

УДК 621.039.548

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ТВЭЛОВ ВВЭР ВЫСОКОГО ВЫГОРАНИЯ
С ОБОЛОЧКОЙ ИЗ СПЛАВА Э110М В ЭКСПЕРИМЕНТЕ С ВОЗРАСТАНИЕМ
РЕАКТИВНОСТИ В РЕАКТОРЕ МИР М1**

*В.В. Новиков¹, В.И. Кузнецов¹, А.С. Еременко¹, П.В. Федотов¹, А.В. Салатов¹,
А.А. Гончаров¹, И.Н. Волкова², А.Г. Ещеркин², А.Л. Ижutow², Г.В. Шевляков²,
Ильнур Ф. Гильмутдинов²*

*1 – АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт
неорганических материалов имен академика А.А. Бочвара, Москва*

AVSalatov@bochvar.ru

2 – АО «ГНЦ НИИАР», Димитровград

Приведены результаты испытания двух рефабрикованных твэлов ВВЭР1000 высокого выгорания с оболочками из сплава Э110М в условиях, имитирующих проектную аварию с вводом положительной реактивности. Представлены основные результаты послереакторных исследований. Представлены результаты посттестовых расчетов термомеханического поведения рефабрикованных твэлов в эксперименте. Отсутствие разрушения твэлов в эксперименте RIA-Э110М-70 при высоких достигнутых значениях среднерадиальной энтальпии топлива подтверждает применимость критерия безопасности для твэлов ВВЭР с оболочкой из сплава Э110М при выгорании 70 МВт·сут/кгU.

Ключевые слова: твэл ВВЭР, оболочка из сплава Э110М, авария с возрастанием реактивности, реакторный эксперимент, послереакторные исследования, расчетное моделирование.

INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF WWER HIGH-BURNUP FUEL RODS WITH CLADDING MADE OF E110M ALLOY IN RIA TEST AT MIR.M1 REACTOR

V.V. Novikov¹, V.I. Kusnetsov¹, A.S. Eremenko¹, P.V. Fedotov¹, A.V. Salatov¹,
A.A. Goncharov¹, I.N. Volkova², A.G. Escherkin², A.L. Izhutov², G.V. Shevlyakov²,
Ilmur F. Gilmutdinov²

1 – JSC «A.A. Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials»,
Moscow

2 – JSC «SSC RIAR», Dimitrovgrad

The results of testing WWER-1000 two refabricated high-burnup fuel rods with E110M alloy cladding under RIA conditions are shown in the paper. The main results of post-irradiation investigations are presented. The results of post-test computer modeling the thermo-mechanical behavior of refabricated fuel rods during the experiment are shown. The absence of fuel rods destruction in the RIA-E110M experiment at achieved high values of the radial average fuel enthalpy confirms the applicability of the safety criterion for WWER fuel rods with a cladding made of E110M alloy at a burnup of 70 MW·day/kgU.

Keywords: WWER, fuel rod, E110M alloy, cladding, reactivity initiated accident, reactor experiment, post-irradiation investigations, computer modeling.

Введение

В АО «ГНЦ НИИАР» проводится комплекс экспериментальных исследований с целью обоснования использования сплава Э110М в качестве оболочек твэлов ВВЭР и PWR. Комплекс включает облучение в реакторе МИР.М1 в стационарном и переходных режимах НЭ и ННЭ, включая имитацию условий проектных аварий РУ с ВВЭР, с последующим проведением пост-тестовых материаловедческих и расчетных исследований.

Сплав Э110М обладает более высокой прочностью и радиационной стойкостью по сравнению со сплавом Э110 благодаря более высокому содержанию железа и кислорода. По коррозионной стойкости и поглощению водорода в условиях реакторного облучения сплав Э110М аналогичен сплаву Э110 и превосходит характеристики сплава циркалой.

В 2023 г. в реакторе МИР.М1 проведен эксперимент RIA-Э110М-70, имитирующий условия аварии с возрастанием реактивности РУ с ВВЭР. Целью эксперимента является получение данных для обоснования предельного значения среднерадиальной энтальпии топлива в авариях с возрастанием реактивности, при котором обеспечено отсутствие разрушения твэлов (согласно п.2.2.2 НП-082-07 [1]).

В эксперименте RIA-Э110М-70 были испытаны два рефабрикованных твэла (РФТ) с выгоранием ~ 70 МВт·сут/кгU с оболочками из сплава Э110М, проведены послереакторные материаловедческие исследования испытанных РФТ. В результате эксперимента разрушение твэлов не произошло, оболочки твэлов сохранили герметичность.

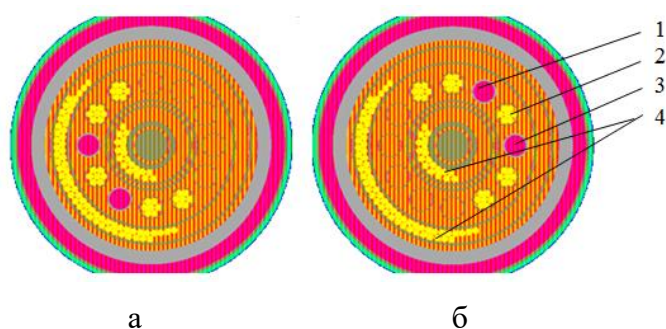
Проведены постестовые нейтронно-физические и теплогидравлические расчеты эксперимента АО «ГНЦ НИИАР», расчеты термомеханического поведения РФТ в эксперименте с использованием программы РАПТА-5.2 (АО «ВНИИНМ»), в результате которых получены оценки критериальных параметров твэлов: температуры и энтальпии топлива, а также деформаций оболочки.

Эксперимент RIA

Для эксперимента из полномасштабного твэла ВВЭР с максимальным расчётным выгоранием ~ 70 МВт·сут/кгU, прошедшего эксплуатацию в составе ТВС-2М на 2 блоке Балаковской АЭС в течение трех 18-месячных топливных циклов (2012-2017 гг.), были вырезаны фрагменты и изготовлены два рефабрикованных твэла. Один экспериментальный твэл был оснащён датчиком температуры топлива, второй – датчиком удлинения.

Сценарий эксперимента RIA предусматривал этап облучения двух твэлов на определённом уровне мощности перед импульсом (этап кондиционирования), последующий импульс мощности до заданного уровня энерговыделения, обеспечивающего определённый рост энтальпии топлива и снижение мощности за максимально короткий период времени.

На рис. 1 представлена схема поперечного сечения облучательного устройства, в котором реализуется пятикратный импульс мощности на твэлах в условиях стационарной работы реактора МИР.М1. Импульсное увеличение мощности выполнялось путём перемещения (поворота) подвески с твэлами относительно поглощающего экрана из гафния. В исходном положении (а) поглощающие элементы экранируют твэлы, в конечном положении (б) поглощающие элементы не экранируют твэлы.



1 – экспериментальный твэл с датчиком температуры; 2 – компенсатор реактивности;
3 – экспериментальный твэл с датчиком длины; 4 – экран из поглощающих элементов (гафний)

Рис. 1. Схема поперечного сечения ОУ с различным положением поглощающего экрана из гафния: а, б – исходное и конечное положения

Мощность твэлов определялась методом теплового баланса по показаниям приборов теплотехнического контроля. Из данных об изменении мощности петлевого канала (ПК) реактора МИР.М1, в котором располагалось облучательное устройство, при апробации поворота экрана определена мощность твэлов при импульсе мощности. На рис. 2 показано изменение линейной мощности (ЛМ) в наиболее теплонапряженном сечении по высоте твэла непосредственно во время импульса мощности. Наброс мощности был выполнен за 0,6 секунды. Выдержка на максимальном уровне мощности составила около 12 секунд.

Данный сценарий эксперимента по скорости увеличения мощности, максимальному уровню мощности, длительности выдержки на максимальном уровне мощности сопоставим со сценарием проектной аварии с подключением неработающей петли без предварительного снижения мощности РУ с ВВЭР-1200.

Для определения неравномерности энерговыделения в твэлах на стадии подготовки к эксперименту и после эксперимента были проведены нейтронно-физические расчеты АО «ГНЦ НИИАР» по программе MCU-RRFI/A [2] при задании фактического положения органов регулирования в активной зоне около ПК. После проведения исследований твэлов и получения данных по гамма-сканированию распределения энерговыделения были уточнены по фактическим распределениям активности короткоживущего изотопа Zr-95 с энергией 724 кэВ. Результаты экспериментальной оценки распределения энерговыделения представлены на рис. 3. Видно, что максимальное по длине твэла с датчиком температуры энерговыделение после поворота экрана за 0,6 секунды увеличилось с 123 ± 8 Вт/см до 658 ± 8 Вт/см, а для твэла с датчиком удлинения с 238 ± 8 Вт/см до 622 ± 8 Вт/см.

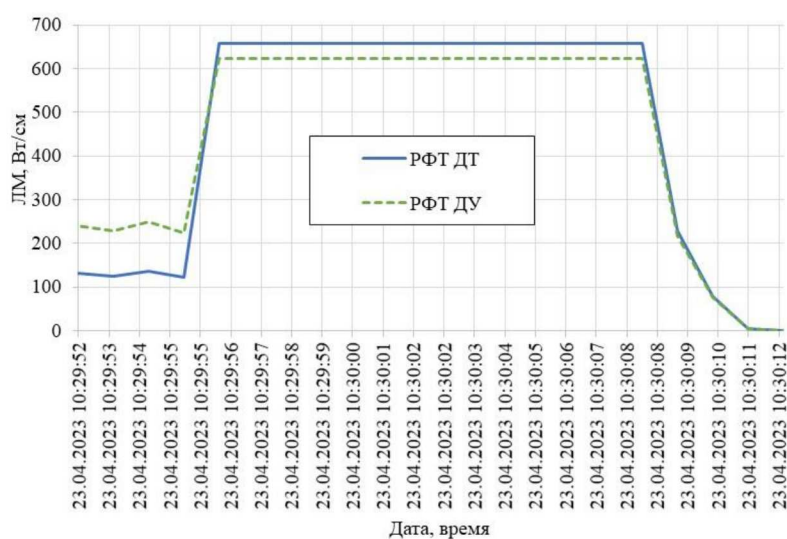


Рис. 2. Изменение максимальной линейной мощности твэла с датчиком температуры ($ЛМ_{\text{макс}}$ (РФТ ДТ)) и максимальной линейной мощности твэла с датчиком удлинения ($ЛМ_{\text{макс}}$ (РФТ ДУ)) во время импульса мощности

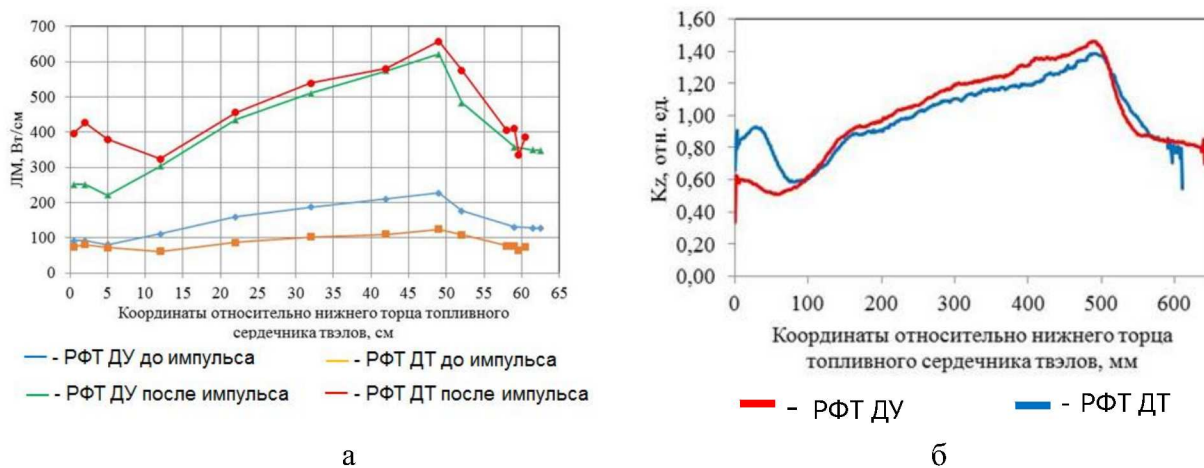


Рис. 3. Распределение ЛМ по высоте активной части твэла (а) и коэффициенты неравномерности энергосвечения по высоте твэлов «kz», полученные по гамма-сканированию

Послереакторные исследования РФТ

Визуальная инспекция твэлов показала отсутствие существенных изменений в их коррозионном состоянии в результате проведенного эксперимента. Каких-либо дефектов по результатам осмотра твэлов РФТ ДУ и РФТ ДТ выявлено не было. По результатам анализа рентгеновских снимков каких-либо дефектов топливного сердечника и закладных деталей твэла, как до, так и после эксперимента, также не обнаружено. Зазоры между таблетками отсутствуют, смещения топливного сердечника в результате эксперимента не произошло, зазоры между нижней и верхней таблетками и нижней заглушкой и переходником остались без изменения.

Диаметр твэлов РФТ ДУ и РФТ ДТ до и после эксперимента измеряли с шагом 1 мм в восьми азимутальных ориентациях. Абсолютная погрешность измерения диаметра

не превышала 8 мкм. Диаграммы изменения диаметра по длине твэлов имеют выраженную короткопериодическую составляющую, представляющую собой рельеф, образовавшийся на оболочке в результате её механического взаимодействия с топливными таблетками. Профили изменения диаметра по длине обоих твэлов до и после испытаний существенно различаются (рис. 4). В результате испытания на участке с координатами 150-600 мм от нижнего торца топливного сердечника произошло увеличение диаметра обоих твэлов. Формы кривых изменения диаметра для обоих твэлов примерно совпадают, в то же время наблюдается различие по абсолютной их величине. У твэла РФТ ДТ оно больше, чем у твэла РФТ ДУ. Большее значение увеличения диаметра твэла во время эксперимента свидетельствует о большей окружной деформации её оболочки, значение максимальной окружной деформации оболочки для твэла РФТ ДТ составило 0,85%, для твэла РФТ ДУ – 0,70%.

Длина обоих твэлов за время эксперимента увеличилась. Удлинение твэла РФТ ДУ составило $0,64 \pm 0,31$ мм, РФТ ДТ – $1,36 \pm 0,31$ мм.

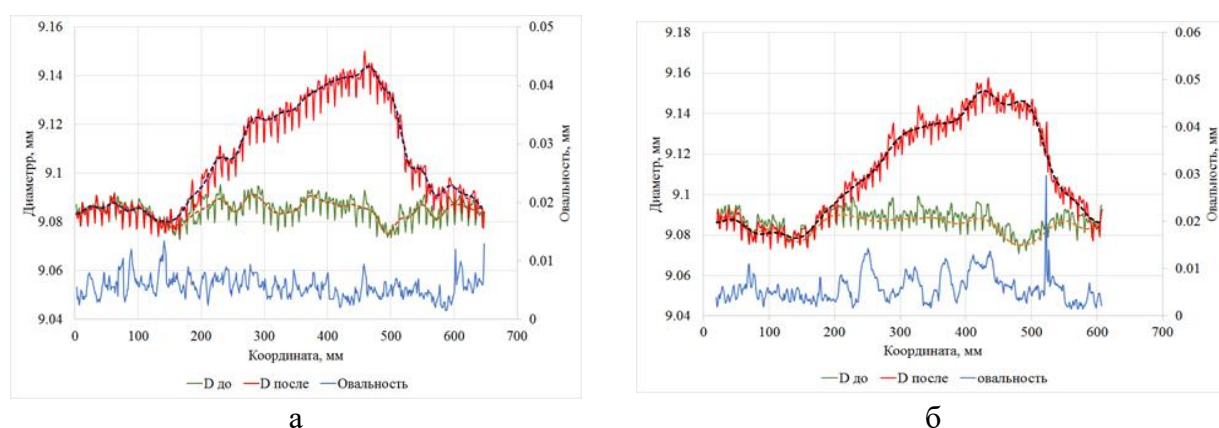


Рис. 4. Изменение диаметра по длине РФТ ДУ (а) и РФТ ДТ (б) до и после эксперимента

Профили распределения ^{137}Cs и ^{134}Cs по длине твэлов РФТ до и после эксперимента практически подобны (рис. 5). Перераспределения летучих продуктов деления по длине топливных сердечников или повышенного их содержания в местах расположения стыков топливных таблеток не установлено.

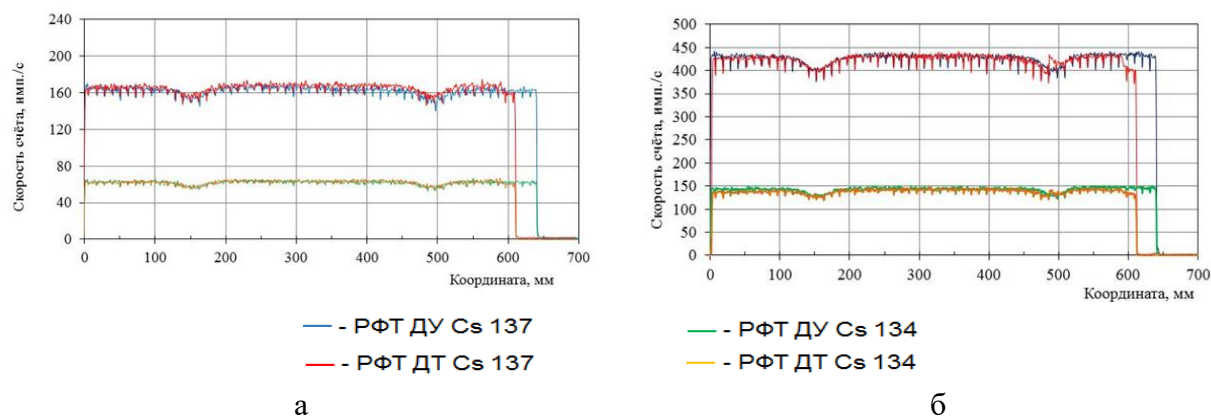


Рис. 5. Изменение скорости счета ^{134}Cs и ^{137}Cs по длине РФТ ДУ (а) и РФТ ДТ (б)

Характерной особенностью топлива в поперечных и продольных сечениях РФТ на участке максимума энерговыделения является увеличение фрагментации топливных таблеток за счёт образования многочисленных коротких радиальных трещин во внешнем слое топливных таблеток, а также образование трещин по границам зерен в центральной части топливных таблеток, увеличение концентрации мелких внутризеренных пор и уменьшение центрального отверстия топливных таблеток (рис. 6).

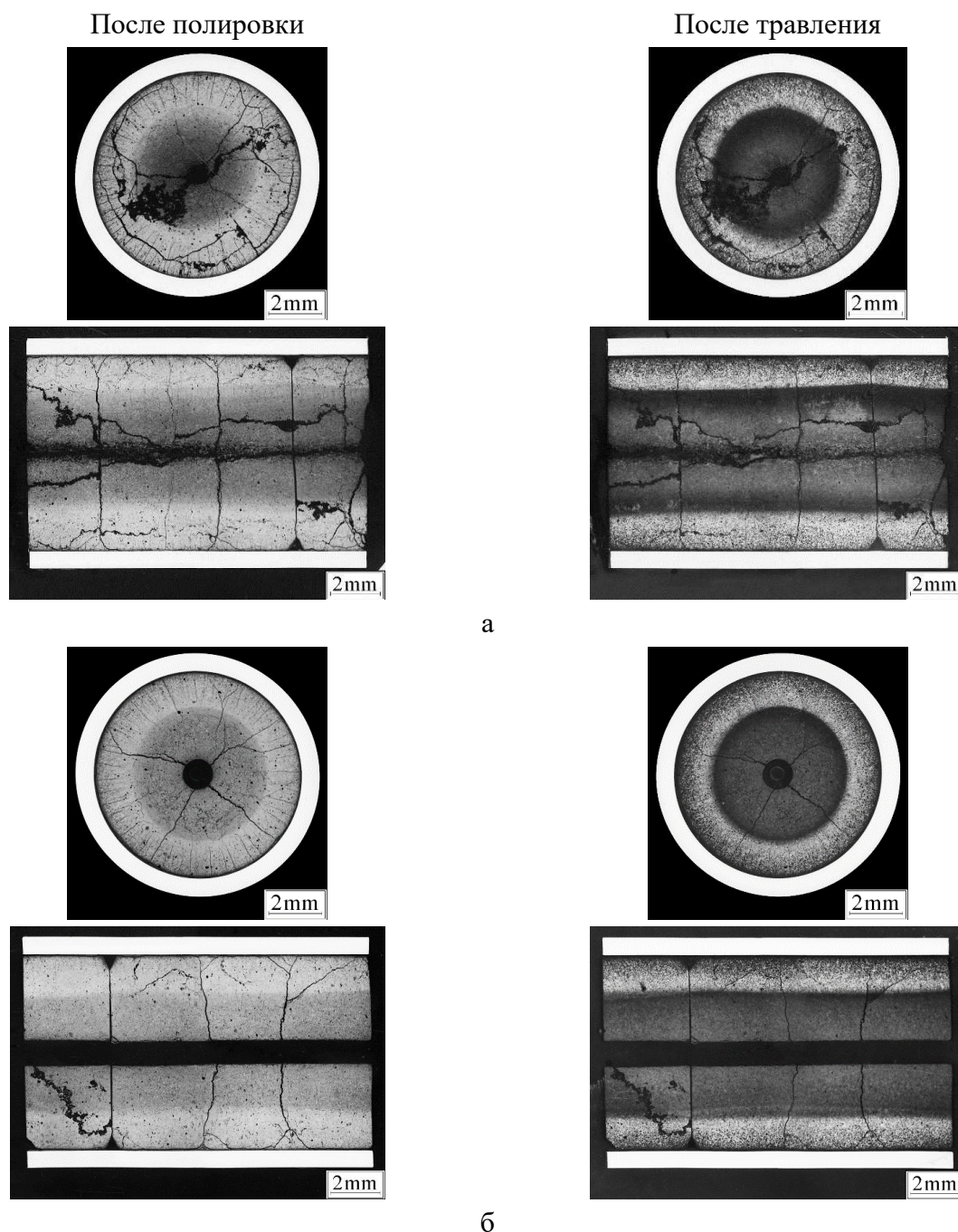


Рис. 6. Макроструктура поперечных и продольных сечений РФТ ДТ (а) и РФТ ДУ (б) на участке максимума энерговыделения

Распределение продуктов деления в топливе РФТ (рис. 7) характерно для штатного топлива реакторов ВВЭР-1000, отработавшего до высокого (~60 МВт·сут/кгU) выгорания. Небольшое снижение содержания цезия в матрице топлива по сравнению с расчетным в центральной части топливной таблетки связано, по-видимому, с высокой линейной мощностью в данном сечении твэла во время эксперимента, что также подтверждается образованием в этой же области металлических выделений на основе молибдена и благородных металлов.

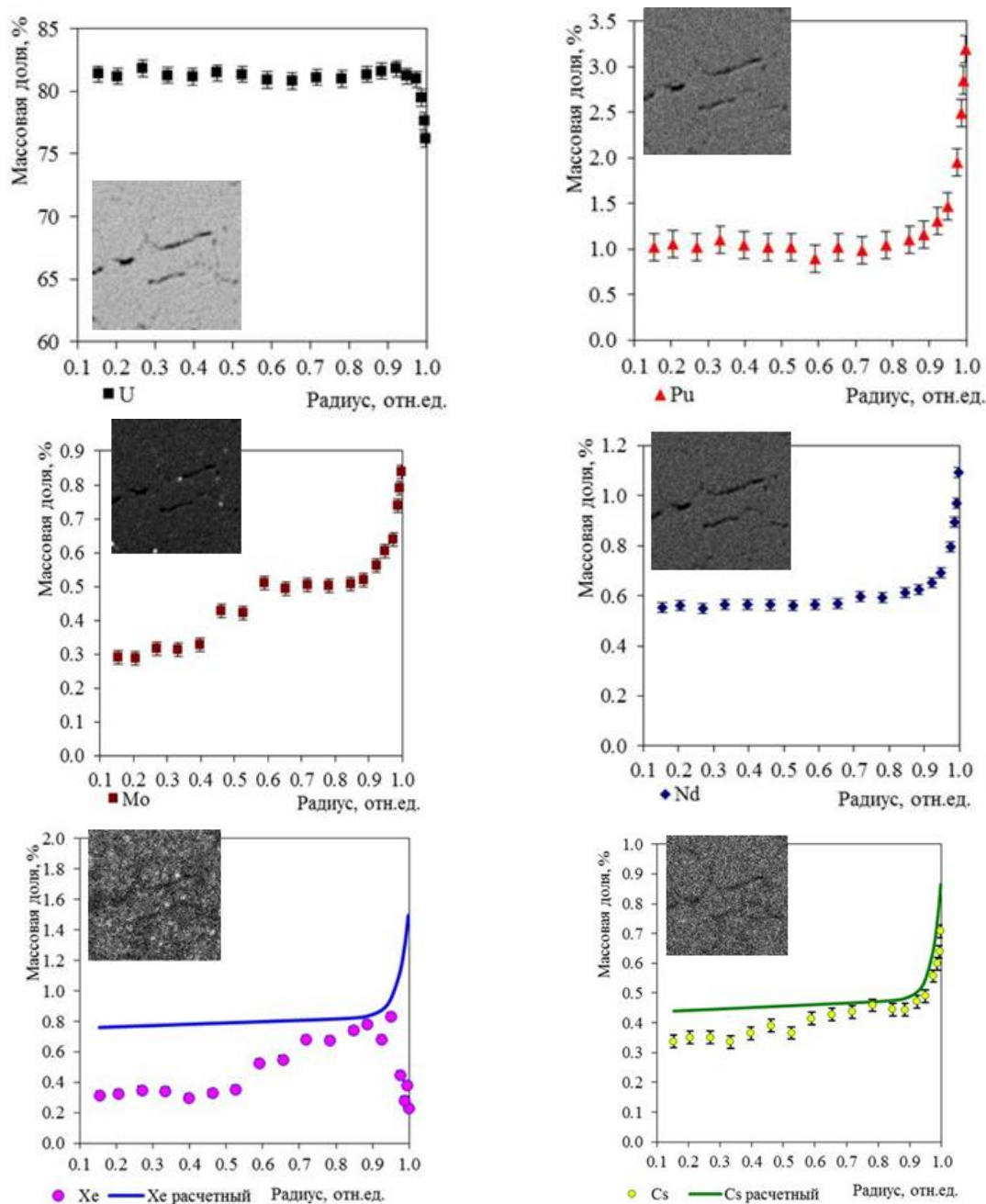


Рис. 7. Распределения U, Pu и основных продуктов деления по радиусу топливной таблетки и карты распределения химических элементов в характеристическом рентгеновском излучении

Существенного изменения в коррозионном состоянии оболочки за время эксперимента не произошло (рис. 8). Деформация оболочки под действием распухающего топлива во время эксперимента привела к фрагментации оксидной плёнки вертикальными трещинами на её наружной поверхности. Толщина оксидной пленки на наружной поверхности не превышает 7 мкм, со стороны внутренней поверхности наблюдается плотный контакт топлива с оболочкой, растрескивания оксидной пленки здесь не замечено. Гидрирование оболочки незначительно, концентрация водорода в оболочке составляет 37 ± 5 ppm для РФТ ДУ и 61 ± 6 ppm для РФТ ДТ.

Проведены механические испытания на растяжение кольцевых образцов оболочки РФТ ДУ при комнатной температуре и при температурах 100, 200, 400 °С. С увеличением температуры испытаний значения предела прочности снижаются от 740 до 460 МПа, предела текучести – от 680 до 430 МПа, а значение общего удлинения увеличивается от 14 до 21%, относительная погрешность измерений не превышает 5%.

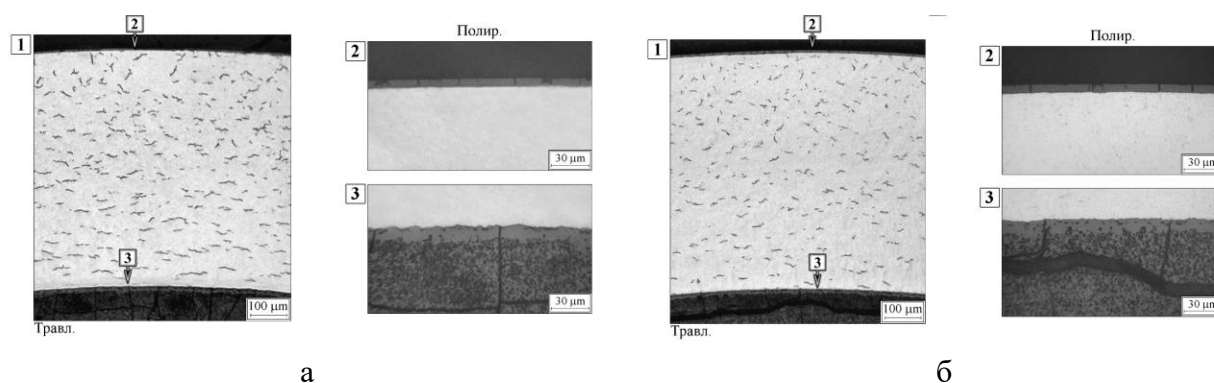


Рис. 8. Микроструктура оболочки РФТ ДТ (а) и РФТ ДУ (б) на участке максимума энерговыделения

Таким образом, геометрические и структурные изменения топлива и оболочки твэлов РФТ ДТ и РФТ ДУ в эксперименте RIA-Э110М-70 не привели к разрушению твэлов (т.е. к нарушению целостности конструкции твэлов, в результате которого твэлы утрачивают геометрию, обеспечивающую их проектное охлаждение [1]).

Расчетное моделирование термомеханического поведения РФТ в эксперименте

Проведены расчеты термомеханического поведения твэлов РФТ ДТ и РФТ ДУ в эксперименте RIA-Э110М-70 с использованием программы РАПТА-5.2 [3].

Программа для РАПТА-5.2 (организация разработчик – АО «ВНИИНМ») предназначена для расчётного моделирования поведения тепловыделяющего элемента водо-водяного энергетического реактора при проектных авариях с целью проверки неперевышения установленных в федеральных нормах и правилах в области

использования атомной энергии НП-082-07 значений максимального проектного предела повреждения твэлов, не превышения предельного значения максимальной среднерадиальной энтальпии топлива в проектных авариях с быстрым увеличением реактивности и прогнозирования разгерметизации твэла.

Исходные данные по высотному распределению и изменению в процессе эксперимента линейной мощности энерговыделения в РФТ представлены на рис. 2, 3а, граничные условия 3 рода на поверхности оболочки РФТ задавались по результатам теплогидравлических расчетов АО «ГНЦ НИИАР» по программе МУЗА [4].

Результаты расчетов проиллюстрированы на рис. 9-11. Расчетные оценки максимальной температуры и максимальной среднерадиальной энтальпии топлива РФТ ДТ и РФТ ДУ с учетом погрешности определения линейной мощности энерговыделения составили:

- для РФТ ДТ - 2537 ± 20 °С и $139,6 \pm 1,8$ кал/г,
- для РФТ ДУ - 2355 ± 22 °С и $118,9 \pm 1,5$ кал/г.

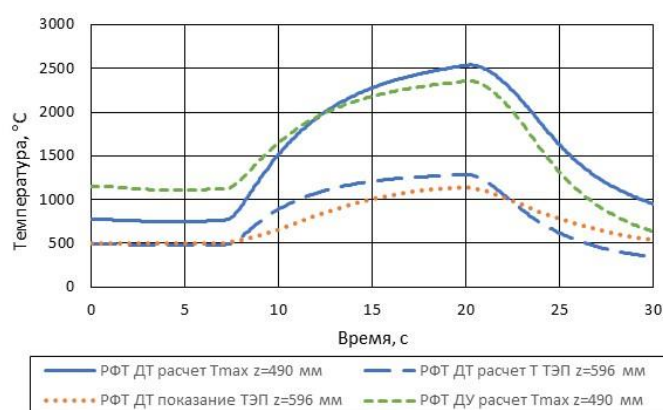


Рис. 9. Температура внутренней поверхности центрального отверстия топливной таблетки в наиболее горячем сечении по высоте (490 мм) РФТ ДТ и РФТ ДУ и в сечении установки ТЭП (596 мм) РФТ ДТ

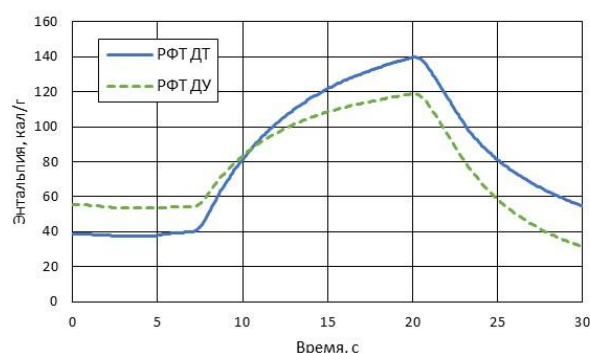


Рис. 10. Среднерадиальная энтальпия топлива в наиболее горячем сечении по высоте (490 мм) РФТ ДТ и РФТ ДУ

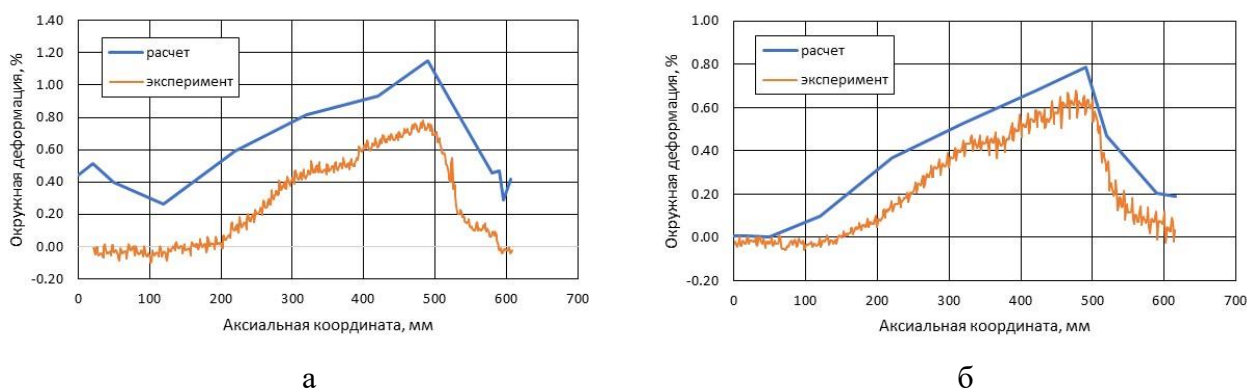


Рис. 11. Распределение окружной деформации оболочки по высоте РФТ ДТ (а) и РФТ ДУ (б)

Обсуждение результатов

При выполнении проектных обоснований твэлов ВВЭР используется критерий безопасного поведения твэлов в проектных авариях с возрастанием реактивности в виде зависимости предельного значения среднерадиальной энтальпии топлива от выгорания:

$$H_{lim} = 200 - 0,875 \cdot V_u, \text{ кал/г},$$

где V_u – среднее выгорание топлива в таблетке, МВт·сут/кгU.

Выполнение данного критерия гарантирует отсутствие разрушения (фрагментации) твэла, т.е. сохранение геометрии, обеспечивающей проектное охлаждение твэла.

Данный критерий построен на базе результатов испытаний рефабрикованных твэлов ВВЭР на импульсных реакторах ИГР и БИГР [5, 6, 7, 8] (см. рис. 12). Следует заметить, что условия экспериментов на импульсных реакторах ИГР и БИГР существенно отличаются от условий проектных аварий с возрастанием реактивности РУ с ВВЭР: твэл располагался в герметичной ампуле с водой атмосферного давления при комнатной температуре, ширина импульса мощности составляла ~3 мс (БИГР) и ~800 мс (ИГР). Условия экспериментов на реакторах ИГР и БИГР являются консервативными по скорости и величине энерговывода по сравнению со сценариями проектных аварий с выбросом ОР СУЗ РУ с ВВЭР.

В качестве критерия принята граничная зависимость среднерадиальной энтальпии топлива от выгорания, разделяющая эксперименты с сохранением герметичности от экспериментов с разгерметизацией оболочки, при этом во всех представленных экспериментах разрушения (фрагментации) твэлов не было. Оболочки всех твэлов испытывали пластическую деформацию в результате механического взаимодействия с топливом и под действием внутреннего давления газа, разгерметизация оболочек происходила в результате локализации пластической деформации.

На рис. 12 приведены также результаты эксперимента RIAЭ110M70.

Сопоставление результатов эксперимента RIAЭ110М70 с представленным критерием правомерно, поскольку механизмы возможного повреждения оболочки из сплава Э110М в эксперименте RIAЭ110М70 и оболочки из сплава Э110 в экспериментах на импульсных реакторах аналогичны, несмотря на значительные различия в параметрах энерговывода, – это пластическая деформация под действием механического взаимодействия с топливом и под действием перепада давления газа на оболочке. Пластичность сплавов Э110 и Э110М сохраняется на достаточном уровне благодаря высокой коррозионной стойкости и низкому поглощению водорода на протяжении всего проектного срока эксплуатации.

Таким образом, отсутствие разрушения ТВЭлов в эксперименте RIAЭ110М70 при достигнутых значениях среднерадиальной энтальпии топлива подтверждает применимость критерия безопасного поведения ТВЭлов ВВЭР в проектных авариях с возрастанием реактивности для ТВЭлов с оболочкой из сплава Э110М.

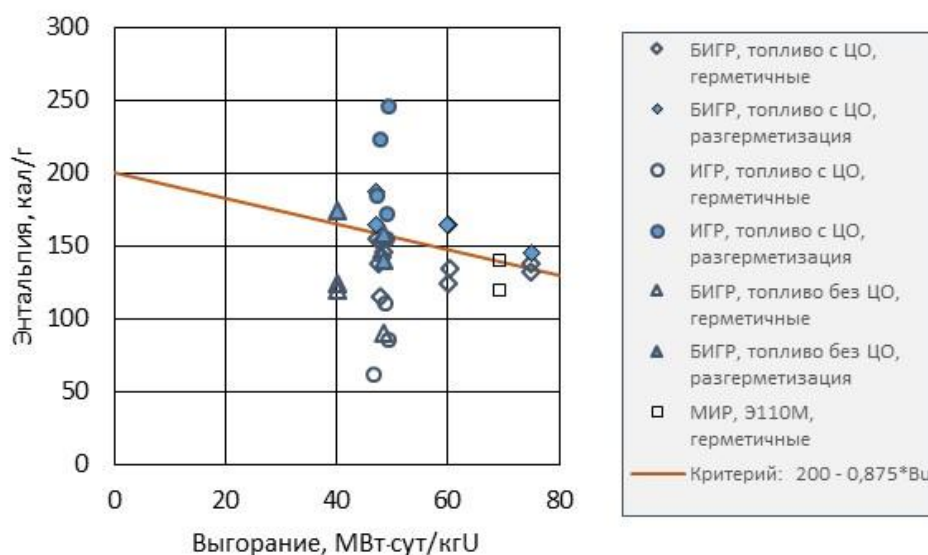


Рис. 12. Результаты экспериментов на реакторах ИГР, БИГР, МИР.М1 и критерий безопасности для ТВЭлов ВВЭР в проектных авариях RIA

Выводы

Проведен эксперимент с возрастанием реактивности RIA-Э110М-70 в реакторе МИР.М1, проведены посттестовые материаловедческие и расчетные исследования, в результате которых получены данные о состоянии ТВЭлов высокого выгорания с оболочкой из сплава Э110М при достижении высоких значений среднерадиальной энтальпии топлива, необходимые для обоснования критерия безопасного поведения ТВЭлов ВВЭР в условиях проектных аварий с возрастанием реактивности.

По результатам эксперимента установлено:

– максимальная линейная мощность энерговыделения в топливе РФТ ДТ и РФТ ДУ составила соответственно 658 ± 8 Вт/см и 622 ± 8 Вт/см;

– расчетные оценки по программе РАПТА-5.2 максимальной температуры топлива и максимальной среднерадиальной энтальпии топлива РФТ ДТ и РФТ ДУ составили:

– для РФТ ДТ – 2537 ± 20 °С и $139,6 \pm 1,8$ кал/г;

– для РФТ ДУ – 2355 ± 22 °С и $118,9 \pm 1,5$ кал/г.

По результатам материаловедческих исследований установлено:

– оболочки твэлов сохранили герметичность;

– произошло увеличение диаметра обоих твэлов: значение максимальной окружной деформации оболочки для твэла РФТ ДТ составило 0,85%, для твэла РФТ ДУ – 0,70%;

– на участке максимального энерговыделения и максимальной деформации оболочки произошло увеличение фрагментации топливных таблеток за счёт образования многочисленных коротких радиальных трещин во внешнем слое топливных таблеток;

– испытания привели к образованию многочисленных коротких радиальных трещин во внешнем слое топливных таблеток, к газовому распуханию топлива в центральной части топливных таблеток, образованию трещин по границам зерен, увеличению концентрации мелких внутризеренных пор и уменьшению центрального отверстия топливных таблеток.

Геометрические и структурные изменения топлива и оболочки не привели к разрушению твэлов. Отсутствие разрушения твэлов в эксперименте RIA-Э110М-70 при высоких достигнутых значениях среднерадиальной энтальпии топлива подтверждает применимость критерия безопасности для твэлов ВВЭР с оболочкой из сплава Э110М при выгорании 70 МВт·сут/кгU.

Список литературы

1. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций. НП-082-07. Введены с 01.07.2008.
2. Программа MCU-RRFIA с библиотекой констант DLC/MCUDAT-1.0. Регистрационный номер паспорта ЦЭП – 338.
3. Программа для ЭВМ РАПТА-5.2. Аттестационный паспорт от 05.12.2022 №399. ФБУ «НТЦ ЯРБ». Экспертный совет по аттестации программ для ЭВМ при Ростехнадзоре.
4. Алексеев А.В. Использование программы МУЗА для расчетного сопровождения экспериментов в исследовательских реакторах. Вопросы атомной науки и техники. Сер.: «Физика ядерных реакторов». 2013 г. Вып.3, С. 135-140.

5. *L. Yegorova, A. Bortash et al., Data Base on the Behavior of High Burnup Fuel Rods with Zr-1%Nb Cladding and UO₂ Fuel (VVER Type) under Reactivity Accident Conditions, NUREG/IA0156, Vol.1-3, 1999.*
6. *L. Yegorova, O. Nechaeva et al., Experimental Study of Narrow Pulse Effects on the Behavior of High Burnup Fuel Rods with Zr-1%Nb Cladding and UO₂ Fuel (VVER Type) under Reactivity-Initiated Accident Conditions, NUREG/IA-0213, Vol.1,2, 2006.*
7. *O.A. Nechaeva, V.V. Novikov, V.I. Kuznetsov, A.V. Salatov, P.V. Fedotov. Pulse tests of refabricated VVER fuel rods in the BGR to justify safety under design basis RIA conditions. Proceedings of the 11th International Conference «WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support», 26 September – 03 October 2015, Golden Sands Resort, Bulgaria. Vol.2, P. 399-408.*
8. *State-of-the-art Report on Nuclear Fuel Behaviour Under Reactivity-initiated Accident Conditions. NEA No.7575. OECD 2022.*