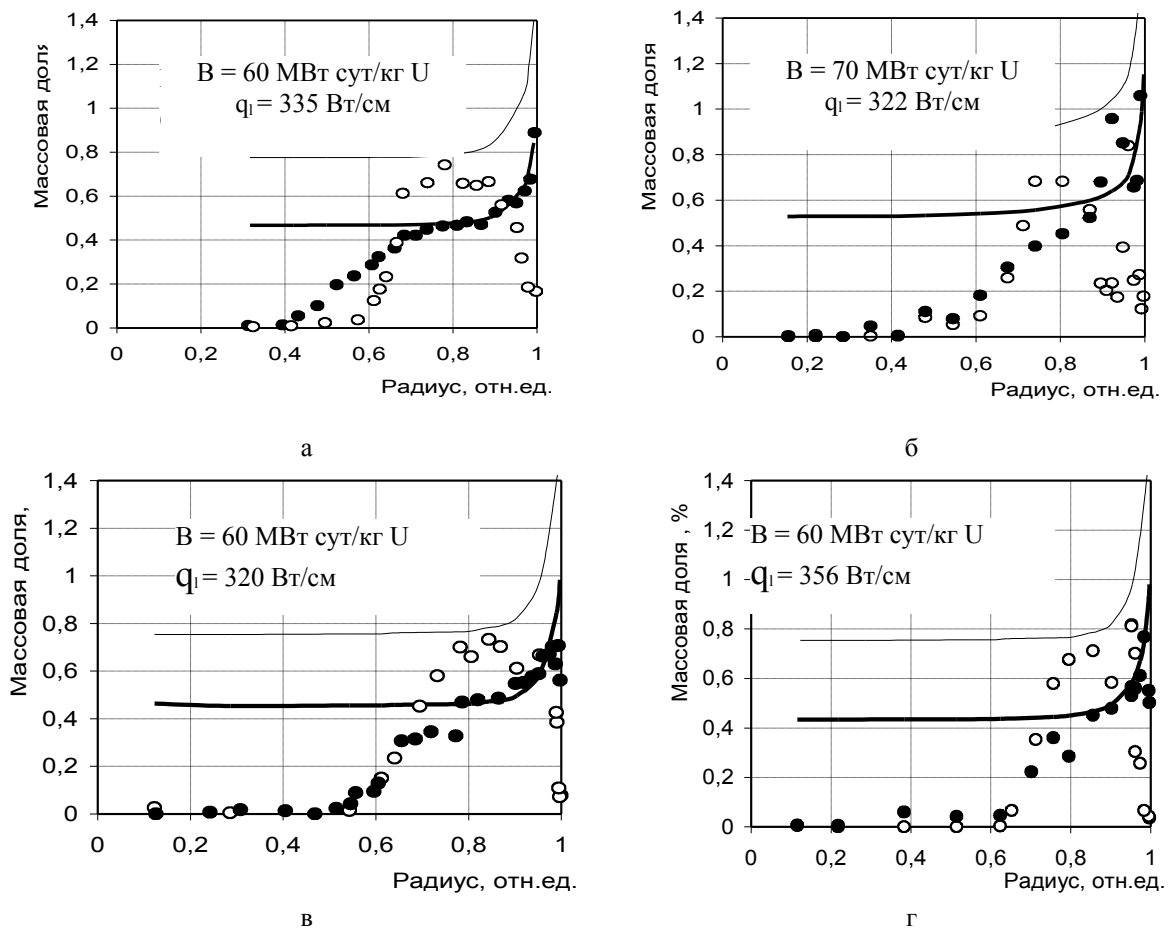


Рис. 14. Радиальное распределение ксенона и цезия в топливе после эксперимента RAMP-11: а – твэл РФТ 34, б – твэл РФТ 31; в, г – твэл ПМТ 111 в разных сечениях; ○, ● – ксенон и цезий (измеренные значения); —, — — – ксенон и цезий, наработанные в результате деления и трансмутации (расчет)

Таблица 4

Выход ксенона и цезия из топлива в эксперименте RAMP-11

Твэл	Выгорание, МВт сут/кг урана	Максимальная локальная линейная мощность, Вт/см	Выход, %	
			Ксенон	Цезий
ПМТ 111	60	320	42	40
ПМТ 111	60	356	45	47
РФТ-31	70	322	45	40
РФТ-34	60	335	34	25

Перенос циркония из оболочки в топливо.

На образце из твэла РФТ-31 были обнаружены трещины в оксидной пленке на внутренней поверхности оболочки. В процессе исследования указанного образца было проверено предположение о возможности прямого взаимодействия газообразного йода с незащищенным металлом оболочки и иодидного переноса циркония в топливный сердечник. Иодидные транспортные реакции в поле температурного градиента хорошо известны [9]. Указанное явление лежит в основе технологии получения иодидного циркония. На образце были получены карты распределения циркония и урана в периферийной части топливного сердечника вблизи трещины в оксидной пленке на оболочке (рис. 15).

Эксперимент по циклическому изменению мощности. С помощью рентгеноспектрального микроанализа были исследованы особенности распределения продуктов деления в двух рефабрикованных твэлах, изготовленных из твэлов реактора ВВЭР-440, облученных до максимального выгорания 52 МВт*сут/кг урана (ТВС 228) и 60 МВт*сут/кг урана (ТВС 222) и испытанных в реакторе МИР в маневренных режимах (рис. 16). Максимальная линейная мощность твэлов во время испытаний менялась от 150...200 до 250...270 Вт/см.

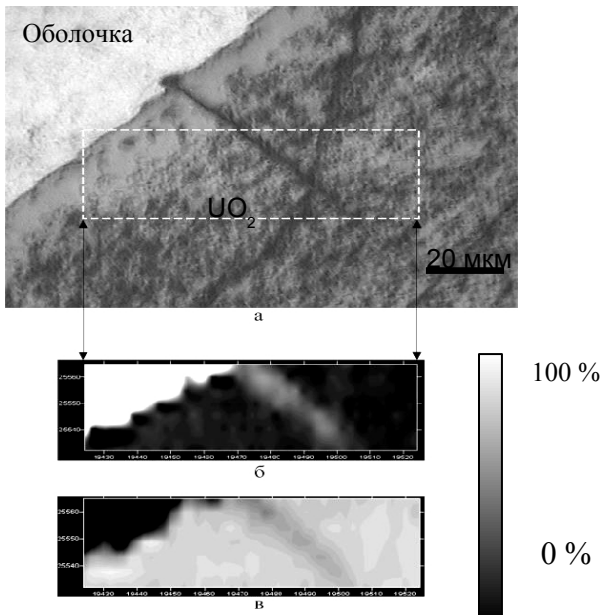


Рис. 15. Микроструктура (а) и карты распределения циркония (б) и урана (в) во внешней части топливной таблетки РФТ31, выделенной прямоугольником

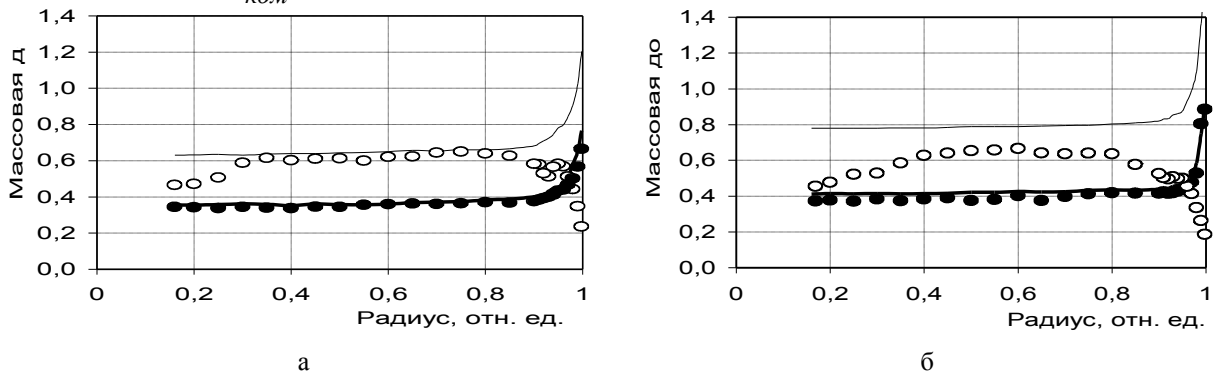


Рис. 16. Радиальное распределение Xe и Cs в топливе после эксперимента по циклическому изменению мощности: (а) и (б) – твэлы с выгоранием 52 и 60 МВт*сут/кг урана соответственно; \circ , \bullet – Xe и Cs (измеренные значения); —, — — — Xe и Cs, наработанные в результате деления и трансмутации (расчет)

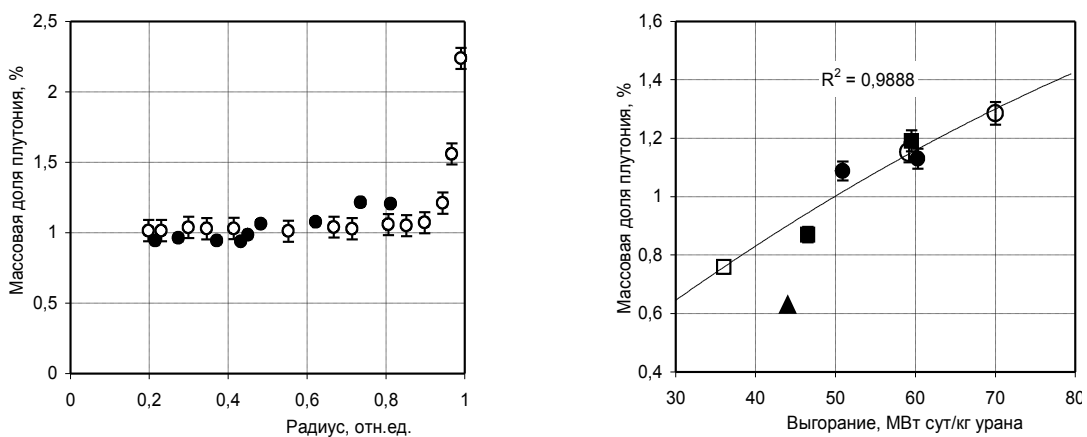


Рис. 17. Радиальное распределение плутония в твэле 68, полученное методами рентгеноспектрального микроанализа (\circ) и масс-спектрометрии с локальным пробоотбором (\bullet)

Рис. 18. Средние по радиусу значения массовых долей P_i для разных групп твэлов: \blacktriangle – реактор МИР, обогащение 4,4 % по ^{235}U ; \bullet – ВВЭР-440, обогащение 3,6 %; \circ – ВВЭР-440, обогащение 4,4 %; \blacksquare – ВВЭР-1000, обогащение 4,4 %; \square – ВВЭР-1000 с уран-гадолиниевым топливом, обогащение 4,4 %

Анализ совокупности всех данных по накоплению плутония показывает, что полученные экспериментальные значения массовой его доли в зависимости от выгорания в ТВЭлах реакторов ВВЭР могут быть объединены в одну группу и с высокой величиной достоверности аппроксимированы квадратичной функцией (см. рис. 18).

Значение массовой доли плутония в ТВЭле, облученном в реакторе МИР, несколько меньше, чем значения для ТВЭлов ВВЭР при том же выгорании, что, возможно, связано с разной долей резонансных нейтронов.

ЛИТЕРАТУРА

1. С.Т. Walker, С. Bager, М. Mogensen. Observations on the release of cesium from UO₂ fuel // *Journal of Nuclear Materials*. 1996, v. 240, p. 32–42.
2. Ф.Н. Крюков, О.Н. Никитин, С.П. Кашкиров. Аналитический комплекс на основе рентгеноспектрального микроанализатора МАР-4 для исследования облученных материалов // *Тез. докл. XIII Российского симпозиума по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел. Черногоровка, 2-4 июня 2003 г.* Черногоровка: ИПТМ РАН, 2003, с. 21.
3. Ф.Н. Крюков, О.Н. Никитин. *Методика рентгеноспектрального микроанализа содержания ксенона в облученном оксидном топливе* / Сборник трудов. Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР. 2002, в. 4, с. 19–29.

4. Ф.Н. Крюков, О.Н. Никитин, С.П. Кашкиров, Г.Д. Лядов. Применение рентгеноспектрального микроанализа для определения локального выгорания облученного топлива ядерных реакторов // *Тез. докл. XIII Российского симпозиума по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел. Черногоровка, 2-4 июня 2003 г.* Черногоровка: ИПТМ РАН, 2003, с. 79.
5. Б.Е. Папин, Ф.Н. Крюков, С.В. Кузьмин, В.Д. Логинов, И.Е. Сернов. *Количественный элементный анализ реакторных материалов методами лазерной масс-спектрометрии* / Препринт. 12(815). Димитровград: НИИАР, 1991.
6. С. Ronchi. Extrapolated equation of state for rare gases at high temperatures and densities // *J. Nucl. Mater.* 1981, v. 96, p. 314.
7. Д.Р. Оландер. *Теоретические основы тепло выделяющих элементов ядерных реакторов* / Пер. с англ. / Под ред. И.И. Федика и А.С. Гонтаря. М.: «ЦНИИатоминформ», 1982.
8. J. Spino, K. Vennix, M. Coquerelee. Detailed characterization of the rim microstructure in PWR fuels in the burn-up range 40-67 GWd/tM // *J. Nucl. Mater.* 1996, v. 231, p. 179–190.
9. Г. Шеффер. Химические транспортные реакции. М.: «Мир», 1964, 189 с.

ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ ПАЛИВА РЕАКТОРІВ НА ТЕПЛОВИХ НЕЙТРОНАХ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОННО-ЗОНДОВОГО МІКРОАНАЛІЗУ

Ф.Н. Крюков, Г.Д. Лядов, О.М. Нікітін

Представлені результати дослідження трьох груп твєлів: після опромінення в енергетичних реакторах ВВЕР-440 та ВВЕР-1000 до максимального вигорання 60 МВт*добу/кг урану, після додаткового опромінення в реакторі МИР до максимального вигорання 70 МВт*добу/кг урану, після опромінення в дослідницькому реакторі з метою обґрунтування його експлуатаційної надійності в перехідних режимах. Визначені особливості вигорання палива з Gd. Наведено аналіз поведінки газових продуктів поділу та цезію у паливі реакторів ВВЕР. Вигляд радіальних розподілів свідчить, що переміщення цезію при реальних умовах експлуатації ВВЕР-440 та ВВЕР-1000 відсутнє. Досліджено вплив способів опромінення в експериментальних реакторах на поведінку ксенону та цезію. Встановлені закономірності поведінки ксенону та цезію при стрибках потужності. Досліджено накопичення та радіальний розподіл плутонію в твєлах реакторів ВВЕР.

INVESTIGATION OF FUEL CONDITION FOR THERMAL REACTORS BY ELECTRON-PROBE ANALYSIS

F.N. Kryukov, G.D. Lyadov, O.N. Nikitin

Results of study of three groups of fuel elements are presented: after irradiation in power reactors VVER-440 and VVER-1000 before maximum burnup of 60 MWt*/day of uranium, after additional irradiation in reactor MIR up to maximum burnup of 70 MWt*/day of uranium, after irradiation in research reactor to operating reliability control in transitional conditions. Peculiarities of burnup of fuel with Gd are determined. The behaviour of gaseous fission products and caesium in fuel of reactors VVER is analyzed. Radial distribution certifies that caesium displacement in real operating conditions of VVER-440 and VVER-1000 is absent. Effect of irradiation methods in research reactors on xenon and caesium behaviour is investigated. Mechanisms of xenon and caesium behaviour under power jumps are determined. Accumulation and radial distribution of plutonium in fuel elements of reactors VVER's are investigated.