

2. Алипченков В.М., Анфимов А.М., Афремов Д.А. и др. Базовые положения, текущее состояние разработки и перспективы дальнейшего развития теплогидравлического расчетного кода нового поколения HYDRA-IBRAE/LM для моделирования реакторных установок на быстрых нейтронах. — Теплоэнергетика, 2016, № 2, с. 54—64.
3. Требования к составу и содержанию отчета о верификации и обосновании программных средств, применяемых для обоснования безопасности объектов использования атомной энергии. РД-03-34—2000. М., Госатомнадзор России, 2000.
4. Усов Э.В., Прибатурин Н.А., Кудашов И.Г. и др. Один из этапов верификации теплогидравлического кода HYDRA-IBRAE/LM/V1 для расчета течения натриевого теплоносителя в сборках твэлов. — Атомная энергия, 2015, т. 118, вып. 6, с. 309—313.
5. Бутов А.А., Дугаров Г.А., Кудашов И.Г. и др. Верификация кода HYDRA-IBRAE/LM/V1 на экспериментах по течению и теплообмену натриевого теплоносителя в одно- и двухфазных режимах. — В сб.: Теплофизика реакторов на быстрых нейтронах. Обнинск, 14—17 октября 2014 г., с. 265—273.
6. Фадеев И.Д. Верификация программы ТР-БН на базе эксплуатационных данных реактора БН-600. — Там же, с. 444—452.
7. Ртищев Н.А., Тарасов А.Е., Чалый Р.В. Кросс-верификация кода СОКРАТ-БН с кодом DIN-800. Черемшанские чтения. — В сб.: Международная школа-семинар для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов. В 3-х частях. Димитровград, ДИТИ НИЯУ МИФИ, 2012, ч. 1, с. 348.
8. Бельтюков А.И., Карпенко А.И., Полуяков С.А. и др. Атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. Учебное пос. Ч. 2. Екатеринбург, УрФУ, 2013. 420 с.
9. Митенков Ф.М., Багдасаров Ю.Е., Букша Ю.К. и др. Инженерные методы анализа режимов с естественной циркуляцией в установках БН. — Атомная энергия, 1987, т. 62, вып. 3, с. 147—152.
10. Кузнецов И.А., Поплавский В.М. Безопасность АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. М.: ИздАт, 2012. 632 с.
11. Низамутдинов В.Р. Расчетно-экспериментальные исследования по определению тепловых потерь на РУ БН. Тезисы докл. научно-технич. конф. «Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика-2015)». Обнинск, ГНЦ РФ — ФЭИ, 2015, с. 102—104.

Поступила в Редакцию 25.04.16

УДК 621.039.54

ОСОБЕННОСТИ РАСПУХАНИЯ УРАН-ПЛУТОНИЕВОГО НИТРИДНОГО ТОПЛИВА ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ ОБЛУЧЕНИИ В БЫСТРОМ РЕАКТОРЕ ДО ВЫГОРАНИЯ 5,5% ТЯЖ. АТ.

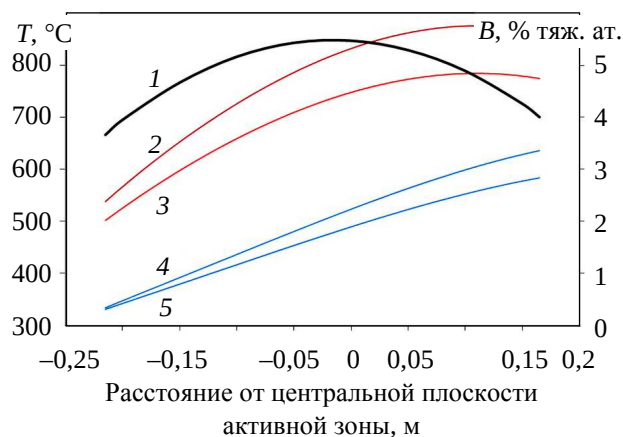
*Беляева А.В., Гильмутдинов И.Ф., Жемков И.Ю., Крюков Ф.Н., Кузьмин С.В., Никитин О.Н.
(АО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград), Иванов Ю.А., Костюков Ю.А. (АО «ВНИИНМ», г. Москва)*

В реакторе БОР-60 в составе разборных облучательных устройств испытывали макеты твэлов с таблеточным уран-плутониевым нитридным топливом и свинцовым заполнением зазора топливо—оболочка. После определенных этапов облучения часть твэлов извлекали для исследований, взамен устанавливали аналогичные, и облучение продолжали до более высокого выгорания. В течение трех этапов облучения достигнуто максимальное выгорание 2,8, 4 и 5,5% тяж. ат. соответственно. Исследование макетов твэлов после первых двух этапов облучения показало, что снижение температуры облучаемого нитридного топлива введением свинцового подслоя обеспечивает хорошее состояние топливных таблеток и может быть перспективно для уменьшения и прогнозирования скорости их радиационного распухания [1]. Более полная информация о механизмах распухания нитридного топлива при низкотемпературном облучении получена при исследовании твэлов после треть-

его этапа облучения до максимального выгорания 5,5% тяж. ат.

Материалы, условия облучения и методы исследования. Основные характеристики твэлов с топливом $U_{0,72}Pu_{0,18}N$ при выгорании 5,5% тяж. ат. следующие:

Плотность топлива, % теоретической . . .	91—92
Массовая доля, %:	
кислорода . . .	0,15
углерода . . .	0,1
Размер зерна, мкм . . .	15—20
Диаметр, мм:	
топливных таблеток . . .	7,8—7,9
твэла . . .	9,4
Длина, мм:	
твэла . . .	625
топливного сердечника . . .	390
Толщина оболочки, мм . . .	0,5
Максимальная линейная тепловая мощность твэла, Вт/см . . .	435
Максимальная температура оболочки твэла, °С . . .	636
Максимальная температура топлива, °С . . .	875

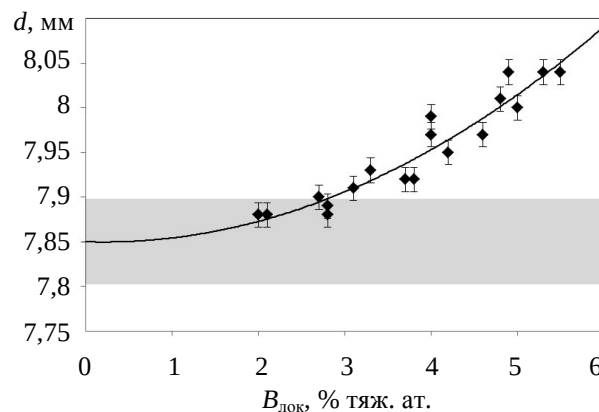


Р и с. 1. Распределение по высоте центрального твэла выгорания (1), максимальной температуры топлива на начало (2) и окончание облучения (3), наружной температуры оболочки на начало (4) и окончание облучения (5)

На рис. 1 показано распределение по высоте центрального твэла выгорания, максимальной температуры топлива и наружной температуры оболочки.

Распухание топлива рассчитано по плотности методом гидростатического взвешивания и диаметру топливных таблеток на оптических изображениях поперечных шлифов твэлов. Для понимания физической природы распухания нитридного топлива при низкотемпературном облучении исследовали его микроструктуру методами сканирующей электронной микроскопии на шлифах и изломах топливных таблеток. Распределение ксенона в топливе получено методом электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа. Массовую долю ксенона в топливе сравнивали с расчетной при его облучении. Расчет проводили в приближении, что делящимся является ^{239}Pu , данные о выходе изотопов ксенона при делении ^{239}Pu на быстрых нейтронах взяты из базы данных [2].

Результаты исследования. Диаметр топливных таблеток измеряли на поперечных шлифах в пяти сечениях каждого из двух твэлов с максимальным выгоранием 5,3 и 5,5% тяж. ат. Полученные данные вместе с более ранними исследованиями показаны на рис. 2 в виде зависимости диаметра таблеток от локального выгорания топлива в сечении твэла. Каждая точка на рис. 2 представляет собой среднюю по четырем измерениям в азимутальных ориентациях через 45° . При максимальном достигнутом выгорании топлива 5,5% тяж. ат. увеличение диаметра таблеток соответствует относительному распуханию топлива $7,3 \pm 1,4\%$.



Р и с. 2. Зависимость диаметра топливных таблеток от локального выгорания в сечении твэла: $\square$ — разброс диаметра до облучения

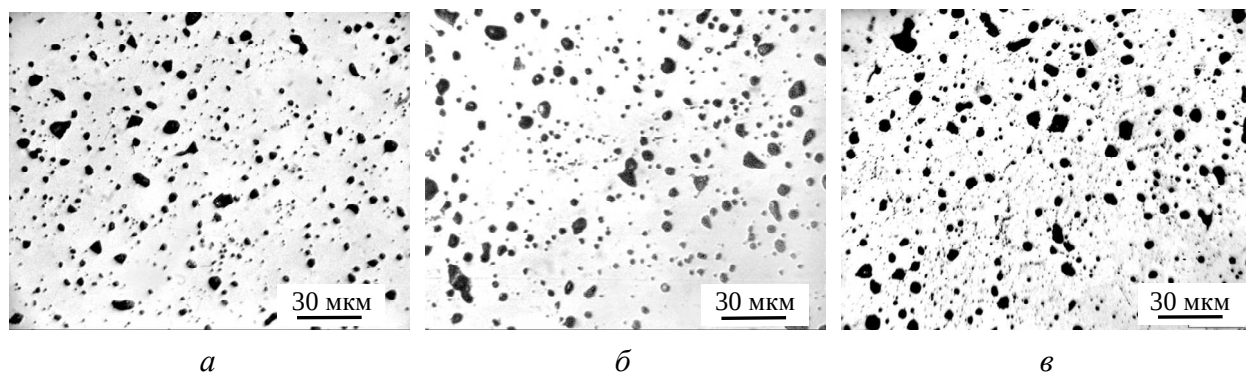
Для определения плотности топлива были использованы образцы, вырезанные из двух твэлов в сечениях вблизи максимума выгорания 5,2 и 5,4% тяж. ат. соответственно. Образцы представляли собой крупные фрагменты топливных таблеток, предварительно освобожденные от оболочек и очищенные химическим способом от остатков свинцового подслоя. Было выполнено по три измерения плотности пяти фрагментов топливных таблеток (см. таблицу). Распухание топлива, вычисленное по изменению плотности, согласуется с полученной по увеличению диаметра таблеток.

Усредненные плотность и распухание топлива

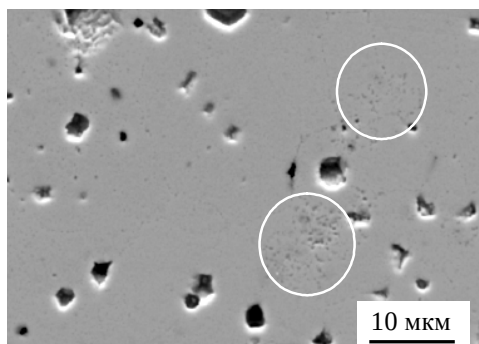
Параметр	Выгорание, % тяж. ат.	
	5,2	5,4
Плотность, г/см^3 :		
исходная	$13,08 \pm 0,07$	$13,08 \pm 0,07$
после облучения	$12,28 \pm 0,06$	$12,26 \pm 0,14$
Распухание, %	$6,5 \pm 0,8$	$6,7 \pm 1,3$

Одним из факторов, определяющих радиационное распухание топлива, является образование и рост газовых пор вследствие накопления и выделения из твердого раствора газообразных продуктов деления. В микроструктуре топлива в дополнение к исходной технологической пористости обнаружены области, представляющие собой скопления мелких пор размером около 1 мкм и менее, что привело к увеличению пористости топлива до средней $11 \pm 1\%$ (рис. 3, 4).

Массовая доля ксенона на участках топлива с технологической пористостью близка к расчетной при его облучении 0,66% при выгорании



Р и с. 3. Микроструктура топлива, облученного до выгорания 2,8 (а), 4 (б) и 5,5% тяж. ат. (в)



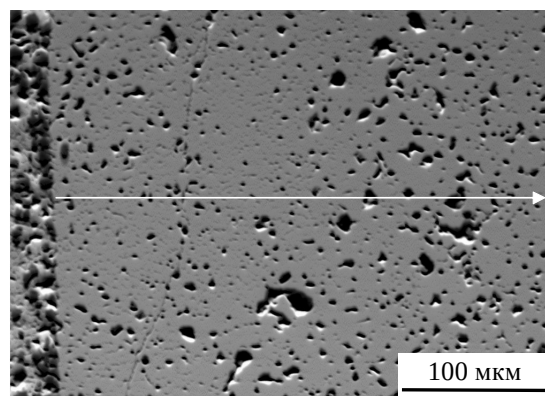
Р и с. 4. Пористость облученного до выгорания 5,5% тяж. ат. топлива: ○ — участки с субмикронными порами

5,3% тяж. ат. В местах скопления мелких пор массовая доля ксенона в матрице топлива всегда меньше соответствующей его наработке вследствие выхода в образовавшиеся поры (рис. 5).

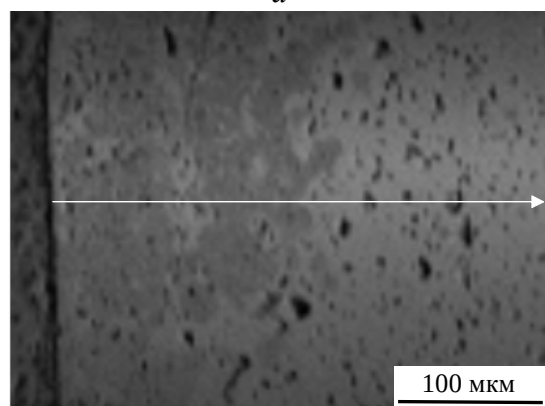
На изломах топливной таблетки обнаружены участки с микроструктурными отличиями от исходного состояния. Они характеризуются наличием зон реструктурированной топливной матрицы, где в пределах исходных зерен сформировались субмикронные зерна и мелкие поры диаметром менее 1 мкм (рис. 6). Крупные технологические поры на таких участках также могут находиться в окружении субзерен, средний размер которых составляет 0,6 мкм (рис. 7).

Для получения дополнительных данных, подтверждающих формирование субмикронной пористости, был проведен количественный анализ микроструктуры топлива. Для сравнения на рис. 8 показано распределение пор на участке топлива без микроструктурных изменений и с реструктурированной топливной матрицей. Эк-

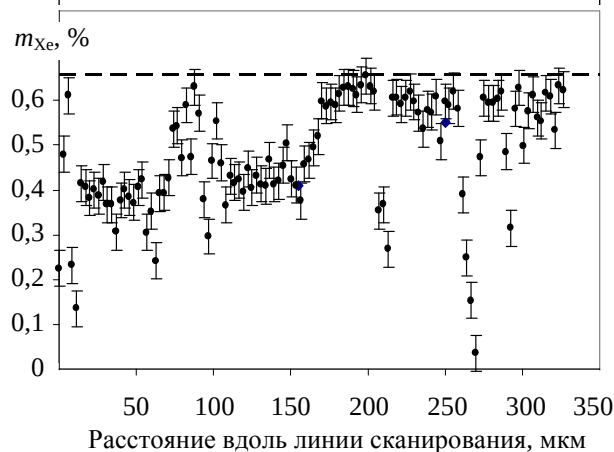
Р и с. 5. Микроструктура топлива (а), распределение ксенона на этом участке (б) и вдоль линии сканирования (в): --- — массовая доля ксенона, соответствующая его наработке при облучении



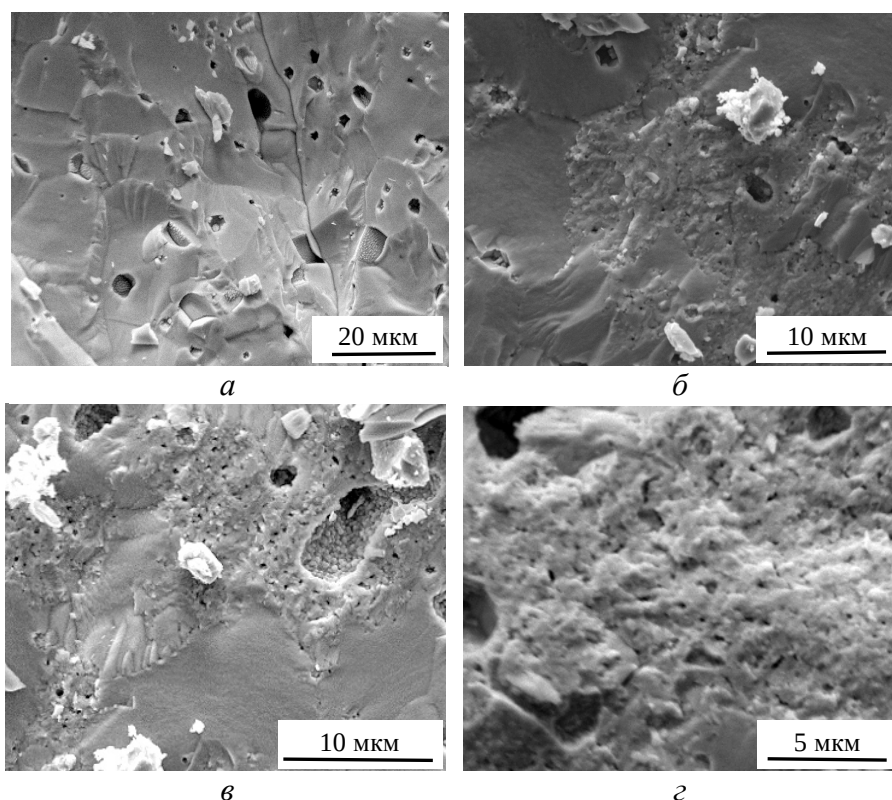
а



б



в



Р и с. 6. Микроструктура топлива на изломе без особенностей (*а*), зоны с реструктурированной топливной матрицей (*б, в, г*)

вивалентный диаметр пор на первом участке находится в интервале 0,4—5 мкм, на втором участке основную долю составляют поры с эквивалентным диаметром менее 0,4 мкм.

Образцы для электронно-микроскопических исследований были вырезаны из сечений ТВЭЛОВ вблизи центральной плоскости активной зоны реактора. В этих сечениях температура топлива при облучении составляла 750—830 °С в центре и 520—550 °С на поверхности таблеток. При

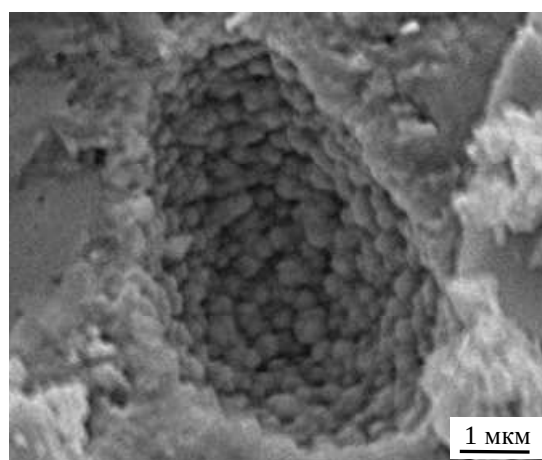
такой низкой температуре образование пористости не может быть следствием термически активируемого процесса диффузии газообразных продуктов деления с их выходом из твердого раствора и образованием газонаполненных пор [3].

Известно, что явление, подобное обнаруженному, наблюдается в диоксидурановом топливе легководных реакторов при облучении в интервале 400—800 °С и превышении определенного порогового выгорания, зависящего от температуры. В низкотемпературной (краевой) зоне топливных таблеток UO_2 происходит реструктуризация с формированием субзеренной структуры и выходом газообразных продуктов деления из твердого раствора в поры. Для структуры

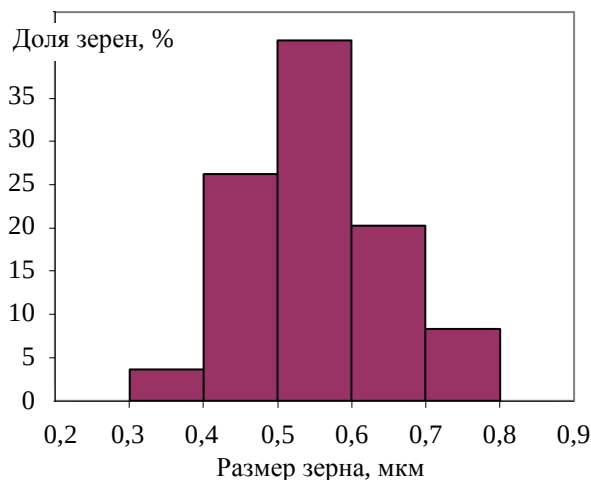
краевой зоны топливных таблеток UO_2 характерны следующие особенности [4, 5]:

образование субзерен характерным размером 0,2—0,3 мкм в пределах исходного зерна, т.е. каждое первоначальное зерно размером около 10 мкм может содержать около 10 тыс. — 100 тыс. новых субзерен;

образование газонаполненных пор характерным размером ~1 мкм, концентрация и размер которых увеличиваются с ростом выгорания;

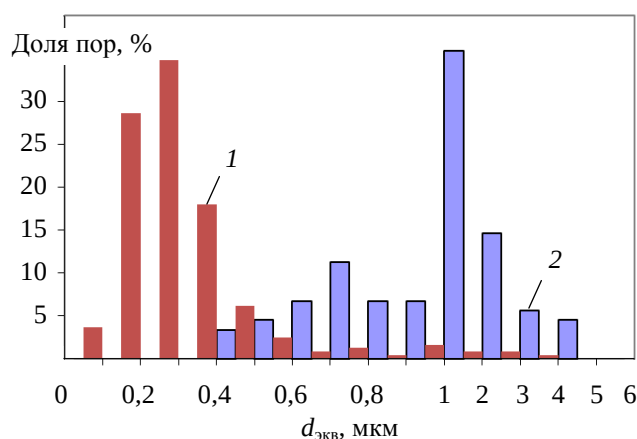


а



б

Р и с. 7. Субзерна на поверхности крупной поры (*а*) и их распределение по размеру (*б*)



Р и с. 8. Распределение пор по размеру в разных частях топливной таблетки: 1, 2 — реструктурированная зона и зона без микроструктурных изменений соответственно

образование газонаполненных пор, сопровождаемое уменьшением количества газообразных продуктов деления (ксенона) в матрице топлива.

Таким образом, в уран-плутониевом нитридном топливе после низкотемпературного облучения до максимального выгорания 5,5% тяж. ат. обнаружены признаки реструктуризации, подобные признакам реструктуризации в низкотемпературной (краевой) зоне топливных таблеток UO_2 . Состояние нитридного топлива можно характеризовать как частично реструктурированное: наряду с участками топлива, содержащими зоны реструктуризации, есть области топлива без признаков реструктуризации и с признаками начала этого процесса, что характерно для гетерогенного процесса и свидетельствует о его начальной стадии при данном выгорании.

Заключение. Особенностью микроструктуры уран-плутониевого нитридного топлива после облучения до максимального выгорания

5,5% тяж. ат. в составе макетов ТВЭЛОВ со свинцовым наполнением было наличие фрагментов субзеренной структуры с выходом газообразных продуктов деления из твердого раствора в поры. Сформированная таким образом пористость является одним из факторов, влияющих на увеличение объема топлива. Отсутствует пористость, формирующаяся в результате термически активируемого процесса диффузии газообразных продуктов деления. Максимальное распухание топлива, определенное по увеличению диаметра таблеток, равно $7,3 \pm 1,4\%$, по изменению плотности — $6,7 \pm 1,3\%$. В соответствии с экспериментальной зависимостью диаметра топливных таблеток от выгорания контакт топлива с оболочкой в данных макетах ТВЭЛОВ со свинцовым подслоем произойдет при выгорании около 9% тяж. ат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крюков Ф.Н., Кузьмин С.В., Никитин О.Н. и др. Состояние нитридного топлива после облучения в быстрых реакторах. — Атомная энергия, 2012, т. 112, вып. 6, с. 336—341.
2. Nuclear Data Library of Fission Products. Second Version. Ed. M. Yoshikawa. Japan Atomic Energy Research Institute, 1990. 253 p.
3. Materials Science and Technology. Ed. B. Frost. Weinheim—New York—Basel—Cambridge, Tokio: VCH, 1994, v. 10A. 558 p.
4. Spino J., Vennix K., Coquerelee M. 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.
5. Крюков Ф.Н., Кузьмин С.В., Лядов Г.Д. и др. Рентгеноспектральный микроанализ ксенона в облученном топливе тепловых реакторов. — Атомная энергия, 2006, т. 100, вып. 2, с. 92—96.

Поступила в Редакцию 26.04.16

УДК 621.039.531:621.039.546

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ОКИСЛЕНИЕ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ РБМК-1000

Сухих А.В., Сагалов С.С. (АО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград),
Павлов С.В. (ДИТИ НИЯУ МИФИ, г. Димитровград)

В настоящее время РБМК-1000 переводят на уран-эрибное оксидное топливо повышенного обогащения [1]. При использовании этого вида топлива, рассчитанного на выгорание 35 МВт·сут/кг и продолжительность эксплуата-

ции до 10 лет, требуется обосновать работоспособность ТВЭЛОВ. Одной из проблем достижения указанных ресурсных параметров является значительное окисление оболочек из сплава Э-110 (Zr—1%Nb) при длительной работе ТВЭЛОВ в па-