А.В. Сухих, С.С. Сагалов, С.В. Павлов

Топливо канальных кипящих реакторов большой мощности: проблемы и решения

Димитровград, 2016 г.

УДК 621.039.546

С.В. Павлов, А.В. Сухих, С.С. Сагалов. Топливо канальных кипящих реакторов большой мощности: проблемы и решения. – Димитровград: АО «ГНЦ НИИАР», 2016. – 185 с.

Представлены исходные данные и параметры эксплуатации двадцати двух ТВС, отработавших в реакторах РБМК-1000 до выгорания 4,6–35,7 МВт·сут/кгU. С использованием неразрушающих и разрушающих методов реакторного материаловедения получен большой объём экспериментальных результатов о состоянии исследованных ТВС и твэлов в широком диапазоне значений энерговыделения и продолжительности эксплуатации. Проведён анализ полученной информации с целью выработки рекомендаций по усовершенствованию конструкции тепловыделяющих сборок, оптимизации технологии их изготовления, оценки ресурса работоспособности и выявления причин выхода из строя ТВС из-за разгерметизации твэлов.

Монография предназначена для сотрудников научно-исследовательских организаций, конструкторских бюро, предприятий атомной промышленности, занимающихся проблемами топлива РБМК, а также будет полезна для аспирантов и студентов соответствующих направлений обучения.

Рецензенты:

Б.А. Калин – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физических проблем материаловедения НИЯУ МИФИ;

В.Г. Крицкий – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник АО «Атомпроект».

- Открытое акционерное общество «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов» (ОАО «ГНЦ НИИАР»), 2016
- Сухих А.В., 2016, АО «ГНЦ НИИАР»
- Сагалов С.С., 2016, АО «ГНЦ НИИАР»
- Павлов С.В., 2016, ООО НПФ «Сосны»

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АЗ – активная зона

АЭС – атомная электрическая станция

БВ – бассейн выдержки

БН-реактор – реактор на быстрых нейтронах

БС – барабан-сепаратор

ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор

ВНИИНМ – Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов

ВТ – вихретоковый

ГПД – газовые продукты деления

ГЦН – главный циркуляционный насос

ДП – дополнительный поглотитель

ДР – дистанционирующая решётка

НИЦ КИ – Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

ИРМ – Институт реакторных материалов

КГО – контроль герметичности оболочек

КМПЦ – контур многократной принудительной циркуляции

КПР – капитальный плановый ремонт

КТ – каркасная труба

КР – концевая решётка

КСС – контактно-стыковая сварка

ЛАЭС – Ленинградская атомная электростанция

МСЗ – Машиностроительный завод

НИИ – Научно-исследовательский институт

ОР – опорная решётка

ОТВС – отработавшая тепловыделяющая сборка

ОЧГ – особо чистый германий

ППД – полупроводниковый детектор

ППР – планово-предупредительный ремонт

ПТВ – пучок твэлов верхний

ПТН – пучок твэлов нижний

РБМК – реактор большой мощности канальный

РЗМ – разгрузочно-загрузочная машина

РУ – реакторная установка

СУЗ – система управления и защиты

ТВС – тепловыделяющая сборка

ТК – технологический канал

ТОП – толщина оксидной плёнки

УЗ – ультразвуковой

ЦЗТ – центральное закрепление твэлов

ЧМЗ – Чепецкий механический завод

LWR – light water reactor (легководный реактор)

BWR – boiling water reactor (кипящий водяной реактор)

PWR – pressured water reactor (водяной реактор под давлением)

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 7
ВВЕДЕНИЕ.....9
ГЛАВА 1. Краткая характеристика объектов исследования 11
1.1. Исходные параметры штатных ТВС и твэлов РБМК.....11
1.2. Технические характеристики экспериментальной ТВС с центральным закреплением твэлов.....17
1.3. История эксплуатации исследованных ТВС 19
ГЛАВА 2. Контроль состояния отработавших ТВС.....29
2.1. Определение герметичности твэлов ультразвуковым методом 29
2.2. Визуальный осмотр ТВС и пучков твэлов.....30
2.3. Определение геометрических параметров пучков твэлов 37
2.4. Измерение усилий страгивания и извлечения твэлов при разборке ТВС 39
ГЛАВА 3. Методы первичных нерезрушающих исследований твэлов 43
3.1. Визуальный осмотр.....43
3.2. Размерометрия.....54
3.2.1. Измерение длины и диаметра твэлов.....54
3.2.2. Оценка величины зазора между топливным сердечником и оболочкой.....56
3.2.3. Рентгеновская радиография топливного сердечника.....58
3.3. Вихретоковое сканирование 60
3.3.1. Структурная схема комплекса утановок вихретокового контроля.....60
3.3.2. Сканирование проходным датчиком.....63
3.3.3. Определение толщины оксидных плёнок на поверхности твэлов.....67
3.4. Гамма-сканирование.....69
ГЛАВА 4. Результаты послереакторных исследований твэлов 71
4.1. Выгорание и его распределение по длине топливного сердечника.....71
4.2. Поведение газообразных и летучих продуктов деления в герметичных твэлах.....75
4.3. Миграция цезия в негерметичных твэлах.....79
4.4. Геометрические параметры твэлов 82
4.4.1. Длина твэлов.....82
4.4.2. Диаметр оболочек 92
4.5. Коррозионное состояние оболочек твэлов.....98
4.5.1. Окисление внутренней поверхности оболочек.....99
4.5.2. Окисление внешней поверхности твэлов 101
4.5.3. Аксиальная и азимутальная асимметрия окисления оболочек.....110

4.6. Фреттинг-износ оболочек твэлов под пуклёвками дистанционирующих решёток 120
4.7. Debris-взаимодействие и последствия попадания воды внутрь твэла 123
4.8. Содержание водорода в оболочках твэлов 126
4.9. Кратковременные механические характеристики материала оболочек 129
4.10. Компонентный состав и толщина отложений продуктов коррозии контура реактора на поверхности твэлов 136
4.11. Состояние сварных соединений заглушек и наконечников с оболочкой 140
4.12. Состояние наконечников и фиксирующих колец твэлов 142
4.13. Состояние топлива в исследованных ТВС 145
4.13.1. Плотность топлива 145
4.13.2. Структура топлива в герметичных твэлах 146
4.13.3. Структура топлива в негерметичных твэлах 149
4.13.4. Рентгено-спектральный анализ уран-эрбиевого оксидного топлива 154
4.13.5. Газовыделение из топлива при эксплуатации твэлов 155
4.13.6. Состояние пружинного фиксатора топливного сердечника 157
ГЛАВА 5. Результаты исследования конструкционных элементов ТВС 159
5.1. Каркасная и центральная трубы 159
5.2. Состояние дистанционирующих решёток из стали и циркониевого сплава в ТВС, отработавших до проектного и повышенного выгорания топлива 162
5.2.1. Конструкция дистанционирующих решёток 163
5.2.2. Размерные изменения 164
5.2.3. Упругие и прочностные свойства 167
5.2.4. Морфология дефектов в ячейках решёток 168
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 170
Список литературы 177

ПРЕДИСЛОВИЕ

Успешный опыт эксплуатации первой в мире атомной электрической станции в Обнинске и двух энергоблоков Белоярской АЭС стал основой для создания канальных уран-графитовых реакторов большой мощности – РБМК [1–6]. В 1973 г. состоялся физический пуск реактора РБМК-1000 первого блока Ленинградской АЭС (ЛАЭС). За период с 1975 по 1990 годы были введены в эксплуатацию ещё три блока на ЛАЭС, четыре на Курской и три блока на Смоленской АЭС. В настоящее время 11 энергоблоков с РБМК-1000 производят около 45 % электроэнергии, вырабатываемой всеми АЭС Российской Федерации.

Дальнейшее строительство АЭС с реакторами РБМК не планируется, так как в России принята концепция развития атомной энергетики, основанной на использовании ВВЭР и БН-реакторов [7]. Если предположить, что энергоблоки Ленинградской, Смоленской и Курской АЭС будут выводиться из эксплуатации в том же порядке, в каком они вступали в строй действующих, то с учётом увеличения проектного срока их использования (с 30 до 45 лет) этот процесс продлится до 2035 года [8].

Несмотря на вывод из эксплуатации всех энергоблоков РБМК-1000 в ближайшие 20 лет проблемы работоспособности, надёжности и безопасности ядерного топлива кипящих реакторов остаются актуальными и не снимаются с повестки дня. Наряду с этими традиционными проблемами перед разработчиками ТВС и твэлов возникают новые задачи. Это, например, перевод ТВС РБМК с длительного «мокрого» на «сухое» хранение, разработка способов обращения с негерметичными твэлами, обоснование технологии дожигания недовыгоревших сборок с остановленных энергоблоков АЭС [9–11]. Исходя из специфики эксплуатации кипящих реакторов (непрерывная перегрузка топлива) на остановленных энергоблоках будет находиться много ТВС с глубиной выгорания значительно меньше проектной. Это топливо может быть использовано на действующих блоках, что позволит существенно сократить потребление «свежих» ТВС. Для реализации всех перечисленных задач необходимо знать, как изменяются характеристики ТВС и твэлов в процессе эксплуатации.

Первые послереакторные исследования отработавшего топлива РБМК-1000 начали проводить в защитных камерах ЛАЭС. Из облучённых твэлов вырезались фрагменты длиной около 1000 мм, которые отправляли в специальных контейнерах на материаловедческие исследования в НИИ атомных реакторов (г. Димитровград) и Институт реакторных материалов (г. Заречный). Фрагментация твэлов была вынужденной мерой, обусловленной небольшими размерами радиационных защитных камер в этих институтах.

Только после пуска в эксплуатацию нового материаловедческого комплекса НИИАР (в 1986 г.), оснащённого крупногабаритными камерами высотой более 7 метров, появилась возможность исследования полномасштабных пучков твэлов ТВС РБМК-1000 [12]. Для изучения состояния отработавших ТВС использовались разрушающие и неразрушающие методы реакторного материаловедения. В результате проведённых исследований был получен значительный объём экспериментальной информации по состоянию тепловыделяющих сборок и их составных элементов: твэлов, центральной и каркасной труб, дистанционирующих решёток в широком диапазоне энерговыработки и продолжительности эксплуатации.

Таким образом, появилась возможность в отдельной работе проследить за изменением изучавшихся в процессе послереакторных исследований характеристик ТВС и твэлов, обобщить и проанализировать полученные результаты. Приведённая в монографии информация охватывает лишь часть проблемы поведения топлива РБМК при эксплуатации и не претендует на всеобъемлющий характер. Тем не менее, книга может быть полезна научным сотрудникам, инженерам и проектировщикам, работающим в атомной энергетике, студентам и аспирантам соответствующих специальностей.

В заключении авторы считают своим приятным долгом выразить глубокую признательность специалистам НИИАР, внёсшим большой вклад в исследование топлива РБМК: Смирнову В.П, Смирнову А.В., Дворецкому В.Г., Маркову Д.В., Звир Е.А., Чёсанову В.В., Перепёлкину С.О., Кобылянскому Г.П., Маёршиной Г.И.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение выгорания и эксплуатационной надёжности – основные направления совершенствования ядерного топлива для реакторов РБМК-1000. К 2017 году предполагается увеличить проектное выгорание топлива с 20 до 35 МВт·сут/кгU при продолжительности эксплуатации около 10 лет. Для этого в кипящих канальных реакторах будут использоваться ТВС нового поколения (уран-эрбиевое топливо с профилированным обогащением по ^{235}U, центральное закрепление твэлов, антидебризный фильтр, фиксаторы топливного столба из сплава ЭК-173ИД) [13].

По мере роста продолжительности эксплуатации и глубины выгорания топлива выбор оптимальных решений по конструкции, технологии изготовления и параметрам облучения ТВС РБМК-1000 существенно усложняется. Это связано с недостатком необходимых стендов и петлевых установок, имитирующих реальные условия для прогнозирования поведения ТВС в кипящем канальном реакторе. Поэтому доказательная база при выборе того или иного решения формируется в основном по результатам испытаний на действующих энергоблоках АЭС и с помощью сведений, полученных в процессе послереакторных исследований отработавших ТВС в материаловедческих центрах отрасли. Основными задачами этих исследований являются:

– изучение закономерностей и механизмов изменения характеристик элементов конструкции усовершенствованных ТВС, облучённых до глубокого выгорания с целью обоснования ресурса их работоспособности;

– выяснение причин выхода из строя тепловыделяющих сборок на различных уровнях энерговыработки и продолжительности эксплуатации.

Успехам в модернизации топлива РБМК во многом способствовало создание в НИИАР материаловедческого центра на основе комплекса защитных камер и внутрикамерных устройств для контроля состояния полномасштабных ТВС, отработавших в энергетических реакторах [12]. Наряду со сборками первого поколения (низкое обогащение по ^{235}U, стальные ДР, отсутствие выгорающего поглотителя и т.д.) в нём проводились исследования ТВС и твэлов новых конструкций, изготовленных с применением более совершенных технологий.

В период с 1998 по 2014 год было исследовано 22 сборки, отработавшие на ЛАЭС до выгорания 4,6–35,7 МВт·сут/кгU. Среди них – ТВС с циркониевыми дистанционирующими решётками, центральным закреплением твэлов, различным обогащением по ^{235}U (2,4–2,8 %) и содержанием выгорающего поглотителя Er_2O_3 (0,4–0,6 %), с твэлами без финишных операций травления и анодирования. Кроме того, 8 сборок было поставлены в НИИАР с целью выяснения причин их разгерметизации.

По результатам изучения состояния отработавших штатных и экспериментальных тепловыделяющих сборок РБМК-1000 с урановым и уран-эрбиевым оксидным топливом была подтверждена возможность достижения повышенного уровня выгорания, а также обнаружены препятствия, стоящие на пути к поставленной цели.

Глава 1. Краткая характеристика объектов исследования

Объектами послереакторных исследований являлись ТВС РБМК-1000, отработавшие на 1-ом и 2-ом энергоблоках ЛАЭС до различного выгорания. Тепловыделяющие сборки, изготовленные на ПАО «МСЗ», отличались по конструкции, виду топлива, материалу дистанционирующих решёток (ДР) и фиксаторов топливного сердечника твэлов (табл. 1.1).

1.1 Исходные параметры штатных ТВС и твэлов РБМК

Тепловыделяющая сборка РБМК-1000 состоит из двух идентичных пучков твэлов – верхнего (ПТВ) и нижнего (ПТН), которые размещены один над другим в технологическом канале реактора. Каждый пучок включает 18 твэлов, расположенных вокруг каркасной трубы (КТ) в два ряда: 6 твэлов во внутреннем ряду и 12 твэлов в наружном.

Конструктивно твэл РБМК состоит из топливного сердечника в защитной оболочке, герметизированной по торцам заглушкой и наконечником с помощью контактно-стыковой сварки. Со стороны наконечника предусмотрен свободный объём – газосборник с размещённым в нём фиксатором топливного сердечника. На заглушке выбит заводской номер твэла [14].

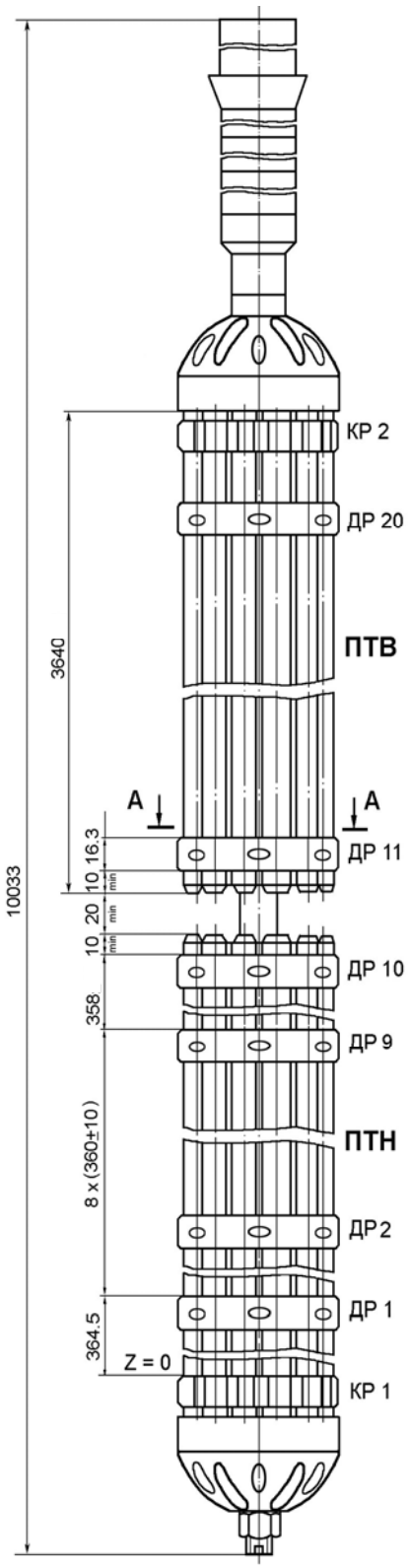
Наконечники твэлов закреплены в концевых решётках (КР) с помощью обжимных колец. В каждом пучке твэлы дистанционируются десятью решётками из коррозионностойкой стали или циркониевого сплава Zr-1%Nb. Крепление ДР осуществляется путём вдавливания стенок их направляющих втулок в пазы на КТ. Оба пучка соединяются в единую ТВС с помощью центральной трубы или стержня, проходящих внутри каркасных труб ПТВ и ПТН. В ПТВ твэлы расположены наконечниками вверх, а в ПТН – вниз. Торцевые заглушки твэлов ПТВ и ПТН находятся в центре активной зоны реактора РБМК и отстоят друг от друга на расстоянии около 30 мм для компенсации удлинения оболочечных труб.

В качестве материала оболочек, концевых деталей твэлов, а также каркасной и центральной труб используются сплавы Zr−1%Nb (Э110) и Zr−2,5%Nb (Э125) соответственно. Топливом служат спечённые таблетки из диоксида урана или UO_2+Er_2O_3 с обогащением по ^{235}U до 1,8−2,8 %. Перемещению топливных таблеток по длине твэла препятствует фиксатор в виде спиральной пружины из сплава Ц2М или ЭК-173ИД, имеющий фиксирующие витки, диаметр которых в свободном состоянии превышает внутренний диаметр оболочки, и компенсирующие витки меньшего диаметра. Основные параметры штатных ТВС РБМК-1000 и её твэлов представлены на рис. 1.1, 1.2, в табл.1.2.

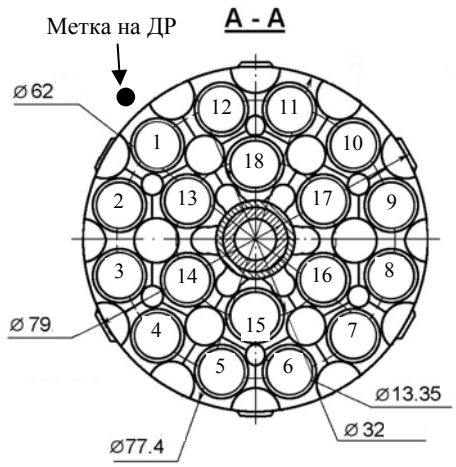
Таблица 1.1 – Основные исходные параметры исследованных ТВС РБМК-1000

№ п/п	Заводской номер ТВС	Краткое обозначение	Дата изготовления	Исполнение ТВС	Материал ДР	Исполнение твэла	Обогащение топлива по ^{235}U, %	Масс. доля эрбия, %	Наличие центрального канала в топливе	Материал фиксатора топливного сердечника	Особенности
1	1-18-0659-73	659	1973	—	сталь	—	1,8	0	нет	Ц2М	
2	1-20-7917-81	917	1981	862.02.000-30	сталь	АБ.02.001.000	2,0	0	нет	Ц2М	Регенерированное топливо
3	4-24-6004-87	004	1987	862.02.000-30	сталь	АБ.02.001.000	2,4	0	нет	Ц2М	Длит. хранение в БВ
4	1-24-16570-88	570	1988	862.02.000-16	Э110	АБ.02.001.000-00	2,4	0	нет	Ц2М	
5	4-24-16671-88	671	1988	862.02.000-16	Э110	АБ.02.001.000-00	2,4	0	нет	Ц2М	
6	1-24-20567-89	567	1989	862.01.000-30	сталь	АБ.02.001.000-00	2,4	0	нет	Ц2М	
7	1-24-20012-89	012	1989	862.01.000-30	сталь	АБ.02.001.000	2,4	0	нет	Ц2М	
8	1-24-31587-90	587	1990	862.01.000-30	сталь	АБ.02.001.000-00	2,4	0	нет	Ц2М	
9	1-24-31608-91	608	1991	862.02.000-30	сталь	АБ.02.001.000-00	2,4	0	нет	Ц2М	
10	4-26-54626-95	626	1995	862.02.000-36	сталь	АБ.02.001.000-24	2,6	0,413	есть	Ц2М	
11	4-26-54361-95	361	1995	862.02.000-36	сталь	АБ.02.001.000-24	2,6	0,400	есть	Ц2М	
12	4-24-55609-96	609	1996	862.02.000-37	сталь	АБ.02.001.000-24	2,4	0	нет	Ц2М	
13	4-26-57997-96	997	1996	862.02.000-36	сталь	АБ.02.001.000-24	2,6	0,409	есть	Ц2М	
14	11-26-64440-98	440	1998	862.02.000-36	сталь	АБ.02.001.000-29	2,6	0,410	есть	ЭК-173ИД	
15	10-26-67761-99	761	1999	862.01.000-36	сталь	АБ.02.001.000-29	2,6	0,425	есть	ЭК-173ИД	
16	10-26-70360-00	360	2000	862.01.000-40	Э110	АБ.02.001.000-29	2,6	0,410	есть	ЭК-173ИД	
17	11-26-76676-01	676	2001	862.09.000-03	Э110	АБ.02.001.000-24	2,6	0,410	нет	ЭК-173ИД	
18	13-26-77442-01	442	2001	866.00.000-01	Э110	АБ.02.001.000-35	2,6	0,410	есть	ЭК-173ИД	Центральное закрепление твэлов
19	11-28-83079-03	079	2003	865.00.000-19	Э110	АБ.02.001.000-35	2,8	0,600	есть	ЭК-173ИД	Оболочки твэлов из губчатого циркония
20	11-28-88038-04	038	2004	865.00.000-17	сталь	АБ.02.001.000-35	2,8	0,600	есть	ЭК-173ИД	
21	11-26-90342-05	342	2005	865.00.000-01	сталь	АБ.02.001.000-29	2,6	0,410	есть	ЭК-173ИД	Оболочки без финишного травления и анодирования
22	10-26-90424-05	424	2005	865.00.000-01	сталь	АБ.02.001.000	2,6	0,410	есть	ЭК-173ИД	

Примечание: в твэлах ТВС 626, 997 и 361 применялись экранные таблетки с пониженным обогащением по ^{235}U и без центрального канала; две экранные таблетки размещались около заглушек (см. рис. 1.2, а) и были предназначены для снижения всплеска энерговыделения в центре ТВС.

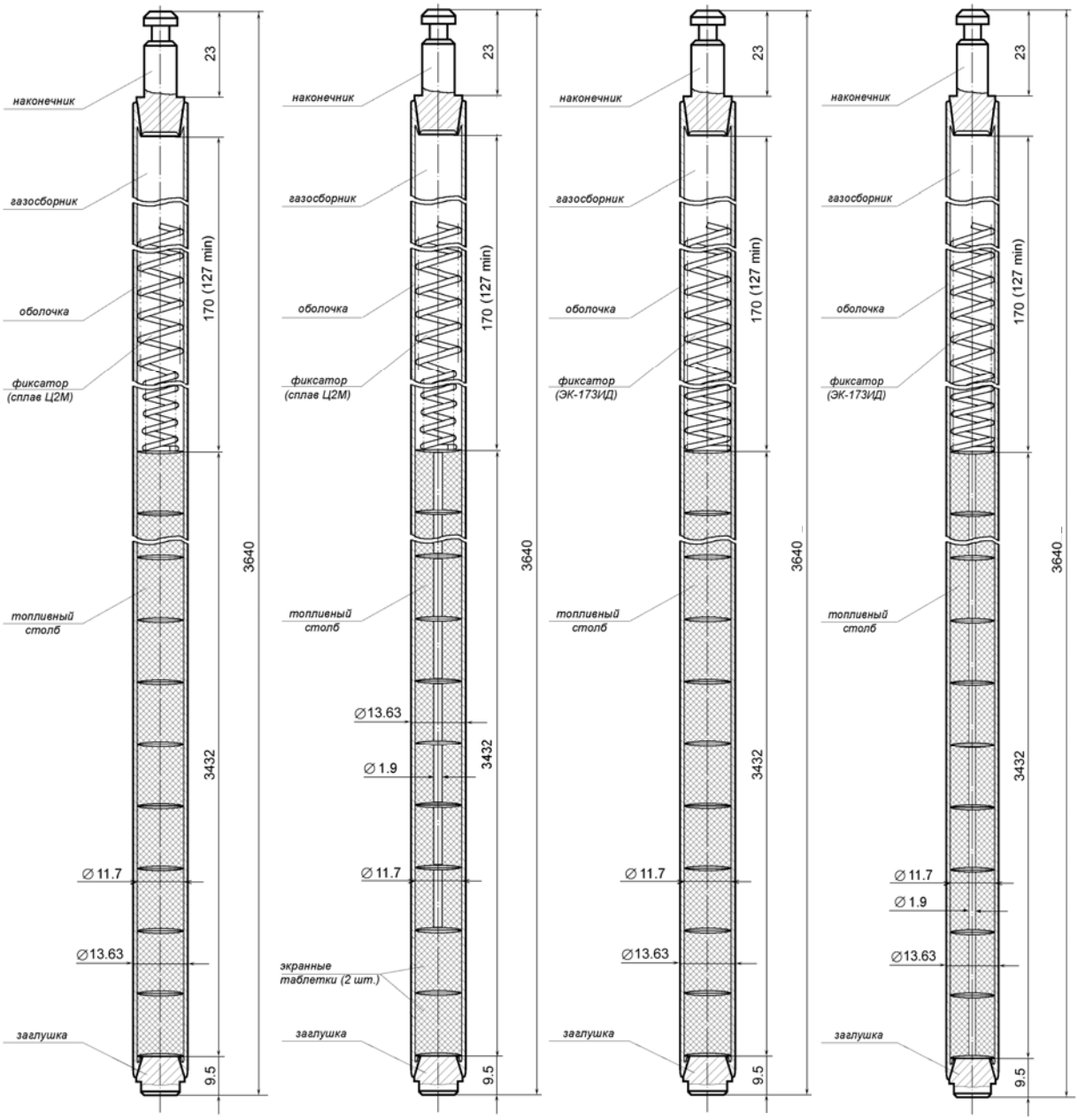


а



б

Рис. 1.1 – Общий вид штатной ТВС (а) и условная нумерация твэлов в пучках (б)



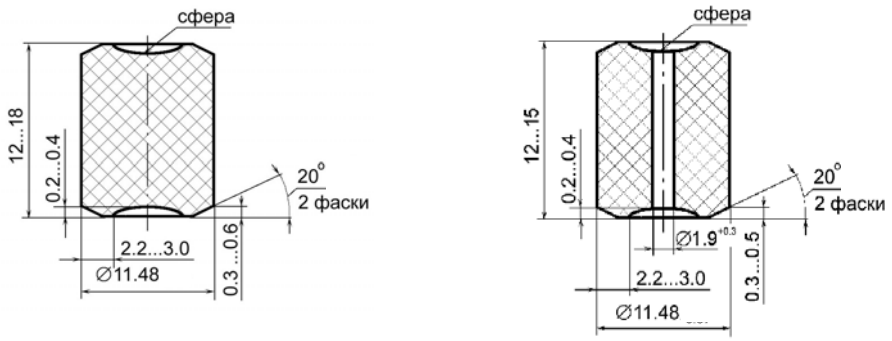
ТВС 671, 570, 587, 608, 567,609, 917, 659, 004 и 012

ТВС 626, 997 и 361

ТВС 676

ТВС 342, 360, 440, 442, 079, 761, 038, 424

а



б

Рис. 1.2 – Разновидности конструкций твэлов (а) и топливных таблеток (б) в штатных ТВС РБМК-1000

Таблица 1.2 – Основные характеристики трёх штатных ТВС и твэлов РБМК-1000 различного исполнения, изготовленных на ПАО «МСЗ» в 1991–2000 гг.

Параметр	Значение		
Номер ТВС	587	997	360
Дата изготовления ТВС	02.91	11.96	02.00
Исполнение ТВС	862.01.000-30	862.02.000-36	862.01.000-40
Номинальная массовая доля ^{235}U в уране, %	2,4	2,6	2,6
Масса UO_2, г	130345	126957	127616
Масса U, г	114723,2	111315,8	111944,6
Масса ^{235}U, г	2833,9	2894,4	2916,9
Номинальная массовая доля ^{235}U в уране экранных таблеток, %	—	2,4	—
Масса UO_2 в экранных таблетках, г	—	1080	—
Масса U в экранных таблетках, г	—	950	—
Масса ^{235}U в экранных таблетках, г	—	22,8	—
Среднее значение массовой доли эрбия, %	—	0,409	0,410
Номера пучков твэлов	36482 35993	31649 51648	38565 38501
Данные о дистанционирующих решётках:			
материал	сталь	сталь	сплав Э110
наружный диаметр обоймы, мм	79	79	79
количество пуклёвок на обойме	6	6	12
вписанный диаметр ячеек, мм	13,35	13,35	13,35
толщина ячеек обоймы, мм	0,35	0,35	0,35
Данные о твэлах:			
исполнение	АБ.02.001.000	АБ.02.001.000-24	АБ.02.001.000-29
длина, мм	3640	3640	3640
наружный диаметр, мм	13,63	13,63	13,63
внутренний диаметр, мм	11,7	11,7	11,7
наружный диаметр таблетки UO_2, мм	11,48	11,48	11,48
высота таблетки, мм	12–18	11–17	12–18
диаметр центрального канала в таблетке, мм	—	1,9	1,9
длина топливного сердечника, мм	3432	3432	3432
материал фиксатора топливного сердечника	сплав Ц2М	сплав Ц2М	ЭК173ИД
давление гелия в твэле, кгс/см^2	5–7	5–7	5–7
вид сварки торцевой заглушки и наконечника	КСС-2	КСС-2	КСС-2
номера партий оболочек	491-9-1/1 158-9-1/2	1979-2-1/1 165-2-1/1	802-6-1/2 42-6-1/2 1376-9-1/1
номера партий топливных таблеток	815225 815231	21510	215020 233342
номера партий экранных таблеток	—	123701	—

В таблицах 1.3 и 1.4 приведены типичные примеры паспортных данных на топливо и оболочечные трубы, использованные при изготовлении твэлов РБМК (ТВС 587).

Таблица 1.3 – Идентификационные и весовые данные по твэлам ТВС 587

Пучок твэлов	Условный номер твэла	Заводской номер твэла	Масса UO_2, г	Масса U, г	Масса ^{235}U, г	Номер партии топлива	Номер партии оболочек
ПТВ №36482	1	52377	3616	3181,4	79,9	815225 Массовая доля ^{235}U в U – 2,51 % Массовая доля ^{236}U в U – 0,41 %	491-9-1/1
	2	52379	3608	3174,3	79,7		
	3	52378	3610	3176,1	78,7		
	4	52371	3664	3170,8	79,6		
	5	52363	3627	3191,0	80,1		
	6	52364	3629	3192,8	80,1		
	7	52380	3603	3169,9	79,6		
	8	52373	3607	3170,1	79,8		
	9	52367	3628	3191,9	80,1		
	10	52369	3638	3200,7	80,3		
	11	52365	3624	3188,4	80,0		
	12	52366	3628	3191,9	80,1		
	13	52375	3630	3193,1	79,9		
	14	52372	3603	3169,9	79,6		
	15	52374	3607	3173,4	79,7		
	16	52370	3628	3191,9	80,1		
	17	52376	3631	3193,1	79,7		
	18	52368	3625	3189,3	80,1		
ПТН №35993	1	93555	3626	3192,7	77,6	815231 Массовая доля ^{235}U в U – 2,431 % Массовая доля ^{236}U в U – 0,16 %	158-6-1/1
	2	93546	3621	3188,3	77,5		
	3	93564	3594	3164,5	77,9		
	4	93563	3614	3182,1	77,3		
	5	93567	3633	3198,9	77,8		
	6	93553	3623	3190,1	77,5		
	7	93554	3621	3188,3	77,5		
	8	93552	3617	3184,8	77,4		
	9	93570	3626	3192,7	77,6		
	10	93565	3632	3198,0	77,7		
	11	93566	3634	3199,7	77,8		
	12	93559	3640	3205,0	77,9		
	13	93556	3630	3196,2	77,7		
	14	93560	3625	3191,8	77,6		
	15	93561	3628	3194,5	77,6		
	16	93562	3626	3192,7	77,6		
	17	93558	3626	3192,7	77,6		
	18	93557	3611	3197,0	77,7		

Таблица 1.4 – Сертификационные данные на оболочечные трубы различных партий в ТВС 5871

Параметр	Номера партий оболочки	
	491-9-1/1	158-6-1/1
Марка сплава	Э-110	
Номинальные размеры труб, мм	13,58x11,7x3612	
Химический состав труб	Соответствует ТУ 95-166-83	
Результаты механических испытаний:		
Предел прочности в продольном направлении, кгс/мм^2 (20 °С)	38,8	41,2
Предел текучести в продольном направлении, кгс/мм^2 (380 °С)	10,0	10,7
Общее относительное удлинение в продольном направлении, %	53,5	49,7
Предел прочности в поперечном направлении, кгс/мм^2 (380 °С)	15,9	17,0
Результаты коррозионных испытаний за 72 часа – привес, мг/дм^2	15,8	13,5
Средний коэффициент ориентации гидридов	0,2	0,15
Вид термообработки	Отжиг	

1.2 Технические характеристики экспериментальной ТВС с центральным закреплением твэлов

Тепловыделяющая сборка РБМК-1000 нового поколения с центральным закреплением твэлов также включает в себя два идентичных пучка, расположенных друг над другом на несущей трубе. Каждый пучок состоит из 18 твэлов, установленных в каркас, и концевой решётки. Каркас образован десятью дистанционирующими решётками из сплава Zr−1% Nb, одной ДР из коррозионно-стойкой стали и опорной решёткой (ОР), закреплённой на каркасной трубе.

Крепление дистанционирующих решёток осуществляется путём вдавливания стенок направляющих втулок ДР в пазы на КТ. Опорные и концевые решётки закреплены путём развальцовки стенок каркасной трубы. Наконечники твэлов зафиксированы в ОР с помощью обжимных колец. Опорные решётки пучков, в отличии от ТВС штатной конструкции, обращены друг к другу. Для создания необходимого зазора используются втулки, размещённые между пучками твэлов. Сверху и снизу пучков твэлов (на КТ) расположены два хвостовика ТВС. Пучки твэлов, втулки и хвостовики на несущей трубе стянуты гайкой, закреплённой стопорным штифтом. Основные параметры экспериментальной ТВС РБМК-1000 и её твэла представлены на рис. 1.3 и в табл. 1.5.

При исследовании ТВС РБМК-1000 применяется условная нумерация твэлов относительно метки, нанесённой белой краской на обойме каждой из ДР (см рис. 1.1, б). Ориентация твэлов в пучках по отношению к графитовой кладке обозначается метками в районе газосборников. Твэлам, находившимся при эксплуатации в ПТВ и ПТН друг над другом, присвоен один и тот же номер с литерой «В» и «Н» соответственно.

В экспериментальных ТВС использовалось топливо из диоксида урана, обогащённого по ^{235}U до 2,6−3,0 % с добавкой 0,41 или 0,6 % оксида эрбия Er_2O_3 в виде таблеток с центральным отверстием, с фасками и лунками на торцах. Оболочки и концевые детали (заглушка, наконечник) твэлов изготовлены из сплава Zr-1% Nb. В твэле предусмотрен компенсационный объём (газосборник) со стороны заглушки. В компенсационном объёме установлен фиксатор топливного столба в виде спиральной пружины из сплава ЭК-173ИД. Свободный объём экспериментальных твэлов, как и штатных, заполнен гелием с избыточным давлением 0,5−0,7 МПа.

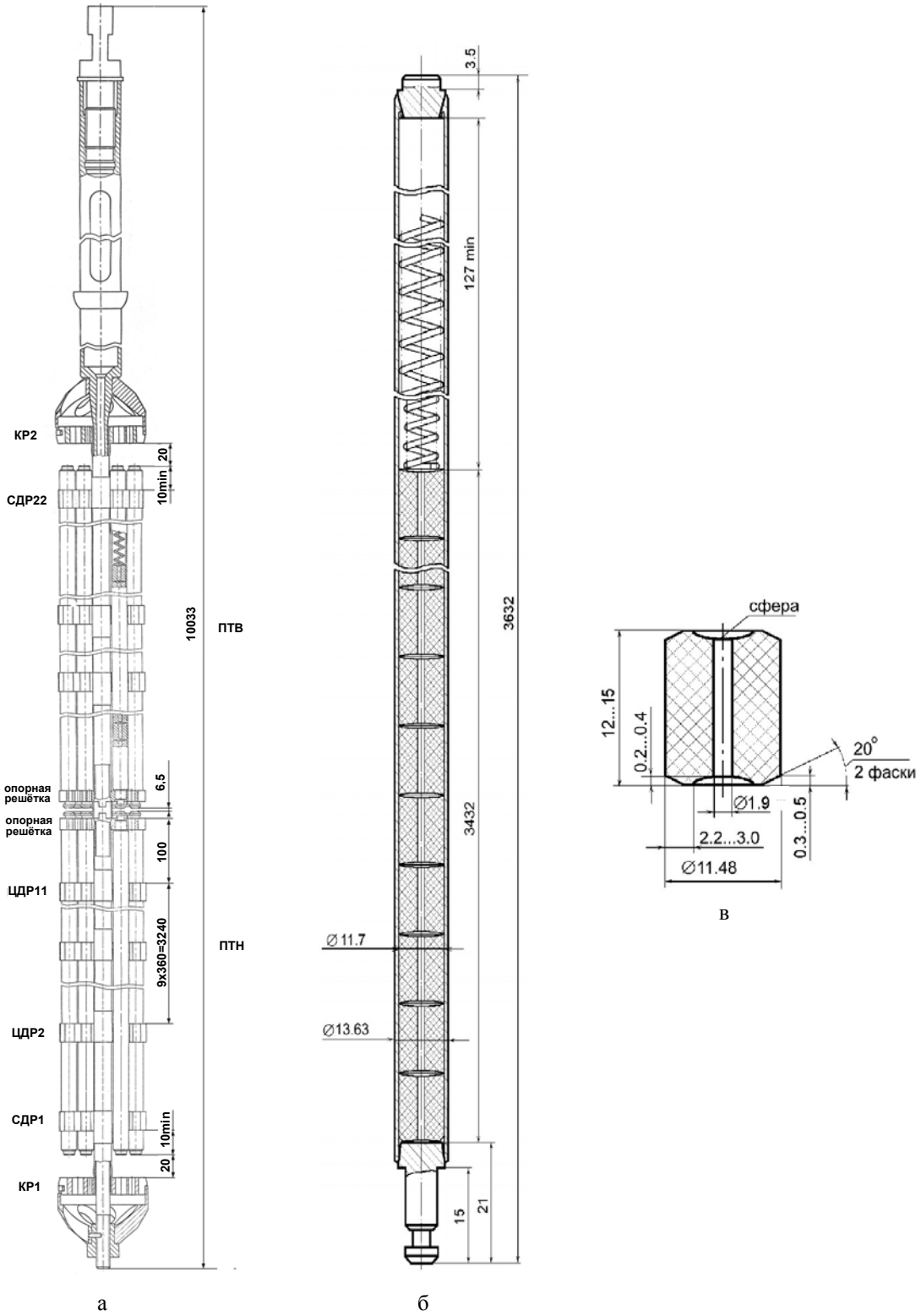


Рис. 1.3 – Эскиз ЭТВС РБМК-1000 (а), твэла (б) и топливной таблетки (в)

Таблица 1.5 – Основные характеристики ТВС 442 с центральным закреплением твэлов

Параметр	Значение	
Дата изготовления ТВС	12.2001	
Исполнение ТВС	866.00.000-01	
Номинальная массовая доля ^{235}U в уране, %	2,6	
Масса UO_2, г	127449	
Масса U, г	111759,9	
Масса ^{235}U, г	2917,3	
Среднее значение массовой доли эрбия, %	0,41	
Дистанционирующая решётка:		
номер чертежа	861.01.04.040	863.00.050
количество	2	20
материал	06Х18Н10Т	Э110
наружный диаметр обоймы, мм	$79_{-0,4}$	
количество пуклёвок на обойме	6	12
вписанный диаметр ячеек, мм	$13,37^{+0,15}$	$13,35^{+0,20}_{-0,15}$
толщина ячеек обоймы, мм	0,35	
высота обоймы, мм	$16,3^{+1,0}_{-0,43}$	$16,3_{-0,48}$
количество сварных точек в соединении:		
– ячейка-ячейка	2	
– ячейка-обойма	2	
Опорная решётка:		
номер чертежа	866.00.011	
количество	2	
высота, мм	$10_{-0,09}$	
диаметр ячеек, мм	$10^{+0,12}_{-0,03}$	
материал	Э125	
Твэл:		
номер чертежа	866.00.010	
длина, мм	3632 ± 2	
наружный диаметр оболочки, мм	$13,63_{-0,15}$	
внутренний диаметр оболочки, мм	$11,7^{+0,1}$	
давление гелия в твэле, кгс/см^2	5–7	
длина топливного сердечника, мм	3432	
материал фиксатора топливного сердечника	ЭК-173ИД	
вид сварки торцевой заглушки и наконечника	КСС-2	
Топливная таблетка:		
номер чертежа	312.394.011	
наружный диаметр таблетки UO_2, мм	$11,48_{-0,07}$	
диаметр центрального канала в таблетке, мм	$1,9^{+0,3}$	
высота таблетки, мм	12–15	

1.3 История эксплуатации исследованных ТВС

Схема ядерно-энергетической установки с уран-графитовым реактором канального типа, предназначенной для выработки насыщенного пара давлением 7 МПа, включающей в себя технические средства, обеспечивающие работу реактора, и устройства вывода из

него тепловой энергии с целью преобразования её в другой вид энергии, представлена на рис. 1.4.

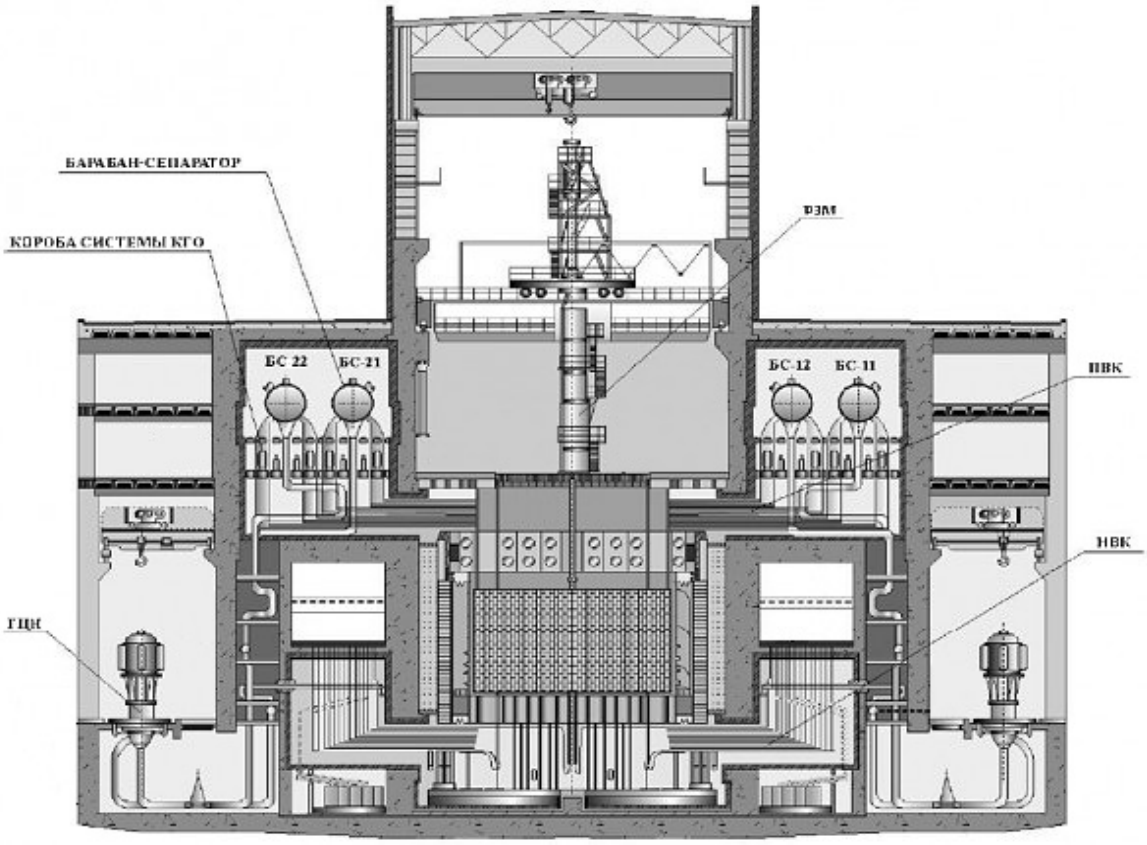


Рис. 1.4 – Разрез энергоблока с реактором РБМК-1000: ГЦН – главный циркуляционный насос, РЗМ – разгрузочно-загрузочная машина, ПВК – паро-водяные коммуникации, НВК – нижние водяные коммуникации, БС – барабан-сепаратор

Для получения приемлемого коэффициента полезного действия атомной станции необходимо иметь как можно более высокие температуру и давление генерируемого реактором пара. Следовательно, должен быть предусмотрен корпус, удерживающий теплоноситель при этих параметрах. Такой корпус – основной конструктивный элемент реакторов ВВЭР. Для реактора РБМК роль корпуса играет большое количество прочных трубопроводов – технологических каналов (ТК).

Реактор РБМК-1000 состоит из набора вертикальных ТК, вставленных в цилиндрические отверстия графитовых колонн, а также верхней и нижней защитных плит. Лёгкий цилиндрический кожух замыкает полость графитовой кладки. Кладка, состоящая из собранных в колонны графитовых блоков квадратного сечения, опирается на нижнюю плиту, которая передаёт вес реактора на бетонную шахту. Каналы для топлива и регулирующих стержней проходят через нижние и верхние металлоконструкции. Приводы регулирующих стержней расположены над активной зоной в районе верхней защитной конструкции реакторного зала. Для перегрузок ядерного топлива «на ходу» реактора используется разгрузочно-загрузочная машина (РЗМ). С целью повышения надёжности теп-

лоотвода от активной зоны реактор оснащён двумя одинаковыми петлями охлаждения. К каждой петле подключено по 840 вертикальных технологических (топливных) каналов с тепловыделяющими сборками. Петли охлаждения имеют четыре параллельно включенных главных циркуляционных насоса (ГЦН) – три работающих и один резервный.

Вода в каналах нагревается до кипения и частично испаряется. Пароводяная смесь со средним массовым паросодержанием 14 % отводится через верхнюю часть ТК и пароводную коммуникацию в два горизонтальных барабана-сепаратора (БС). Отделённый в них сухой пар (влажность не более 0,1 %) при давлении 7 МПа поступает из каждого гравитационного сепаратора по паропроводам в две турбины электрической мощностью по 500 МВт, а вода после смешения с конденсатом пара по 12 опускным трубам подаётся во всасывающий коллектор ГЦН. Теплоноситель поступает в ТК снизу при температуре 265–270 °С. Расход теплоносителя по каждому каналу может регулироваться независимо индивидуальным запорно-регулирующим клапаном.

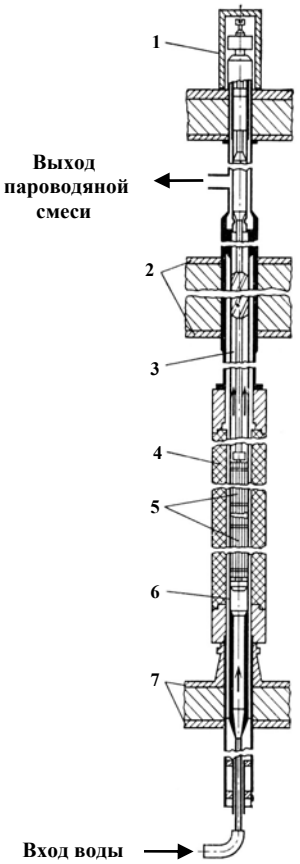


Рис. 1.5 – Технологический канал реактора РБМК-1000: 1 – верхняя объёмная биологическая защита; 2 – верхняя защитная металлоконструкция; 3 – технологический канал; 4 – графитовая кладка; 5 – ТВС; 6 – центральная труба технологического канала; 7 – нижняя опорная металлоконструкция

Технологический канал (рис. 1.5) предназначен для размещения ТВС и организации потока теплоносителя. В пределах активной зоны (АЗ) он выполнен из сплава Zr-2,5%Nb и имеет наружный диаметр 88 мм при толщине стенки 4 мм. Назначенный срок эксплуатации корпуса канала составляет 23 года. При необходимости на остановленном реакторе дефектный корпус канала может быть извлечён и заменён новым. Наряду с технологическими, в реакторе имеются каналы управления и защиты. В них располагаются стержни поглотителей и датчики контроля энерговыделения. Размещение каналов управления в колоннах графитовой кладки автономно от ТК.

Реактор оснащён системой физического контроля за энерговыделением, расходом теплоносителя и герметичностью оболочек твэлов в каждом из технологических каналов. Обработка информации, получаемой от этих систем, производится с использованием контрольно-вычислительного комплекса [4, 6].

Основные технические характеристики энергоблока с реактором РБМК-1000 представлены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Технические характеристики реактора РБМК-1000

Параметр	Величина
Тепловая мощность, МВт	3200
Электрическая мощность, МВт	1000 (2х500)
КПД (брутто)	31,3
Температура теплоносителя на входе (выходе) реактора, °С	270 (284)
Номинальный расход теплоносителя через реактор, $м^3$/ч	$(48–50)\cdot10^3$
Паропроизводительность, т/ч	5400
Давление теплоносителя на входе в ТК/ на выходе из ТК, кгс/см2	79,6/75,3
Размер активной зоны: высота / диаметр, м	7,0 / 11,8
Загрузка реактора, т	189,7
Выгорание топлива в ТВС, среднее по реактору в стационарном режиме перегрузок (кампания 1300 эфф. суток), МВт·сут/кгU	22,5
Общее количество ТК: из них ТК для установки ТВС ТК для установки СУЗ	1661 1156 227
Шаг технологической решётки, мм	250х250
Проектный срок службы реактора, лет	30

Большая часть из исследованных ТВС РБМК-1000 эксплуатировалась на 2-ом блоке Ленинградской АЭС, который был пущен в 1975 году и работал с обычными перерывами на ППР до ноября 1991 г., т.е. до остановки блока на капитальный плановый ремонт (КПР). КПР, связанный с заменой вышедших из строя технологических каналов, продолжался до декабря 1994 г. Графики изменения тепловой мощности этого энергоблока в период эксплуатации шестнадцати штатных ТВС РБМК представлены на рис. 1.6–1.9.

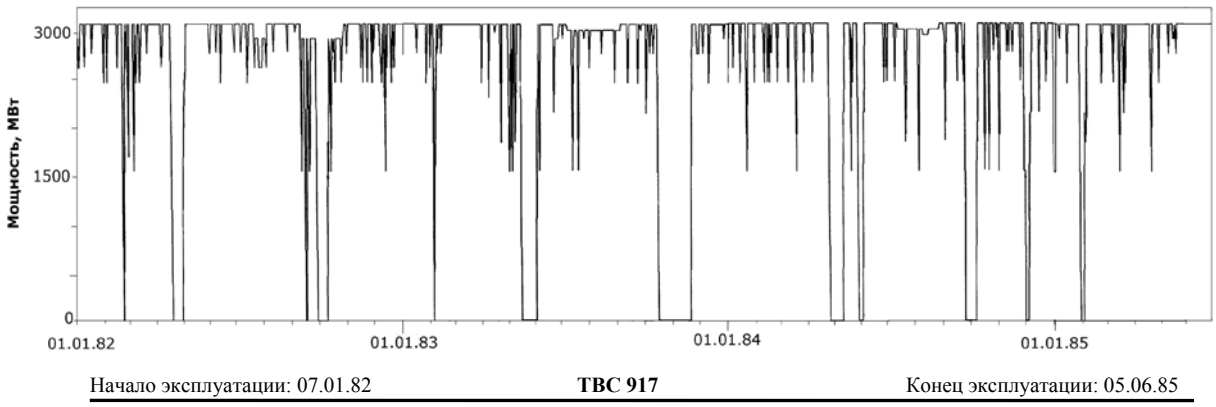


Рис. 1.6 – Изменение тепловой мощности 2-го блока ЛАЭС в период эксплуатации ТВС 917

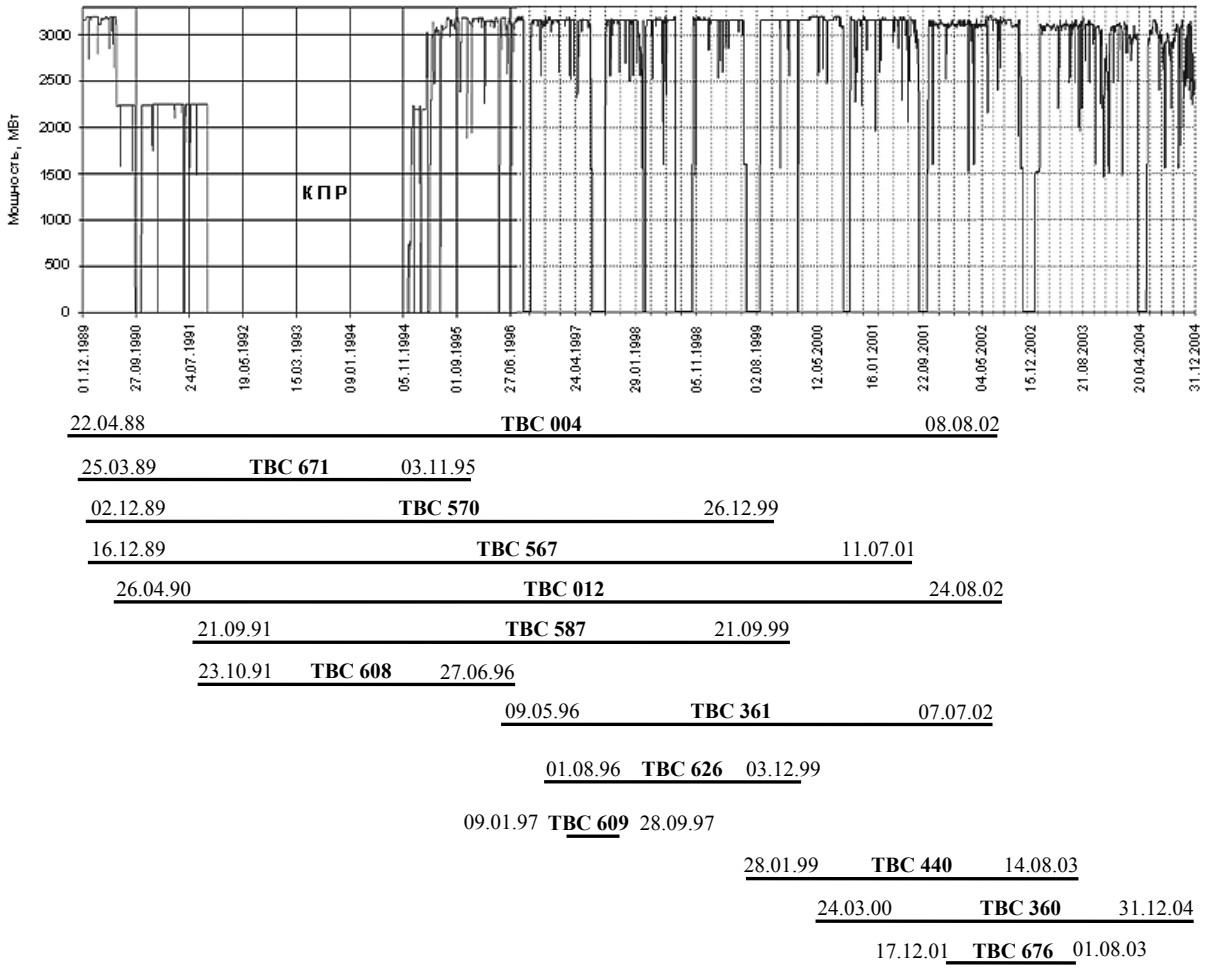


Рис. 1.7 – Изменение тепловой мощности 2-го блока ЛАЭС в 1989–2004 гг.

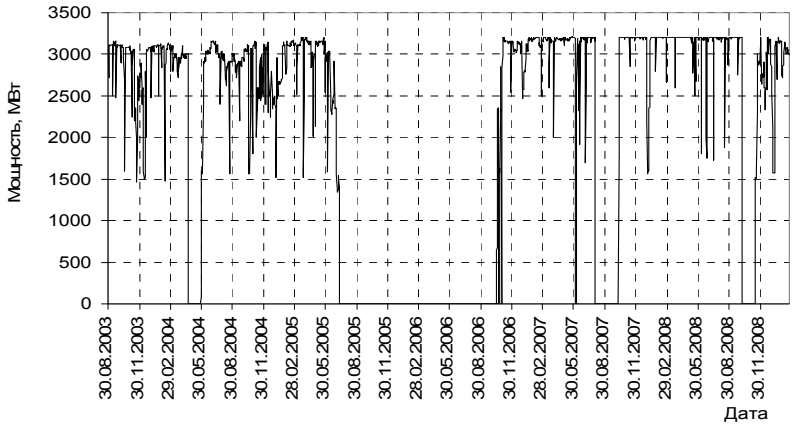


Рис. 1.8 – Изменение мощности 2-го блока ЛАЭС в период эксплуатации ТВС 079

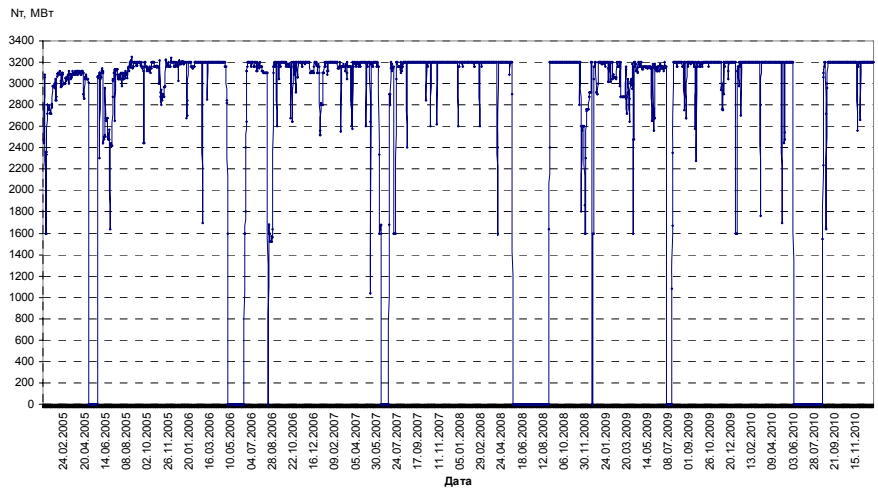


Рис. 1.9 – Изменение мощности 2-го блока ЛАЭС в период эксплуатации ТВС 424

Рис.1.10–1.14 иллюстрируют характер изменения тепловой мощности 1-го энергоблока ЛАЭС во время облучения пяти ТВС (342, 761, 997, 442 и 424) из числа исследованных.

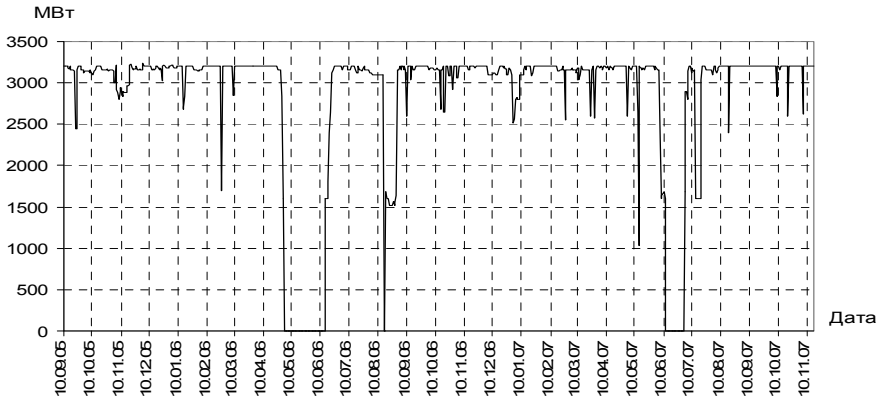


Рис. 1.10 – Изменение тепловой мощности 1-го блока ЛАЭС
в период эксплуатации ТВС 342

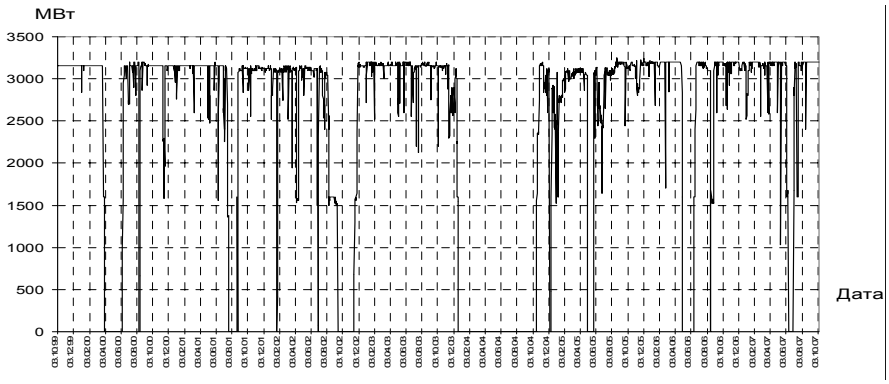


Рис. 1.11 – Изменение тепловой мощности 1-го блока ЛАЭС
в период эксплуатации ТВС 761

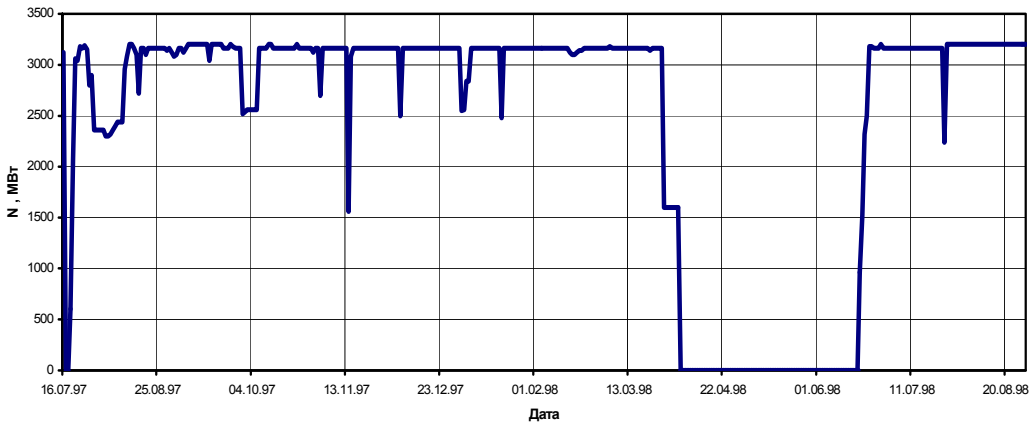


Рис. 1.12 – Изменение тепловой мощности 1-го блока ЛАЭС в период эксплуатации ТВС 997

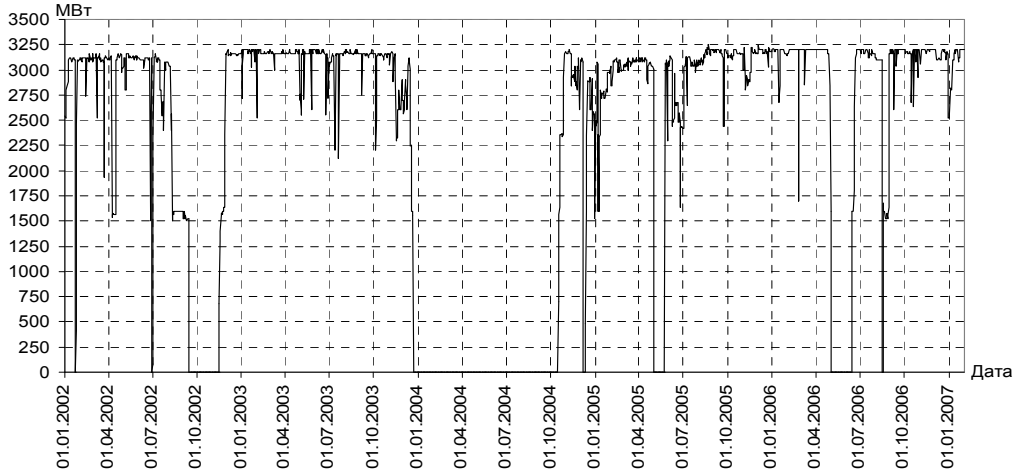


Рис. 1.13 – Изменение тепловой мощности 1-го блока ЛАЭС в период эксплуатации ТВС 442

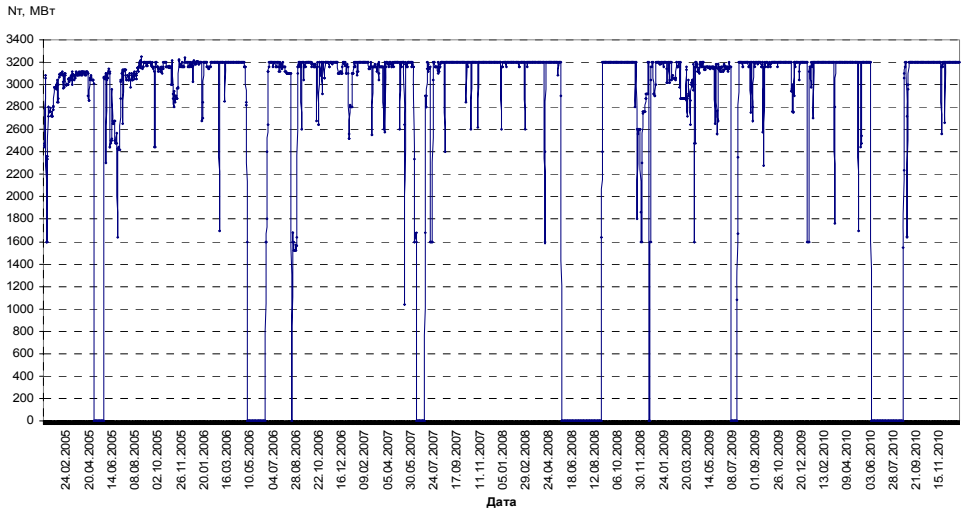


Рис. 1.14 – Изменение тепловой мощности 1-го блока ЛАЭС в период эксплуатации ТВС 424

Основные параметры эксплуатации всех двадцати двух тепловыделяющих сборок приведены в табл. 1.7.

Таблица 1.7 – Параметры эксплуатации исследованных ТВС РБМК

№ п/п	Номер ТВС	Начало эксплуатации	Окончание эксплуатации	Ячейка реактора	Продолжительность эксплуатации календарная, лет (эффективная, сут)	Выгорание, МВт·сут/кгU	Энерговыработка, МВт·сут/ТВС	Средняя мощность канала, МВт	Герметичность	Наличие заглушки на негерметичном твэле
1	659	24.09.73	22.12.76	—	~ 3,0	10,79	—		негерм.	нет
2	917	07.01.82	05.06.85	44-47	3,36 (1093)	19,50	2260	2,0	негерм.	нет
3	004	22.04.88	07.06.90	24-25	4,25 (1343)	13,40	1530		герм.	—
		04.06.00	08.08.02	24-47		25,10	2869	2,13		
4	570	02.12.89	08.12.91	40-65	9,93 (2304)	11,70	1344		герм.	—
		02.08.92	04.03.97	54-75		19,60	2241			
		25.03.97	26.12.99	16-17		24,78	2838	1,23		
5	671	25.03.89	29.07.98	26-44	6,52 (1077)	13,32	1522		негерм.	нет
		29.07.92	03.11.95	50-20		18,90	2160	2,0		
6	567	16.12.89	11.07.01	21-63	11,58 (2654)	24,0	2745	1,04	герм.	
7	012	26.04.90	20.03.92	22-13	12,33 (3100)	4,8	561		герм.	—
		20.03.92	24.08.02	22-64		24,5	2830	0,9		
8	587	21.09.91	17.12.91	62-47	8,01 (1525)	—	80		герм.	—
		17.03.93	10.06.97	22-30		—	1881			
		19.06.97	21.09.99	40-20		26,16	3000	2,0		
9	608	23.10.91	14.12.91	46-56	4,45	—	—		негерм.	нет
		27.02.93	27.06.96	21-16		6,3	722	1,24		
10	626	01.08.96	03.12.99	50-24	3,29 (978)	18,65	2070	2,1	негерм.	нет
11	361	09.05.96	28.08.98	35-53	6,16 (2000)	12,07	1346		герм.	—
		11.10.98	31.10.99	35-53		17,03	1933	2,4		
		21.11.99	07.07.02	27-57		31,3	3490	1,7		
12	609	09.01.97	28.09.97	40-45	0,72 (206)	4,6	530	2,5	негерм.	есть
13	997	16.07.97	28.08.98	65-35	1,1 (336)	6,07	675,6	2,0	негерм.	есть
14	440	28.01.99	17.06.01	34-34	4,58 (1340)	14,8	1669		герм.	—
		29.07.01	14.08.03	30-60		26,0	2927	2,2		
15	761	3.10.99	24.10.02	12-33	6,5 (2358)	35,7	3993	1,7	герм.	—
		24.10.02	07.10.07	52-24						
16	360	24.03.00	12.11.02	52-42	4,79 (1514)	18,1	2027		герм.	—
		21.03.03	31.12.04	47-15		27,5	3073	2,0		
17	676	17.12.01	01.08.03	33-55	1,5 (538)	10,5	1178	2,18	негерм.	есть
18	442	30.01.02	08.05.04	46-16	5,0 (1429)	12,4	1382	1,6	герм.	—
		08.05.04	30.01.07	32-32		26,1	2915	2,0		
19	079	30.08.03	21.02.09	26-26	5,5 (1387)	26,4	2941	2,2	герм.	—
20	038	09.01.05	17.11.11	31-57	6,86 (1835)	34,3	3847	2,1	герм.	—
21	342	10.09.05	20.06.07	20-21	2,0 (728)	11,8	1325		герм.	—
		23.06.07	16.11.07	30-42		14,3	1608	2,2		
22	424	03.09.05	08.06.08	45-26	5,1 (1709)		2011		герм.	—
		08.06.08	09.10.10	17-25		28,4	3193	1,87		

Продолжительность эксплуатации: календарная – время от первой загрузки до последней выгрузки ТВС из реактора; эффективная – длительность эксплуатации ТВС на мощности (за вычетом простоев реактора). Продолжительность эксплуатации эффективная используется для оценки важнейшего фактора – средней мощности технологического канала, в котором эксплуатируется ТВС. Мощность технологического канала характеризует темп выгорания топлива – параметр, существенно влияющий на состояние отработавших ТВС кипящего канального реактора. Так, например, из данных, представленных в табл. 1.7, следует, что для тепловыделяющих сборок 570 и 587 значения Тэфф составляют 2304 и 1525, а энерговыработка 2838 и 3000 МВт·сут/ТВС соответственно. Следовательно, темп выгорания в ТВС 587 значительно выше, чем в сборке 570. Это связано с тем, что сборки эксплуатировались в различных местах АЗ реактора РБМК-1000 (рис. 1.15). ТВС 570 облучалась в периферийных топливных каналах, а сборка 587 – в ТК, расположенных ближе к центру активной зоны (в районе «плато» энерговыделения). Кроме того, тепловыделяющая сборка 570 длительное время эксплуатировалась тогда, когда 2-ой энергоблок ЛАЭС находился на пониженном (70 % от номинала) уровне мощности (см. рис. 1.7).

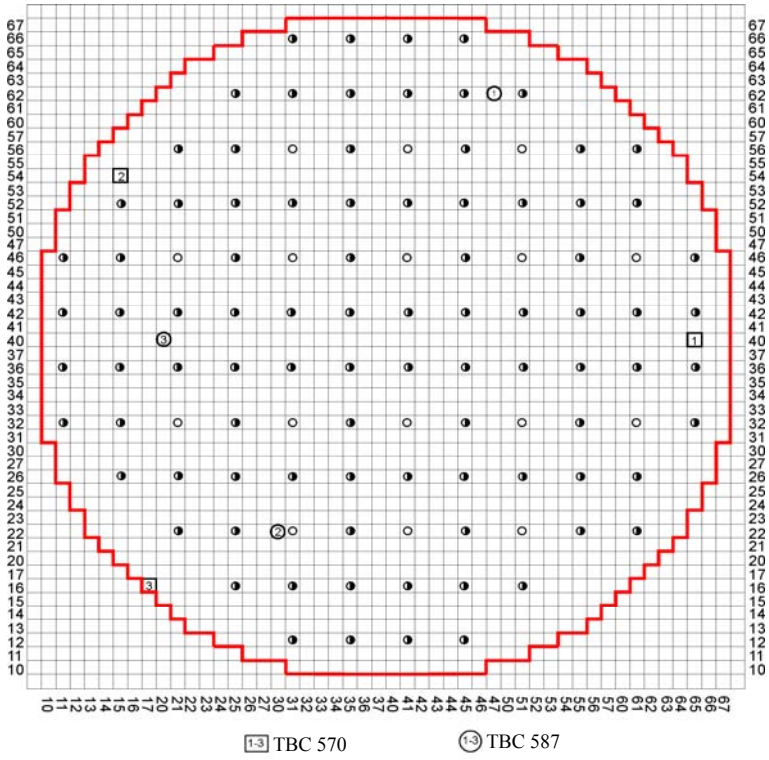


Рис. 1.15 – Размещение ТВС 570 и 587 в активной зоне 2-го блока ЛАЭС в различных топливных циклах

На рис. 1.16 и 1.17 представлены данные с ЛАЭС – графики изменения мощности и расхода теплоносителя в каналах эксплуатации ТВС 342 и 012. Из анализа приведённых графиков следует, что в каналах со средней мощностью 2,2 и 0,9 МВт (см. табл. 1.7) расход теплоносителя составлял примерно 37 и 20 м^3/час соответственно.

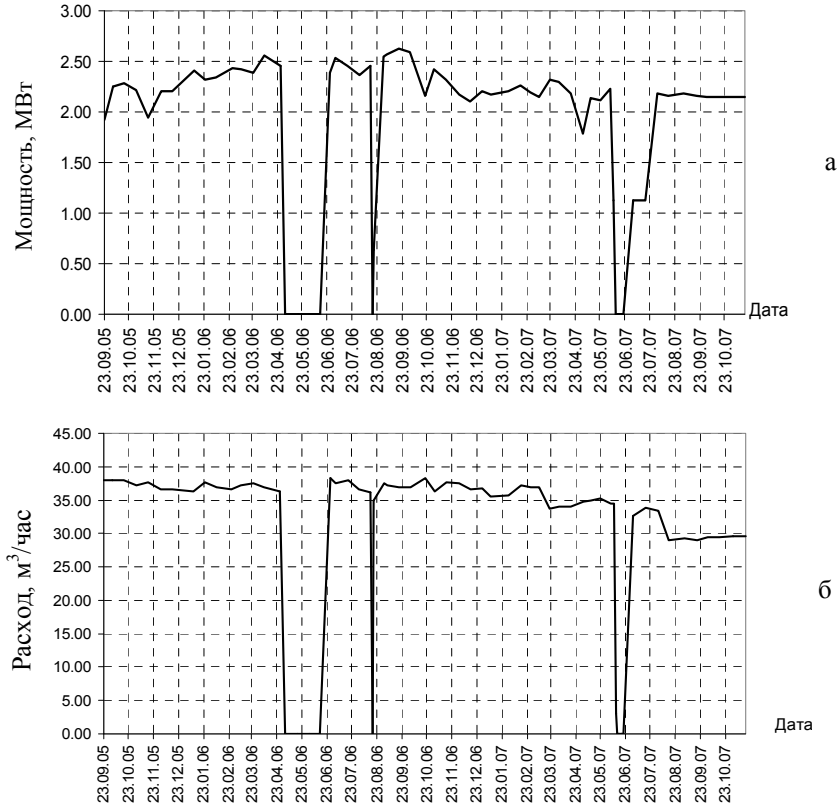


Рис. 1.16 – График изменения мощности (а) и расхода теплоносителя (б) в каналах 20-21 и 30-42 в период эксплуатации ТВС 342

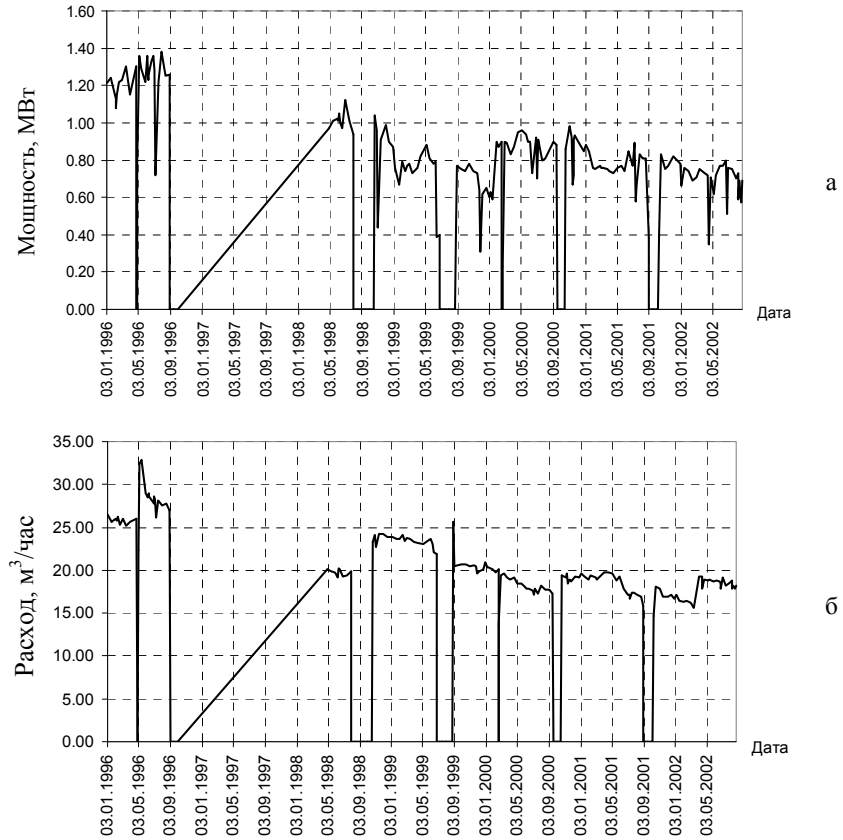


Рис. 1.17 – График изменения мощности (а) и расхода теплоносителя (б) в канале 22-64 в период эксплуатации ТВС 012

Глава 2. Контроль состояния отработавших ТВС

2.1 Определение герметичности твэлов ультразвуковым методом

Негерметичные ТВС РБМК-1000 выявляются поканальной системой контроля герметичности оболочек (КГО) твэлов, а после выгрузки из реактора – методом пенального «настоя», сущность которого заключается в измерении активности проб воды из пенала по реперным радионуклидам, например, ^{131}J и ^{137}Cs. ТВС считается негерметичной, если объёмная активность проб превышает 10^{-3} Ku/л по ^{131}J и 10^{-4} Ku/л по ^{137}Cs. Для идентификации негерметичных твэлов в дефектных ТВС РБМК в материаловедческом центре НИИАР используется ультразвуковая система КГО [15].

Ультразвуковой метод КГО основан на обнаружении воды, прошедшей через дефект внутрь твэла. С этой целью в оболочке твэла возбуждаются ультразвуковые волны, которые излучают часть энергии в воду бассейна выдержки. При наличии воды в твэле излучение энергии происходит не только во внешнюю, но и во внутреннюю среду, что приводит к снижению амплитуды УЗ-волн, распространяющихся в оболочке. Чувствительность метода определяется количеством воды в негерметичном твэле, а также возможным образованием вторичных дефектов и локальных скоплений гидридов циркония в материале оболочек из циркониевого сплава.

В условиях защитной камеры для контроля герметичности твэлов ПТН и ПТВ используется специальный контейнер, заполненный водой и позволяющий проводить опрессовку пучка твэлов внешним давлением 0,5 МПа в течение одного часа. Для возбуждения и приёма ультразвуковых волн применяется торцевой датчик, устанавливаемый на заглушки твэлов.

В таблице 2.1 представлены результаты ультразвукового КГО твэлов в составе пучков ТВС 609 и 676, отработавших на 2-ом блоке ЛАЭС до выгорания 4,6 и 10,5 МВт·сут/кгU соответственно.

Таблица 2.1 – Результаты ультразвукового КГО твэлов ТВС 609 и 676

№ твэла	Амплитуда сигнала, В			
	ТВС 609		ТВС 676	
	ПТН	ПТВ	ПТН	ПТВ
1	4,7	8,4	8,8	7,7
2	5,1	6,5	8,1	0*
3	4,9	5,9	8,3	7,6
4	4,2	7,8	8,8	9,0
5	0*	6,8	8,6	5,5
6	5,6	7,5	7,1	8,9
7	4,4	9,2	8,6	8,7
8	4,8	9,1	7,0	8,6
9	5,8	9,3	7,9	8,8
10	5,2	8,5	8,1	7,4

11	2,7	9,0	8,5	7,8
12	3,7	7,5	7,5	9,0
13	5,1	8,7	8,9	7,9
14	4,5	7,8	7,6	8,0
15	5,1	8,6	6,8	8,9
16	5,3	6,0	8,7	8,8
17	5,3	7,5	8,6	8,9
18	5,2	7,3	7,9	9,2

Примечание: 0* – амплитуда сигнала не превышает уровень шумов аппаратуры

На рис. 2.1 приведены типичные осциллограммы герметичного и негерметичного твэлов.

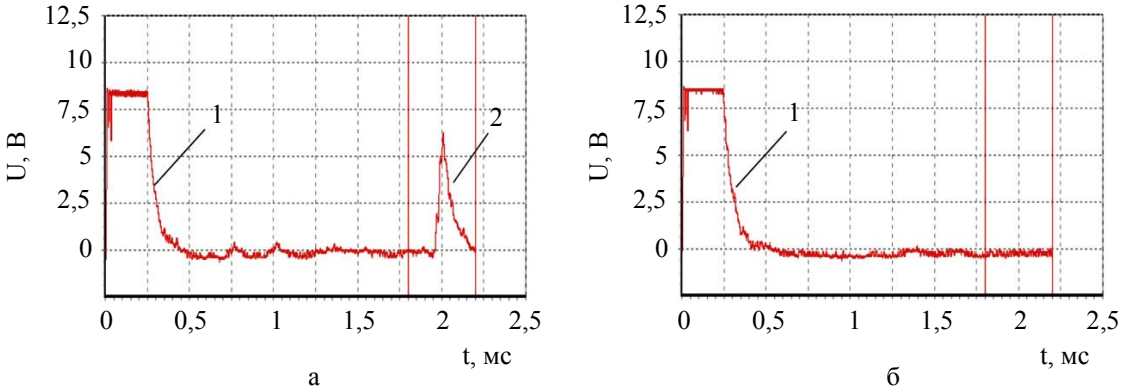


Рис. 2.1 – Осциллограммы сигналов для герметичного (а) и негерметичного твэлов (б): 1 – сигнал возбуждения датчика; 2 – принятый «полезный» сигнал

Из анализа представленных в табл. 2.1 результатов ультразвукового КГО следует, что твэлы 5н ТВС 609 и 2в ТВС 676 негерметичны. Последующие неразрушающие и разрушающие исследования выявили наличие сквозных дефектов в оболочках этих твэлов.

2.2 Визуальный осмотр ТВС и пучков твэлов

Визуальный осмотр отработавшей ТВС на ЛАЭС производится после отделения подвески с помощью фрезерного станка, расположенного в защитной камере. Наряду с определением общего состояния сборки и целостности её элементов при осмотре измеряется величина зазора между пучками твэлов. На рис. 2.2 представлен снимок одной из ТВС РБМК-1000 в районе стыка между верхним и нижним пучками твэлов.

Измерения на ЛАЭС показали, что минимальное расстояние между торцами твэлов ПТН и ПТВ в двадцати двух исследованных ТВС находится в диапазоне 21÷36 мм.

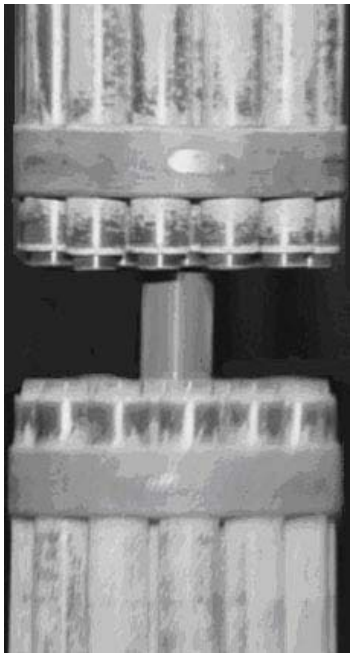


Рис. 2.2 – Внешний вид ТВС 342 в районе стыка пучков твэлов

Осмотр и фотографирование пучков твэлов, доставленных с ЛАЭС в материаловедческий центр железнодорожным транспортом в специальном вагоне-контейнере, проводят через окно защитной камеры или с помощью смотрового устройства, схематично представленного на рис. 2.3.

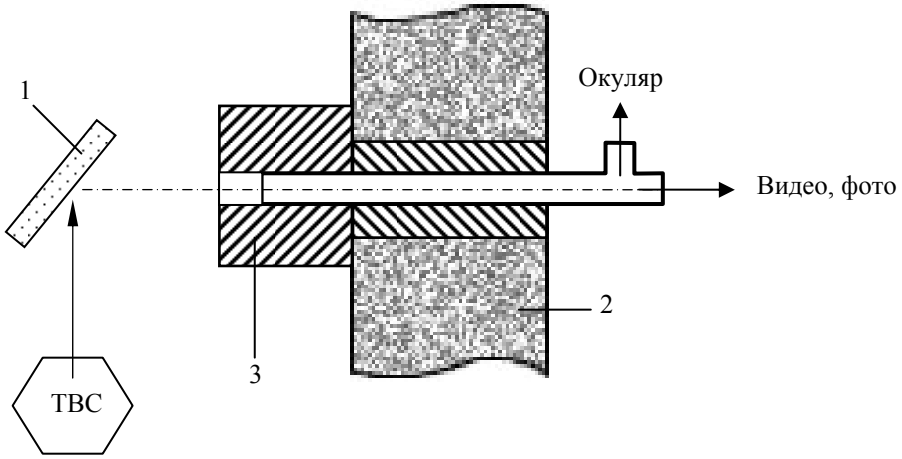


Рис. 2.3 – Схема просмотрового устройства ТВС: 1 – металлическое зеркало; 2 – стена защитной камеры; 3 – дополнительный экран защиты от гамма-излучения

Устройство позволяет проводить исследования облучённых элементов АЗ с максимальным поперечным размером 300 мм и длиной до 5000 мм. Увеличение смотровой системы 0,8–10х. Световой пучок выводится из защитной камеры с помощью металлического зеркала. Линзы оптической системы, размещённые в трубе, проходящей через проходку в стене камеры, дополнительно защищены от гамма-излучения экраном из тяжёлого метал-

ла. Установка визуального осмотра снабжена системой отсчёта координат исследуемого участка ТВС. В процессе непосредственного наблюдения оптическая информация может сохраняться на компьютере в виде фотографий или видеозаписи.

К основным целям визуального осмотра пучков твэлов ТВС РБМК можно отнести:

– изучение общего вида объектов исследования;

– выявление закономерностей распределения отложений продуктов коррозии на твэлах;

– обнаружение нарушения целостности дистанционирующих решёток;

– выявление инородных тел в пучках твэлов;

– обнаружение дефектов в оболочках, наконечниках, фиксирующих кольцах и сварных соединениях заглушек с твэлами.

На рис. 2.4 и 2.5 представлены фотоснимки, полученные через смотровое окно защитной камеры и внутрикамерный перископ для оценки состояния штатной ТВС 012, отработавшей на 2-ом блоке ЛАЭС до выгорания 24,5 МВт·сут/кгU (энерговыработка 2830 МВт·сут/ТВС). Календарная продолжительность эксплуатации сборки составила 12,33 года, а на мощности – 3100 суток (см. табл. 1.7).

Обе эти методики используются при визуальном осмотре ПТН и ПТВ, поскольку они взаимно дополняют друг друга. Преимущество первой методики, основанной на получении фотоснимков через окно защитной камеры, заключается в значительном угле обзора (400×400 мм), а достоинства и недостатки другой – большое увеличение (до 10 раз) при малом ракурсе – обзорном поле снимка (100×100 мм).

Визуальный осмотр на ЛАЭС и в материаловедческом центре показал, что поверхность твэлов всех исследованных ТВС покрыта отложениями продуктов коррозии бурого цвета. По визуальной оценке максимальная и минимальная толщина отложений наблюдалась на твэлах ТВС 012, 567, 570, 361, 917, 360, 671 и ТВС 608, 609, 997 соответственно.

Следует отметить, что практически у всех исследуемых ТВС выявлено локальное утонение слоя отложений на оболочках твэлов выше дистанционирующих решёток, особенно заметно проявившееся в ТВС 626, 440 и 342 (рис. 2.6). Возможная причина обнаруженного эффекта – усиление турбулизации потока теплоносителя в районе ДР, приводящее к неблагоприятным условиям для осаждения продуктов коррозии на оболочках твэлов.

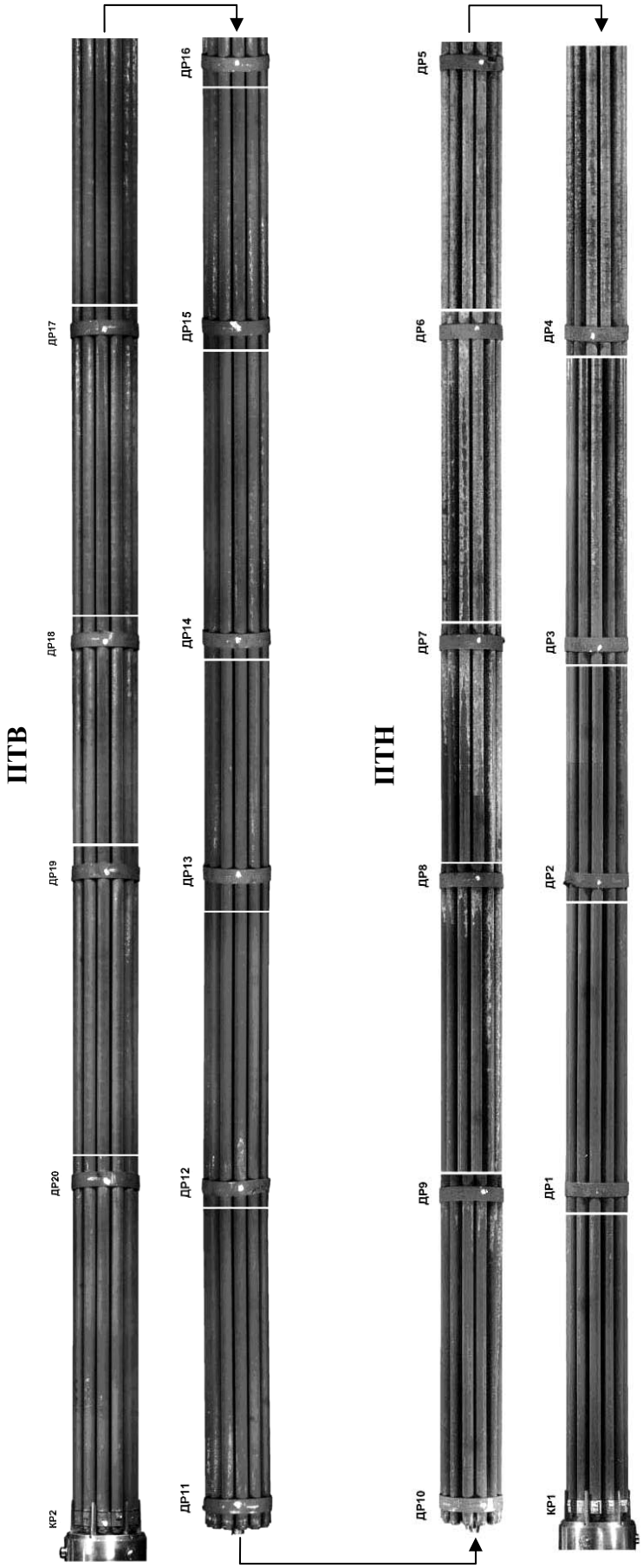


Рис. 2.4 – Внешний вид верхнего и нижнего пучков твэлов ОТВС 012
(снимок через смотровое защитное окно)

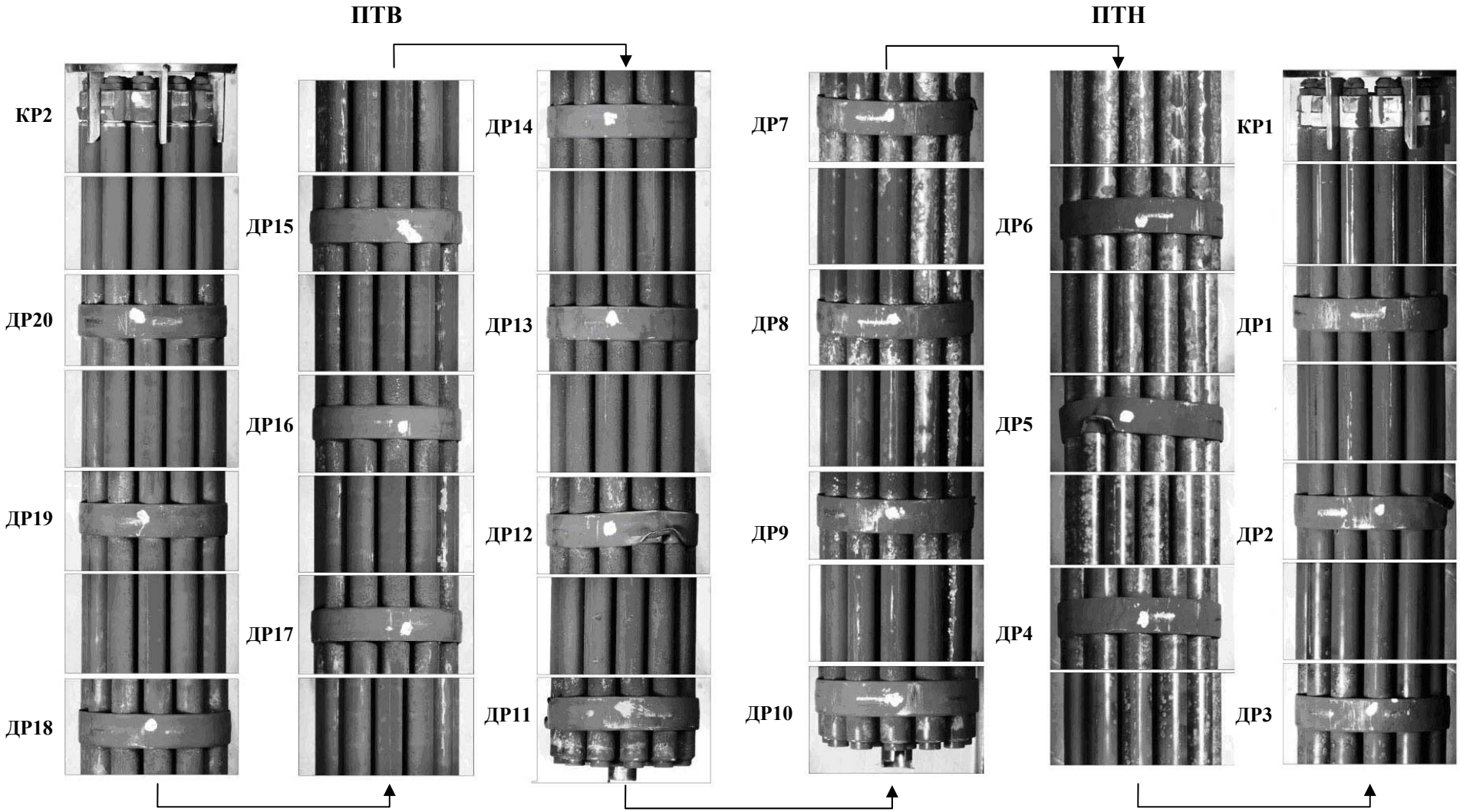
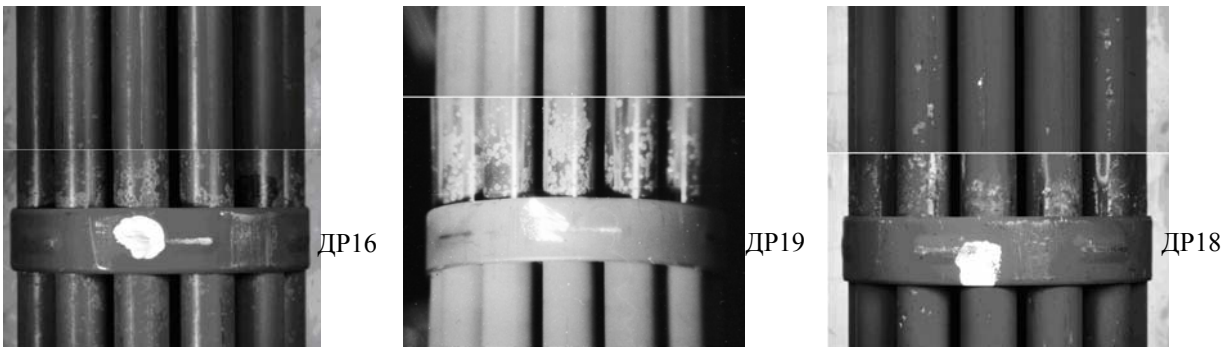


Рис. 2.5 – Внешний вид верхнего и нижнего пучков твэлов ОТВС 012 (снимок через внутрикамерный перископ)

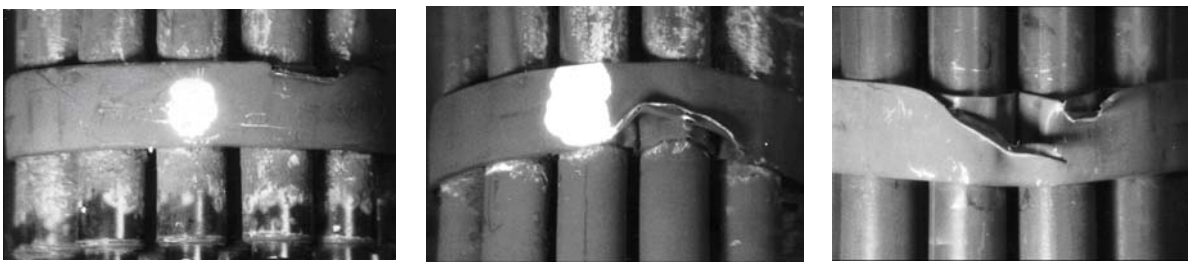


а б в

Рис. 2.6 – Локальное утонение слоя отложений выше ДР в верхних пучках твэлов ТВС 342 (а), 626 (б) и 440 (в)

У всех исследованных ТВС были обнаружены дефекты стальных и циркониевых дистанционирующих решёток. Особенностью стальных ДР являлось наличие потёртостей выступов обойм и механических повреждений в виде сколов, задиров и разрывов её кромок (рис. 2.7).

скол *задир* *разрыв*



СДР11 СДР12 СДР20

а б в

Рис. 2.7 – Механические повреждения обойм СДР ТВС 587 (а, б) и ТВС 997 (в)

В ТВС с циркониевыми ДР наряду с вмятинами (рис. 2.8, а) наблюдалось большое количество преимущественно хрупких разрушений: выкрашивания, трещины и т.п. (рис. 2.8, б, в).

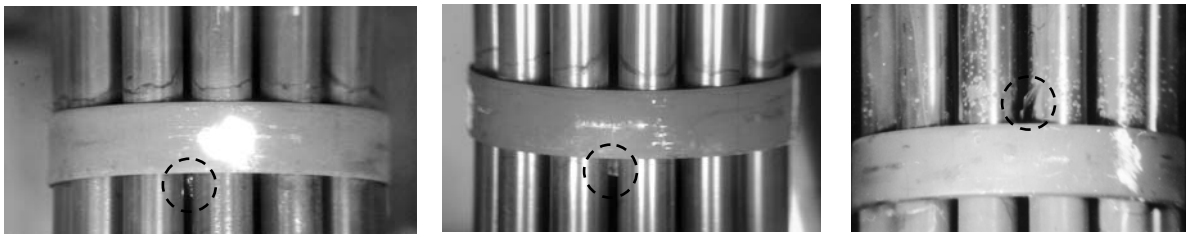
задир *скол* *трещина*

ЦДР17 ЦДР7 ЦДР1

а б в

Рис. 2.8 – Механические повреждения обойм ЦДР ТВС 671 (а, б) и 570 (в)

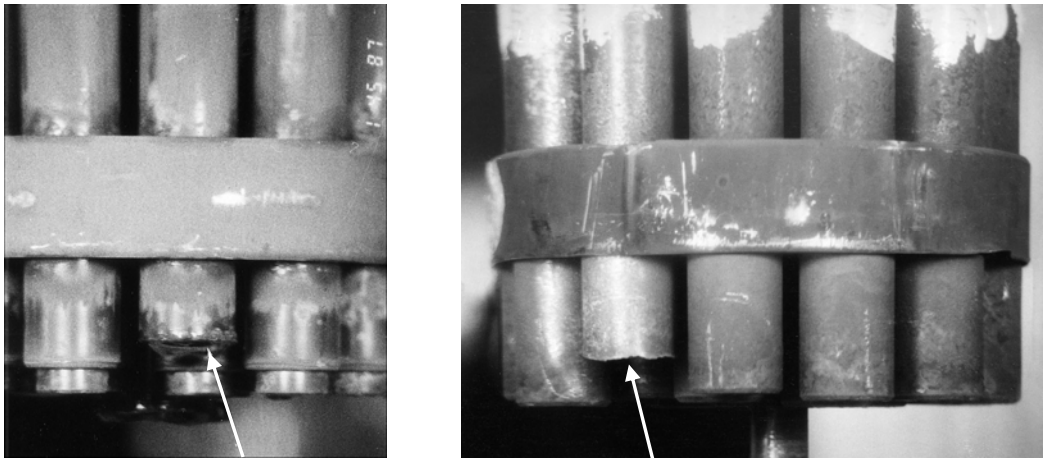
При визуальном осмотре в 5 из 22 исследованных ТВС были обнаружены инородные тела, застрявшие в районе ДР преимущественно верхнего пучка твэлов (рис. 2.9).



а б в

Рис. 2.9 – Инородные тела, застрявшие в районе ДР ПТН ТВС 609 (а, б) и ПТВ ТВС 626 (в)

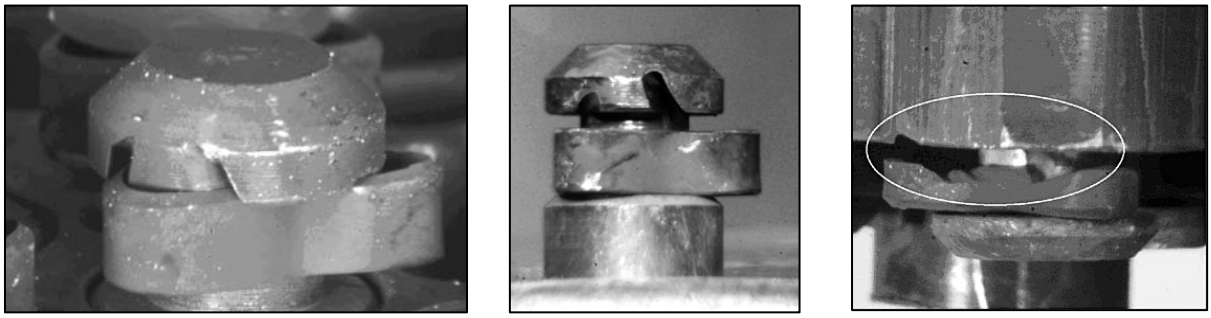
В некоторых ТВС, признанных на ЛАЭС негерметичными (см. табл. 1.7), зафиксировано отсутствие заглушек у дефектных твэлов (рис. 2.10).



а б

Рис. 2.10 – Отсутствие заглушек у твэлов ПТВ ТВС 626 (а) и 659 (б). В ТВС 659 использовалась форма заглушек, отличная от применяемых в настоящее время

В тепловыделяющих сборках с большим сроком эксплуатации при визуальном осмотре наблюдались дефекты в наконечниках и следы износа фиксирующих колец твэлов (рис. 2.11).



а в

Рис. 2.11 – Дефекты наконечников твэлов 16в ТВС 440 (а), 18в ТВС 038 (б) и фиксирующего кольца твэла 9н ТВС 442 (в)

2.3 Определение геометрических параметров пучков твэлов

В процессе исследований измерялись следующие характеристики ПТН и ПТВ:

– прогиб;

– зазоры между твэлами;

– координаты расположения дистанционирующих решёток;

– наличие люфтов твэлов в ячейках ДР;

– диаметр обойм ДР (результаты измерений будут представлены в разделе 5.2.2).

Результаты измерений расстояний от обоймы ДР до струны отвеса в четырёх ориентациях по периметру свидетельствовали об отсутствии прогиба пучков твэлов всех исследованных ТВС в пределах ошибки измерения (0,5 мм).

Зазор между твэлами определяли с помощью щупов, толщина которых изменялась в пределах 1,8–3,0 мм через каждые 0,2 мм. Величина зазоров между твэлами всех пучков находилась в интервале 2,2–3,0 мм. Согласно ТУ зазор между твэлами должен быть не менее 2,0 мм.

Координаты ДР (расстояние от низа КР до нижней части соответствующей ДР) измерялись мерительной рулеткой с погрешностью ± 1 мм. В табл. 2.2 приведены результаты определения отклонений координат расположения ДР в пучках от проектных значений в восьми исследованных ТВС.

Таблица 2.2 – Расстояния между ДР в исследованных ТВС

№№ДР	Проектное расстояние между ДР, мм	Отклонение от проектной координаты, мм							
		ТВС 917	ТВС 671	ТВС 570	ТВС 587	ТВС 567	ТВС 626	ТВС 424	ТВС 038
Верхний пучок твэлов									
КР2-ДР20	364,5	+ 3,0	+ 2,0	– 19,0	+ 2,0	0,0	+ 3,0	– 1,0	– 0,5
ДР20-ДР19	360	+ 2,0	+ 9,0	– 19,0	+ 2,0	– 7,0	– 6,0	0,0	– 1,5
ДР19-ДР18	360	+ 4,0	+ 8,0	– 25,0	+ 2,0	+ 1,0	+ 4,0	+ 0,5	+ 0,5
ДР18-ДР17	360	+ 6,0	+ 8,0	отсутств.	+ 2,0	+ 2,0	+ 4,0	0,0	– 0,5
ДР17-ДР16	360	+ 6,0	+ 7,0	– 25,0	+ 3,0	+ 2,0	+ 5,0	0,0	+ 1,0
ДР16-ДР15	360	+ 1,0	+ 6,0	– 23,0	+ 2,0	+ 1,0	– 1,0	+ 0,5	0,0
ДР15-ДР14	360	– 2,0	+ 7,0	– 18,0	– 7,0	– 6,0	+ 4,0	+ 0,7	+ 1,0
ДР14-ДР13	360	+ 10,0	+ 7,0	– 11,0	– 6,0	– 2,0	– 4,0	+ 0,3	0,0
ДР13-ДР12	360	+ 10,0	+ 6,0	– 20,0	– 8,0	+ 2,0	+ 4,0	– 0,3	+ 0,5
ДР12-ДР11	358	+ 4,0	– 9,0	– 26,0	– 1,0	– 1,0	+ 1,0	+ 3,3	0,0
Нижний пучок твэлов									
ДР10-ДР9	358	– 2,0	– 2,0	+ 15,0	– 2,0	+ 6,0	+ 3,0	+ 2,8	+ 2,0
ДР9-ДР8	360	0,0	+ 8,0	– 2,0	– 6,0	+10,0	+ 1,0	+ 1,0	0,0
ДР8-ДР7	360	– 3,0	+ 9,0	+ 1334,0	– 8,0	+ 6,0	+ 3,0	+ 0,7	0,0
ДР7-ДР6	360	– 3,0	+ 10,0	отсутств.	– 2,0	+ 9,0	+ 4,0	+ 0,8	+ 0,5
ДР6-ДР5	360	0,0	+ 11,0	+ 670,0	– 1,0	+ 6,0	– 1,0	+ 0,7	+ 56,7
ДР5-ДР4	360	– 7,0	+ 11,0	+ 336,0	– 6,0	+ 6,0	+ 2,0	+ 0,3	– 56,7
ДР4-ДР3	360	– 6,0	+ 9,0	– 2,0	– 5,0	+ 6,0	+ 4,0	+ 0,5	+ 0,5
ДР3-ДР2	360	– 8,0	+ 10,0	+ 6,0	– 6,0	+ 6,0	+ 2,0	+ 1,0	+ 0,5
ДР2-ДР1	360	+ 1,0	+ 8,0	– 11,0	– 6,0	+ 5,0	0,0	+ 0,7	0,0
ДР1-КР1	364,5	– 1,0	+ 9,0	– 2,0	– 5,0	+ 5,0	0,0	– 0,2	+ 7,5

Из анализа представленных данных следует:

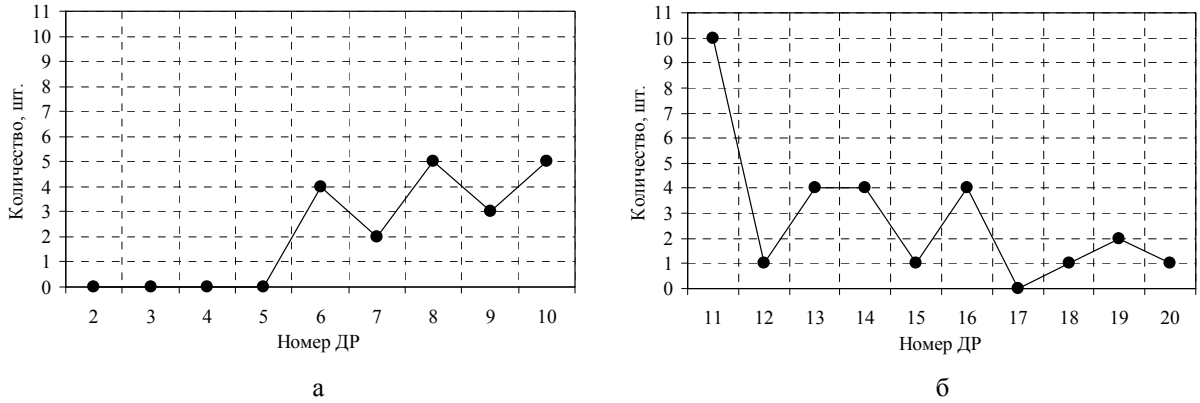
– наибольшее смещение ЦДР от исходного положения наблюдалось в ПТН ТВС 570;

– в ТВС 038 стальная ДР сползла вниз на 57 мм;

– расстояние между ДР в остальных ТВС находилось в диапазоне 360 ± 10 мм, что соответствует допуску на изготовление пучка твэлов (ДР могут смещаться в пределах паза на центральной трубе).

Наличие поперечных люфтов твэлов внешнего ряда в ячейках ДР определялось следующим образом. Обойма ДР закреплялась в фиксирующем устройстве так, что через внутрикамерный перископ были видны зазоры между контролируемым и соседними твэлами, после чего с помощью специального приспособления прилагалось усилие к контролируемому твэлу. Изменение зазоров между твэлами оценивалось визуально и с помощью мерительных щупов.

Испытания, проведённые таким образом, показали отсутствие люфтов твэлов во всех исследованных тепловыделяющих сборках со стальными ДР, кроме ТВС 917 и 761. В первой сборке с выгоранием 19,5 МВт·сут/кгU люфты твэлов в ДР наблюдались только в ПТВ, а в ТВС 761 с максимальным выгоранием этот эффект был обнаружен в обоих пучках. Количество обнаруженных узлов «твэл – ячейка ДР» с люфтом в этой ТВС приведено на рис. 2.12. Доля ячеек с люфтом в периферийных твэлах ПТН и ПТВ составляла 10 и 23 % соответственно. В ТВС 570 практически во всех ячейках ЦДР твэлы внешнего ряда ПТН и ПТВ находились в неподжатом состоянии.



а б

Рис. 2.12 – Распределение количества узлов «твэл – ячейка ДР» с люфтами в ПТН (а) и ПТВ (б) ТВС 761 (выгорание 35 МВт·сут/кгU)

После измерения геометрических параметров приступают к разделке пучков, предварительно пометив белой краской ориентацию твэлов внешнего, а затем и внутреннего ряда по отношению к расположению графитовой кладки вокруг ТВС.

2.4 Измерение усилий страгивания и извлечения твэлов при разборке ТВС

При разборке пучков производится порядная подрезка твэлов – срезаются наконечники в районе обжимных фиксирующих колец. Твэлы захватываются со стороны торцевой заглушки, извлекаются из концевой решётки и протягиваются с помощью мостового крана через все дистанционирующие решётки.

Усилия извлечения твэлов характеризуют степень их натяга в ячейках ДР и косвенно свидетельствуют о жёсткости ТВС в целом. Структурная схема установки для измерения этого параметра представлена на рис. 2.13.

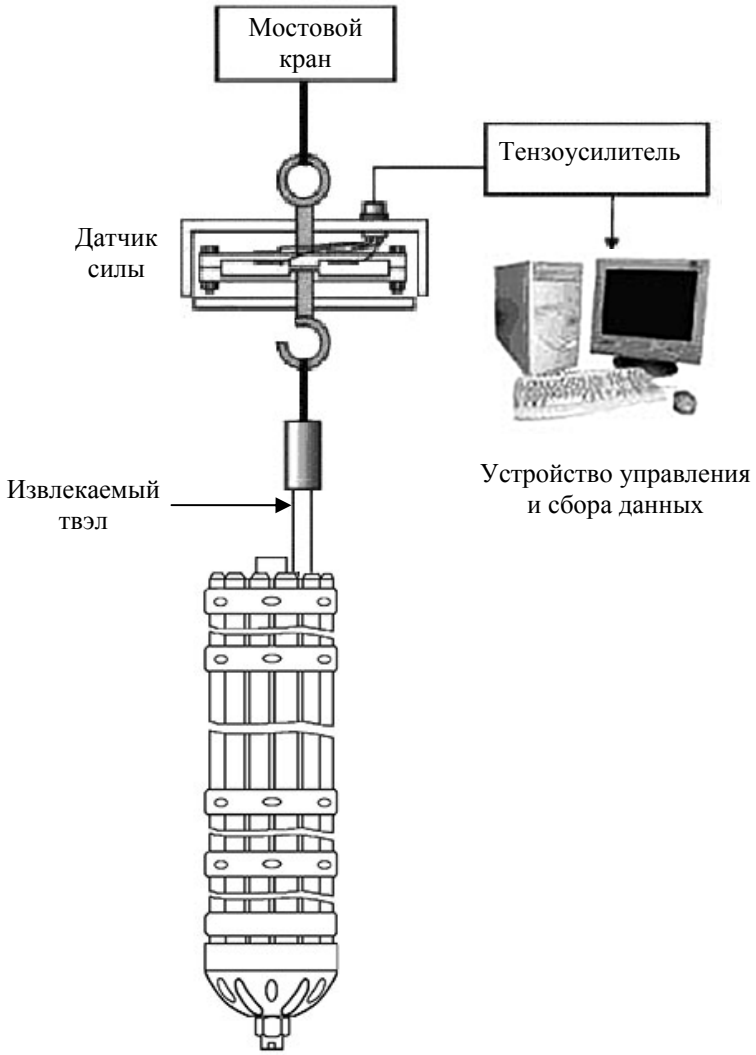


Рис. 2.13 – Схема установки измерения усилия извлечения твэлов из ТВС

Усилие извлечения твэла определяется с помощью датчика силы, выполненного на базе тензорезистора. Датчик располагается между захватом поднимаемого твэла и крюком мостового крана защитной камеры. Электрический сигнал с тензорезистора поступает на тензоусилитель, а затем на устройство управления и сбора данных. Калибровка датчика осуществляется с помощью набора образцовых грузов. Абсолютная погрешность измере-

ния усилия извлечения твэлов в диапазоне от 10 до 10^3 Н не превышает ± 10 Н.

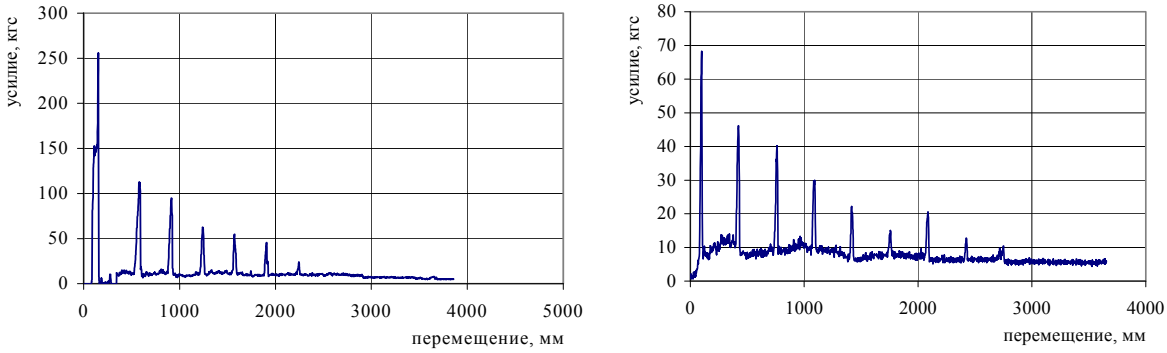
Под усилием страгивания (УС) понимают усилие в начальный момент извлечения твэла из пучка, под усилием извлечения (УИ) – среднее значение силы при перемещении твэла после страгивания до его полного извлечения. Результаты измерения УС и УИ в исследованных ТВС приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3 – Усилия страгивания и извлечения из пучков

№ ТВС	Выгорание, МВт·сут/кгU	Пучок твэлов	Вид усилия	Усилие, кгс		
				среднее	миним.	макс.
609	4,6	ПТВ	УС	18,9	7,0	50,0
			УИ	9,2	2,0	21,0
		ПТН	УС	22,8	8,0	46,0
			УИ	13,4	2,5	43,5
997	6,07	ПТВ	УС	24,7	12,6	50,0
			УИ	15,9	6,3	42,0
		ПТН	УС	89,4	26,3	147,0
			УИ	24,4	6,0	86,4
608	6,3	ПТВ	УС	29,8	10,5	93,3
			УИ	4,8	1,1	12,3
		ПТН	УС	17,3	3,7	29,3
			УИ	5,1	1,1	12,3
676	10,5	ПТВ	УС	8,9	2,0	62,0
			УИ	1,4	1,0	6,0
		ПТН	УС	40,5	12,0	92,0
			УИ	18,3	8,0	46,0
626	18,65	ПТВ	УС	142,0	113,0	150,0
			УИ	16,0	8,0	30,0
		ПТН	УС	111,0	74,0	114,0
			УИ	9,0	6,0	16,0
917	19,5	ПТВ	УС	21,9	4,4	63,7
			УИ	6,8	2,5	13,6
		ПТН	УС	149,7	60,2	206,3
			УИ	13,7	3,9	33,8
012	24,5	ПТВ	УС	273,0	219,0	329,0
			УИ	11,7	3,5	75,5
		ПТН	УС	153,3	45,0	282,0
			УИ	11,7	4,5	30,5
440	26,0	ПТВ	УС	181,8	54,5	289,9
			УИ	13,2	4,5	22,5
		ПТН	УС	189,7	117,6	344,9
			УИ	11,7	3,5	27,5
587	26,2	ПТВ	УС	93,0	70,0	109,1
			УИ	5,7	1,5	15,0
		ПТН	УС	102,0	75,0	109,0
			УИ	6,0	2,2	17,0
361	31,3	ПТВ	УС	198,9	114,5	214,5
			УИ	7,3	6,0	1,1
		ПТН	УС	181,7	115,0	204,5
			УИ	7,8	6,0	15,0
761	35,7	ПТВ	УС	16,4	4,5	39,0
			УИ	3,3	1,5	9,5
		ПТН	УС	28,8	11,3	55,3
			УИ	3,8	1,5	8,5

Примечание: в ТВС 570, 671, 360, 676, 442 и 079 с циркониевыми ДР усилия страгивания и извлечения твэлов из ПТН и ПТВ не превышали 12 кгс.

На рис. 2.14 представлены типичные диаграммы «усилие – перемещение» для твэлов ТВС 012.



а б

Рис. 2.14 – Диаграммы «усилие – перемещение» для твэлов ПТН (а) и ПТВ (б) ТВС 012

Из анализа полученных результатов следует, что наибольшее усилие страгивания наблюдается при извлечении твэлов из нижнего пучка ТВС, причём этот параметр имеет дозную зависимость – его значение увеличивается по мере роста выгорания (рис. 2.15). После страгивания средние усилия извлечения твэлов не превышают 25 кгс и имеют тенденцию к уменьшению по мере роста продолжительности эксплуатации.

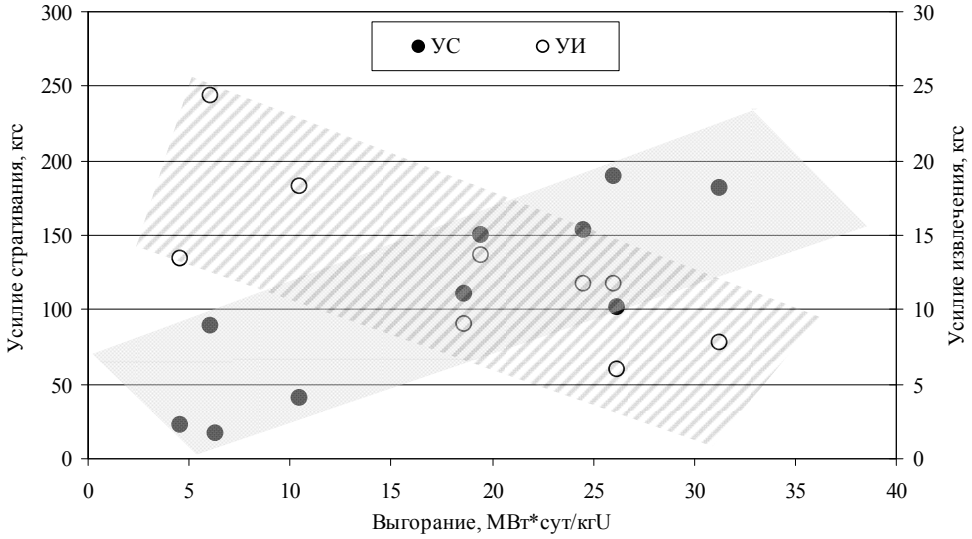


Рис. 2.15 – График зависимости средних усилий страгивания и извлечения твэлов ПТН от выгорания топлива в исследованных ТВС со стальными ДР

Аналогичные закономерности наблюдаются и в верхнем пучке девяти из исследованных ТВС со стальными дистанционирующими решётками. ТВС 917 и 761 выпадают из общего правила. В ПТВ первой сборки и двух пучках второй средние усилия страгивания «аномально» малы для выгораний 19,5 и 35,7 МВт·сут/кгU, составляя 21,9 и 16,4; 28,8 кгс соответственно (см. таблицу 2.3). Примечательно, что именно в пучках только этих ТВС были обнаружены люфты твэлов в ячейках стальных ДР (см. раздел 2.3).

Усилия страгивания и извлечения являются характеристиками контактных усилий в звене «твэл – ячейка ДР» и могут быть использованы для оценки поджатия твэлов в дис-

танционирующих решётках. Усилие страгивания, очевидно, является функцией трёх факторов: поджатия твэла в ячейках ДР, «прикипания» оболочки к пуклёвкам ячеек, а также наконечника в отверстии концевой решётки вследствие заполнения зазора продуктами коррозии контура. На усилие извлечения, вероятно, решающее влияние оказывает первый фактор – поджатие твэла в ячейках ДР. Поджатие – контактное усилие в системе «твэл – ячейка ДР» в процессе эксплуатации должно иметь тенденцию к уменьшению из-за наличия вибрации твэла в потоке теплоносителя, что и наблюдается на графике изменения усилий извлечения твэлов из пучка (см. рис. 2.15).

Глава 3. Методы первичных неразрушающих исследований твэлов

3.1 Визуальный осмотр

Для визуальной инспекции твэлов используется установка (рис. 3.1), размещённая над приёмным колодцем глубиной 5 м в защитной камере длиной 7,5 м, шириной 4 м и высотой 7,2 м. Увеличение смотровой системы 0,8–10х. Установка оснащена устройством отсчёта координат исследуемого участка твэла. Оптическая информация сохраняется в виде фотографии или видеозаписи.

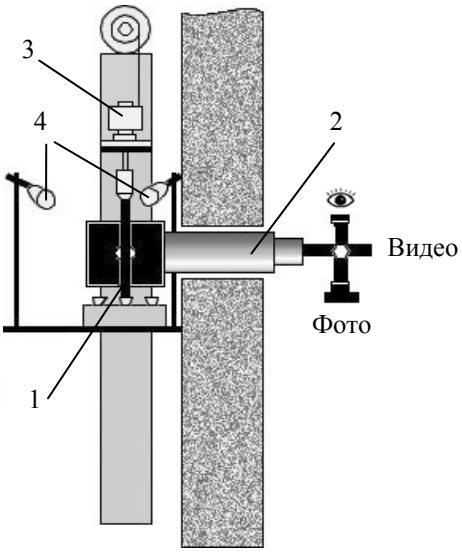


Рис. 3.1 – Установка визуального осмотра твэлов:
1 – твэл;
2 – перископ;
3 – устройство вращения и перемещения;
4 – софиты подсветки

Визуальный осмотр используется в качестве первичного метода изучения явлений, происходящих на поверхности твэлов при эксплуатации в активной зоне кипящего канального реактора. Для иллюстрации возможностей этого метода при исследованиях в защитной камере на рис. 3.2–3.5 представлены фотоснимки участков твэлов (между и под ДР) ТВС 079 и 761. Первая сборка с оболочками из сплава Zr-1%Nb на губчатой основе и топливом UO_2 + 0,6 % Er_2O_3, с обогащением 2,8 % по ^{235}U эксплуатировалась на 2-ом блоке ЛАЭС до выгорания 26,4 МВт·сут/кгU. В ТВС 079 использовались дистанционирующие решётки из циркониевого сплава Э110. Вторая сборка (ТВС 761) со стальными ДР, оболочками твэлов из сплава Zr-1%Nb и топливом UO_2 + 0,43 % Er_2O_3, с обогащением 2,6 % по ^{235}U отработала на 2-ом блоке ЛАЭС до выгорания 35,7 МВт·сут/кгU.

Из анализа приведённых фотоснимков следует, что максимальное окисление внешней поверхности твэлов РБМК-1000 обнаружено на участках под дистанционирующими решётками. Наряду с окислением в ТВС 761 со стальными ДР наблюдается фреттинг-взаимодействие, наиболее значительное в твэлах верхнего пучка (рис. 3.5).

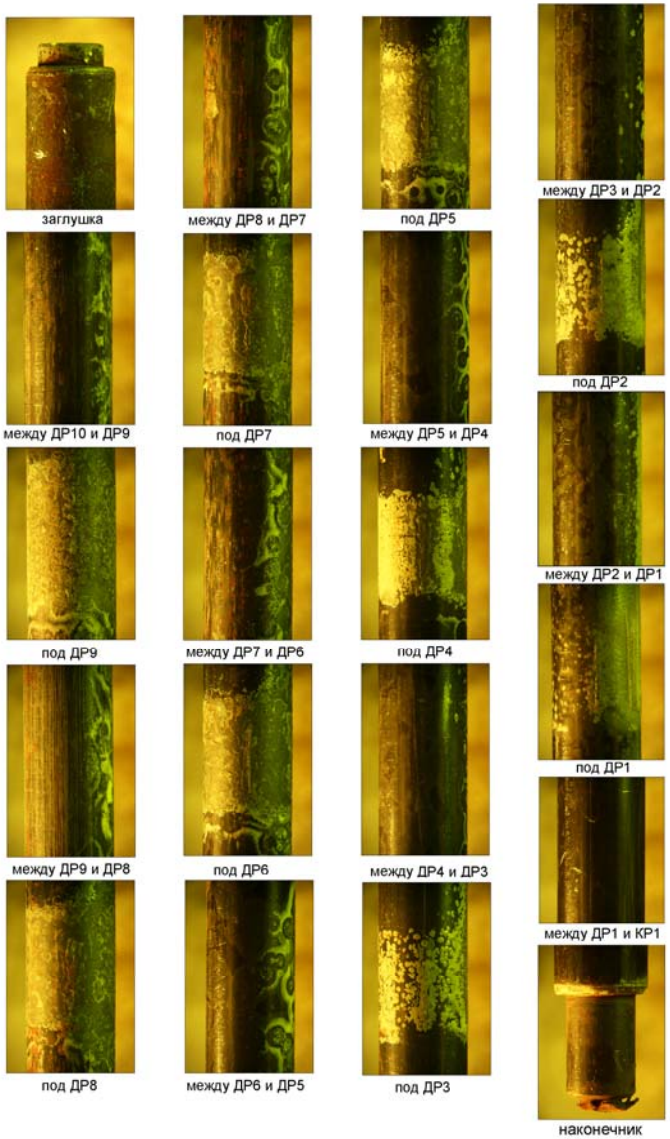


Рис. 3.2 – Вид твэла ПТН ТВС 079

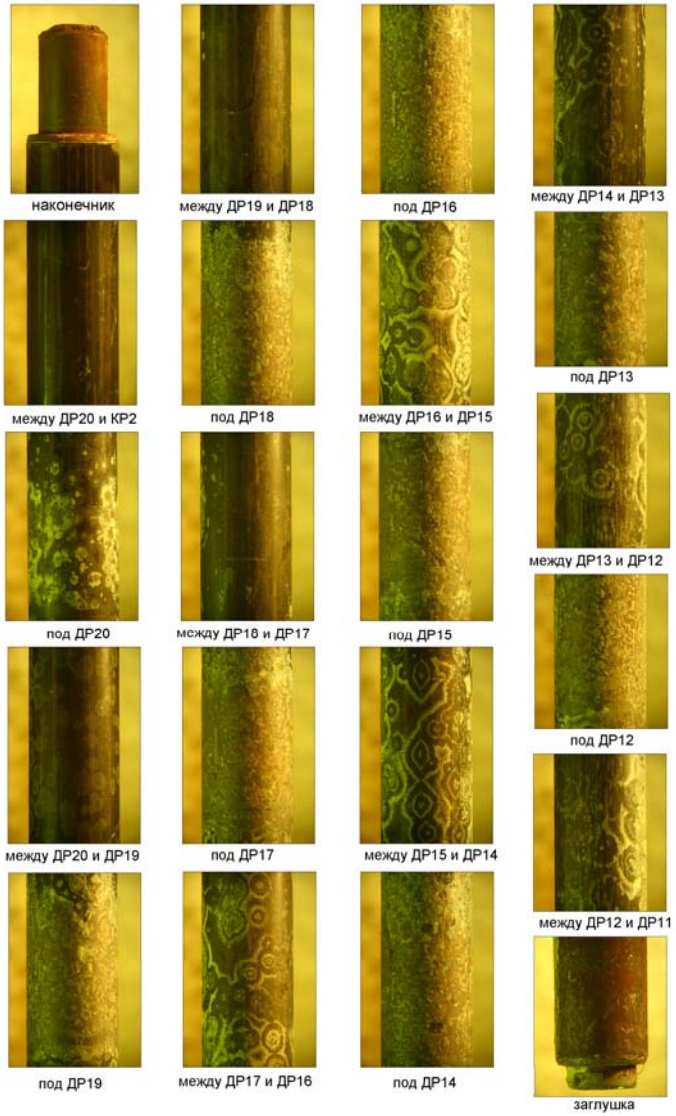


Рис. 3.3 – Вид твэла ПТВ ТВС 079

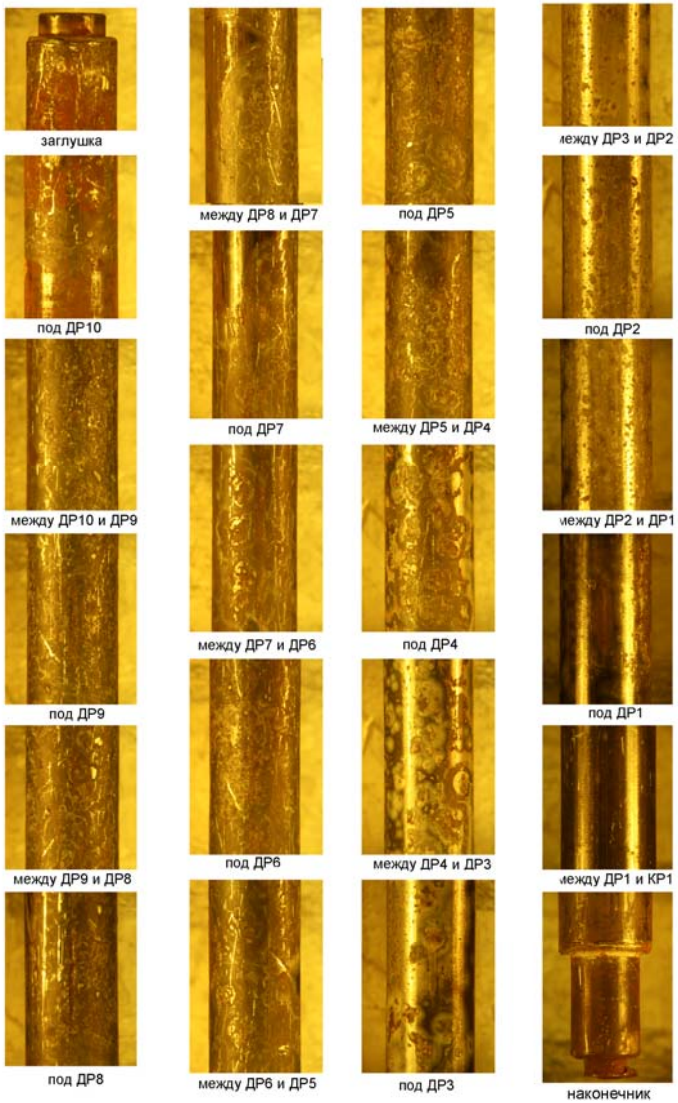


Рис. 3.4 – Внешний вид твэла ПТН ТВС 761

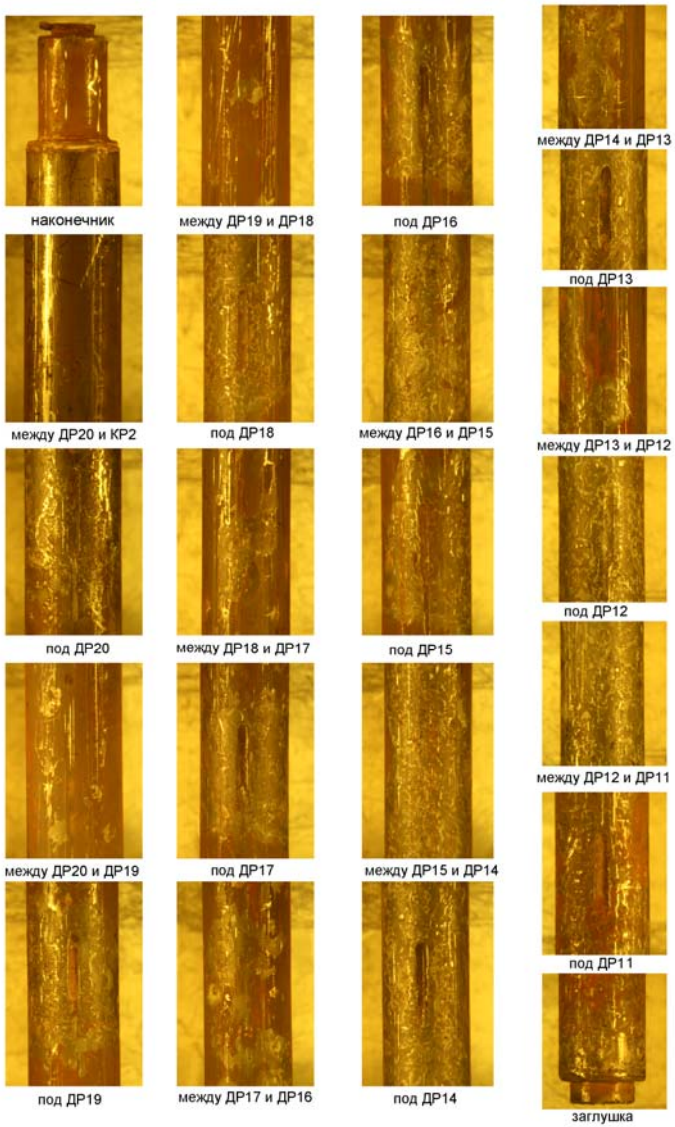


Рис. 3.5 – Внешний вид твэла ПТВ ТВС 761

Визуальный осмотр выявил в большинстве твэлов исследованных ТВС наличие азимутальной асимметрии окисления оболочечных труб. Наибольшее коррозионное поражение было обнаружено на поверхностях оболочек твэлов, ориентированных к центру ТВС (рис. 3.6–3.8).

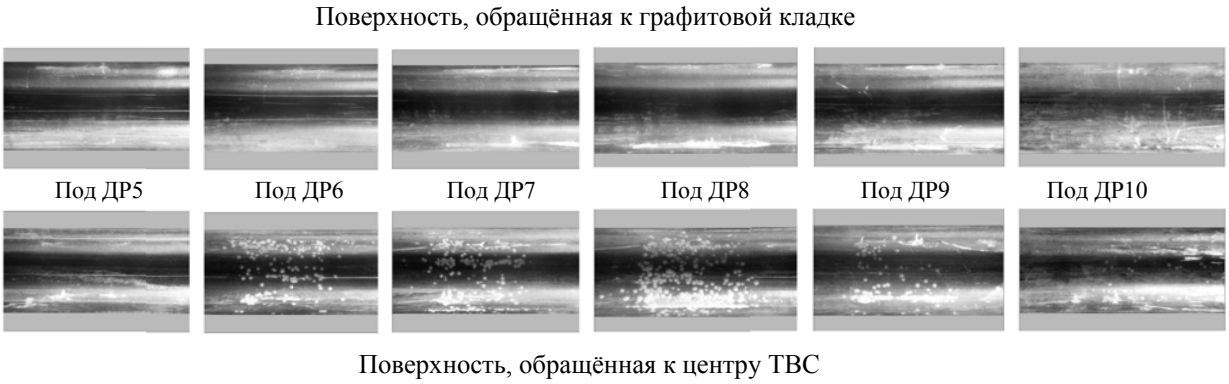


Рис. 3.6 – Окисление поверхности твэла внешнего ряда ПТН ТВС 997
(выгорание 6,07 МВт·сут/кгU)

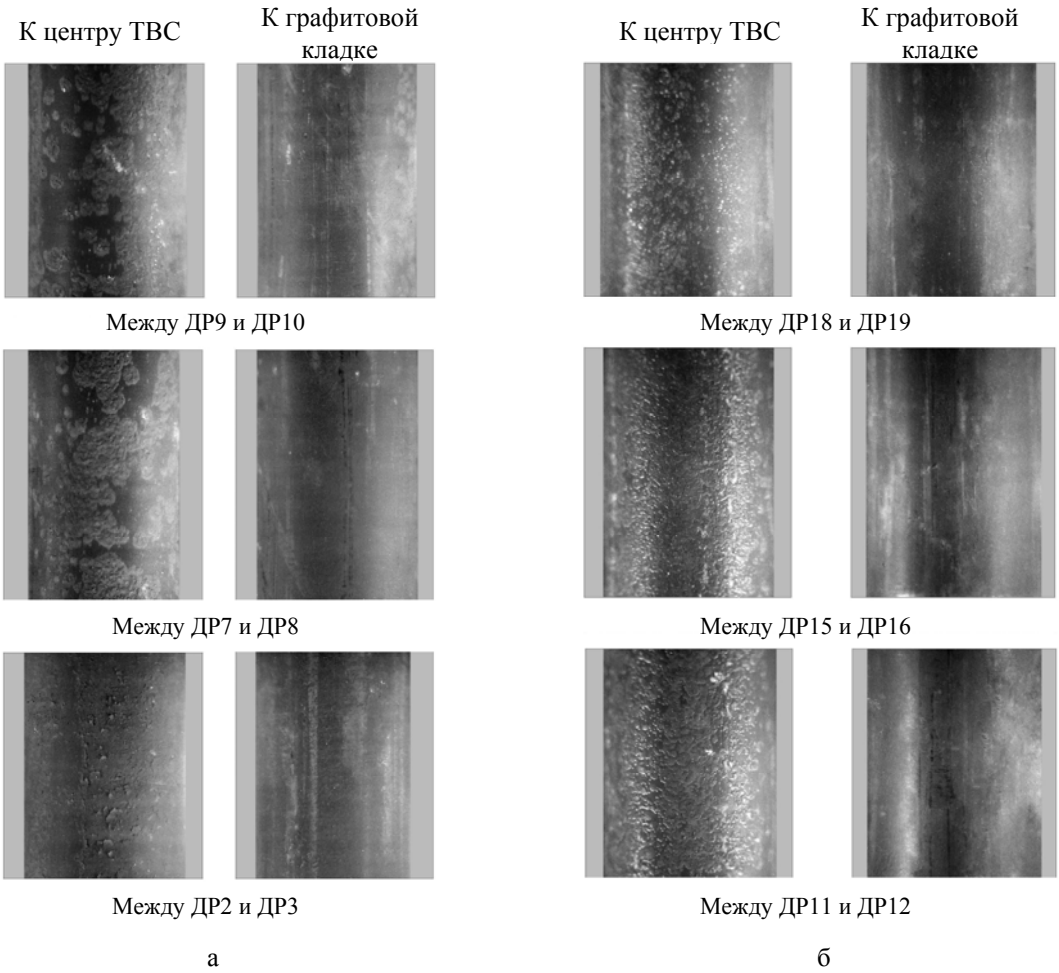


Рис. 3.7 – Окисление поверхности твэла внешнего ряда ПТН (а) и ПТВ (б) ТВС 659
(выгорание 10,8 МВт·сут/кгU)

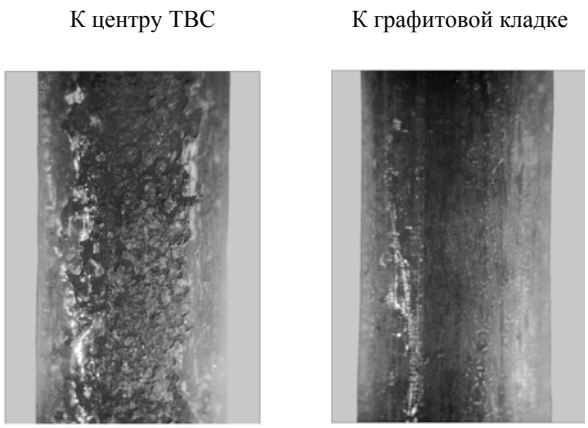


Рис. 3.8 – Внешний вид поверхности твэла наружного ряда верхнего пучка ТВС 671 (выгорание 18,9 МВт·сут/кгU)

В процессе визуального осмотра исследуются, наряду с окислением, закономерности распределения следов фреттинг-износа оболочек твэлов под пуклёвками ДР. На рис. 3.9–3.12 представлены фотографии следов фреттинг-взаимодействия стальных ДР с твэлами в ТВС РБМК-1000, отработавших на ЛАЭС до различного выгорания топлива.

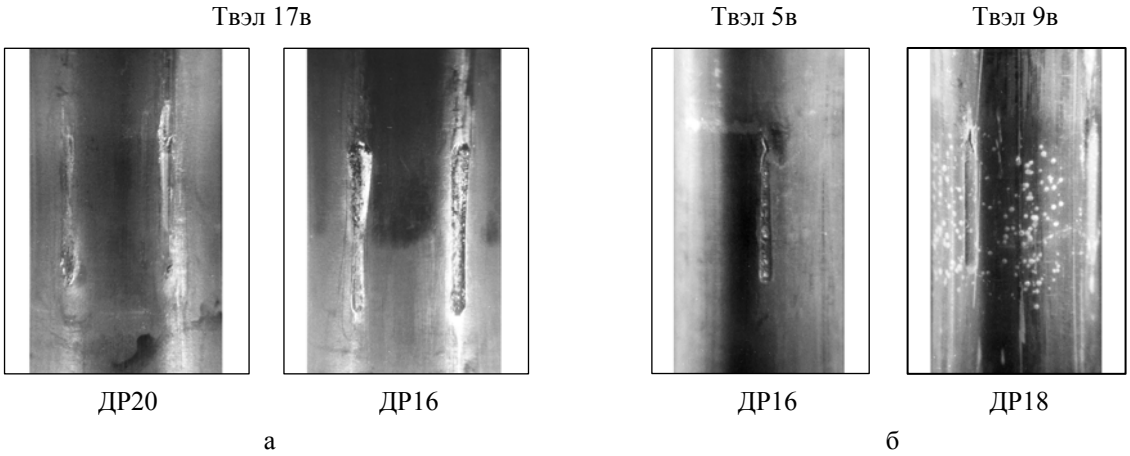


Рис. 3.9 – Следы фреттинг-износа оболочек твэлов пуклёвками стальных ДР в ТВС 608 (а) и 997 (б) (выгорание ~ 6 МВт·сут/кгU)

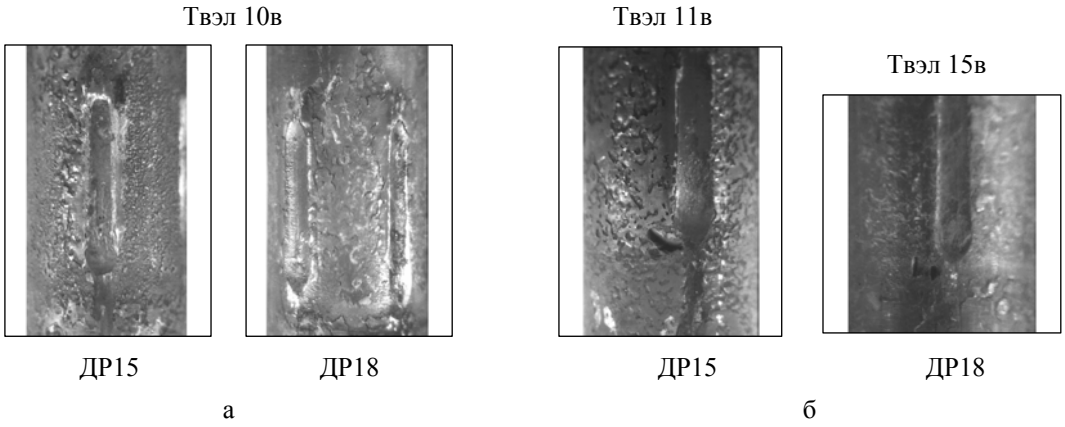


Рис. 3.10 – Следы фреттинг-взаимодействия твэлов ПТВ ТВС 917 (выгорание 19,5 МВт·сут/кгU)

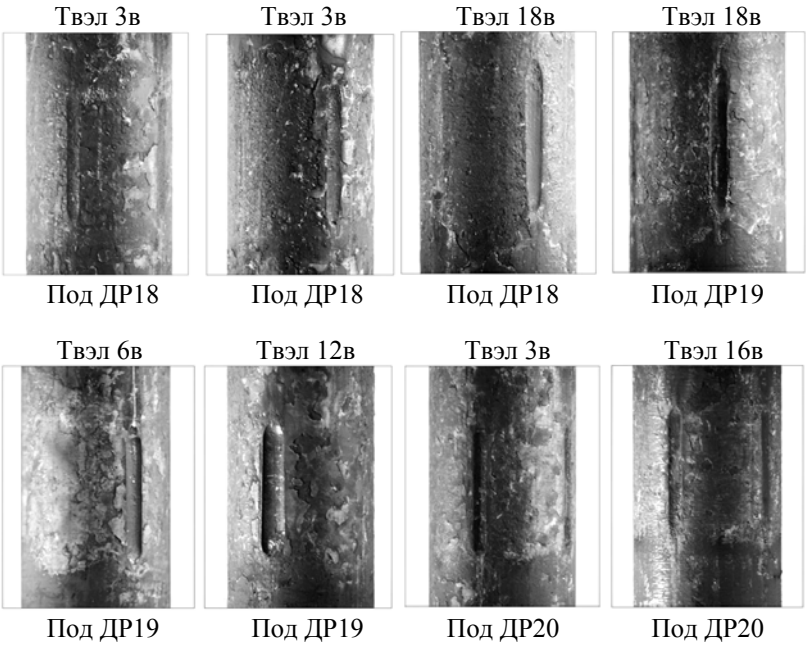


Рис. 3.11 – Следы фреттинг-износа оболочек твэлов пуклёвками СДР в ПТВ ТВС 440 (выгорание 26,0 МВт·сут/кгU)

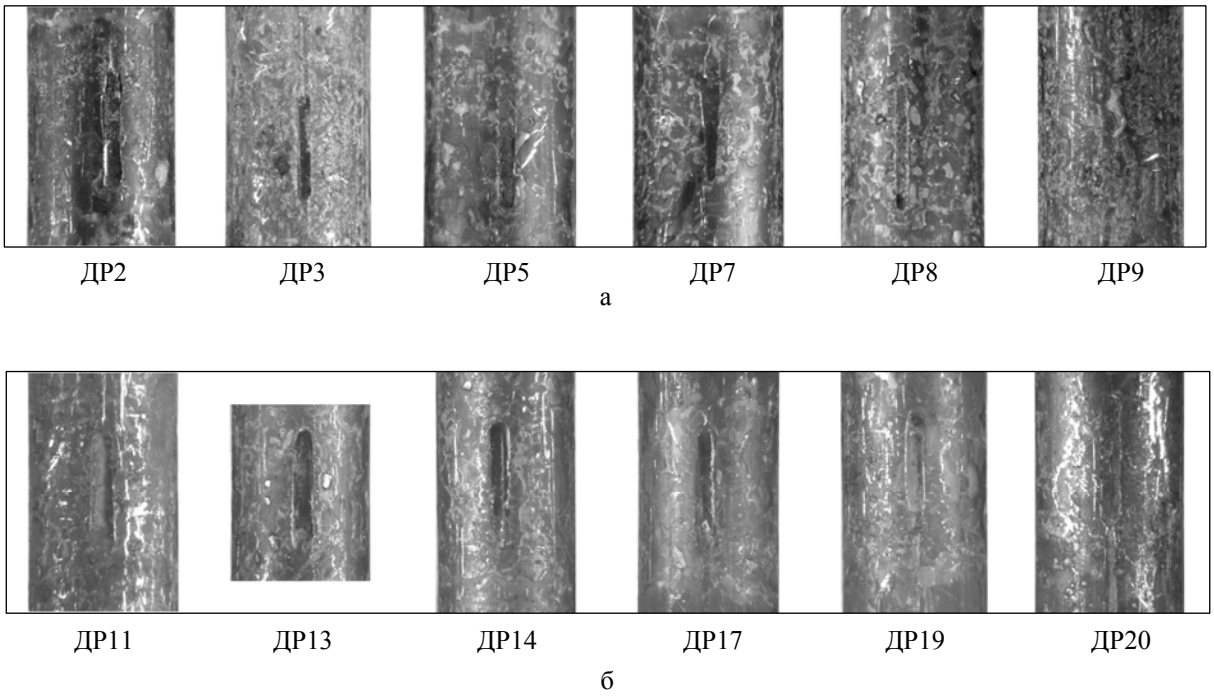


Рис. 3.12 – Следы фреттинг-взаимодействия СДР с оболочками твэлов 16н (а) и 7в (б) ТВС 761 (выгорание 35,7 МВт·сут/кгU)

Подсчёт следов фреттинг-износа показал, что этот эффект наблюдается на различных уровнях твэлов ПТН и ПТВ. В одних ТВС он существенно не зависит от номера ДР (рис. 3.13), а в других обнаруживаются проявления некоторых закономерностей. Так, например, в ТВС 917 фреттинг-износ практически отсутствовал под ДР8–10 и был максимален в твэлах ПТВ (рис. 3.14).

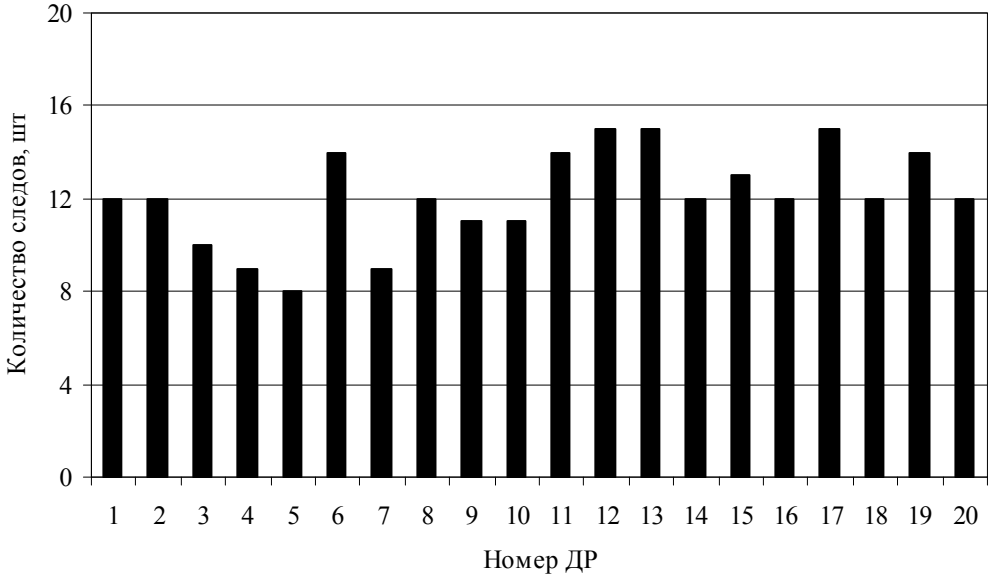


Рис. 3.13 – Число следов фреттинг-износа на оболочках твэлов ТВС 608

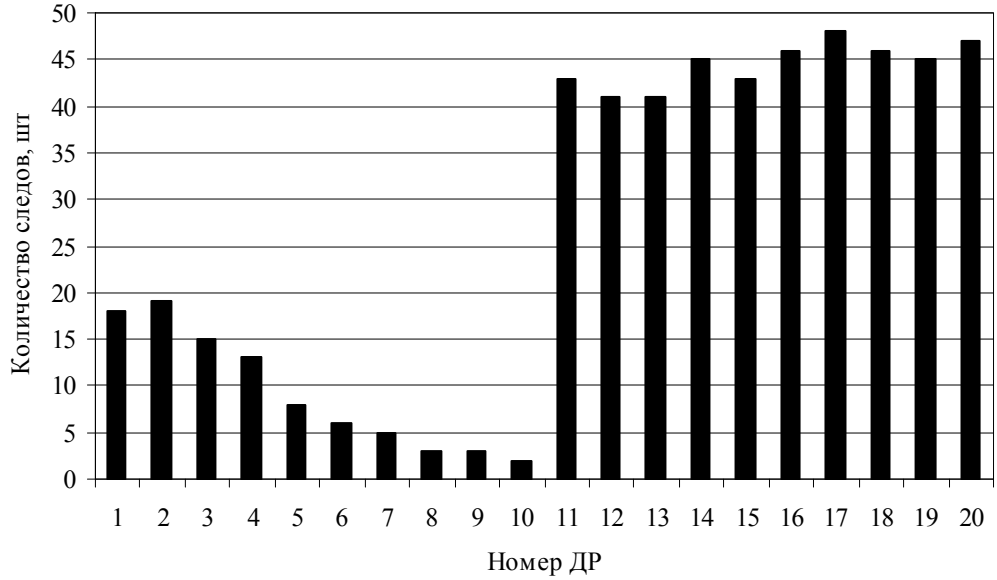


Рис. 3.14 – Число следов фреттинг-износа на оболочках твэлов ТВС 917

По результатам измерения ширины следов взаимодействия твэла с пуклёвкой ДР может быть сделана оценка глубины фреттинг-износа оболочек в исследованных ТВС. Ширина следов, равная 1–3 мм, измерялась на фотографиях большого масштаба (увеличение 8х) с погрешностью не более 0,1 мм. Расчётная глубина следов фреттинг-износа оказалась на 100 мкм меньше реальной, определённой при металлографических исследованиях поперечных шлифов твэлов ТВС 917 (рис. 3.15).

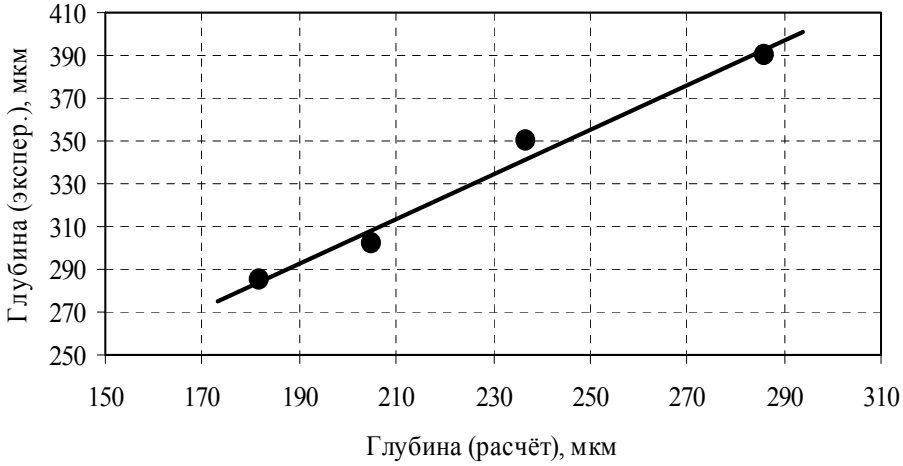


Рис. 3.15 – Связь между расчётной и экспериментальной (определённой металлографическим методом) глубиной фреттинг-износа оболочки твэла ПТВ ТВС 917

На основе данных, рассчитанных по результатам визуального осмотра, строится гистограмма распределения следов фреттинг-износа по глубине (рис. 3.16) или находится зависимость этого параметра от номера ДР для твэлов исследуемых ТВС (рис. 3.17). Из анализа представленных данных следует, что распределение следов фреттинг-износа по глубине близко к нормальному с основной массой значений в диапазоне 200–400 мкм. Максимальная величина износа составила 500 мкм.

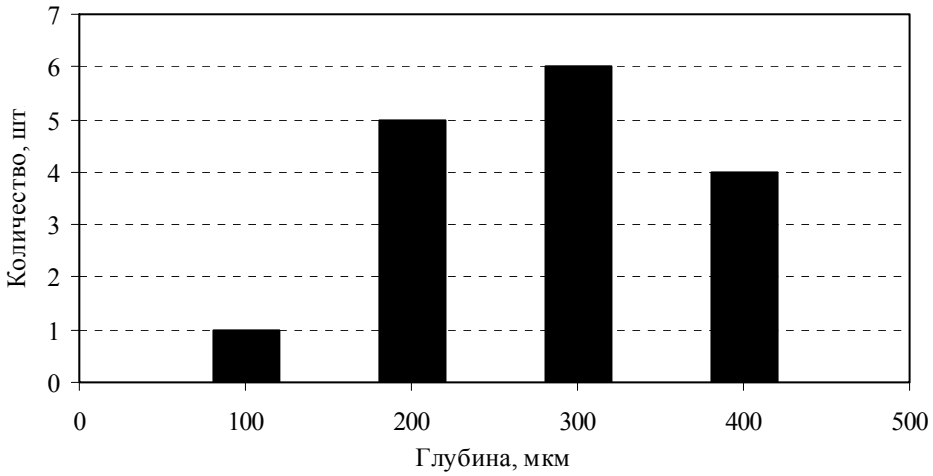


Рис. 3.16 – Гистограмма распределения следов фреттинг-износа оболочек твэлов ТВС 917 по глубине

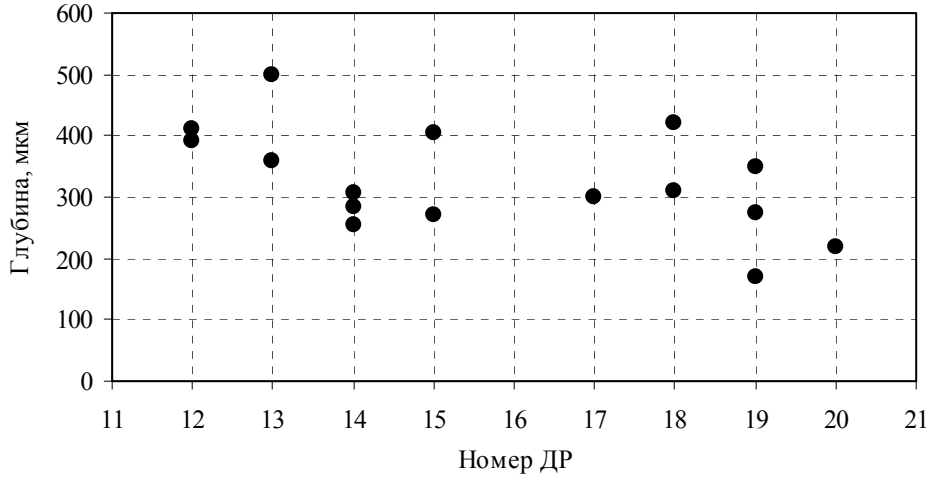


Рис. 3.17 – Зависимость глубины фреттинг-износа оболочек твэлов от номера ДР в ПТВ ТВС 917

Согласно литературным данным твэлы зарубежных энергетических реакторов LWR наиболее часто теряют герметичность по механизму истирания оболочек при взаимодействии с посторонними предметами (проволока, стружка, сварочный грат, крупные частицы оксида циркония и т.п.), циркулирующими по реакторному контуру в потоке теплоносителя. Во время эксплуатации ТВС посторонние тела застревают (как правило, в районе ДР) и, вибрируя в потоке теплоносителя, приводят к debris-износу оболочек твэлов вплоть до образования сквозных дефектов [16, 17]. Наибольшее количество такого типа дефектов (20 шт.) было зарегистрировано визуально в ТВС 917, эксплуатировавшейся на 2-ом блоке ЛАЭС в 1982–1985 гг. На рис. 3.18 представлены типичные виды debris-дефектов на оболочках твэлов, обнаруженных в этой тепловыделяющей сборке.

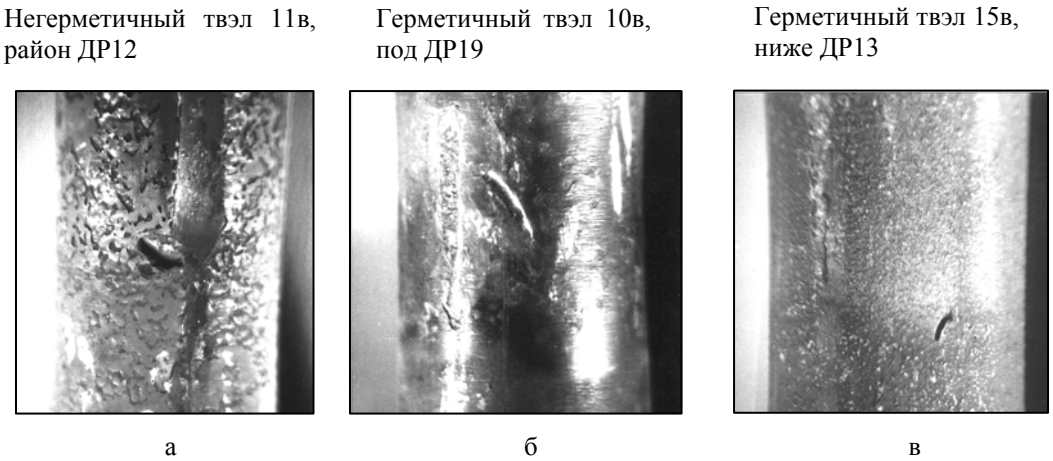


Рис. 3.18 – Сквозной (а) и поверхностные (б, в) debris-дефекты оболочек твэлов ПТВ ТВС 917

На картограмме (рис. 3.19) и гистограмме (рис. 3.20) указаны твэлы, имевшие следы debris-взаимодействия с инородными предметами, а также приведены распределения их количества в районе расположения ДР по высоте ПТВ. Из анализа представленных данных следует, что количество debris-дефектов было приблизительно равным в наружном и внутреннем рядах твэлов, а их распределение по высоте пучка носило случайный характер.

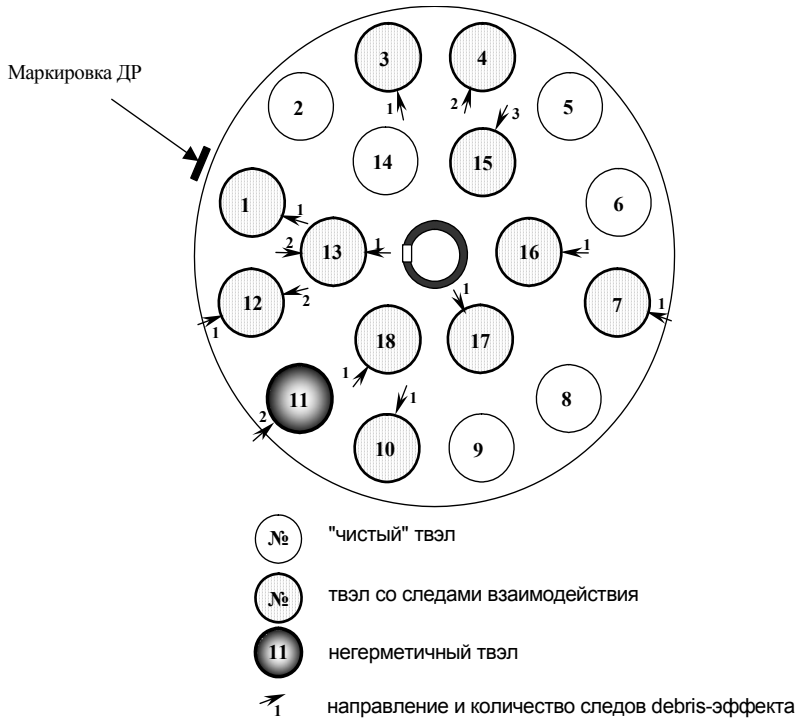


Рис. 3.19 – Картограмма расположения твэлов со следами взаимодействия с посторонними предметами в ПТВ ТВС 917

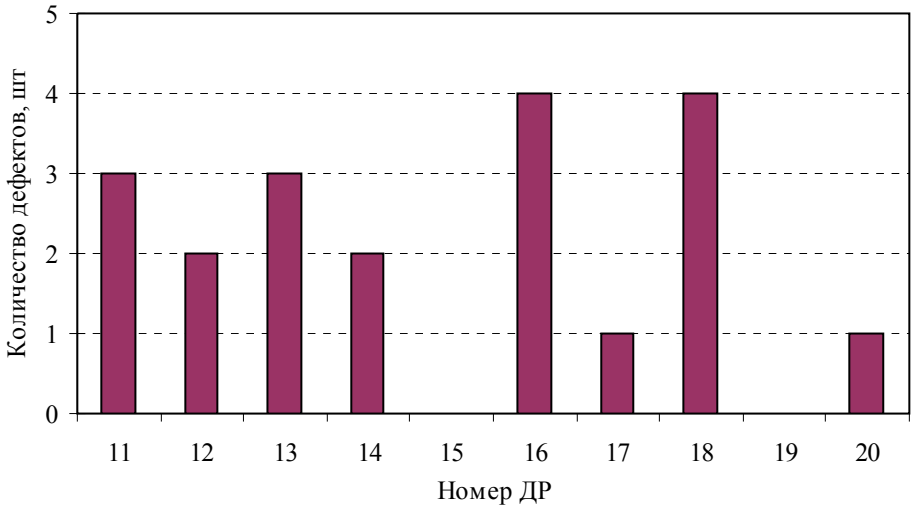


Рис. 3.20 – Гистограмма расположения следов debris-взаимодействия по высоте ПТВ ТВС 917

На рис. 3.21 представлен вид сквозных и поверхностных debris-дефектов, обнаруженных ещё в семи из 22-х исследованных ТВС РБМК.

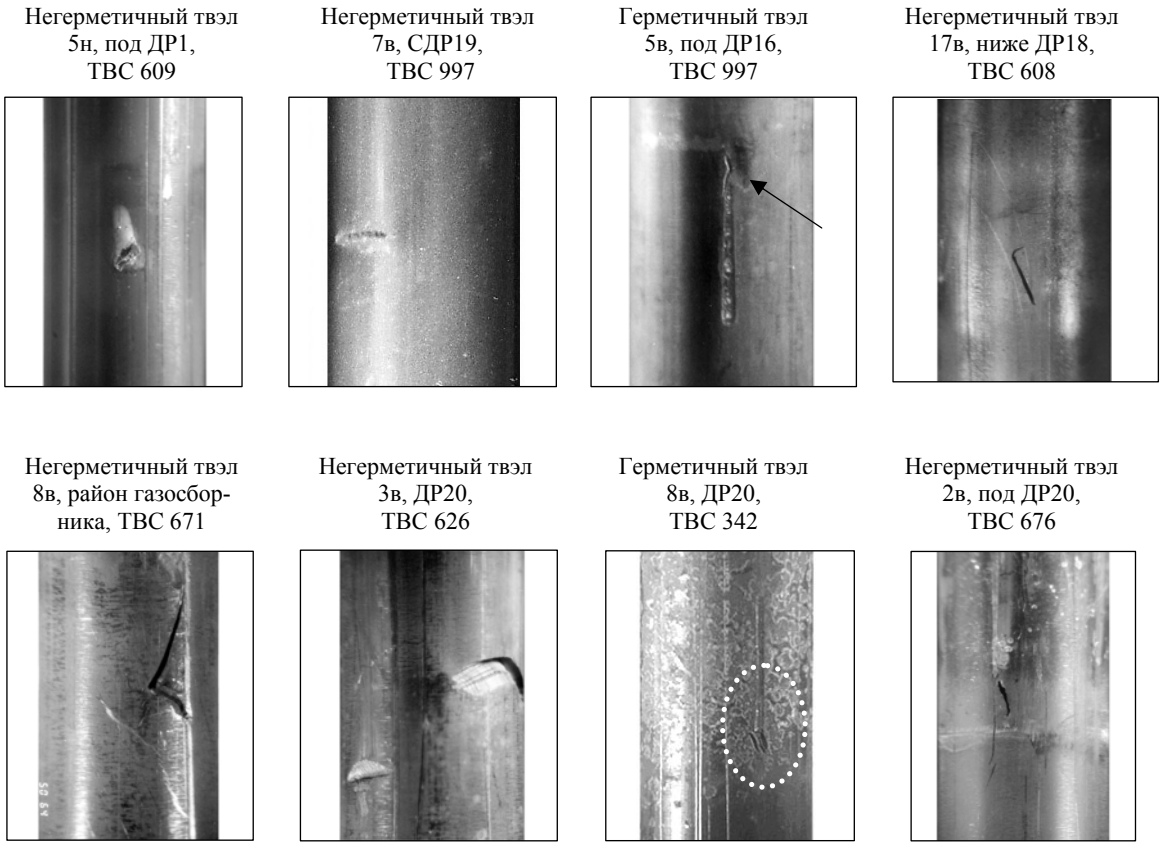


Рис. 3.21 – Сквозные и поверхностные debris-дефекты, выявленные визуально в семи из исследованных ТВС

После разгерметизации циркониевой оболочки водный теплоноситель проникает внутрь твэла, приводя к окислению и гидрированию её внутренней поверхности с образованием вторичных дефектов. На рис. 3.22 представлены участки вторичных разрушений оболочки, обнаруженные визуально в негерметичных твэлах трёх ТВС с различным выгоранием топлива.

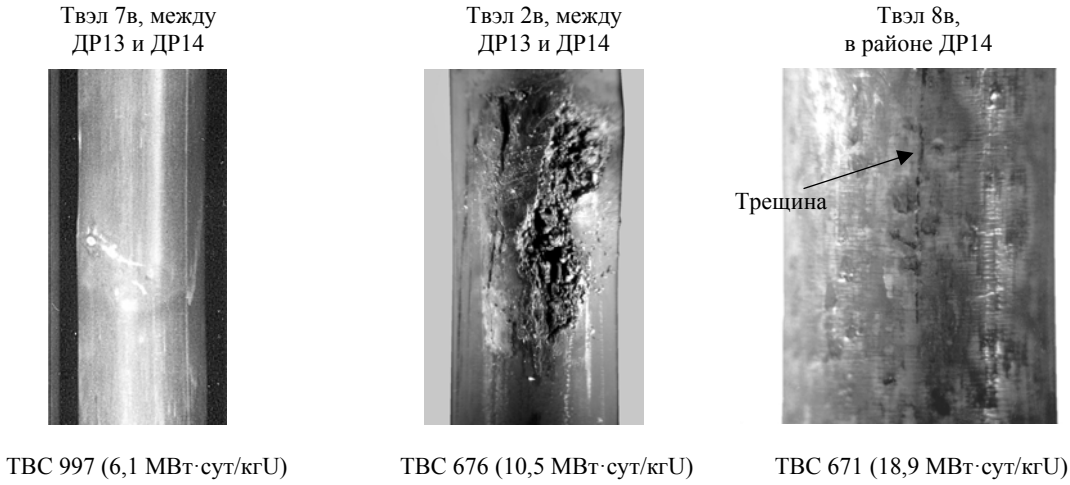


Рис. 3.22 – Внешний вид негерметичных твэлов верхнего пучка в районе вторичных дефектов оболочки

Из анализа фотоснимков, представленных на рис. 3.21 и 3.22, следует, что вторичные разрушения оболочки обнаруживаются на значительном расстоянии от первичного сквозного дефекта. Так, например, при расположении первичного debris-дефекта в верхней части негерметичных твэлов ПТВ – рядом с ДР20 (ТВС 997, 676) и в районе газосборника (ТВС 671), вторичные дефекты наблюдались в их нижней части, вблизи максимума энерговыделения – между ДР13 и ДР14.

3.2 Размерометрия

3.2.1 Измерение длины и диаметра твэлов

Для определения длины твэлов в условиях защитной камеры используются приспособление, схематично изображённое на рис. 3.23, калибр с аттестованными расстояниями между рисками и катетометр. Приспособление состоит из измерительной трубы с подвижным дном, в которую поочерёдно устанавливается калибр или твэл.

Длина твэлов определяется по формуле:

$$L_{тв} = L_{кал} + k_{опт}\left(L_{тр-твэл} - L_{тр-риска}\right), \qquad (3.1)$$

где $L_{кал}$ – длина калибра до соответствующей риски;

$L_{тр-риска}$ – расстояние от риски калибра до торца трубы;

$L_{тр-твэл}$ – расстояние от торца трубы до торца твэла;

$k_{опт}$ – коэффициент оптического искажения стекла окна защитной камеры.

Расстояние от торца трубы до риски калибра и торца твэла определяют с помощью катетометра КМ-6 или В-630. Погрешность измерения составляет ± 0,3 мм при длине твлов до 4000 мм.

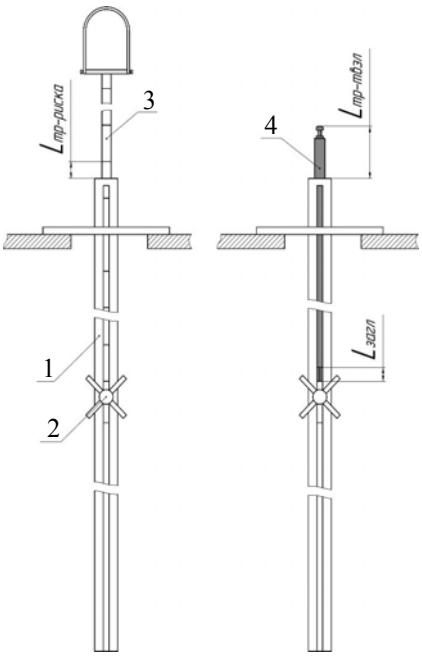
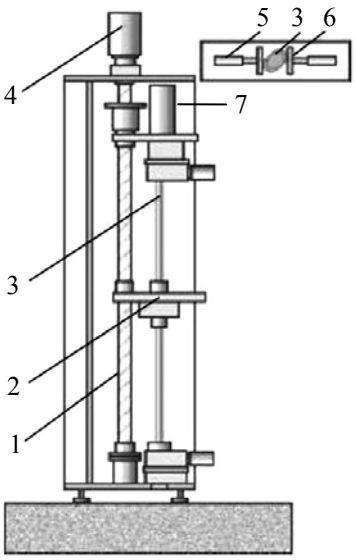


Рис. 3.23 – Приспособление для определения длины твэлов: 1 – измерительная труба; 2 – подвижное дно; 3 – калибр с рисками; 4 – исследуемый твэл



1 – ведущий винт с магнитной линейкой; 2 – блок датчиков; 3 – твэл; 4 – двигатель перемещения измерительной каретки; 5 – датчик линейных перемещений; 6 – измерительные наконечники; 7 – двигатель вращения твэла

Рис. 3.24 – Установка измерения наружного диаметра твэлов с максимальной длиной 4000 мм

Наружный диаметр твэлов определяется на автоматизированной установке (рис. 3.24) контактным методом с помощью датчиков линейных перемещений типа «магнитная линейка». Калибровка системы осуществляется с помощью стандартного образца внешнего диаметра. Датчики, расположенные на каретке, перемещаются вдоль оси твэла в старт-стопном режиме с заданным шагом сканирования. Компьютер опрашивает их показания посредством измерительного блока и записывает файл с результатами определения диаметра в выбранной ориентации.

Значение диаметра d в одной ориентации определяется как разность показаний отдельных датчиков Y_1 и Y_2:

$$d = Y_1 - Y_2 . \qquad (3.2)$$

Эффективный диаметр D в заданном сечении вычисляется по формуле:

$$D = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} d_i , \qquad (3.3)$$

где n – количество ориентаций измерений; d_i – значение диаметра в i-ой ориентации.

Овальность вычисляется по формуле:

$$\delta = D_{\max} - D_{\min} , \qquad (3.4)$$

где $D_{\max}$ и $D_{\min}$ – максимальное и минимальное значение диаметра в заданном сечении.

Погрешность результата измерения диаметра твэла d рассчитывают по формуле:

$$\Delta d = \sqrt{(\Delta Y_1)^2 + (\Delta Y_2)^2} \qquad (3.5)$$

где ΔY_1, ΔY_2 – погрешности результатов измерения первым и вторым датчиком. При $\Delta Y_1 = \Delta Y_2 = 3{,}5$ мкм, $\Delta d = 5$ мкм.

Погрешность измерения эффективного диаметра D в заданном сечении рассчитывают по формуле:

$$\Delta D = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (\Delta d_i)^2} , \qquad (3.6)$$

где Δd_i – погрешность измерения диаметра твэла в i-ой ориентации, мкм; n – число ориентаций твэла в заданном сечении. При измерении диаметра в двух ориентациях (n = 2) ΔD = 7 мкм.

Погрешность измерения овальности твэла рассчитывают по формуле:

$$\Delta_{ов} = \sqrt{(\Delta D_{\max})^2 + (\Delta D_{\min})^2}\ , \qquad (3.7)$$

где $\Delta D_{\max}$ – погрешность измерения максимального диаметра, мкм; $\Delta D_{\min}$ – погрешность измерения минимального диаметра, мкм. При условии, что $\Delta D_{\max} = \Delta D_{\min} = \Delta d$=5 мкм, $\Delta_{ов}$ = 7 мкм.

3.2.2 Оценка величины зазора между топливным сердечником и оболочкой

Для определения зазора осуществляется контролируемое радиальное нагружение твэла с одновременным измерением усилия F и деформации оболочки ΔX (рис. 3.25, а). Нагружение производится в области упругих деформаций оболочки. Касание топлива с оболочкой определяется по скачку производной dF/dX в точке А (рис. 3.25, б).

На рис. 3.25, б представлена диаграмма нагружения – деформации оболочки твэла в случае жёсткого топливного сердечника. В реальных твэлах реакторов на тепловых и быстрых нейтронах керамический топливный сердечник, как правило, фрагментирован. Нарушение целостности сердечника обусловлено растрескиванием таблеток из оксида урана в условиях теплосмен.

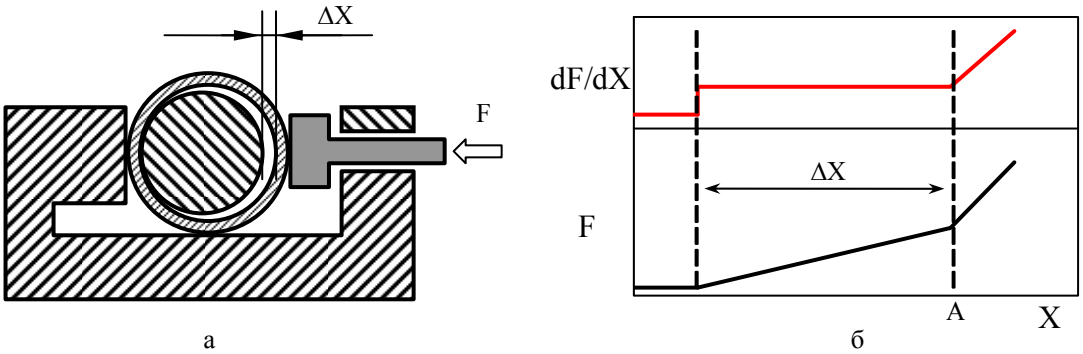


Рис. 3.25 – Способ определения зазора между топливом и оболочкой: а – устройство нагружения оболочки; б – диаграмма измерения диаметрального зазора «топливо – оболочка»

Схема установки для реализации метода представлена на рис. 3.26. Исследуемый твэл устанавливается между штоком нагружения и пьезоэлектрическим датчиком силы. Усилие на оболочку твэла передаётся через шток с помощью пневматической системы. Перемещение штока измеряется электромагнитным датчиком. Максимальное усилие, прикладываемое к оболочке, не превышает 1200 Н.

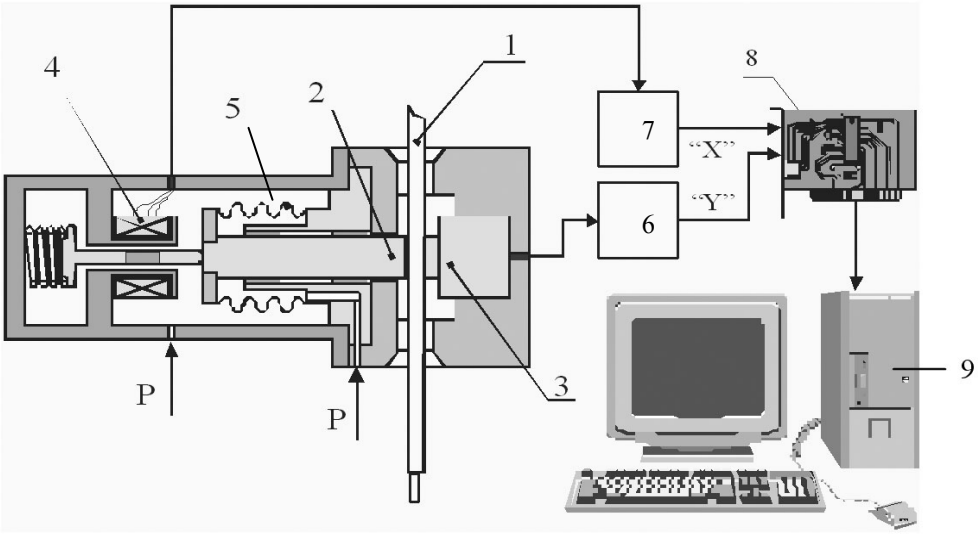


Рис. 3.26 – Схема установки определения величины зазора «топливо – оболочка»: 1 – твэл; 2 – шток нагружения; 3 – датчик силы; 4 – датчик перемещения; 5 – сильфон; 6 – усилитель заряда; 7 – усилитель; 8 – аналого-цифровой преобразователь; 9 – ПК; P – давление воздуха в пневматической системе

На рис. 3.27 приведена типичная диаграмма «усилие – деформация» при нагружении (прямой ход – стрелки вверх) и разгружении (обратный ход – стрелки вниз) твэла, облучённого в водо-водяном реакторе [18]. При прямом ходе кривой нагружения (в случае ненулевого значения диаметрального зазора) наблюдается линейный участок 0-1, соответствующий упругой деформации оболочки до касания одной из её сторон с топливом. Протяжённость этого участка зависит от положения топливного сердечника относительно оболочки и может значительно изменяться при одном и том же значении диаметрального зазора.

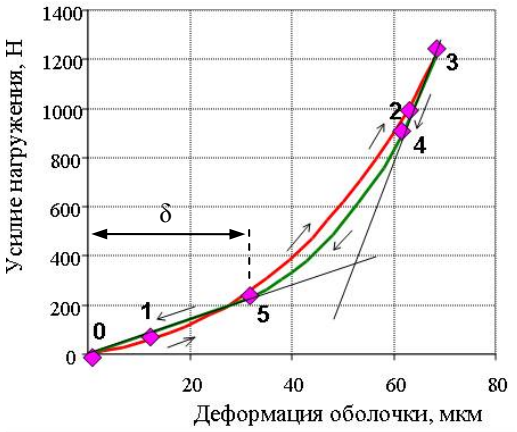


Рис. 3.27 – Типичная диаграмма «усилие-деформация»: δ – величина зазора

Нелинейная зависимость деформации оболочки от усилия нагружения на участке 1-2 объясняется началом деформации стенки оболочки в месте её контакта с топливом, центрированием топливных таблеток и сдвигом их фрагментов. Выше этой переходной зоны на участке 2-3 зависимость деформации от усилия нагружения вновь приближается к линейной и соответствует совместной деформации стенок оболочки, а также находящимися в «плотном» контакте с ними топливными таблетками.

Так как при нагружении смещение таблеток и их фрагментов является неупругим, то

на обратном ходе кривой нагружения описанные выше линейные участки носят, как правило, более выраженный характер (участки 3-4 и 5-0), а протяженность переходной зоны между ними (участок 4-5), по сравнению с прямым ходом, уменьшается. Поэтому оценка величины диаметрального зазора производится по проекции линейного участка 5-0 кривой нагружения на горизонтальную ось.

Адекватность оценки зазора компрессионным методом подтверждена на большом массиве исследованных твэлов. Рис. 3.28 иллюстрирует хорошее совпадение результатов определения зазора методами нагружения оболочки и оптической металлографии поперечных шлифов твэлов, отработавших в энергетических реакторах на тепловых нейтронах до различного выгорания.

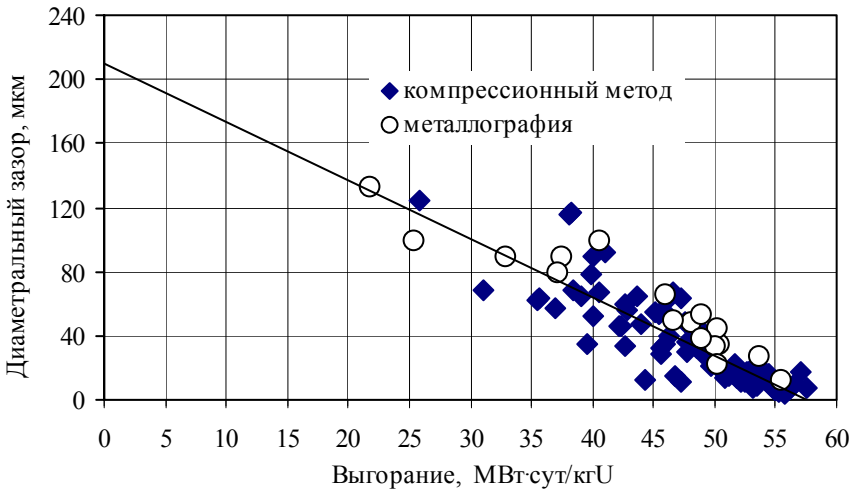


Рис. 3.28 – Зависимость диаметрального зазора между топливом и оболочкой от выгорания

3.2.3 Рентгеновская радиография топливного сердечника

Рентгеновское просвечивание используется для определения длины топливного сердечника, зазоров между таблетками, местоположения и целостности его фиксатора. На рис. 3.29 представлена схема установки для реализации метода.

При контроле состояния необлучённых твэлов хорошо зарекомендовали себя отечественные рентгеновские аппараты РУП-120, РУП-200 и РУП-150/300. Применение этих аппаратов для сканирования отработавших твэлов оказалось не эффективным из-за высокой степени облучения фотопластинки радиоактивными продуктами деления, накопившимися в топливе, по сравнению с дозой, создаваемой собственно рентгеновской трубкой.

Использование в составе рентгеновской установки высоковольтного генератора EPSILON EPS 45-80 (выходная мощность до 80 кВт), имеющего при напряжении 100 кВ силу тока до 0,8 А (на два порядка больше, чем в аппаратах РУП), позволило снизить экспозицию с 5 минут до 2 секунд без ухудшения качества радиографического изображения

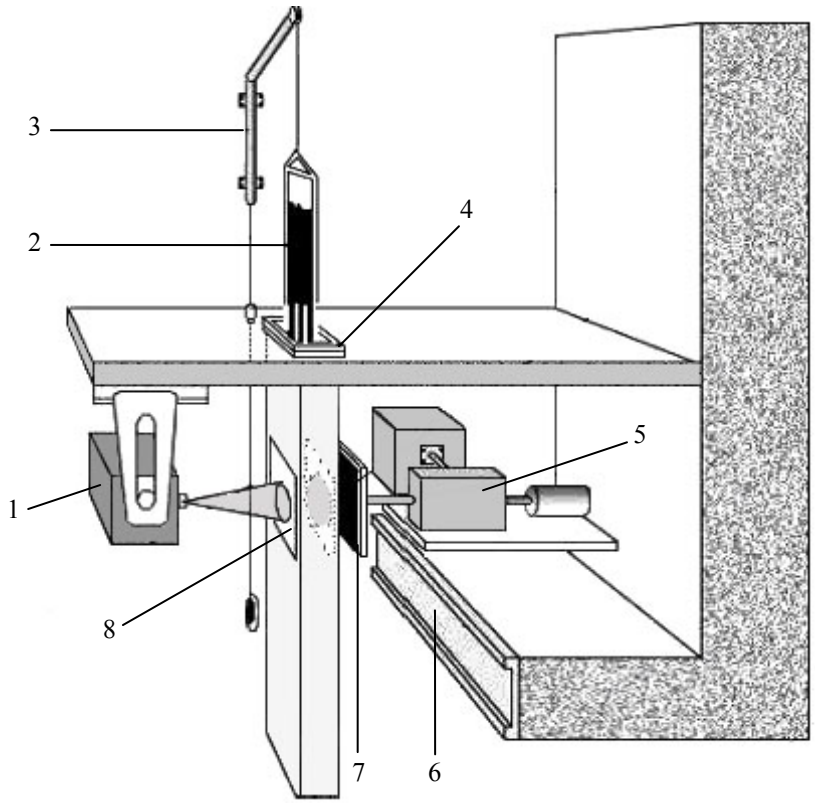


Рис. 3.29 – Схема установки рентгеновского просвечивания твэлов: 1 – источник излучения; 2 – подвеска с твэлами; 3 – трос лебёдки для перемещения подвески с твэлами; 4 – шахта в подкамерное помещение; 5 – устройство для установки кассеты с фотоплёнкой на место экспозиции; 6 – направляющий канал для транспортировки кассеты с фотоплёнкой из операторского в подкамерное помещение и обратно; 7 – кассета с фотоплёнкой; 8 – окна в стенах шахты для прохождения рентгеновского излучения

облучённого твэла. Для реализации такой экспозиции подвеска с твэлами размещается в шахте подкамерного помещения стационарно, а кассета с фотопластиной подаётся из операторского в подкамерное помещение и извлекается обратно. Синхронизация импульсного включения рентгеновского аппарата после доставки фотопластины к месту экспозиции и возвращения её в «чистую» зону осуществляется в автоматическом режиме [19].

На рис. 3.30 представлены рентгеновские снимки фрагментов облучённых твэлов. Длина топливного сердечника определяется по координате торца последней таблетки в газосборнике твэла. Для оценки расстояния между краем топливного сердечника и наконечником при просвечивании твэла рядом с ним размещают металлическую линейку с мерными насечками (на снимке не показана). Координата начала топливного сердечника может быть получена гамма-спектрометрическим методом по спаду скорости счёта гамма-излучения продуктов деления, например ^{137}Cs. Наиболее оперативно этот параметр определяют по результатам вихретокового сканирования твэлов.

а б

Рис. 3.30 – Рентгеновские снимки фрагментов твэлов: а – зазор между топливными таблетками; б – газосборник с фиксатором топливного сердечника твэла РБМК

3.3 Вихретоковое сканирование

3.3.1 Структурная схема комплекса установок вихретокового контроля

В состав автоматизированного комплекса, предназначенного для вихретоковой диагностики состояния облучённых твэлов, входят гармонический и импульсный дефектоскопы, а также прибор для измерения толщины оксидной плёнки (рис. 3.31). Механическая часть оборудования и объект контроля размещаются в защитных камерах, измерительная аппаратура – в операторском помещении материаловедческого комплекса [20].

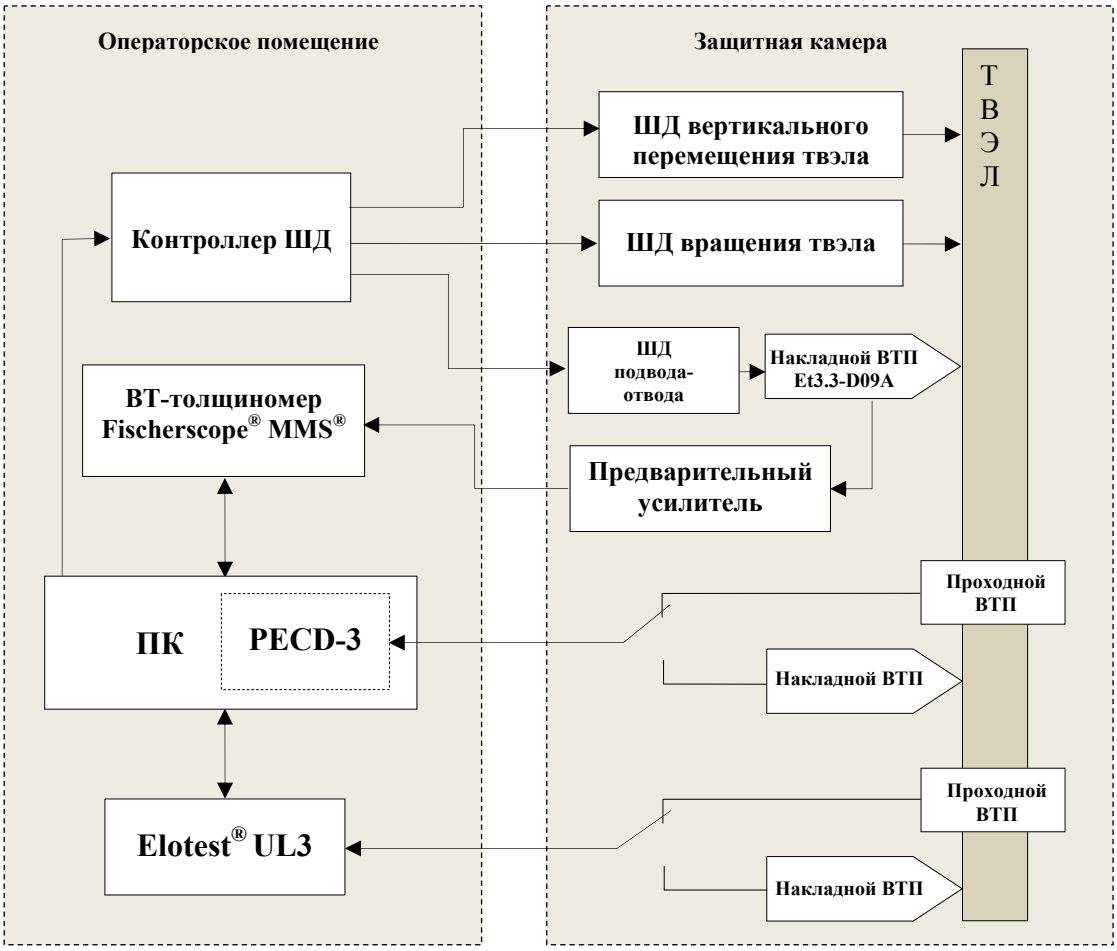
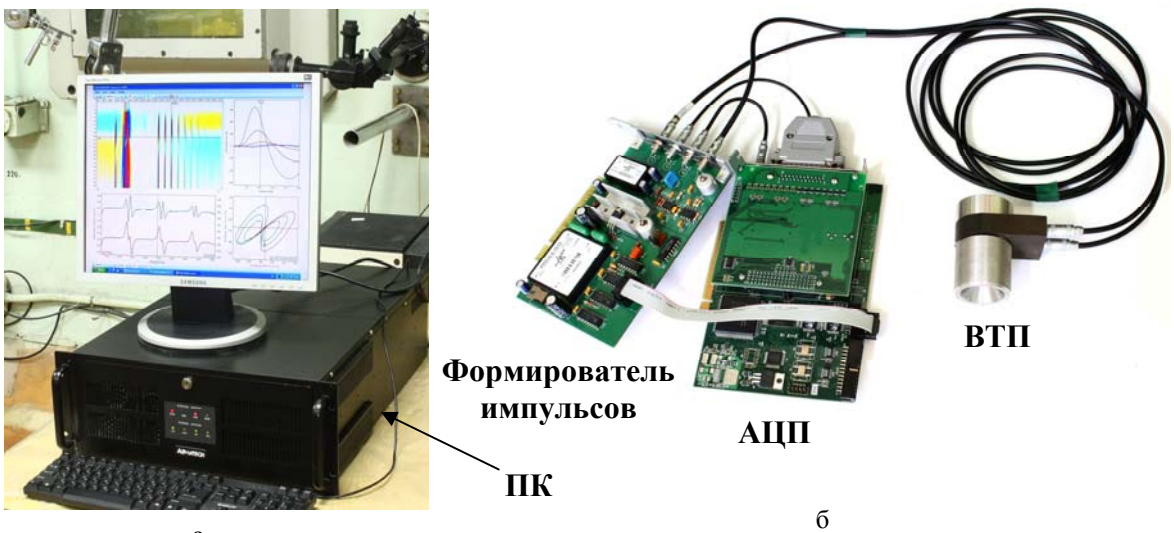


Рис. 3.31 – Структурная схема установки ВТ-контроля

В канале гармонического ВТ-контроля используется дефектоскоп «Elotest® UL3» фирмы Rohmann GmbH, позволяющий работать одновременно на двух частотах в диапазоне от 10 Гц до 2 МГц. Прибор оснащён проходным и накладным параметрическими вихретоковыми преобразователями (ВТП).

Импульсный дефектоскоп PECD-3 разработан в НИИАР и представляет собой комплект плат стандарта PCI, встраиваемых в промышленный компьютер (рис. 3.32) [21]. В канале импульсной дефектоскопии применяются накладные и проходные преобразователи трансформаторного типа. Основные параметры дефектоскопа: длительность возбуждающих импульсов – от 1 до 10 мкс, частота следования импульсов – от 1 до 50 кГц, разрядность АЦП – 16 бит, частота дискретизации (стробирования) импульсов – от 30 до 50 МГц.



а б

Рис. 3.32 – Импульсный вихретоковый дефектоскоп: а – общий вид, б – составные части

С целью идентификации основных типов аномалий в оболочках отработавших твэлов РБМК используются контрольные образцы с наружными, сквозными и внутренними дефектами. По результатам сканирования контрольных образцов определяются параметры откликов ВТП для указанных дефектов: положение узловой точки (t_0), полярность и амплитуда сигналов.

Перечисленные параметры отражены на амплитудно-временной плоскости (рис. 3.33), с помощью которой определяется тип выявленной аномалии оболочки твэла [21]. По оси абсцисс откладывается значение t_0, по оси ординат – величина A_m амплитуды отклика от дефекта. Знак полуплоскости соответствует полярности первой полуволны сигнала от аномалии. Например, точки 1–3 соответствуют внутренним дефектам глубиной 10, 15 и 30 % от толщины оболочки соответственно.

Наряду с проведением дефектоскопии вихретоковым методом измеряют толщину оксидного слоя на поверхности твэлов. В качестве первичного преобразователя используют накладной датчик, позволяющий локализовать зону контроля по длине и окружности твэла. Измерение толщины оксидов сводится, по сути, к измерению зазора между наконечником преобразователя и металлической (неокисленной) частью оболочки.

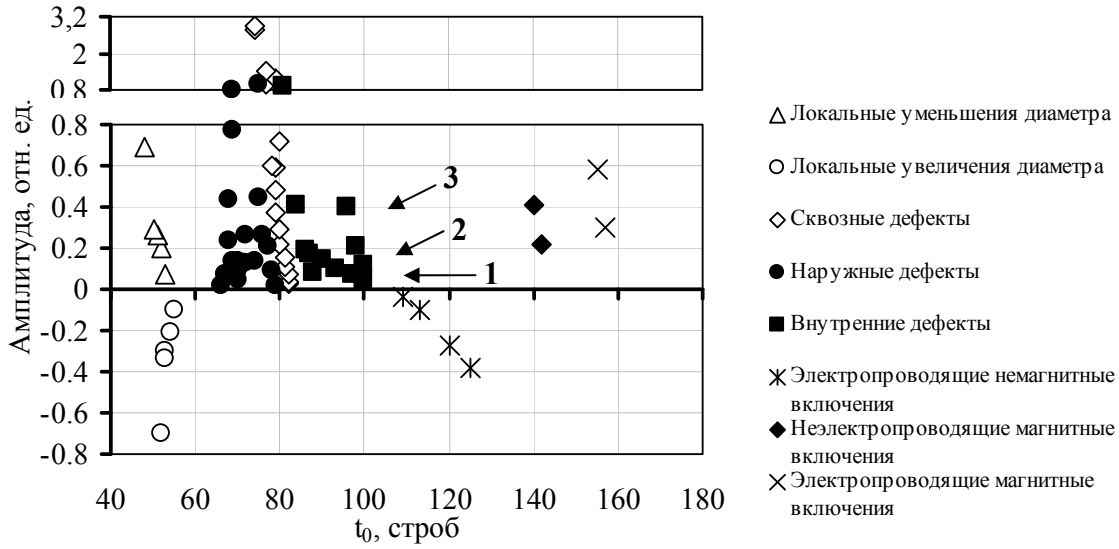


Рис. 3.33 – Диаграмма идентификации одиночных дефектов твэлов

Настройка толщиномера осуществляется с помощью калибровочных полимерных плёнок известной толщины, которые крепят на поверхность имитатора твэла РБМК с оболочкой из сплава Zr-1%Nb. Для оценки достоверности результатов ВТ-контроля проводится их сравнение с данными металлографического анализа поперечных шлифов образцов, полученных на характерных участках твэлов.

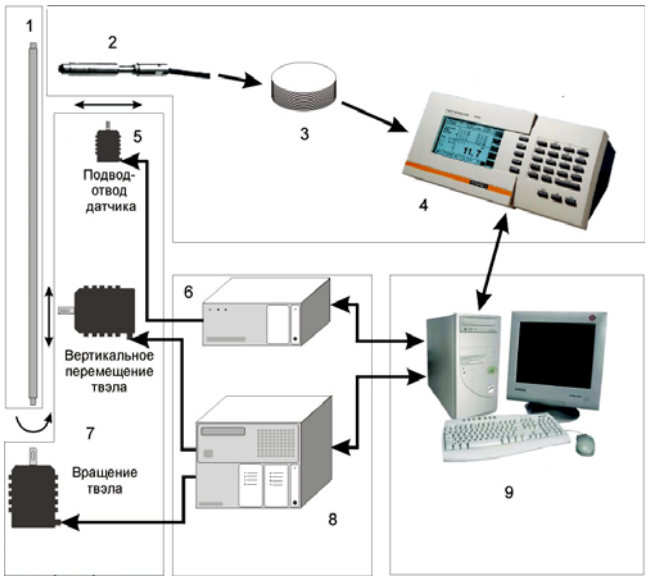


Рис. 3.34 – Схема установки измерения толщины окисной пленки: 1 – твэл; 2 – вихретоковый датчик; 3 – усилитель сигнала; 4 – толщиномер; 5, 7 – шаговые двигатели; 6, 8 – контроллеры шаговых двигателей; 9 – персональный компьютер

Структурная схема установки толщинометрии, предназначенной для измерения толщины отложений и оксидных плёнок на облучённых твэлах, представлена на рис. 3.34 [22]. В качестве толщиномера используется многофункциональная измерительная система «Fischerscope® MMS®» фирмы Helmut Fischer GmbH, оснащённая накладным вихретоковым преобразователем Et3.3-D09A. В защитной камере расположен согласующий предвари-

тельный усилитель, позволяющий улучшить соотношение сигнал/шум измерительного тракта. Вихретоковый датчик специальным устройством прижимается к оболочке твэла и ориентируется перпендикулярно её поверхности. Сканирующая система обеспечивает аксиальное перемещение твэла и его вращение вокруг своей оси, что позволяет получать распределение толщины оксидной плёнки (ТОП) по длине и азимуту оболочки.

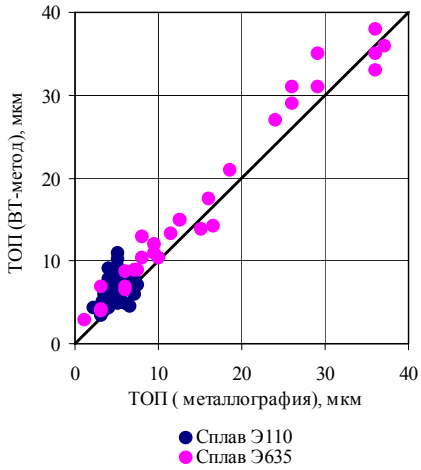


Рис. 3.35 – Сравнение результатов измерения ТОП вихретоковым и разрушающим методами на равномерно окисленной поверхности оболочек твэлов из циркониевых сплавов

На равномерно окисленных участках оболочки погрешность результата измерения толщины оксидной плёнки с доверительной вероятностью 95% для диапазона измерений 0÷40 мкм не превышает ±4 мкм. При исследовании неравномерно окисленных участков погрешность составляет не более ±17 мкм в диапазоне 0÷400 мкм [23]. Рис. 3.35 иллюстрирует хорошее совпадение результатов измерений толщины плёнок методами вихревых токов и оптической металлографии поперечных шлифов твэлов.

3.3.2 Сканирование проходным датчиком

Оценка линейных размеров твэлов

Вихретоковый способ оценки линейных размеров является самым экспрессным и наименее трудоёмким из числа тех, что используются в процессе послереакторных исследований твэлов. Принцип, заложенный в основу измерений, заключается в определении координат границ (торцов) наконечников, заглушек и пружинного фиксатора, по относительному положению которых вычисляют длину оболочечной трубы и топливного сердечника твэла.

Возможность измерения координаты основана на высокой чувствительности ВТП к краям металлических деталей. По экстремумам модулированного сигнала вычисляют координаты начала и конца этих деталей. Так, например, для расчёта высоты топливного сердечника определяются координаты расположения торца наконечника и края компенсирующей части пружинного фиксатора (рис. 3.36).

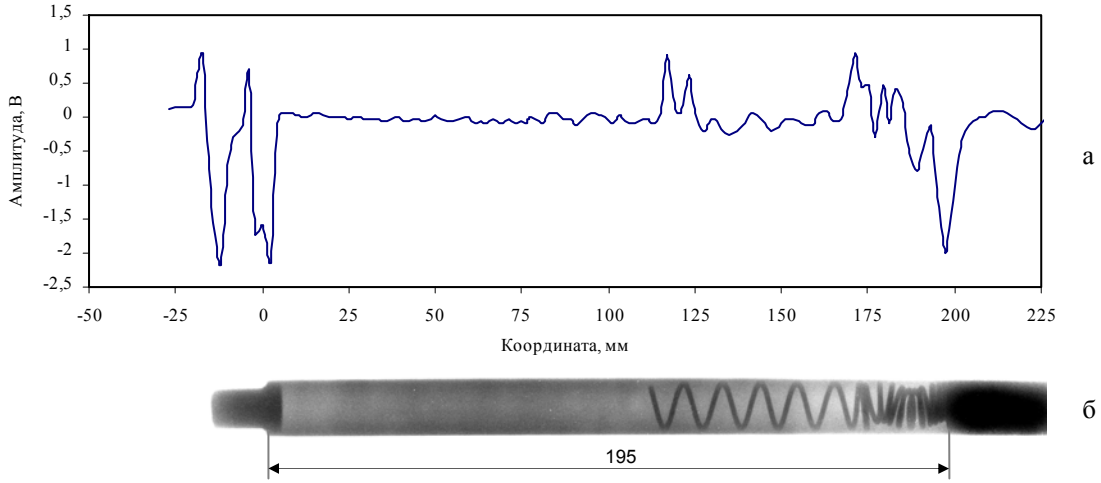


Рис. 3.36 – ВТ-диаграмма (а) и рентгеновский снимок (б) газосборника твэла ПТН ТВС 587

Наряду с экспрессной оценкой размерных изменений метод вихревых токов с использованием проходного датчика обеспечивает достаточно высокую чувствительность к дефектам сплошности оболочек твэлов РБМК.

Дефектоскопия оболочек твэлов

Электрофизические параметры оболочечных труб из циркониевого сплава толщиной 0,9 мм позволяют не только обнаруживать, но и классифицировать дефекты по типу: внутренний, наружный, сквозной. Согласно данным вихретоковой диагностики герметичных твэлов РБМК практически все аномальные отклики на ВТ-диаграммах обусловлены наружными дефектами оболочек. Максимальная амплитуда ВТ-сигналов из-за локального утонения стенки оболочки наблюдалась в районе её взаимодействия с ДР (рис. 3.37, а) и коррелировала с увеличениями диаметра твэлов, обнаруженными методом профилометрии (рис. 3.37, б). Увеличение диаметра было вызвано повышенной коррозией оболочки под дистанционирующими решётками. Образовавшиеся «нодули» из-за разности молярных объёмов Zr-1%Nb и ZrO_2 выступали над поверхностью твэлов.

На рис. 3.38 представлена ВТ-диаграмма одного из твэлов ТВС 038, указывающая на не типичное высотное расположение дефекта оболочки под СДР5. При первичных исследованиях нижнего пучка было обнаружено смещение этой решётки относительно проектной координаты (см. табл. 2.2). Каких-либо аномальных ВТ-сигналов в районе штатного положения СДР5 не было выявлено, поэтому был сделан вывод, что её сдвиг на ~50 мм произошёл в начальный период эксплуатации ТВС. Аномальное смещение решётки привело к наибольшему уменьшению толщины оболочек твэлов ПТН под СДР5.

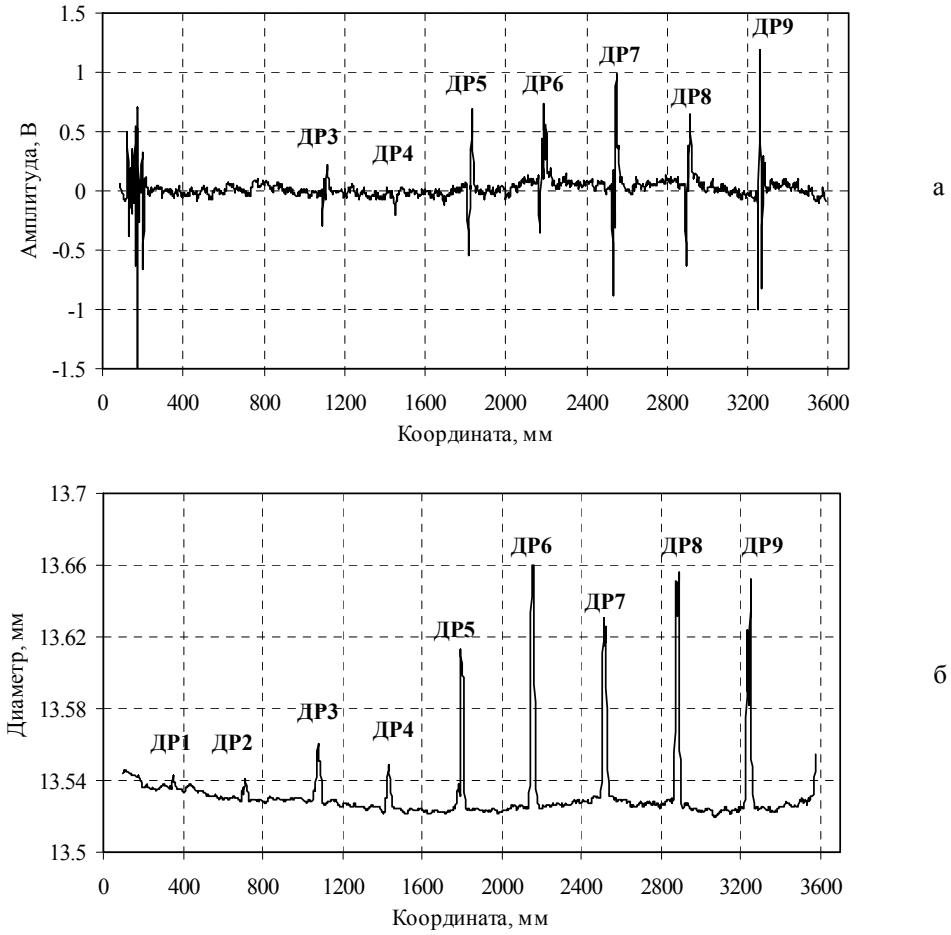


Рис. 3.37 – Корреляция ВТ-диаграммы (а) и распределения среднего диаметра (б) твэла ПТН ТВС 587

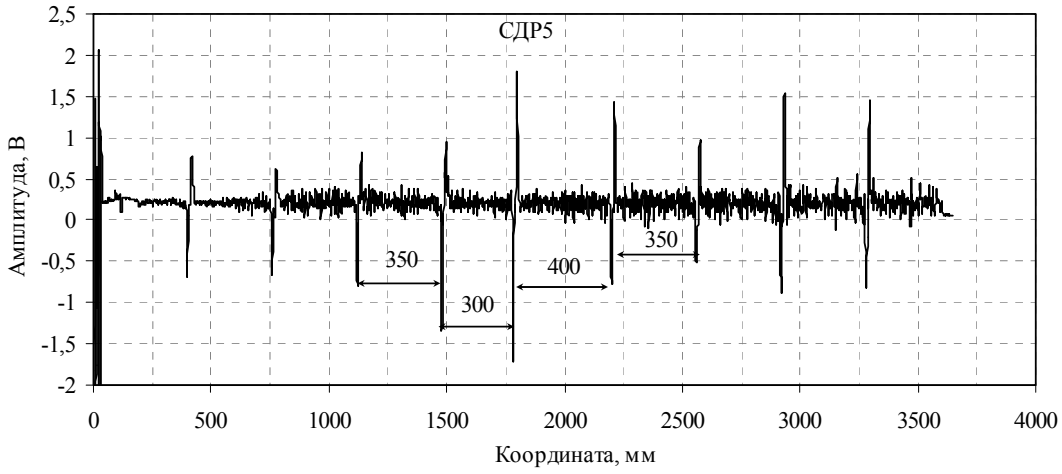


Рис. 3.38 – ВТ-диаграмма твэла 1н ТВС 038

Наряду с дефектами коррозионного происхождения в некоторых твэлах наблюдался фреттинг-износ оболочек под дистанционирующими решётками. Этот вид дефектов был обнаружен по отсутствию корреляции между профилограммами и ВТ-диаграммами твэлов (рис. 3.39). В твлах верхнего пучка ТВС 917, отработавшей на 2-ом блоке ЛАЭС до

выгорания 19,5 МВт·сут/кгU, значительные по амплитуде ВТ-сигналы от поверхностных дефектов не сопровождались локальными увеличениями диаметра оболочек. В процессе визуального осмотра и последующих металлографических исследований этих твэлов был выявлен фреттинг-износ циркониевых оболочек под стальными ДР (см. рис. разд. 4.6).

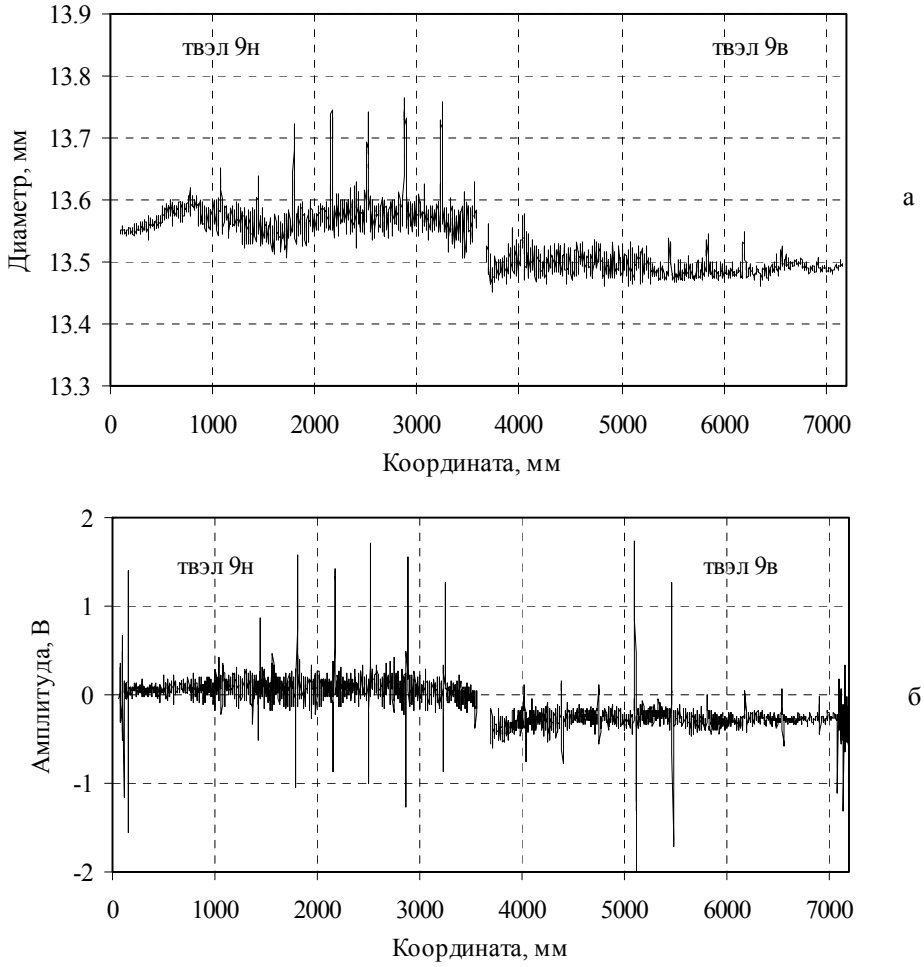


Рис. 3.39 – Профилограмма (а) и ВТ-диаграмма (б) твэлов ПТН и ПТВ ТВС 917

Вихретоковый метод широко использовался как для обнаружения первичных debris-дефектов, так и при изучении последствий попадания водного теплоносителя внутрь негерметичных твэлов – вторичных разрушений защитной оболочки. Чаще всего debris-взаимодействие наблюдалось в твэлах верхнего пучка ТВС РБМК-1000.

При анализе ВТ-диаграмм твэла 2в из ПТВ ТВС 676, отработавшей на 2-ом блоке ЛАЭС до выгорания 10,5 МВт·сут/кгU в районе ДР20 был зарегистрирован сигнал с характеристиками, соответствующими сквозному повреждению оболочки, а на координатах 2400–2500 мм (между ДР17 и ДР18) ряд сигналов от локальных увеличений диаметра (ЛУД) и дефектов на внутренней стороне оболочки. В интервале координат 480–1000 мм наблюдались сигналы ВТП от сквозных дефектов и увеличения диаметра оболочки (рис. 3.40).

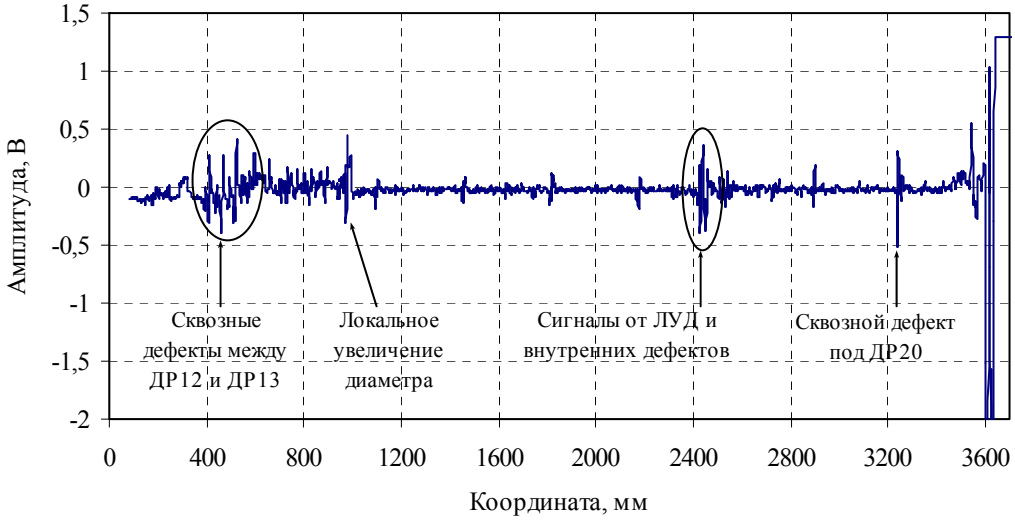


Рис. 3.40 – ВТ-диаграмма твэла 2в ТВС 676

Результаты визуального осмотра этого твэла выявили наличие первичного debris-дефекта в районе ДР20 (см. рис. 3.21) и вспучивания оболочки на участке между ДР13 и ДР14 (см. рис. 3.22). Последующие разрушающие материаловедческие исследования подтвердили негерметичность этого твэла.

3.3.3 Определение толщины оксидных плёнок на поверхности твэлов

Толщина оксидных плёнок (ТОП) определялась с помощью прибора «Fischerscope MMS» и накладного вихретокового преобразователя. Измерение ТОП проводилось как в аксиальном (по длине), так и азимутальном (по периметру) направлениях твэлов. На рис. 3.41 приведены ВТ-сканограммы и ТОП-диаграммы твэлов ПТН и ПТВ ТВС 587, полученные с использованием проходного и накладного ВТП соответственно. Представленные экспериментальные результаты указывают на уменьшение «живого» сечения (рис. 3.41, а) и увеличение окисления оболочек твэлов под стальными ДР (рис. 3.41, б).

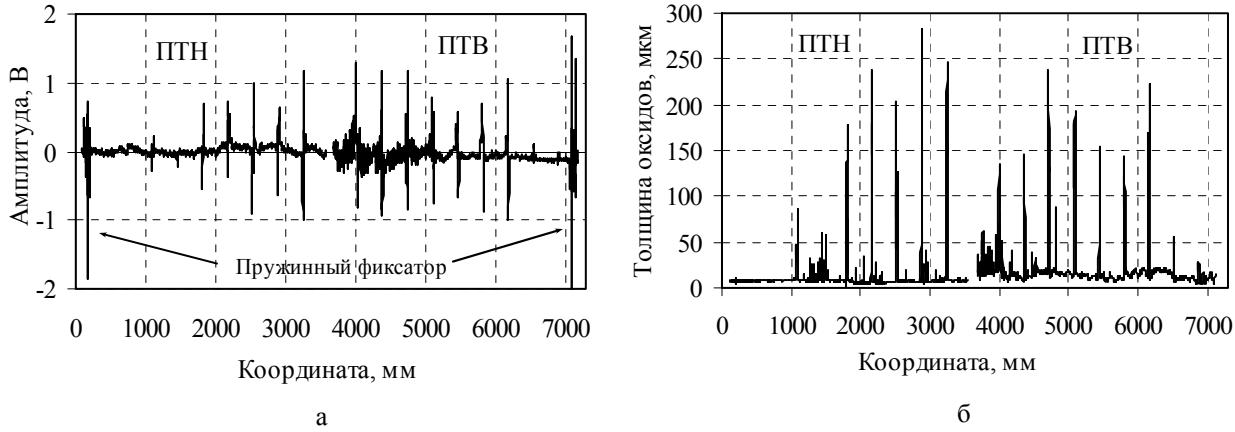
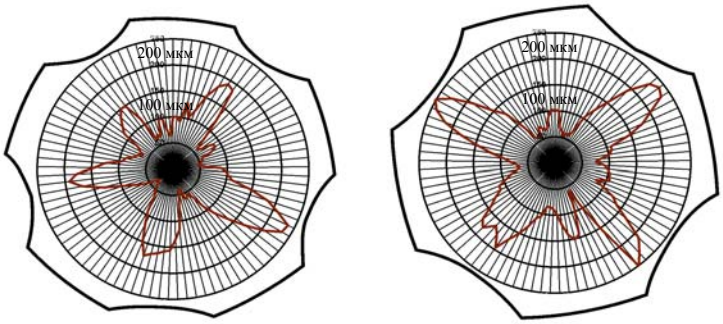


Рис. 3.41 – ВТ-сканограммы (а) и ТОП-диаграммы (б) твэлов ПТН и ПТВ ТВС 587

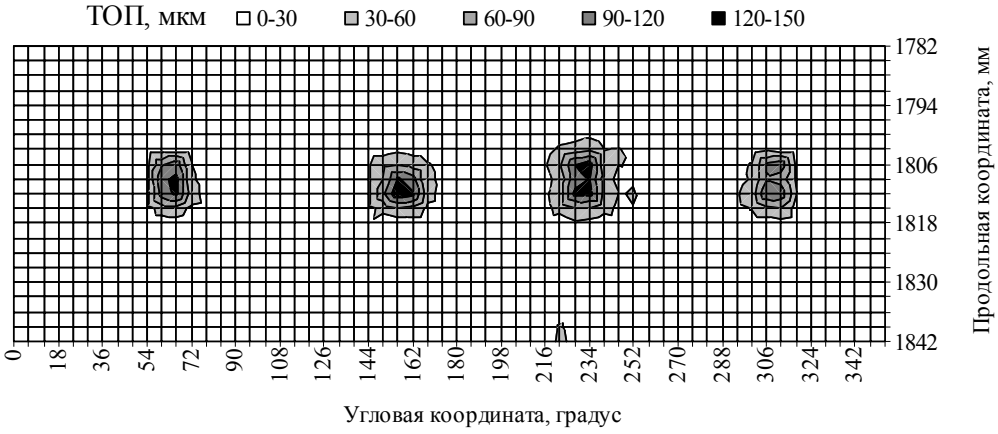
В результате измерения ТОП под ДР по окружности оболочек выявлены симметрично расположенные максимумы локального окисления поверхности твэлов. На твэлах внутреннего и внешнего рядов ТВС наблюдаются соответственно пять и четыре участка повышенного окисления оболочек под пуклёвками ДР (рис. 3.42).



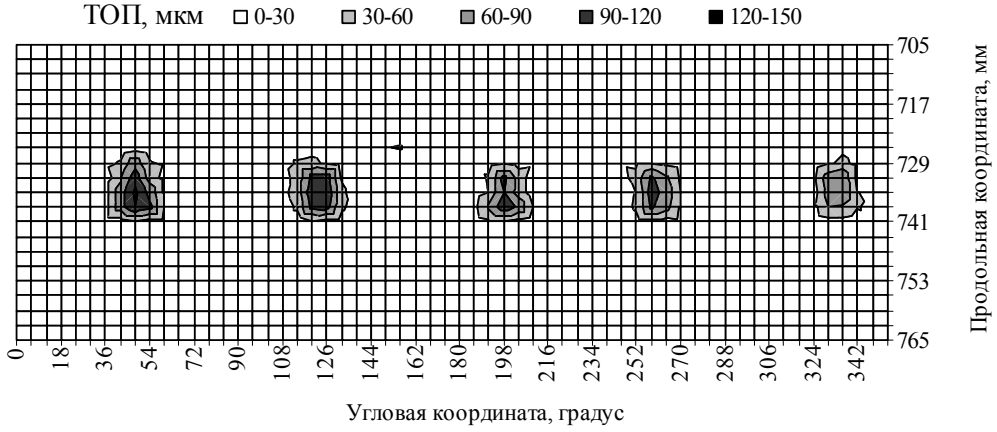
а б

Рис. 3.42 – Азимутальное распределение толщины оксидной плёнки на поверхности твэлов внутреннего (а) и наружного (б) рядов ТВС 587 (выгорание 26,16 МВт·сут/кгU)

На рис. 3.43 представлены С-сканы результатов измерения ТОП под ДР в ТВС 342, отработавшей на 1-ом блоке ЛАЭС до выгорания 14,3 МВт·сут/кгU.



а



б

Рис. 3.43 – Распределение ТОП на наружной поверхности оболочек под ДР в твэлах ПТВ наружного (а) и внутреннего (б) рядов ТВС 342

Типичный вид «нодуля», возникшего под одной из пуклёвок ДР в твэле ТВС 587, показан на рис. 3.44.

Рис. 3.44 – Типичный вид поверхности твэлов ТВС 587 под пуклёвкой ДР

3.4 Гамма-сканирование

Установка, предназначенная для гамма-спектрометрических исследований твэлов РБМК (рис. 3.45), размещена в защитной камере, длина, ширина и высота которой составляют 7,5; 4,0 и 7,2 м соответственно. Камера оснащена вертикальным колодцем глубиной 4 м. Транспортировки твэлов из маркированных пеналов, расположенных в приёмных колодцах защитной камеры, к месту измерения осуществляется с помощью мостового крана.

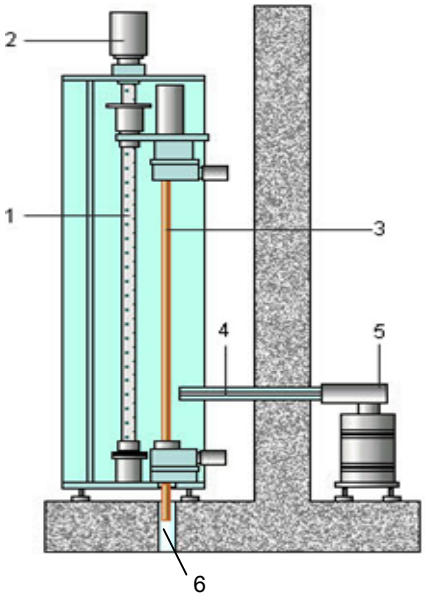


Рис. 3.45 – Установка гамма-сканирования твэлов длиной до 4000 мм: 1 – ведущий винт с магнитной линейкой; 2 – двигатель перемещения твэлов; 3 – твэл; 4 – коллимационная система; 5 – детектор; 6 – вертикальный колодец

Установка включает в себя механическое и электронное оборудование. Механическая часть установок размещается в защитной камере и предназначена для юстировки и перемещения твэлов относительно коллиматора, выводящего пучок гамма-квантов с заданными геометрическими параметрами к детектору спектрометра. Электронная аппаратура (детектор, усилитель, анализатор, ЭВМ и вспомогательные приборы) находится в чистой зоне – операторском помещении. Использование средств вычислительной техники позволяет обрабатывать гамма-спектры, накапливать массивы данных и выдавать результаты сканирования в автоматическом режиме [24].

На рис. 3.46 представлена блок-схема полупроводникового гамма-спектрометра, предназначенного для исследований отработавших твэлов. В таких спектрометрах ис-

пользуются два типа полупроводниковых детекторов: планарные и коаксиальные, отличающиеся высоким энергетическим разрешением и большой эффективностью регистрации гамма-излучения. Энергетическое разрешение – полная ширина фотопика (пика полного поглощения) на половине его высоты – является мерой способности детектора различать два пика, близкие по энергии. Чем сложнее спектр гамма-излучения, тем желательней иметь детектор с наилучшим разрешением. Вторым учитываемым параметром является эффективность детектора, определяющая скорость счёта и время экспозиции, необходимые для достижения заданной чувствительности и точности.

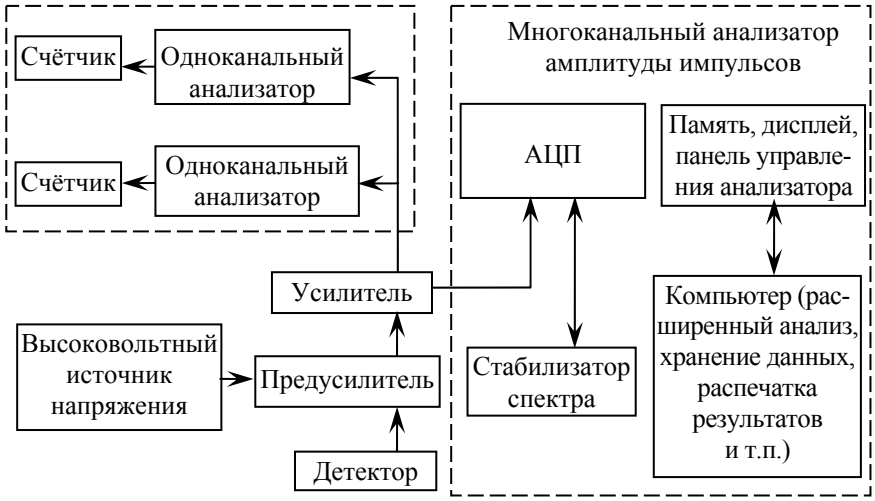


Рис. 3.46 – Блок-схема гамма-спектрометра на базе одноканальных и многоканального амплитудных анализаторов [25]

В зависимости от задач гамма-спектрометрических исследований выбирается вид сканирования (по длине или диаметру твэла), геометрические размеры коллиматора, шаг сканирования, время экспозиции и т.п. Сканирование по длине твэлов осуществляется с шагом и шириной щелевого коллиматора, равными 1−5 мм. При диаметральном сканировании шаг и размеры коллимационной щели варьируются в пределах 0,5−1 мм. В процессе спектрометрических исследований измеряется, как правило, скорость счёта гамма-излучения радиоактивных нуклидов: осколков деления топлива ^{134}Cs, ^{137}Cs ^{106}Ru, ^{95}Zr, ^{95}Nb, ^{144}Ce, ^{154}Eu, ^{85}Kr, а также продуктов активации компонентов сплава Zr-1% Nb (^{94}Nb, ^{60}Co).

Полученная информация после обработки на ЭВМ используется для определения: выгорания топлива, его радиального и аксиального распределения по ТВС; геометрических параметров топливного сердечника (длина, зазоры между таблетками); наличия миграции продуктов деления, выхода ГПД из топлива, концентрации легирующих и примесных элементов в оболочке из циркониевого сплава.

Глава 4. Результаты послереакторных исследований твэлов

4.1 Выгорание и его распределение по длине топливного сердечника

Выгорание топлива определялось методом сравнения интенсивностей гамма-линий ^{137}Cs исследуемых твэлов и эталона. В качестве эталона использовался фрагмент твэла ТВС РБМК-1000, отработавшей на 2-ом блоке Ленинградской АЭС до выгорания 27,5 МВт·сут/кгU. Выгорание топлива в эталоне было определено масс-спектрометрическим методом с погрешностью ± 4 %.

На рис. 4.1 представлены типичные распределения скоростей счёта гамма-излучения ^{137}Cs (относительное выгорание) по длине топливных сердечников твэлов ПТН и ПТВ, расположенных друг над другом, в трёх ТВС, отработавших на ЛАЭС до различного выгорания.

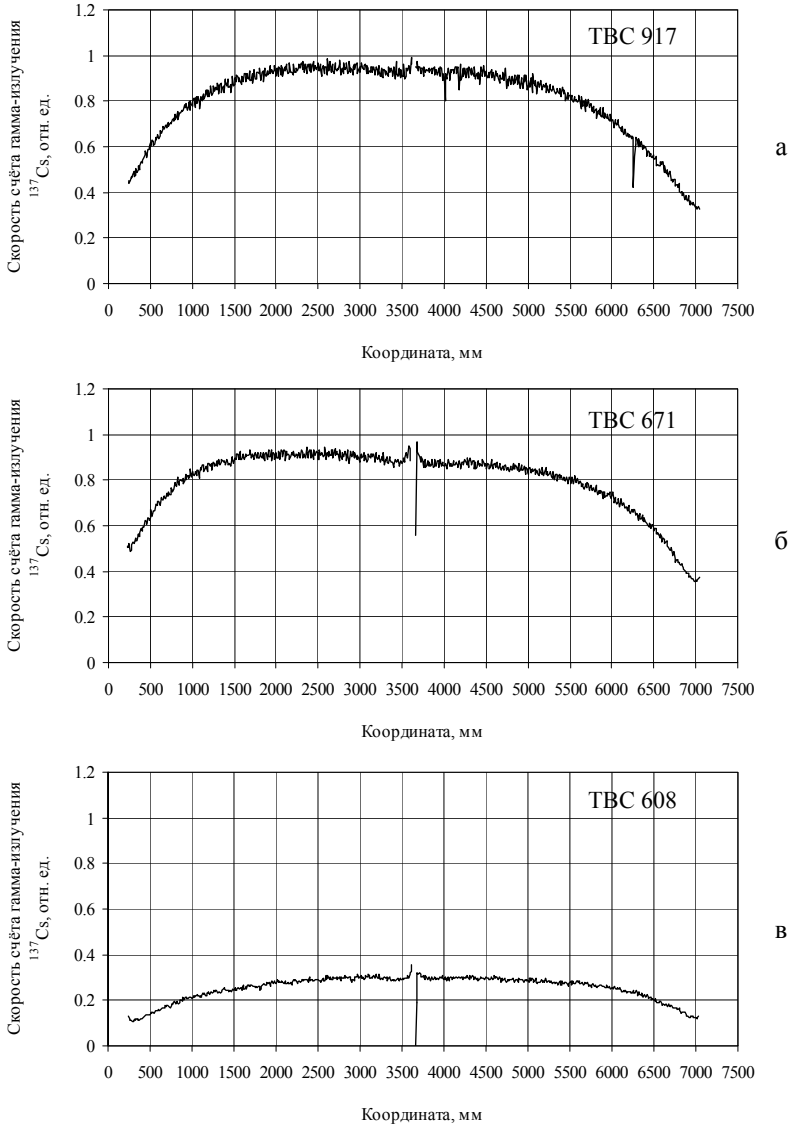


Рис. 4.1 – Гамма-сканограммы твэлов ПТН и ПТВ трёх штатных ТВС РБМК-1000, отработавших на 2-ом блоке ЛАЭС до среднего выгорания 19,5 (а), 18,9 (б) и 6,3 МВт·сут/кгU (в)

Всплески активности ^{137}Cs в центре ТВС обусловлены наличием зазора между ПТН и ПТВ, предназначенного для компенсации удлинения твэлов. Отсутствие этих всплесков на некоторых сканограммах связано с особенностями установки сканирования полнометражных твэлов РБМК, которая не позволяла проводить измерения на краю топливного сердечника из-за наличия «мёртвой зоны». Для выполнения измерений по всей длине твэл помещался в цилиндрический пенал и сканировался на специализированной установке с использованием щелевого коллиматора шириной 1 мм. Проведённые исследования показали, что наибольшее увеличение скорости счёта ^{137}Cs в крайних таблетках твэлов двух пучков достигала 35% (рис. 4.2).

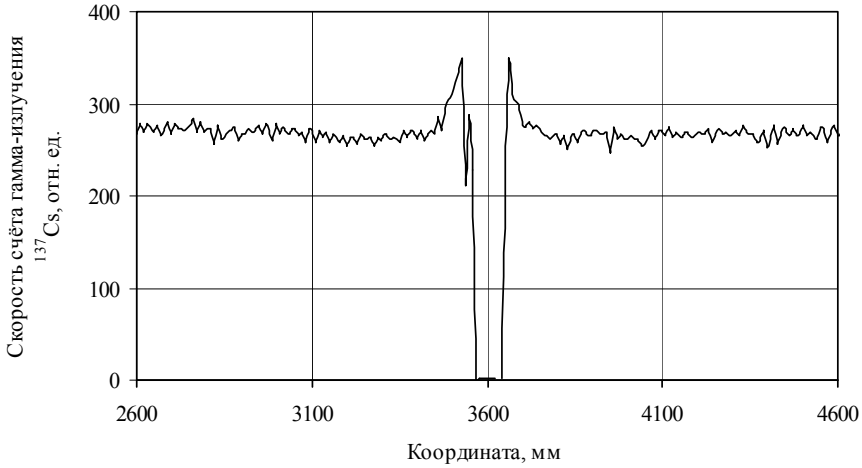


Рис. 4.2 – Всплески активности ^{137}Cs на краях топливных сердечников твэлов ПТН и ПТВ штатной ТВС РБМК-1000

Среднее выгорание топлива в трёх ТВС, определённое методом сравнения с эталоном, представлено в табл. 4.1. Твэлы верхних пучков ТВС 917 и 671, облучённые практически до планового выгорания, выгорели на 10–12 % меньше, чем твэлы нижнего пучка. В ТВС 608 наблюдается обратная картина: выгорание топлива в ПТВ на ~ 5% больше, чем в ПТН.

Выгорание рассчитывали по формуле:

$$B_{тв.}^{макс} = B_{обр.}\left(I_{тв.}C_1\right)/(I_{обр.}C_2), \qquad (4.1)$$

где $B_{обр.}$ – выгорание топлива в аттестованном образце, МВт·сут/кгU;

$I_{тв.}$ – скорость счёта гамма-излучения ^{137}Cs на участке максимального выгорания исследованного твэла, приведённая к дате выгрузке ТВС из реактора, $с^{-1}$;

$I_{обр.}$ – скорость счёта гамма-излучения у аттестованного образца ^{137}Cs на участке с выгоранием $B_{обр.}$;

C_1, C_2 – поправочные коэффициенты, учитывающие распад ^{137}Cs при облучении и выдержке после эксплуатации для исследованного твэла и аттестованного образца.

Таблица 4.1 – Среднее выгорание топлива в твэлах ТВС

Номер твэ-ла	Выгорание топлива, МВт·сут/кгU					
	ТВС 917		ТВС 671		ТВС 608	
	ПТН	ПТВ	ПТН	ПТВ	ПТН	ПТВ
1	21,8	19,7	21,4	19,6	6,4	6,9
2	21,5	18,6	21,6	19,6	6,4	6,9
3	21,5	19,2	22,0	19,4	6,2	6,8
4	21,5	19,6	21,7	19,0	6,58	6,8
5	21,8	19,2	22,0	18,9	6,4	6,6
6	20,8	18,9	21,4	19,3	6,1	6,3
7	21,1	19,2	21,4	18,8	6,5	6,7
8	21,8	18,6	21,0	19,2	6,8	7,0
9	20,8	18,6	21,0	19,1	6,6	6,7
10	21,1	18,6	21,0	19,2	6,6	6,7
11	21,1	18,6	20,8	19,3	6,4	6,9
12	22,1	18,9	21,3	19,6	6,4	6,4
Среднее	21,3	19,0	21,4	19,3	6,4	6,7
13	18,6	17,0	18,8	17,0	5,2	5,6
14	19,2	17,0	19,1	17,2	5,5	5,8
15	19,2	17,4	19,0	17,1	5,7	5,9
16	19,6	17,0	18,9	17,0	5,6	5,9
17	18,6	17,0	18,5	16,9	5,4	5,7
18	19,9	17,4	18,5	17,1	5,8	6,0
Среднее	19,2	17,0	18,8	17,1	5,5	5,8

В табл. 4.2 приведены величины выгорания топлива в наружном и внутреннем рядах пучков твэлов этих ТВС.

Таблица 4.2 – Соотношение между выгоранием топлива в твэлах, расположенных в наружном и внутреннем рядах ПТН и ПТВ

Параметр	ТВС 917		ТВС 671		ТВС 608	
	ПТН	ПТВ	ПТН	ПТВ	ПТН	ПТВ
Выгорание в наружном ряду, МВт·сут/кгU	21,3	19,0	21,4	19,3	6,4	6,7
Выгорание во внутреннем ряду, МВт·сут/кгU	19,2	17,0	18,8	17,1	5,5	5,8
Соотношение	1,11	1,12	1,14	1,13	1,16	1,16

Из анализа представленных данных следует, что выгорание топлива на периферии и в центре сборок отличается на 10−16 %. Уменьшение выгорания во внутреннем ряду объясняется экранировкой потока нейтронов твэлами наружного ряда. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что плановое выгорание в ТВС РБМК может быть повышено путём использования в твэлах внутреннего ряда топлива повышенного обогащения по ^{235}U [26].

Всплески активности ^{137}Cs на краях топливных сердечников нижнего и верхнего твэлов (см. рис. 4.2) обусловлены образованием «ловушки нейтронов» в зазоре, заполнен-

ном водным теплоносителем. Повышение энерговыделения на стыке ПТН и ПТВ снижает надёжность ТВС РБМК-1000, особенно в нерегламентных ситуациях, связанных со случайными набросами мощности.

Для устранения обнаруженных недостатков спроектирована ТВС нового поколения с центральным закреплением твэлов (ЦЗТ), в которую включили антидебризный фильтр в районе нижнего хвостовика, циркониевые ДР, фиксатор топливного столба из сплава ЭК-173ИД (вместо Ц2М), топливо повышенного обогащения по ^{235}U с добавками выгорающего поглотителя на основе эрбия Er_2O_3 [27].

Первая экспериментальная ТВС (ЭТВС) с ЦЗТ после облучения на ЛАЭС была доставлена в материаловедческий центр НИИАР для проведения послереакторных исследований. Параметры её эксплуатации представлены в табл. 1.7. В ЭТВС использовалось топливо в виде таблеток с центральным отверстием, фасками и лунками на торцах. Таблетки были изготовлены из спечённого диоксида урана с обогащением 2,6% по ^{235}U и добавкой 0,41% Er_2O_3. Фиксатором топливного сердечника служила спиральная пружина из сплава ЭК-173ИД. В пучках твэлов использовались две стальные ДР (06Х18Н10Т) и двадцать ДР из сплава Э110.

Послереакторные исследования ЭТВС проводились с использованием комплекса неразрушающих и разрушающих методов реакторного материаловедения. На рис. 4.3 и 4.4 приведены некоторые результаты, полученные гамма-спектрометрическим методом. Типичное распределение скоростей счёта гамма-излучения нуклидов ^{137}Cs, ^{134}Cs и ^{106}Ru по длине твэлов ПТН и ПТВ представлено на рис. 4.3. Сканирование твэлов осуществлялось с шагом и шириной щелевого коллиматора 2 мм.

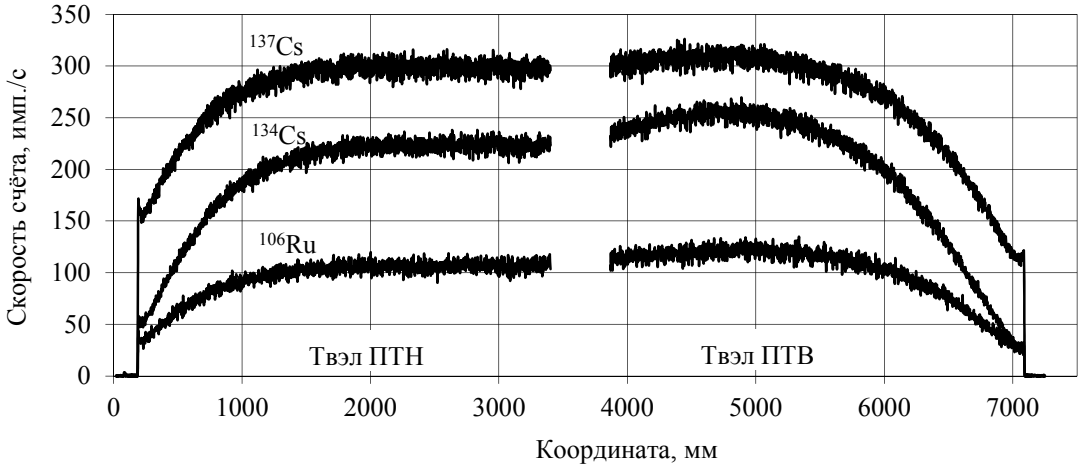


Рис. 4.3 – Гамма-сканограммы твэлов нижнего и верхнего пучков ЭТВС с ЦЗТ

Распределения скоростей счёта гамма-излучения ^{137}Cs, ^{134}Cs и ^{106}Ru по длине концевых фрагментов нижнего и верхнего твэлов в районе наконечников, полученные с ис-

пользованием коллиматора шириной 1 мм, приведены на рис. 4.4. Уменьшение всплеска энерговыделения на стыке ПТН и ПТВ в экспериментальной ТВС (12%) по сравнению со штатной (35%) является следствием применения конструкции с центральным закреплением твэлов.

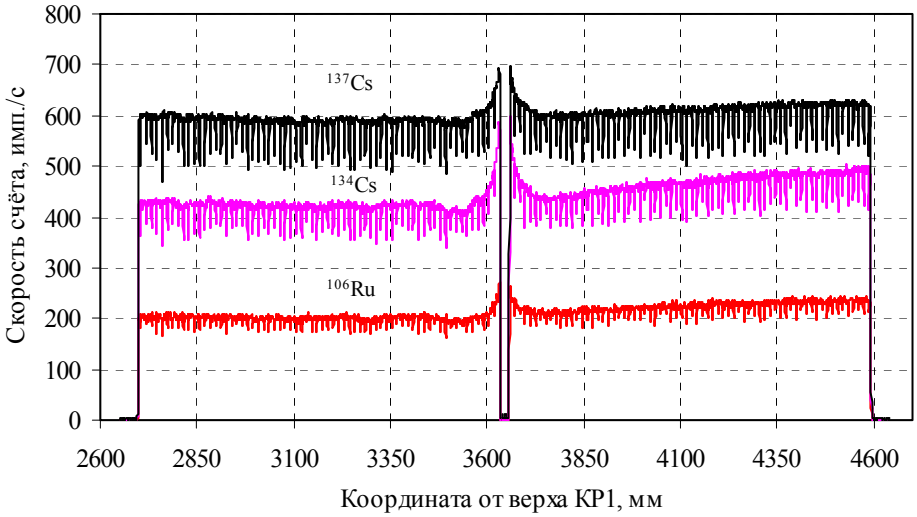


Рис. 4.4 – Распределение скорости счёта гамма-излучения продуктов деления по длине концевых фрагментов твэлов ПТН и ПТВ в ЭТВС с ЦЗТ

4.2 Поведение газообразных и летучих продуктов деления в герметичных твэлах

Анализ гамма-сканограмм герметичных твэлов двадцати двух исследованных ТВС РБМК-1000 показал, что лишь в одной из них (ТВС 659) наблюдалась миграция цезия. Эта ТВС эксплуатировалась на ЛАЭС в 1973−1976 гг. и была выгружена при достижении среднего выгорания 10,8 МВт·сут/кгU по подозрению в негерметичности.

Перенос летучего нуклида ^{137}Cs на стыки топливных таблеток был обнаружен в твэлах № 2, 8, 9 (ПТН) и № 3, 8, 11 (ПТВ). На рис. 4.5 представлены гамма-сканограммы двух аномальных и четырёх нормальных твэлов этой ТВС. Наличие миграции цезия свидетельствует о повышенной температуре топлива (> 1200 °С) в центральной части топливного сердечника отдельных твэлов нижнего и верхнего пучков.

Металлографические исследования поперечных шлифов твэлов выявили увеличение пористости по радиусу таблеток в перегретых твэлах и отсутствие её изменения в нормальных твэлах (рис. 4.6). В твэле 11В при визуальном осмотре обнаружено отсутствие нижней заглушки, поэтому его негерметичность не вызвала сомнений. Для определения целостности остальных твэлов проводилось измерение активности ^{85}Kr в газосборниках. Выгорание топлива приводит к образованию около двух десятков радиоактивных изотопов ксенона и криптона, но вследствие малого времени жизни все они вскоре исчезают, за исключением ^{85}Kr, период полураспада которого составляет 10,7 года. Распад ^{85}Kr сопровождается гамма-излучением с энергией 514 кэВ.

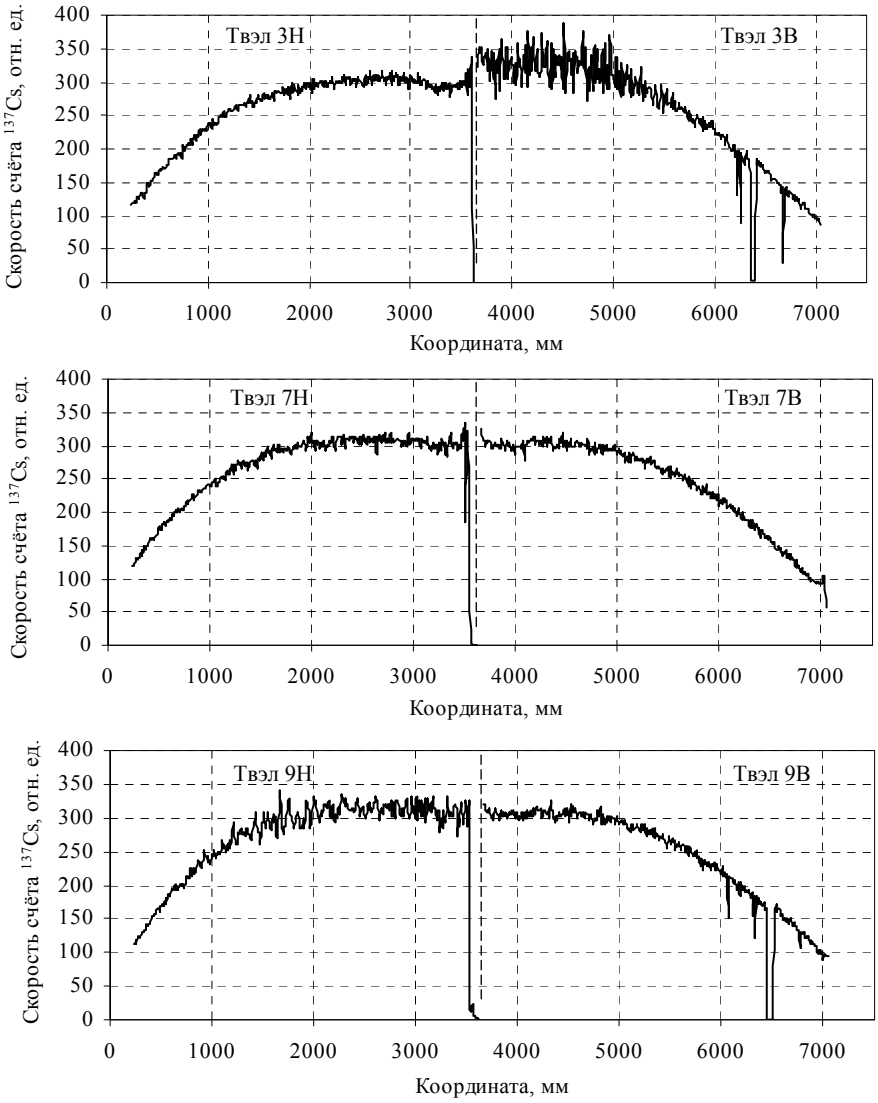


Рис. 4.5 – Распределение концентрации ^{137}Cs в твэлах двух пучков ТВС659

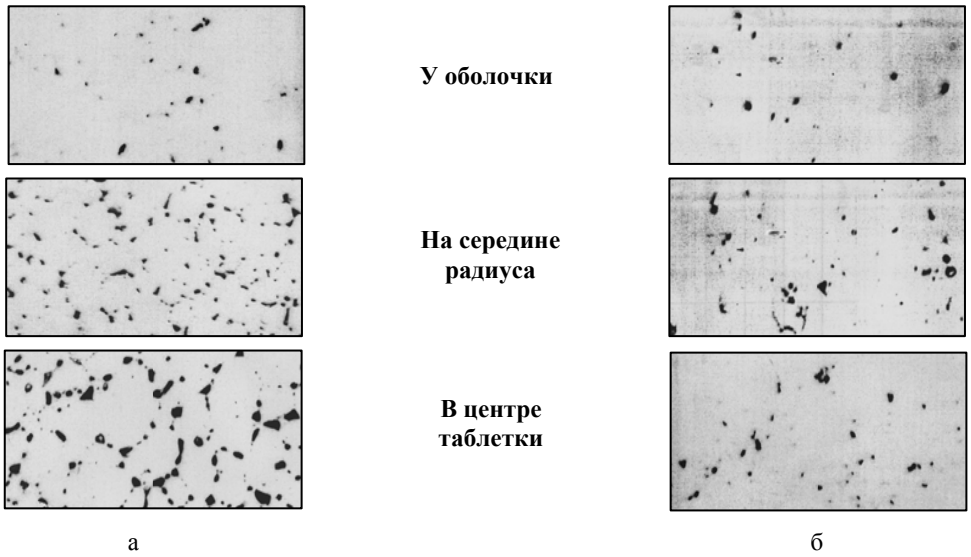


Рис. 4.6 – Микроструктура по радиусу таблетки UO_2 в перегретых (а) и нормальных (б) твэлах

Измерение интенсивности гамма-излучения в газосборниках твэлов проводилось на установке, схема которой представлена на рис. 4.7. В её состав входят: защитный контейнер, пенал для твэлов, подъёмник, коллиматор, детектор из особо чистого германия и гамма-спектрометр.

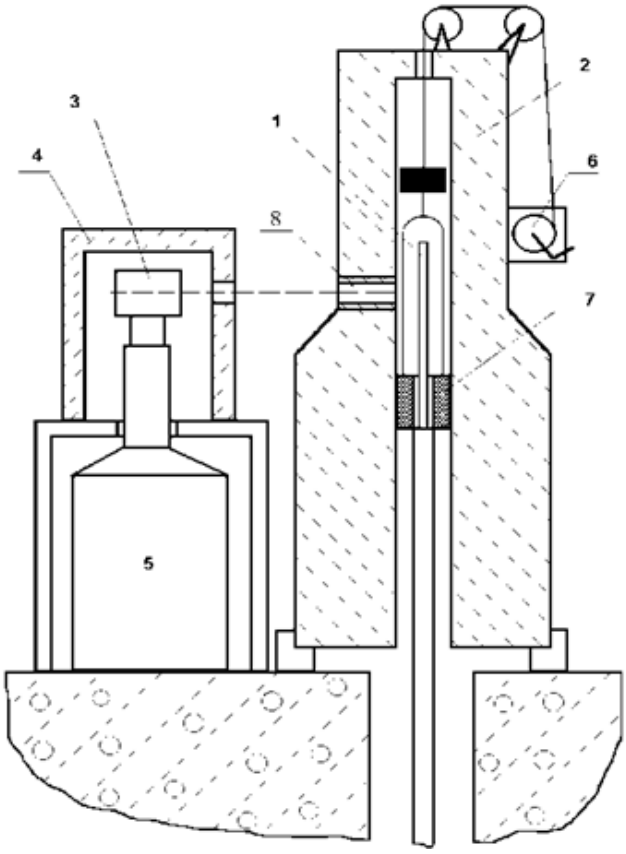


Рис. 4.7 – Схема установки для измерения интенсивности гамма-излучеия ^{85}Kr в газосборнике твэла: 1 – твэл, 2 – защитный контейнер, 3 –детектор, 4 – свинцовая защита детектора, 5 – сосуд Дьюара, 6 – подъёмное устройство, 7 – пенал для твэла; 8 – коллиматор

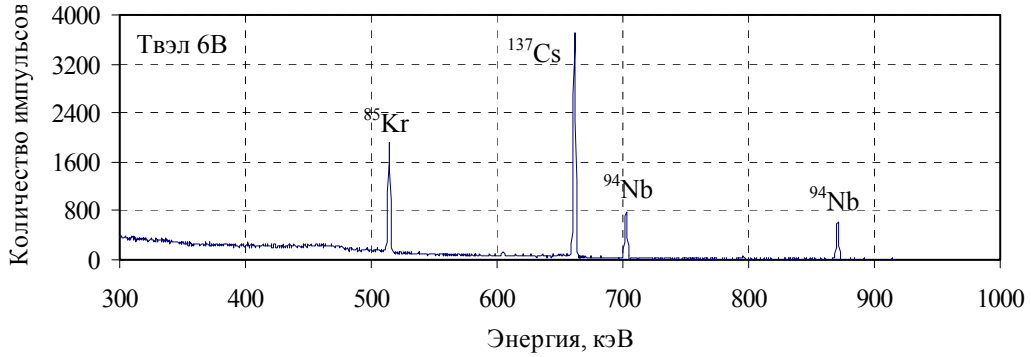
Размещение свинцового контейнера над шибером в потолке, совмещённым с приёмным колодцем на дне защитной камеры, в котором установлены пеналы с твэлами, обеспечивает с помощью подъёмника позиционирование объектов исследования перед отверстием коллиматора. Диаметр коллиматора составляет 20 мм, длина – 350 мм. Измерения проводят в одной точке, время экспозиции – 300 с. Центр коллимационного отверстия находится на 40 мм ниже наконечника твэла.

Результаты измерения активности ^{85}Kr в газосборниках твэлов ТВС 659 приведены в табл. 4.3. Спектры гамма-излучения летучих продуктов деления ^{85}Kr и ^{137}Cs, а также ^{94}Nb, образовавшегося при активации нейтронами оболочки из сплава Zr-1%Nb, герметичного и негерметичного твэлов представлены на рис. 4.8.

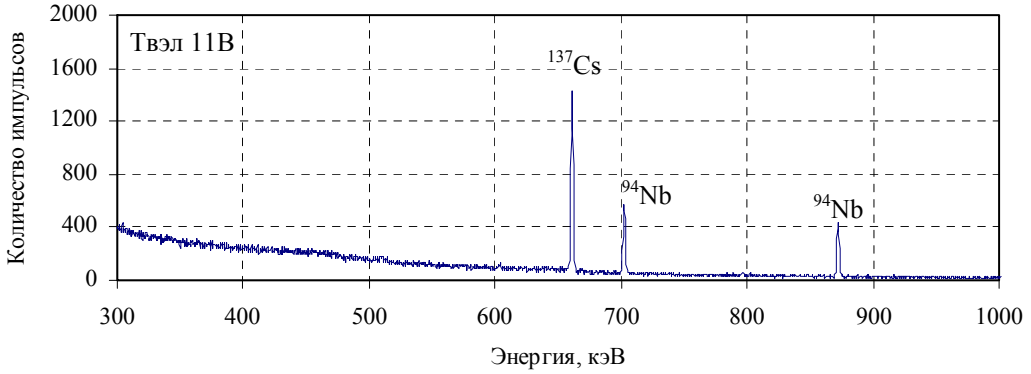
Таблица 4.3 – Содержание ^{85}Kr в газовых полостях твэлов

Номер твэла ПТН	Скорость счёта ^{85}Kr, отн. ед.
1	0,99
2	8,75
3	0,91
4	1,19
5	1,84
6	0,97
7	1,53
8	9,46
9	6,61
10	1,12
11	1,52
12	2,50
13	0,63
14	1,18
15	2,44
16	0,64
17	0,91
18	0,69

Номер твэла ПТВ	Скорость счёта ^{85}Kr, отн. ед.
1	1,67
2	1,33
3	6,60
4	0,33
5	1,71
6	1,51
7	1,70
8	9,46
9	1,93
10	1,86
11	–
12	1,82
13	1,33
14	1,32
15	0,98
16	1,17
17	1,50
18	1,11



а



б

Рис. 4.8 – Гамма-спектры газовой полости герметичного (а) и негерметичного (б) твэлов ТВС 659

Прокол оболочки лазерным излучением с последующим манометрическим и масс-спектрометрическим определением количества и компонентного состава газа в двух твэлах тепловыделяющей сборки подтвердил результаты, полученные неразрушающим гамма-спектрометрическим методом (табл. 4.4). Содержание криптона под оболочкой аномального (перегретого) твэла 3В было в ~ 4 раза больше, чем в нормальном твэле 6В.

Таблица 4.4 – Количество и состав газов под оболочкой твэлов ТВС РБМК-1000 с выгоранием 10,8 МВт·сут/кгU

Номер твэла	Свободный объём твэла, $см^3$	Объём газа при н.у., $см^3$	Давление газа в твэле, МПа	Объёмная доля газов, %						
				He	N_2	O_2	Ar	CO_2	Kr	Xe
6В	56,5	62,9	0,11	80,66	<0,32	<0,06	<0,02	<0,01	1,82	17,11
3В	57,8	166,9	0,29	31,85	<0,14	<0,03	<0,005	<0,002	6,74	61,23

Для определения параметров твэльного газа использовался метод, основанный на нарушении целостности защитной оболочки в вакуумированном измерительном объёме. Давление газа P в твэле рассчитывалось по формуле:

$$P = P_н (V_н/V_с + 1), \qquad (4.2)$$

где $P_н$ – давление, установившееся в измерительной системе после прокола оболочки твэла;

$V_н$ – известный объём измерительной системы;

$V_с$ – свободный объём твэла.

Свободный объём твэла определяли путём измерения падения давления в калибровочной камере при присоединении к ней предварительно отвакуумированного твэла. Погрешность определения давления газа в твэле составляла ± 7%. Объём газов при нормальном давлении рассчитывают по формуле:

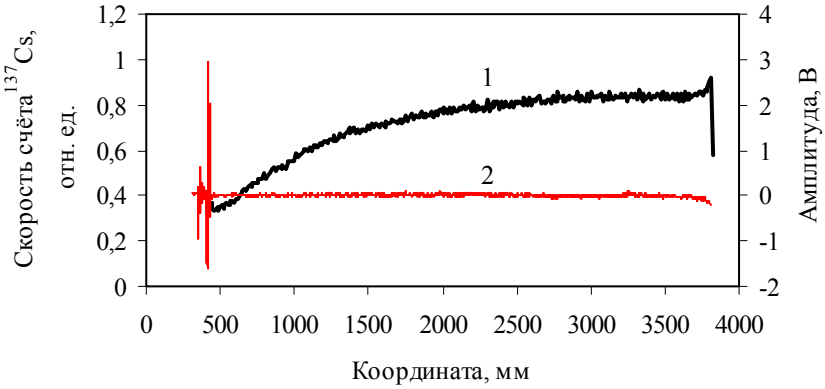
$$V_н = PV_с. \qquad (4.3)$$

Отобранный при проколе газ анализировался на масс-спектрометре. Коэффициенты относительной чувствительности регистрируемых компонент определялись из анализа аттестованной смеси чистых газов. Погрешность определения объёмной доли гелия, криптона и ксенона составляла ± 5% [28].

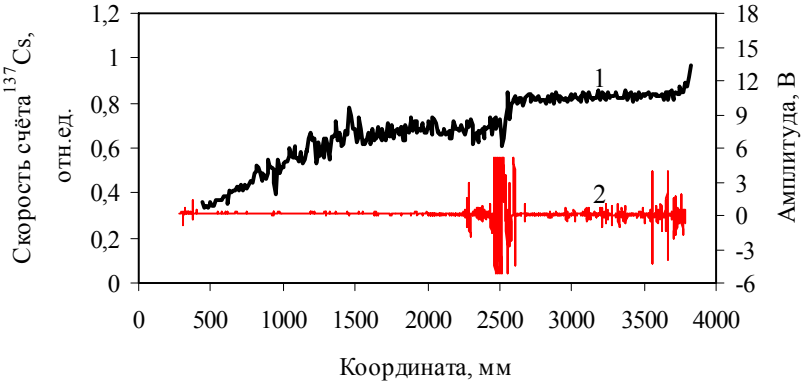
4.3 Миграция цезия в негерметичных твэлах

В НИИАР было исследовано восемь негерметичных ТВС РБМК-1000, отработавших на 2-м блоке ЛАЭС до различного выгорания. В каждой из них было обнаружено по

одному дефектному твэлу: семь в ПТВ и один в ПТН. На рис. 4.9 представлены гамма-сканограммы и ВТ-диаграммы герметичного и негерметичного твэлов ПТВ дефектной ТВС 671, отработавшей до выгорания 18,9 МВт·сут/кгU.



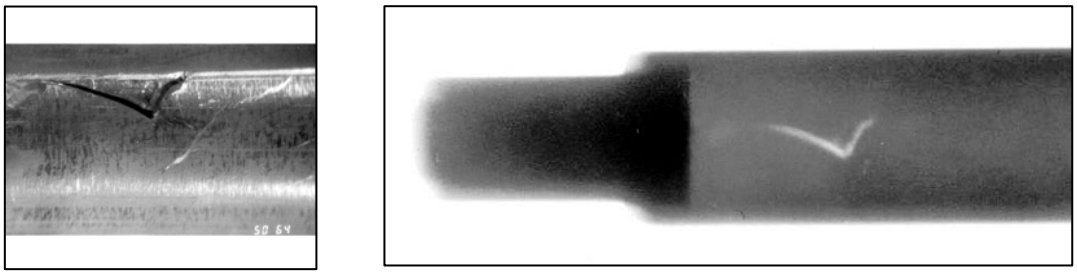
а



б

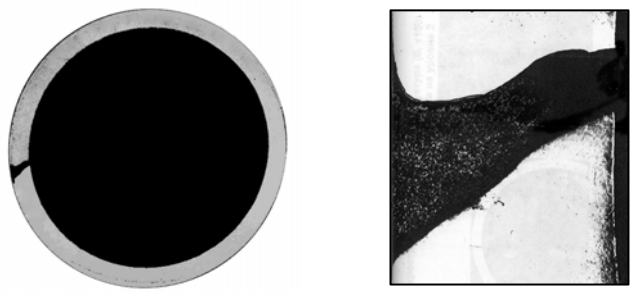
Рис. 4.9 – Гамма-сканограммы (1) и ВТ-диаграммы (2) герметичного (а) и негерметичного (б) твэлов дефектной ТВС 671

Первичный debris-дефект был обнаружен визуально в верхней части оболочки у наконечника твэла (рис. 4.10). На рис. 4.11 представлена макро- и микроструктура поперечного шлифа в районе сквозного дефекта оболочки.



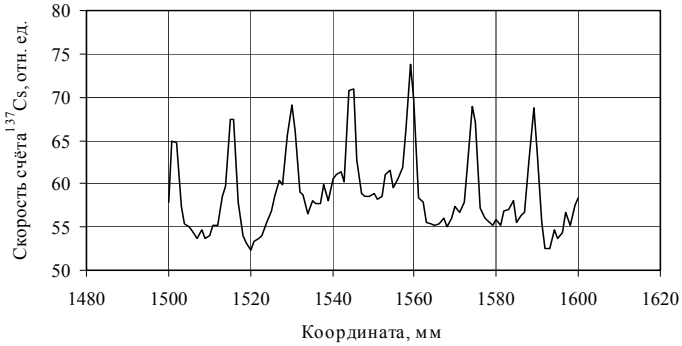
а б

Рис. 4.10 – Фотография (а) и рентгеновский снимок (б) негерметичного твэла в районе debris-дефекта

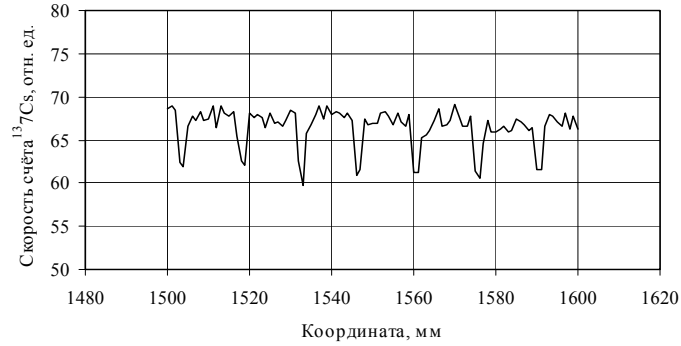


а б

Рис. 4.11 – Макро- (а) и микроструктура (б) оболочки негерметичного твэла в районе сквозного debris-дефекта



а

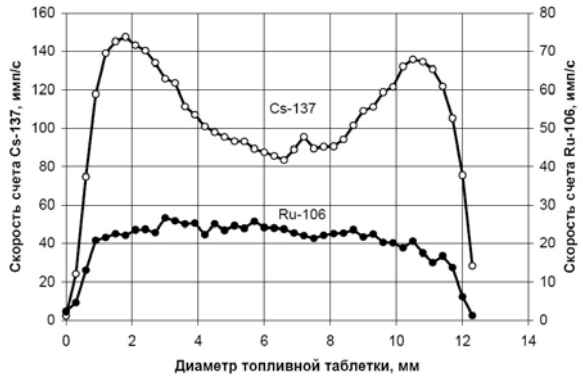


б

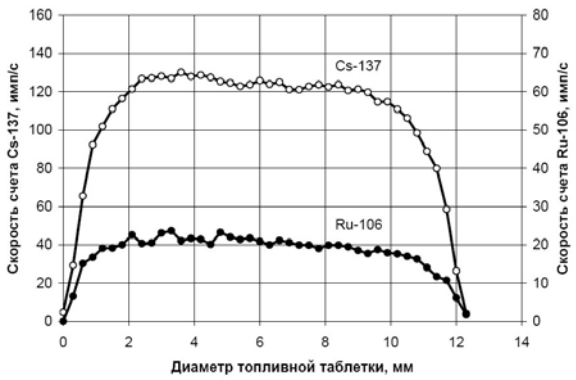
Рис. 4.12 – Гамма-сканограммы участков негерметичного (а) и герметичного (б) твэлов ТВС 671

Аксиальное и диаметральное сканирование тонким (1 мм) щелевым коллиматором позволило выявить перераспределение ^{137}Cs на стыках топливных таблеток (рис. 4.12, а) и его миграцию к оболочке на участке топливного сердечника (координата 1550 мм) с пониженным содержанием этого летучего продукта деления (рис. 4.13, а).

В герметичных твэлах этой ТВС аксиальной и радиальной миграции цезия не наблюдалось (рис. 4.12, б и 4.13, б). Отсутствовало перераспределение цезия и на участке дефектного твэла с координатами 2500–3550 мм (см. рис. 4.9, б).



а



б

Рис. 4.13 – Диаметральные гамма-сканограммы негерметичного (а) и герметичного (б) твэлов на отметке 1550 мм: размер коллиматора 0,5 мм, шаг сканирования 0,3 мм

Керамографические исследования подтвердили наличие перегрева топлива. Об этом свидетельствует увеличение пористости в центре топливного сердечника негерметичного твэла (рис. 4.14).

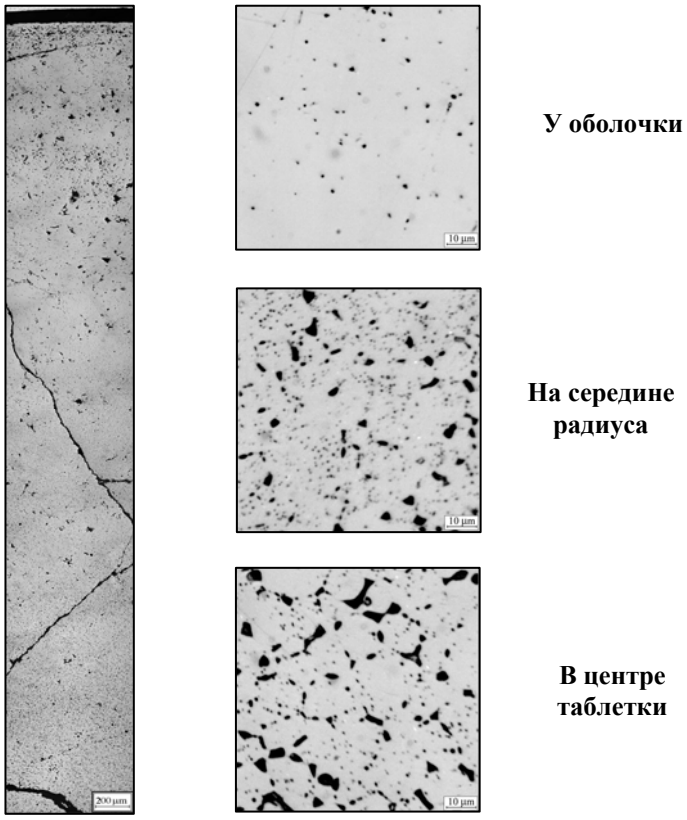


Рис. 4.14 – Макро- (а) и микроструктура (б) топлива негерметичного твэла на участке перегрева

Из анализа полученных результатов следует, что попадание водного теплоносителя внутрь твэла приводит к структурным изменениям, ухудшению теплопроводности и перегреву части оксидного топливного сердечника со стороны сквозного debris-дефекта или разрушенного сварного шва оболочки с заглушкой. Перегрев приводит к радиальной и аксиальной миграции летучих продуктов деления. На участках перегрева убыль ^{137}Cs составляет 5−15% от его общего накопления в соседних герметичных твэлах. Результаты вихретокового контроля указывают на то, что максимальные ВТ-сигналы от внутренних дефектов, связанных с гидрированием оболочки, наблюдаются преимущественно на границе зоны перегрева топливного столба (см. рис. 4.9, б).

4.4 Геометрические параметры твэлов

4.13.1 Длина твэлов

Согласно существующей модели общее удлинение твэла РБМК в процессе эксплуатации определяется первоначальным удлинением при загрузке ТВС на мощности и

дополнительными удлинениями при теплосменах, связанных с изменениями мощности. Это объясняется тем, что при работе в переходных режимах керамическое оксидное топливо растрескивается из-за температурных напряжений и фрагментированные таблетки могут заклиниваться, приводя к нагружению и осевому удлинению оболочки. Необратимое увеличение длины определяется пластическим деформированием и ползучестью оболочки. Заметный вклад в удлинение твэлов вносит радиационный рост оболочечных труб из циркониевого сплава Э-110.

Указанная модель изменения длины твэлов при симметричном относительно центра активной зоны высотном распределении линейной тепловой нагрузки предполагает одинаковое удлинение твэлов верхнего и нижнего пучков. При этом существует возможность несколько большего удлинения отдельных твэлов ПТН, связанная с тем, что при загрузке ТВС на мощности его твэлы проходят через центр активной зоны с наибольшей плотностью нейтронного потока [29–31].

Длина твэлов измерялась на установке, представленной на рис. 3.23, по методике, изложенной в разделе 3.2.1. На рис. 4.15 и 4.16 в графическом виде представлены усреднённые по всем твэлам двух пучков данные об удлинении оболочечных труб в исследованных ТВС с различным выгоранием топлива. Из анализа полученных результатов следует, что наряду с дозной зависимостью удлинения Δl твэлов двух пучков исследованных ТВС, проявляется влияние неизвестных факторов, приводящих к значительному разбросу значений $\Delta l_{ср.}$, который не может быть объяснён погрешностью измерений и неточным значением их исходной длины ($l_{исх.}$ = 3640 ± 2 мм).

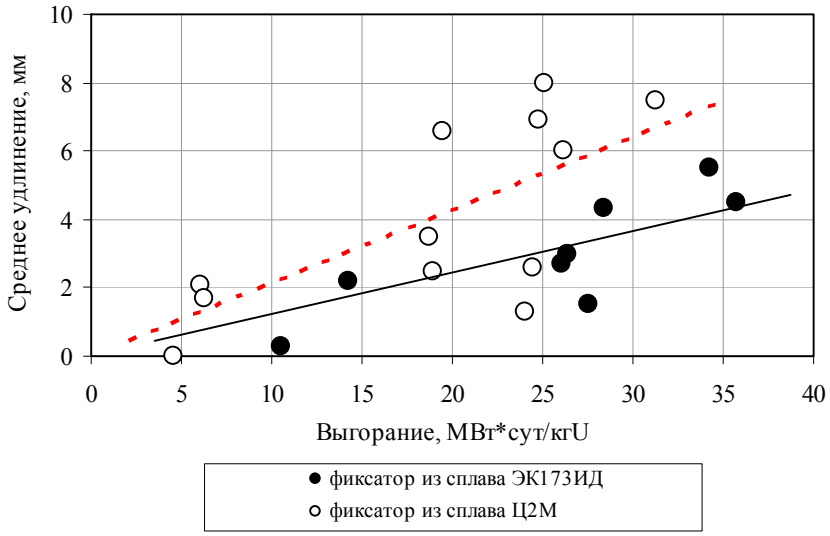


Рис. 4.15 – Зависимость величины удлинения твэлов ПТВ от выгорания топлива

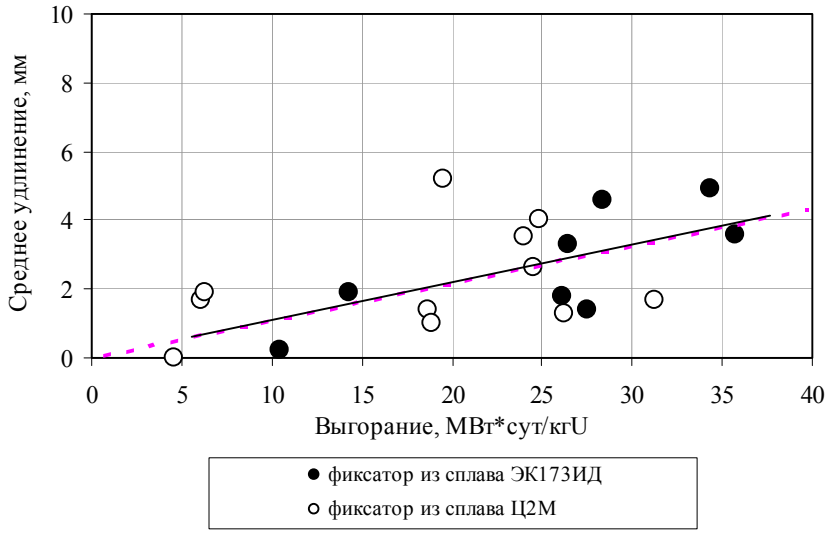


Рис. 4.16 – Зависимость величины удлинения твэлов ПТН от выгорания топлива

Обращает на себя внимание меньшее удлинение твэлов нижнего пучка по сравнению с верхним в случае применения фиксатора ТС из сплава Ц2М. В сборках с фиксатором из сплава ЭК-173ИД удлинение твэлов двух пучков было не велико и практически одинаково. Увеличение длины твэлов ПТН по мере выгорания практически не зависит от типа используемого фиксатора (см. рис. 4.16).

В табл. 4.5 приведены результаты измерения удлинения твэлов с фиксатором из сплава Ц2М в четырёх ТВС, отработавших на 2-ом блоке ЛАЭС в интервале выгораний 6,07–31,3 МВт·сут/кгU, подтверждающие большее удлинение твэлов ПТВ по сравнению с твэлами ПТН. Наибольшее Δl = 9,9 мм наблюдалось в твэле 10 ПТВ ТВС 361 с выгоранием 31,3 МВт·сут/кгU.

Таблица 4.5 – Удлинение твэлов с фиксатором из сплава Ц2М в четырёх ТВС РБМК

Номер п/п	ТВС 997		ТВС 626		ТВС 587		ТВС 361	
	ПТН	ПТВ	ПТН	ПТВ	ПТН	ПТВ	ПТН	ПТВ
1	2,0	2,5	2,2	3,2	0,9	5,3	1,6	7,4
2	1,2	1,8	1,9	4,1	0,9	5,9	2,0	7,2
3	1,5	2,0	0,9	-	1,2	5,2	2,0	6,9
4	1,7	1,4	2,1	4,0	1,5	5,6	1,5	7,6
5	1,8	2,1	0,6	3,0	1,3	6,6	0,5	7,7
6	1,7	2,0	1,6	2,3	2,2	6,1	1,3	7,0
7	1,6	-	1,8	3,0	1,2	5,3	1,8	6,7
8	1,6	2,6	0,9	2,6	1,9	6,2	1,2	7,2
9	1,3	1,5	0,9	3,0	0,9	6,7	1,4	6,5
10	2,0	1,9	1,5	3,6	1,3	6,5	1,1	9,9
11	1,2	2,1	0,7	2,8	1,4	6,6	1,8	7,3
12	1,3	2,6	1,1	4,3	1,1	6,8	1,6	7,9
13	2,1	2,0	1,3	3,7	0,9	5,4	2,3	8,6
14	2,2	2,1	1,7	3,8	1,1	4,6	1,8	7,8

15	1,6	2,0	1,3	3,8	1,6	5,3	2,6	6,7
16	2,0	2,3	1,2	3,7	2,2	6,3	2,5	8,3
17	2,0	2,3	2,0	3,9	1,1	6,2	2,0	7,2
18	1,7	2,0	1,5	4,2	1,1	6,6	2,1	7,7
Среднее по внутреннему ряду	1,6	2,0	1,4	3,3	1,3	6,1	1,6	7,9
Среднее по наружному ряду	1,9	2,1	1,5	3,9	1,3	5,7	2,2	7,7
Среднее по двум рядам	1,7	2,1	1,4	3,5	1,3	6,0	1,7	7,5
Мин.	1,2	1,4	0,6	2,3	0,9	4,6	0,5	6,5
Макс.	2,2	2,6	2,2	4,3	2,2	6,8	2,6	9,9
СКО	0,31	0,33	0,50	0,60	0,42	0,65	0,52	0,81

При анализе паспортных данных на ТВС (см. табл. 1.3) наблюдалась корреляция между величиной удлинения оболочечных труб и исходной массой топлива в твэлах (рис. 4.17). В твэлах ПТВ с максимальным и минимальным удлинением масса UO_2 отличалась на 20–40 грамм, что соответствует весу 2–3 топливных таблеток. Таким образом, чем больше была исходная длина топливного сердечника, тем значительней оказывалось удлинение твэла в конце эксплуатации.

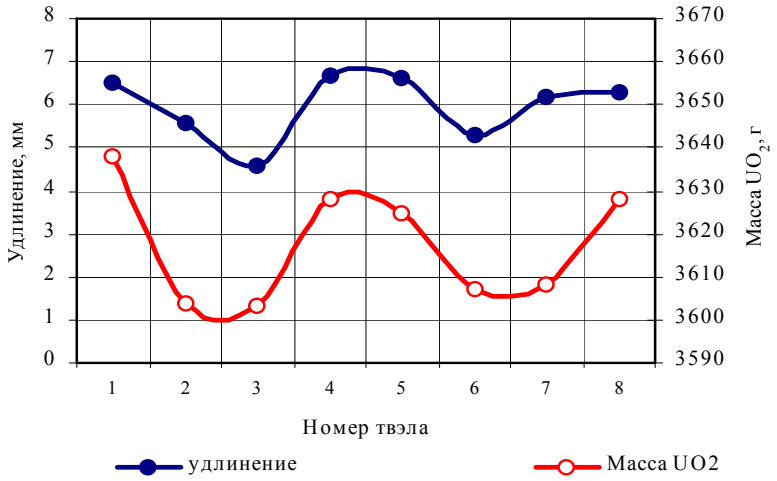


Рис. 4.17 – Корреляция удлинения оболочечных труб с количеством топлива в твэлах ПТВ ТВС 587

На рис. 4.18, а представлены рентгеновские снимки, иллюстрирующие большее сжатие компенсирующей части пружинного фиксатора из сплава Ц2М в наиболее удлинившихся твэлах с повышенным весом топливного сердечника. В наименее удлинившихся твэлах с меньшим весом топлива наблюдается более расслабленное состояние компенсирующих участков фиксаторов (рис. 4.18, б).

Рис. 4.18 – Рентгеновские снимки газосборников с большим (а) и малым (б) удлинением твэлов

С целью изучения обнаруженных закономерностей размерных изменений твэлов РБМК были проведены исследования состояния топливного сердечника с помощью неразрушающих методов: ВТ-сканирования, рентгеновского просвечивания и гамма-спектрометрии.

Высота топливного сердечника измерялась ВТ-методом по расстоянию между сигналами ВТП от торцевой заглушки твэла и края компенсирующей части пружинного фиксатора. Результаты ВТ-контроля выявили наличие значительных различий в длине топливного сердечника в твэлах ТВС РБМК-1000 (рис. 4.19, 4.20). Диапазон изменения длин топливных сердечников в твэлах одной ТВС достигал 25 мм при бóльших средних значениях этого параметра в твэлах ПТВ.

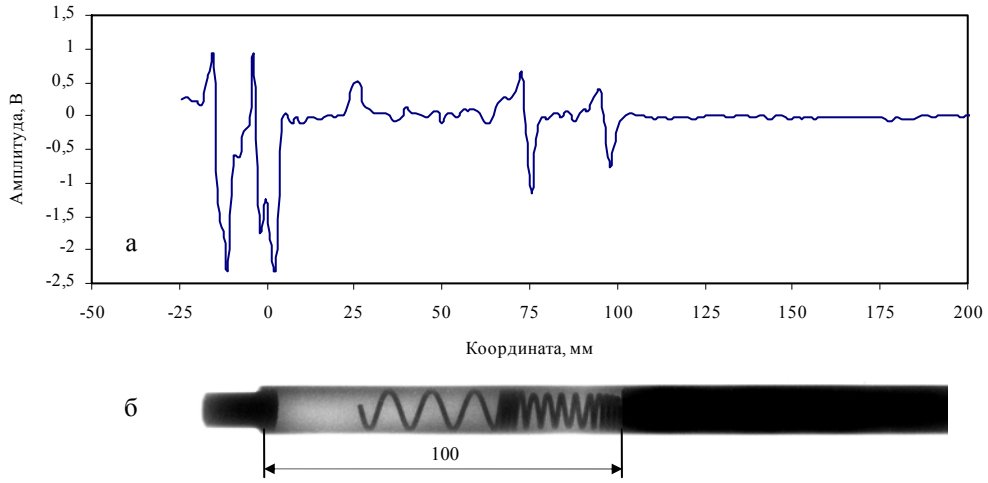


Рис. 4.19 – ВТ-диаграмма (а) и рентгеновский снимок (б) газосборника твэла ПТН ТВС 626

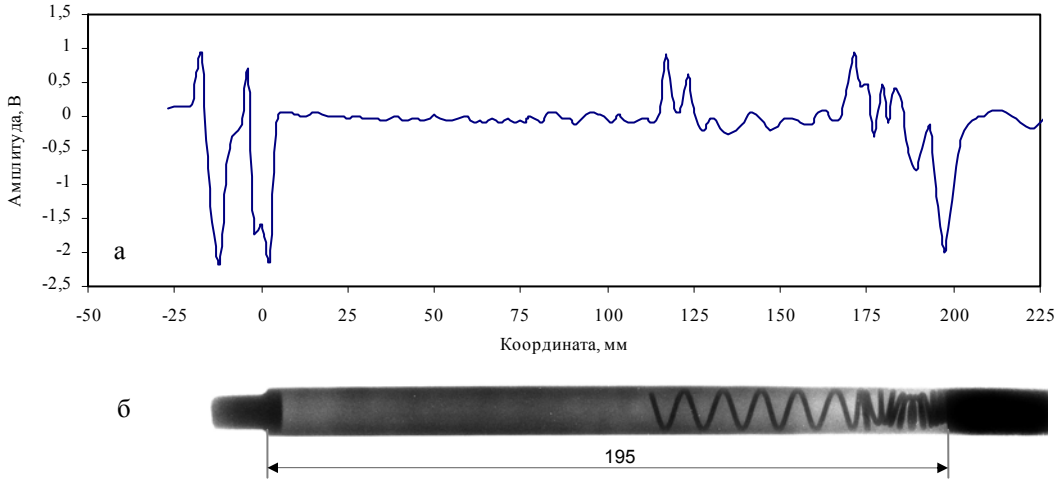


Рис. 4.20 – ВТ-диаграмма (а) и рентгеновский снимок (б) газосборника твэла ПТН ТВС 587

Гамма-сканирование показало наличие многочисленных разрывов топливного сердечника в твэлах верхних пучков ТВС РБМК с фиксатором Ц2М (рис. 4.21). Вид участков топливного сердечника твэлов ПТВ в районе расхождений топливных таблеток показан на рис. 4.22.

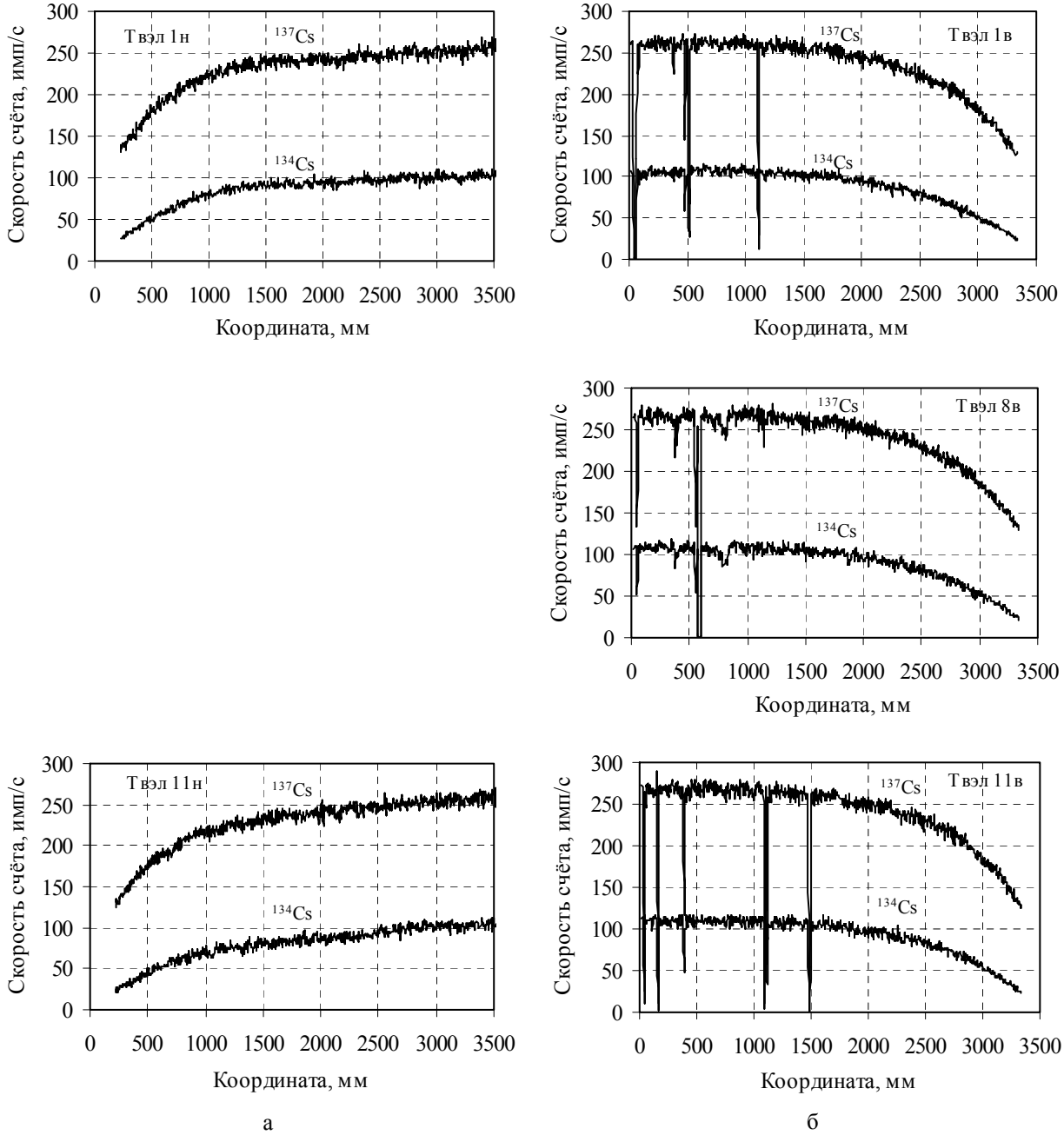


Рис. 4.21 – Гамма-сканограммы твэлов нижнего (а) и верхнего (б) пучков ТВС 361 с фиксатором из сплава Ц2М

ВТ-контроль и рентгеновское просвечивание выявило разрушение компенсирующей части пружинных фиксаторов в нескольких твэлах исследованных ТВС РБМК. Встречались случаи полного смыкания витков компенсирующей части пружинного фиксатора. Рис. 4.23 иллюстрирует наличие этого эффекта в одном из твэлов ТВС, отработавшей на ЛАЭС до выгорания всего 6,07 МВт·сут/кгU.

Специальные испытания показали, что смыкание витков компенсирующей части пружины наступает при нагрузке 15–30 кг, а перемещения фиксирующих витков не наблюдается при воздействиях груза в 150 кг. Случаи поломки фиксатора указывают на наличие значительных усилий, возникающих при полном смыкании компенсирующих вит-

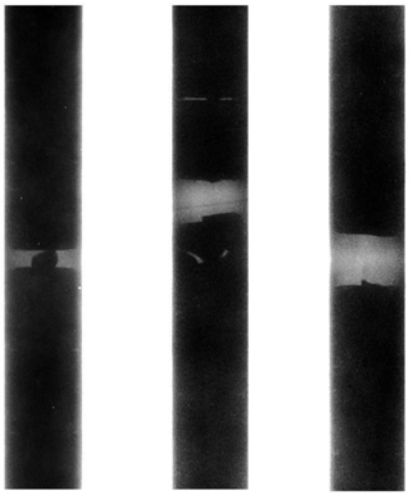


Рис. 4.22 – Рентгеновские снимки участков твэлов ТВС РБМК в районе зазоров между таблетками топлива

ков и передающихся через топливный сердечник на сварной шов заглушки твэла, расположенной в центре активной зоны.

В связи с вышеизложенным становится понятной странная, на первый взгляд, корреляция между удлинением твэлов и исходной координатой края топливного сердечника (из-за различного количества таблеток UO_2), которая была обнаружена в одной из исследованных ТВС (см. рис. 4.17). Очевидно, что при установке поджимного устройства на основе циркониевого сплава Ц2М из-за вариаций механических характеристик фиксировалось лишь его местоположение в газосборнике, а не усилие поджатия. Различное поджатие компенсирующей части пружинного фиксатора в твэлах с разной исходной длиной топливного сердечника, реализованное на заводе-изготовителе топлива РБМК – наиболее вероятная причина отличий их удлинения.

Рис. 4.23 – Рентгеновский снимок газосборника твэла ПТВ ТВС 997 с полным смыканием витков компенсирующей части фиксатора

Обнаруженное несоответствие размерных изменений существующей модели удлинения твэлов РБМК можно объяснить следующим образом. Из анализа полученных результатов следует, что необратимая деформация оболочек твэлов ПТН при первой загрузке топливных сборок в реактор или вообще не происходит или вероятность её не велика. Это обусловлено большим исходным зазором между топливом и оболочкой в твэлах (220–360 мкм), а также условиями эксплуатации реактора РБМК-1000 при перегрузках (снижение мощности ТВС ближайшего окружения технологического канала, в который загружается свежая сборка).

При термоциклировании заклинивание растрескавшихся топливных таблеток твэлов ПТН и ПТВ практически равновероятно. Чаще всего заклиниваются таблетки, линейное перемещение которых наибольшее (таблетки, расположенные вблизи фиксатора ТС). После заклинивания таблеток и сброса мощности в твэлах двух пучков реализуются различные условия для сохранения целостности топливного сердечника. В ПТН он остаётся на заклинившейся таблетке, а зазор образуется у верхней заглушки. В ПТВ топливо пере-

мещается к нижней заглушке, а зазор возникает у заклинившейся таблетки. Из-за вибрации твэлов в потоке быстротекущего теплоносителя в зазор могут попадать фрагменты разрушенных таблеток (см. рис. 4.22). Очередной выход на мощность сопровождается необратимой деформацией оболочек или проскальзыванием заклинившейся таблетки и сжатием компенсирующей части пружинного фиксатора. При следующем термоциклировании процесс повторяется.

Если твэлы ТВС РБМК удлиняются в соответствии с рассмотренным механизмом, то использование фиксатора, имеющего больший свободный ход компенсирующих витков, возвращающего ТС в исходное положение после сброса мощности и устанавливаемого в газосборнике с фиксацией усилия поджатия, должно приводить к меньшему и практически одинаковому удлинению твэлов ПТН и ПТВ – в основном за счёт радиационного роста оболочечных труб. Это и наблюдается в ТВС с новым фиксатором из сплава ЭК-173ИД, разработанного ПАО «МСЗ» совместно с АО «ВНИИНМ».

На рис. 4.24 представлены типичные распределения продуктов деления, подтверждающие отсутствие зазоров в топливных сердечниках твэлов ПТН и ПТВ ТВС РБМК с новым фиксатором.

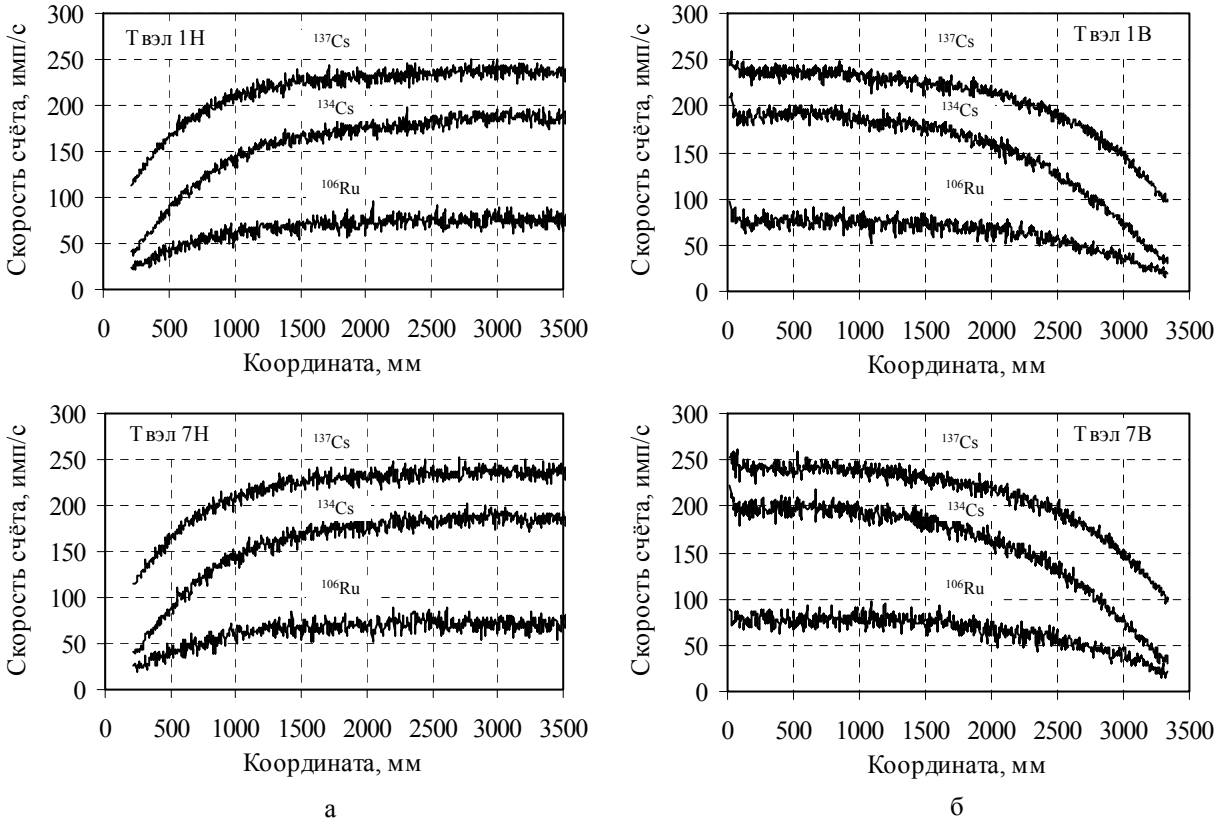


Рис. 4.24 – Типичные гамма-сканограммы твэлов нижнего (а) и верхнего (б) пучков ТВС с фиксатором из ЭК-173ИД (начало)

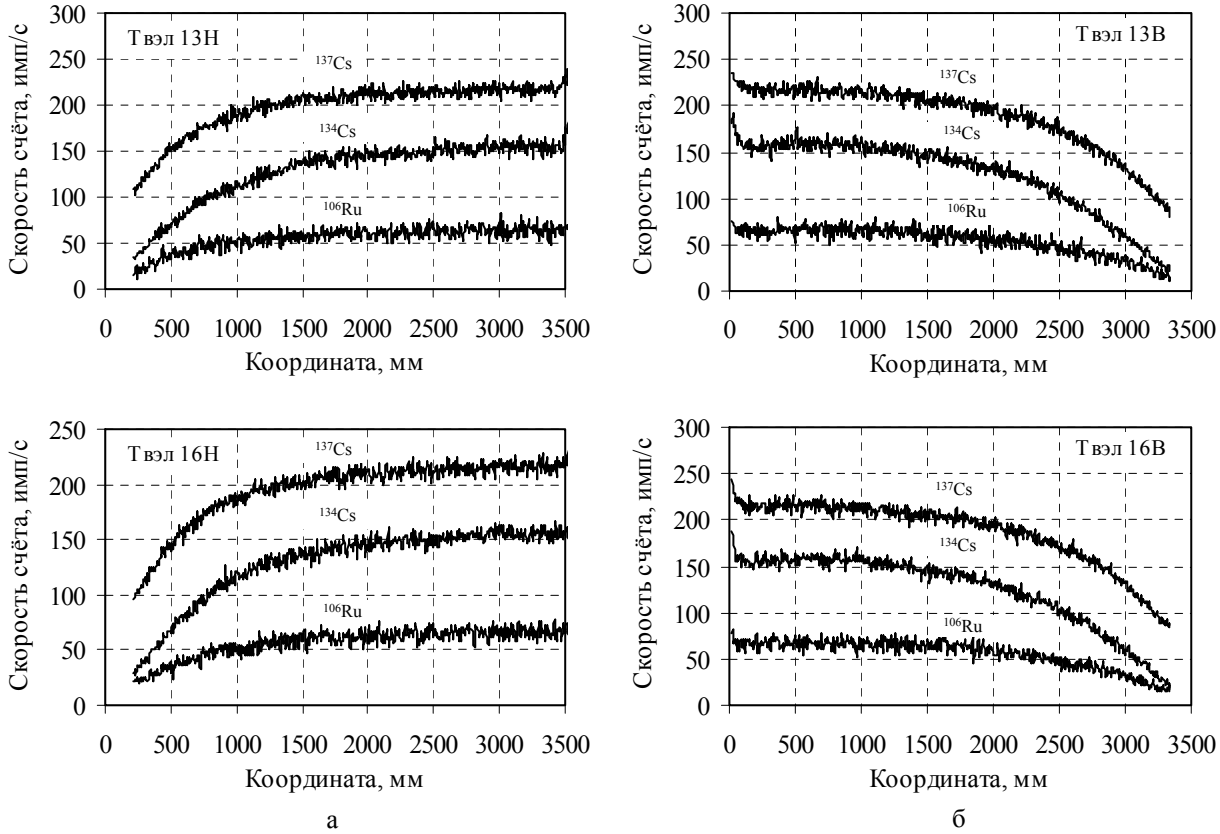


Рис. 4.24 – Типичные гамма-сканограммы твэлов нижнего (а) и верхнего (б) пучков ТВС с фиксатором из ЭК-173ИД (окончание)

Рис. 4.25 иллюстрирует ВТ-диаграмму и рентгенограмму газосборника твэла с фиксатором из ЭК-173 ИД.

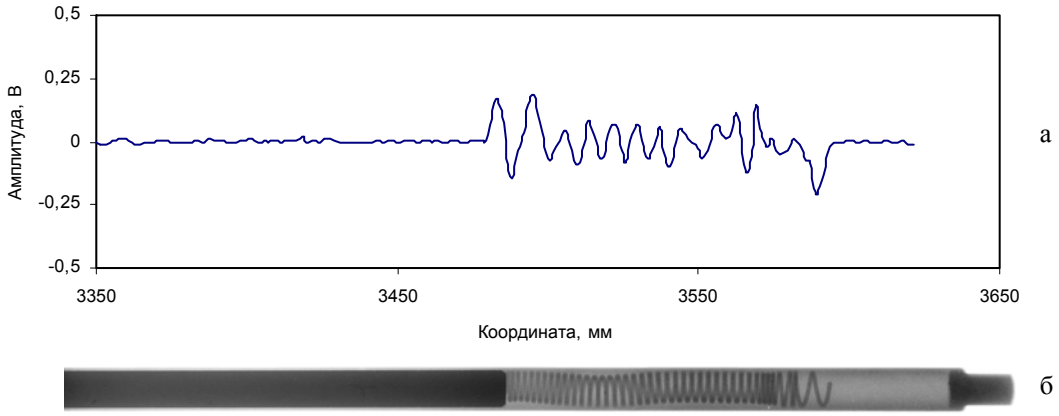


Рис. 4.25 – ВТ-диаграмма (а) и рентгеновский снимок (б) газосборника твэла ТВС 676

Подводя итог вышеизложенному, следует отметить, что состояние топливного сердечника (целостность таблеток, наличие зазоров между ними) влияет на эксплуатационную надёжность твэлов РБМК. Это связано с тем, что при работе в переходных режимах керамическое оксидное топливо растрескивается из-за температурных напряжений, и фрагментированные таблетки, особенно при полном сжатии компенсирующей части фиксатора, заклиниваются, приводя к нагружению и осевому удлинению оболочки. Возник-

новение напряжений в сварном соединении, расположенном на участке с максимальным энерговыделением, может привести к отрыву торцевой заглушки и разгерметизации твэла. При визуальном осмотре 120 негерметичных сборок РБМК-1000 с фиксатором из сплава Ц2М на ЛАЭС в 5 % случаев было обнаружено отсутствие заглушек у твэлов ПТВ [32]. Наблюдался отрыв заглушек и в процессе манипуляций с твэлами в защитных камерах материаловедческого центра НИИАР.

Снижение напряжённо-деформированного состояния при смене типа фиксатора, обеспечивающего поджатие топливного сердечника при транспортировке на АЭС и во время эксплуатации, существенно повысило работоспособность твэлов и ТВС РБМК в целом.

4.13.2 Диаметр оболочек

Для изучения характера изменения диаметра оболочек использовался контактный профилометр. Анализ полученных профилограмм выявил существенные различия в изменении этого параметра по длине твэлов нижнего и верхнего пучков исследованных ТВС.

На рис. 4.26 представлены типичные распределения среднего диаметра твэлов ТВС 567, 570 и 012. В этих тепловыделяющих сборках, эксплуатировавшихся на 2-ом блоке

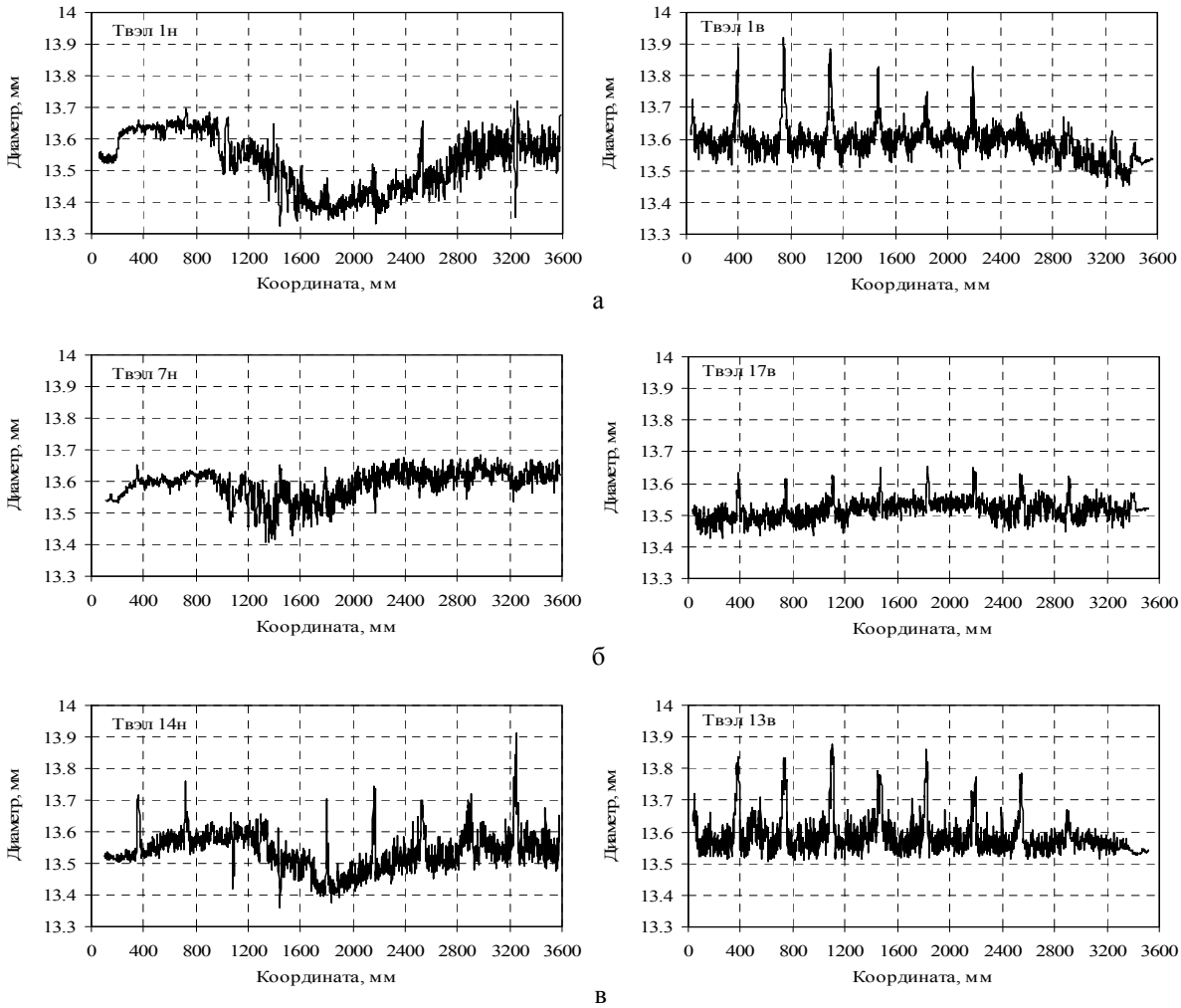


Рис. 4.26 – Типичные профилограммы твэлов ПТН и ПТВ ТВС 567 (а), 570 (б) и 012 (в) с выгоранием топлива 24, 24,8 и 24,5 МВт·сут/кгU соответственно

ЛАЭС до КПР в технологических каналах с невысокой тепловой мощностью (0,9–1,3 МВт) на краю активной зоны (см. табл. 1.7), было обнаружено характерное уменьшение диаметра оболочек твэлов ПТН с 13,6 до 13,4 мм на участке 1000–2600 мм (район ДР3–ДР7). Следует отметить, что при визуальном осмотре нижних пучков твэлов всех исследованных ТВС было замечено меньше содержания или полное отсутствие (рис. 4.27) отложений продуктов коррозии контура на этом участке оболочечных труб.

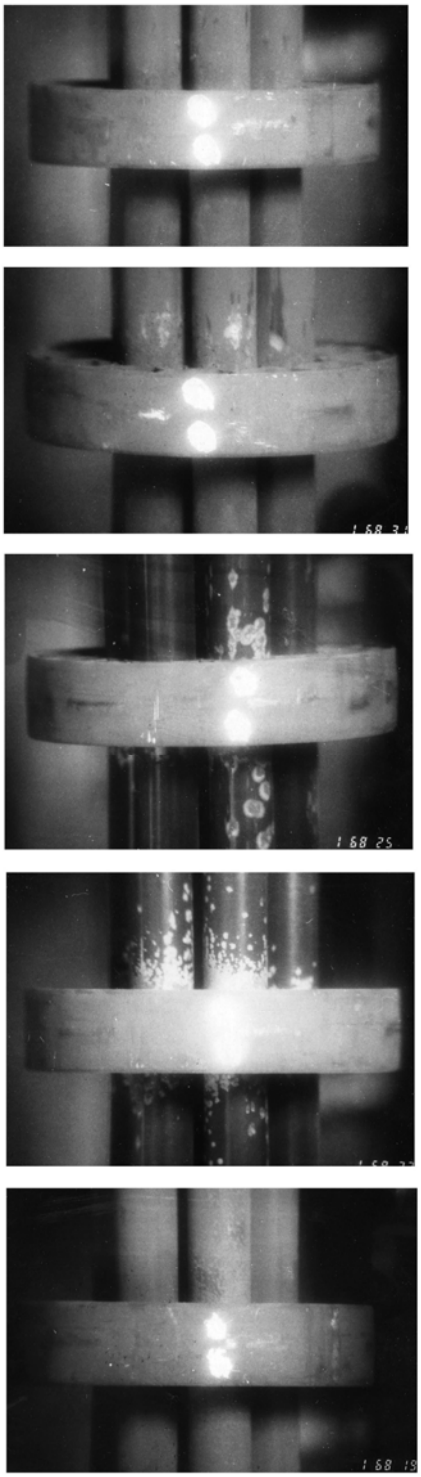


Рис. 4.27 – Внешний вид твэлов внутреннего ряда ПТН ТВС 587

На рис. 4.28 приведены профилограммы твэлов ТВС 626, 587 и 361, отработавших на 2-ом блоке ЛАЭС в технологических каналах с тепловой мощностью 1,7–2,1 МВт. Для твэлов этих ТВС характерно наличие локальных увеличений диаметра (до 13,75 мм) под стальными дистанционирующими решётками и отсутствие существенных колебаний его величины (около 13,5 мм) между ДР. Кроме того, в наиболее удлинившихся твэлах верхнего пучка наблюдается тенденция к уменьшению диаметра оболочек в направлении к центру активной зоны.

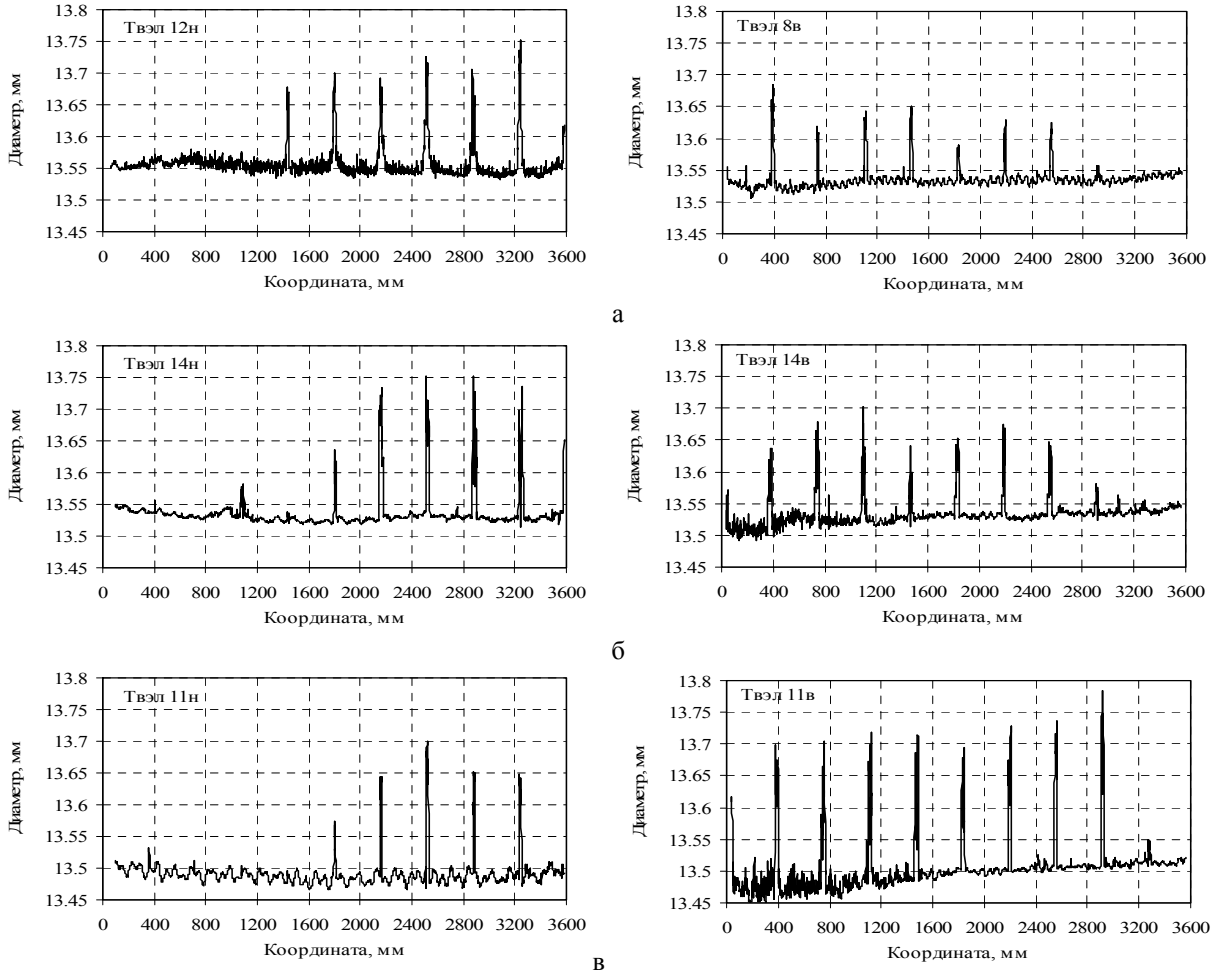


Рис. 4.28 – Типичные распределения среднего диаметра твэлов в ТВС 626 (а), 587 (б) и 361 (в) со стальными дистанционирующими решётками и выгоранием топлива 18,65; 26,16 и 31,7 МВт·сут/кгU соответственно

В твэлах внешних рядов ПТН и ПТВ ТВС с малым выгоранием топлива 4,6–6,3 МВт·сут/кгU локальные увеличения диаметра в районе контакта оболочек с пуклёвками ДР были минимальны или вообще отсутствовали (рис. 4.29).

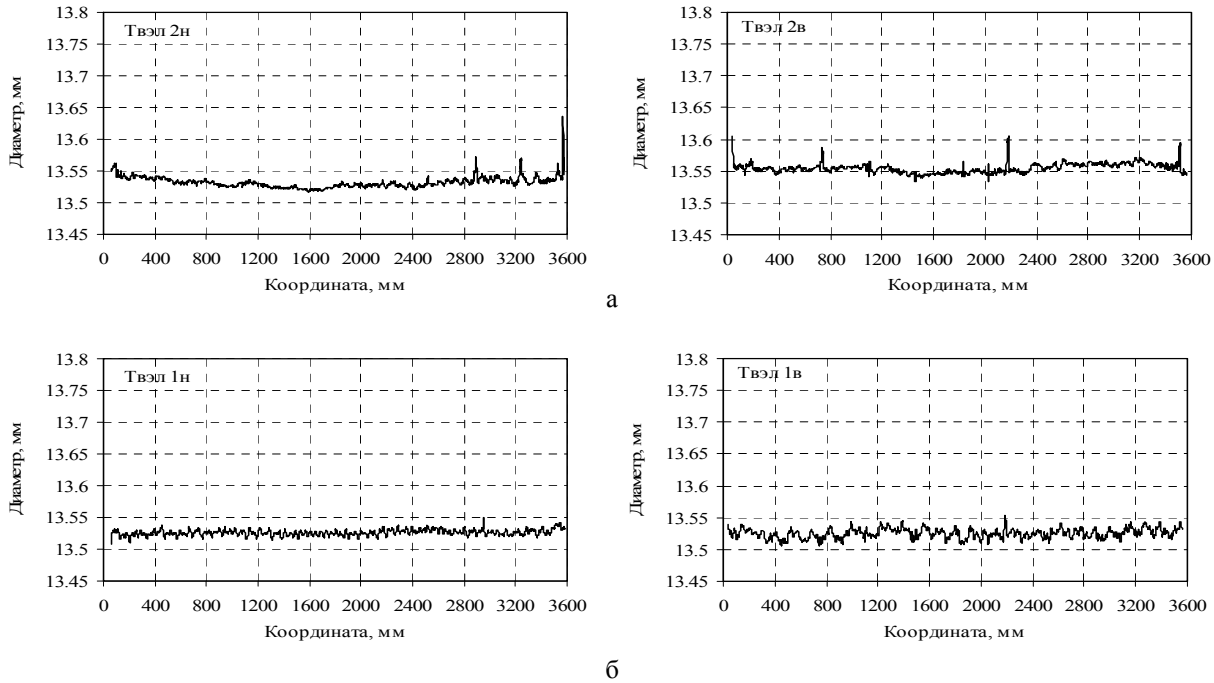


Рис. 4.29 – Профилограммы твэлов в ТВС 608 (а) и 997 (б) с выгоранием топлива 6,3 и 6,07 МВт·сут/кгU соответственно

Периодические вариации диаметра у твэлов с небольшим выгоранием топлива обусловлены технологией изготовления оболочек. Характер изменения диаметра индивидуален для каждой оболочечной трубы. Высокая чувствительность ВТ-метода к незначительным (~10 мкм) локальным изменениям диаметра позволяет экспрессно оценивать распределение этого параметра по длине твэла (например, в районе газосборника) с помощью проходного ВТ-датчика. Рис. 4.30 иллюстрирует корреляцию результатов вихретоковой дефектоскопии и профилометрии при измерении диаметра оболочки твэла ТВС 997, отработавшей на ЛАЭС до выгорания 6,07 МВт·сут/кгU.

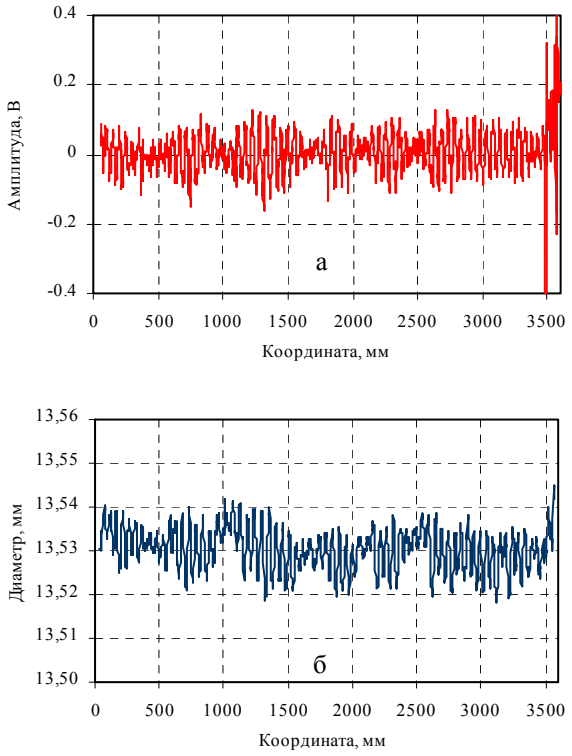


Рис. 4.30 – Корреляция ВТ-диаграммы (а) и профилограммы (б) в районе газосборника твэла ТВС 997

В процессе проведённых исследований выявлено существенно меньшее увеличение диаметра твэлов под циркониевыми ДР (рис. 4.31) по сравнению со стальными в ТВС с близким выгоранием топлива. Максимальная величина увеличения диаметра обо-

лочек под СДР лежит в интервале 200–300 мкм (см. рис. 4.26, 4.28), а под ЦДР не превышает 80 мкм (см. рис. 4.31).

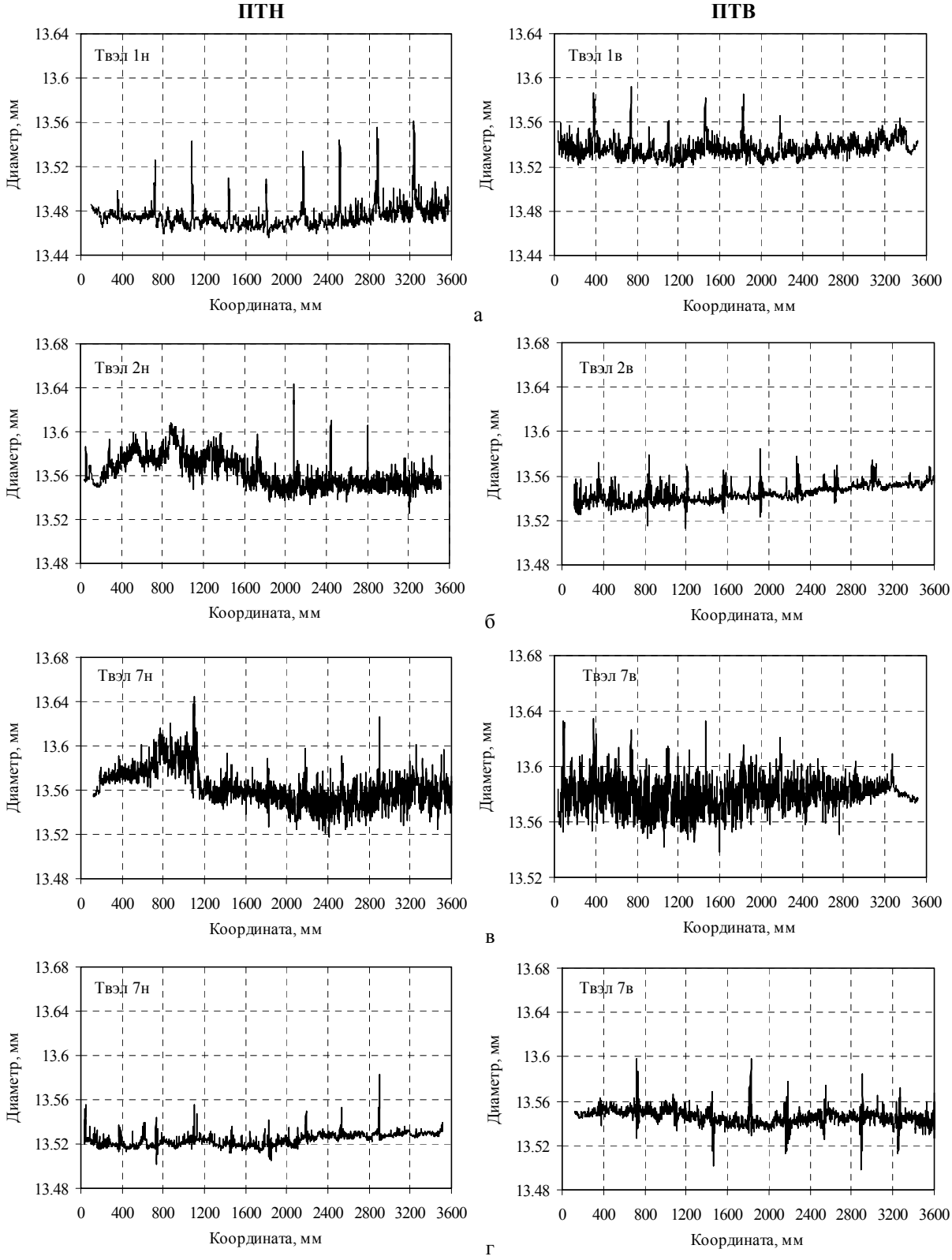


Рис. 4.31 – Типичные профилограммы твэлов ПТН и ПТВ ТВС 671 (а), 442 (б), 079 (в) и 360 (г) с циркониевыми ДР

Тенденция к уменьшению диаметра оболочек к центру АЗ (см. рис. 4.28) наблюдалась только в твэлах с фиксатором топливного сердечника из сплава Ц2М. Максимальное изменение диаметра твэлов верхнего пучка было обнаружено у наиболее удлинившегося твэла ТВС 361 (выгорание 31,3 МВт·сут/кгU). На участке центра АЗ наблюдалась корреляция величины уменьшения диаметра твэлов и величины зазора между топливом и оболочкой, определённого неразрушающим компрессионным методом (рис. 4.32).

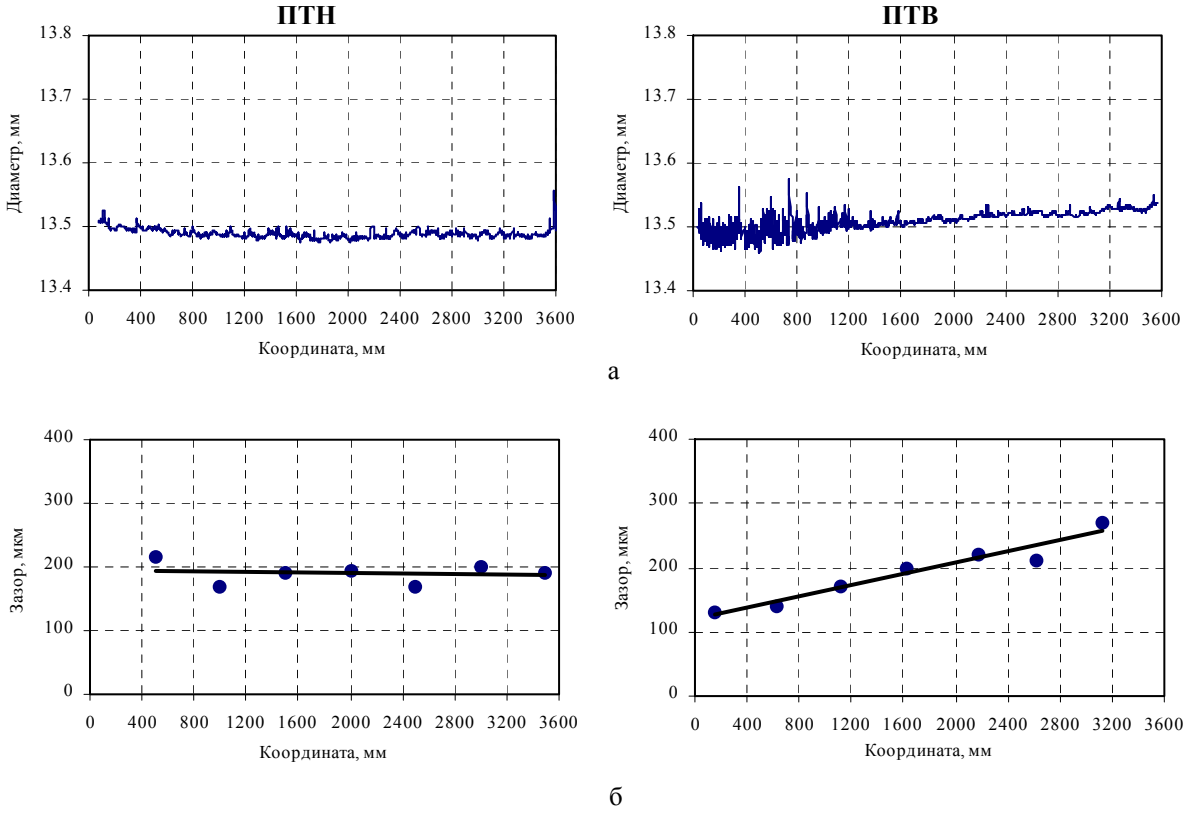


Рис. 4.32 – Типичные распределения диаметра оболочек (а) и зазора «топливо-оболочка» (б) в твэлах ПТН и ПТВ ТВС 361

Проведённые исследования показали, что в слабо удлинившихся твэлах нижнего пучка (Δl = 1,7 мм, табл. 4.5) ТВС 361 с фиксатором из сплава Ц2М диаметральный зазор «топливо–оболочка» равен ~ 200 мкм, а в сильно удлинившихся твэлах ПТВ (Δl = 7,5 мм) он уменьшается к центру АЗ до 120 мкм.

В тепловыделяющих сборках с фиксатором из сплава ЭК-173ИД это явление не обнаружено – величина зазоров между топливом и оболочкой была постоянна по всей длине твэлов ПТН и ПТВ, а удлинение твэлов двух пучков было практически одинаковым и обусловлено радиационным ростом оболочечных труб из сплава Zr-1%Nb. Вклад в удлинение твэлов эффекта «храповика» отсутствовал. Изменения диаметра не наблюдалось, зазор между топливом и оболочкой в твэлах двух пучков был одинаков и составлял 200 мкм (рис. 4.33).

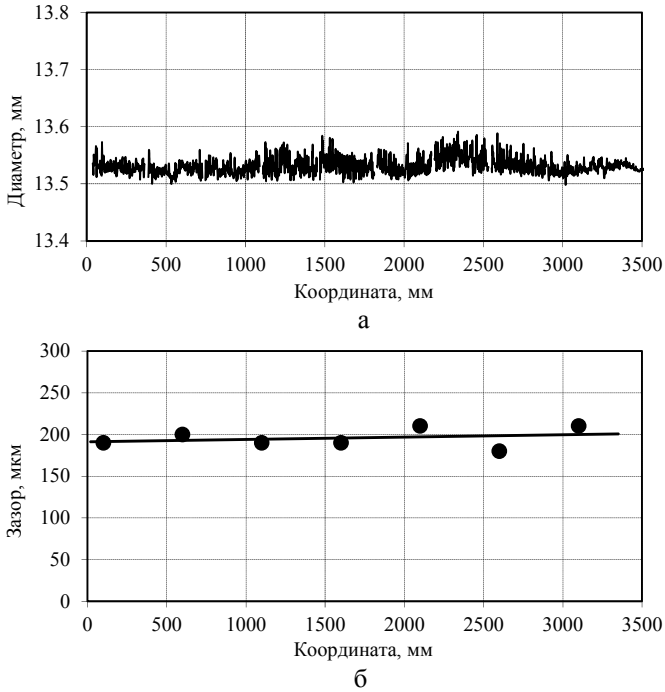


Рис. 4.33 – Распределение среднего диаметра (а) и зазора между топливом и оболочкой (б) по длине твэла ПТВ ТВС 360

4.5 Коррозионное состояние оболочек твэлов

Важнейшим критерием, определяющим работоспособность твэлов кипящего канального реактора, является коррозионная стойкость оболочек из циркониевого сплава. Кислородная коррозия приводит не только к уменьшению их толщины, но и поглощению водорода, выделяющегося в реакции окисления. Наводороживание и появление пластинчатых гидридов неблагоприятной ориентации ведёт к охрупчиванию и деградации механических характеристик циркониевых оболочек. Наряду с ухудшением работоспособности твэлов, коррозия способствует возникновению большого количества шлама (около 1500 кг/год) в контуре циркуляции теплоносителя. Осыпание продуктов коррозии может привести к засорению каналов для протекания теплоносителя, перегреву и выходу ТВС из строя, особенно при работе на малом уровне мощности и низкой скорости теплоносителя.

В материаловедческом центре НИИ атомных реакторов в течение 1997–2014 годов с целью получения экспериментальной информации по коррозионному состоянию облучённых твэлов были проведены послереакторные исследования семнадцати тепловыделяющих сборок реактора РБМК-1000, отработавших на первом и втором энергоблоках Ленинградской АЭС до различного выгорания. При этом использовался вихретоковый метод, позволяющий оперативно выявлять участки локального утонения оболочки и определять толщину оксидного слоя на её поверхности с использованием проходного и накладного датчиков соответственно. Данные вихретоковой диагностики выборочно проверялись методом оптической металлографии поперечных шлифов твэлов.

В 1980-х–2003 годах послереакторные исследования образцов твэлов реактора РБМК-1000 проводились в АО «Институт реакторных материалов» [33]. Разделка тепловыделяющих сборок и отбор фрагментов твэлов осуществлялись в радиационно-защитных камерах энергоблоков Ленинградской атомной электростанции.

4.5.1 Окисление внутренней поверхности оболочек

Внутренняя поверхность защитных оболочек твэлов из сплава Э110 в процессе эксплуатации взаимодействует с внутритвэльной газовой средой, коррозионная активность которой определяется количеством влаги, кислорода и других компонентов, выделяющихся из топлива или содержащихся в газе-наполнителе гелии.

Результаты металлографического определения максимальной толщины оксидных плёнок (ТОП) на внутренней поверхности оболочек герметичных твэлов ТВС, исследованных в ИРМ и НИИАРе, приведены в табл. 4.6.

Таблица 4.6 – Максимальная толщина оксидных плёнок на внутренней поверхности оболочек твэлов исследованных ТВС

Заводской номер ТВС	Краткое обозначение ТВС	Время изготовления, г.	Материал фиксатора топлива	Выгорание, МВт·сут/кгU	Толщина оксидной плёнки, мкм
1-18-1029*	029	1973	Ц2М	14,4	8
1-20-2603*	603	1977	Ц2М	5,1	2
2-20-0122*	122	1977	Ц2М	13,6	6
5-20-8890*	890	1979	Ц2М	15,5	6
1-20-7917*	917	1981	Ц2М	19,5	12
11-24-0405*	405	1981	Ц2М	24,6	8
1-20-9516*	516	1981	Ц2М	10,5	6
11-24-0451*	451	1981	Ц2М	4,4	2
1-20-7026*	026	1982	Ц2М	1,32	1
1-20-2319*	319	1982	Ц2М	2,0	1
2-20-6233*	233	1982	Ц2М	3,2	3
4-24-16671	671	1988	Ц2М	18,9	1
4-24-16570	570	1988	Ц2М	24,8	2
1-24-20567	567	1989	Ц2М	24,0	0**
1-24-20012	012	1989	Ц2М	24,5	0**
1-24-31587	587	1990	Ц2М	26,16	2
1-24-31608	608	1991	Ц2М	6,3	1
4-26-54626	626	1995	Ц2М	18,65	2
4-26-54361	361	1995	Ц2М	31,3	8
4-26-57997	997	1996	Ц2М	6,07	2
10-26-67761	761	1999	ЭК-173ИД	35,7	0**
10-26-70360	360	2000	ЭК-173ИД	27,5	0**
13-26-77442	442	2001	ЭК-173ИД	26,1	0**
11-28-83079	079	2003	ЭК-173ИД	26,4	0**
11-26-90342	342	2005	ЭК-173ИД	14,3	0**

* ТВС, образцы твэлов которых были доставлены в ИРМ; остальные сборки были исследованы в НИИАРе.
** Толщина оксидной плёнки меньше чувствительности микроскопа (1 мкм).

Результаты измерения толщины оксидной плёнки (ТОП) на внутренней поверхности оболочек представлены в графическом виде на рис. 4.34. Для всего массива экспериментальных данных можно выделить две закономерности изменения толщины оксидных плёнок по мере выгорания топлива. В твэлах, изготовленных в 1973–1982 годах, наблюдается рост толщины оксидной плёнки до 12 мкм, а в твэлах, изготовленных позднее, толщина оксидной плёнки при выгорании 5 МВт·сут/кгU достигает 2 мкм и практически не изменяется вплоть до выгорания 35,7 МВт·сут/кгU. Это подтверждает вывод работы [33], что по технологии производства, освоенной в 1980-х годах, внутритвэльная среда стала более инертной к циркониевой оболочке.

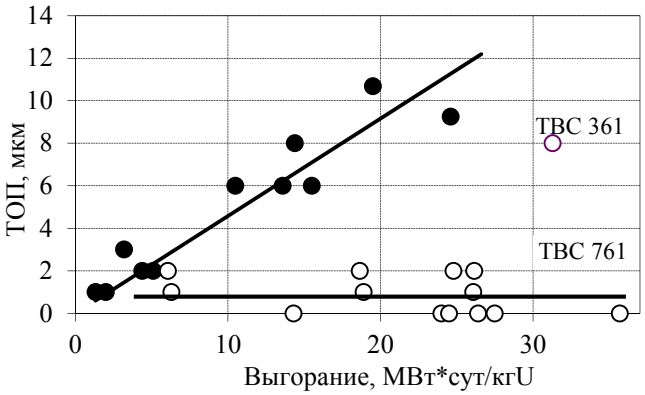


Рис. 4.34 – Зависимость толщины оксидной плёнки на внутренней поверхности оболочек твэлов от среднего по ТВС выгорания топлива: ● — ТВС, изготовленные в 1973–1982 годах; ○ — ТВС, изготовленные в 1988–2005 годах

Исключение составляет только ТВС № 361, в которой на внутренней поверхности оболочек твэлов верхнего пучка были обнаружены оксидные плёнки бóльшей толщины. Полученный результат не является случайностью, обусловленной браком по чистоте газа-наполнителя или использованием некондиционного топлива. В данном случае начал проявляться механизм окисления, обнаруженный ранее в твэлах водо-водяных реакторов.

В твэлах водо-водяных энергетических реакторов, отработавших до выгорания 40 МВт·сут/кгU, на внутренней поверхности оболочек наблюдались оксидные плёнки толщиной от 1 до 10 мкм [34]. Вариации ТОП были обусловлены неравномерностью контакта топлива с оболочкой твэла. Окисление происходило лишь в местах их плотного соприкосновения, что указывало на перераспределение кислорода к оболочке посредством диффузии в твёрдой фазе, а газовая составляющая переноса была существенно меньше. Исследования твэлов водо-водяного энергетического реактора с большим выгоранием и плотной усадкой оболочки на топливо подтвердили правильность этих выводов. При полном отсутствии зазора толщина оксида достигала 15 мкм и была примерно одинаковой по всему периметру оболочки твэла.

Анализ результатов оптической металлографии показал, что в твэлах верхнего пучка ТВС № 361 с максимальным удлинением (7,5 мм) на участках контакта между топливом и оболочкой твэла толщина оксидных плёнок достигала 4–8 мкм, а в твэлах нижнего пучка с удлинением 1,7 мм и зазором более 200 мкм толщина оксидной плёнки не превышала

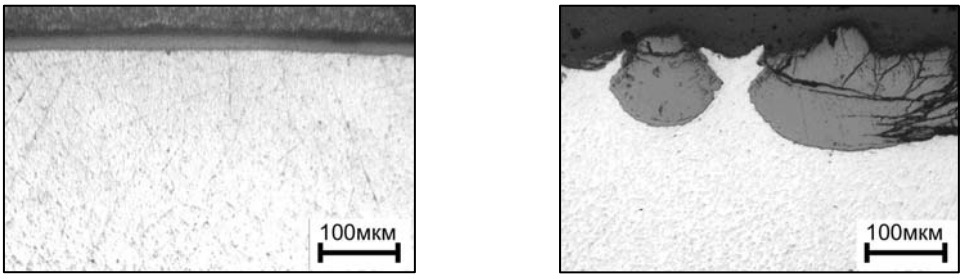
1 мкм. Аномально большое изменение длины и уменьшение диаметра твэлов верхнего пучка в этой сборке было связано с использованием в них фиксатора старой конструкции из сплава Ц2М [24]. В переходных режимах работы реактора такой фиксатор не обеспечивал возврат топливного сердечника в исходное положение после сброса мощности, что зачастую приводило к заклиниванию фрагментированных таблеток и при очередном выходе на мощность вызывало необратимую деформацию оболочки.

В твэлах с фиксатором новой конструкции, изготовленным из сплава ЭК-173ИД, окисления внутренней поверхности оболочек не наблюдалось. Так, например, в ТВС № 761, отработавшей до большего, чем ТВС 361 выгорания (35,7 МВт·сут/кгU), удлинение твэлов, обусловленное в основном радиационным ростом, в обоих пучках было небольшим, зазор между топливом и оболочкой остался значительным, а коррозия внутренней поверхности оболочек отсутствовала. Следует отметить, что увеличение окисления на внутренней поверхности нежелательно, так как оно повышает вероятность заклинивания топливных таблеток в условиях теплосмен.

4.5.2 Окисление внешней поверхности твэлов

Исследования, проведённые в ИРМ и НИИАР, позволили обнаружить два вида коррозии наружной поверхности твэлов реактора РБМК-1000: равномерную и нодулярную (очаговую). При равномерной коррозии на поверхности оболочек твэлов формируются небольшие по толщине оксидные плёнки, хорошо сцеплённые с металлом. Во временном интервале эксплуатации 1500–3000 суток скорость этого типа коррозии уменьшается, и толщина оксидных плёнок не превышает 20 мкм. Очевидно, что равномерная оксидная плёнка такой толщины не может ограничивать эксплуатационный ресурс твэлов.

Кроме равномерного окисления на оболочках твэлов реактора РБМК-1000 под дистанционирующими решётками и между ними была обнаружена нодулярная коррозия (рис. 4.35), которая при автоклавных испытаниях образцов из сплава Zr–1 %Nb не наблюдалась.



а б

Рис. 4.35 – Фрагменты поперечного шлифа оболочки твэла на участке равномерной (*а*) и нодулярной (*б*) коррозии

Наличие нодулярной коррозии связывают с применением в реакторе РБМК-1000 нейтрального бескоррекционного водно-химического режима, при котором отсутствует регулирование и нормирование радиолитического кислорода. Склонность сплава Э110 к этому виду коррозии – фактор, способный ограничить глубину выгорания и продолжительность эксплуатации тепловыделяющих сборок реактора РБМК-1000.

Вопросам изучения очаговой коррозии посвящено большое количество российских и зарубежных публикаций. Однако до настоящего времени отсутствует полное представление о механизмах возникновения и развития этого явления, вероятно, из-за многообразия инициирующих факторов и трудностей, связанных с их воспроизводимостью в реакторных экспериментах.

Появление и развитие нодулярной коррозии на изделиях из циркониевых сплавов связывают как с внешними (эксплуатационными), так и внутренними (структурными) факторами. К основным внешним факторам относятся химический состав теплоносителя, концентрация кислорода и водорода, температура поверхности, плотность теплового и нейтронного потоков, наличие отложений на оболочке. Легирующий и примесный состав, природа, величина и распределение частиц второй фазы, параметры элементарной ячейки, текстура, качество подготовки поверхности (шлифование, травление, анодирование) являются внутренними факторами, определяющими появление и рост очагов коррозии.

Среди существующих моделей нодулярной коррозии циркониевых сплавов наибольшее предпочтение получила электрохимическая модель, объясняющая появление нодулей (локальных оксидных образований линзообразной формы) наличием в сплавах интерметаллических соединений циркония с примесными или с легирующими элементами. В рамках этой модели считается, что интерметаллические частицы увеличивают электронную проводимость оксидных плёнок и усиливают анодный процесс образования ZrO_2. Опыт эксплуатации цирконий–ниобиевых сплавов (Zr–1 %Nb, Zr–2,5 %Nb) подтвердил их меньшую склонность к очаговой коррозии по сравнению с циркалоем, в котором присутствуют крупные интерметаллиды [35–39].

Характерные особенности нодулярного окисления оболочек твэлов реактора РБМК-1000 были выявлены в процессе послереакторных исследований тепловыделяющих сборок, отработавших на ЛАЭС до выгорания 6,1–35,7 МВт·сут/кгU [40–46]. Для изучения коррозионного состояния твэлов использовали вихретоковый метод контроля, с помощью которого возможно определение утонения оболочки и толщины оксидной плёнки на её наружной поверхности при использовании проходного и накладного датчиков соответственно [20]. Толщину оксидной плёнки, определённую ВТ-методом, выборочно

проверяли металлографическим способом при анализе структуры поперечных шлифов твэлов.

Нодулярная коррозия наблюдалась как под, так и между дистанционирующими решётками пучков твэлов. Рис. 4.36 иллюстрирует макро- и микроструктуру поперечного шлифа одного из твэлов ПТН ТВС 587 на участке максимального ВТ-сигнала от утонённой оболочки под стальной решёткой. Молярные объёмы ZrO_2 и сплава Zr-1%Nb существенно отличаются, поэтому «нодуль» значительно выступает над поверхностью оболочки. Максимальная толщина оксидов под пуклёвками стальных ДР в этой сборке составила около 400 мкм при утонении оболочки с 900 до 670 мкм. Толщина оксидной плёнки на поверхности твэла между дистанционирующими решётками не превышала 70 мкм (рис. 4.36, б).

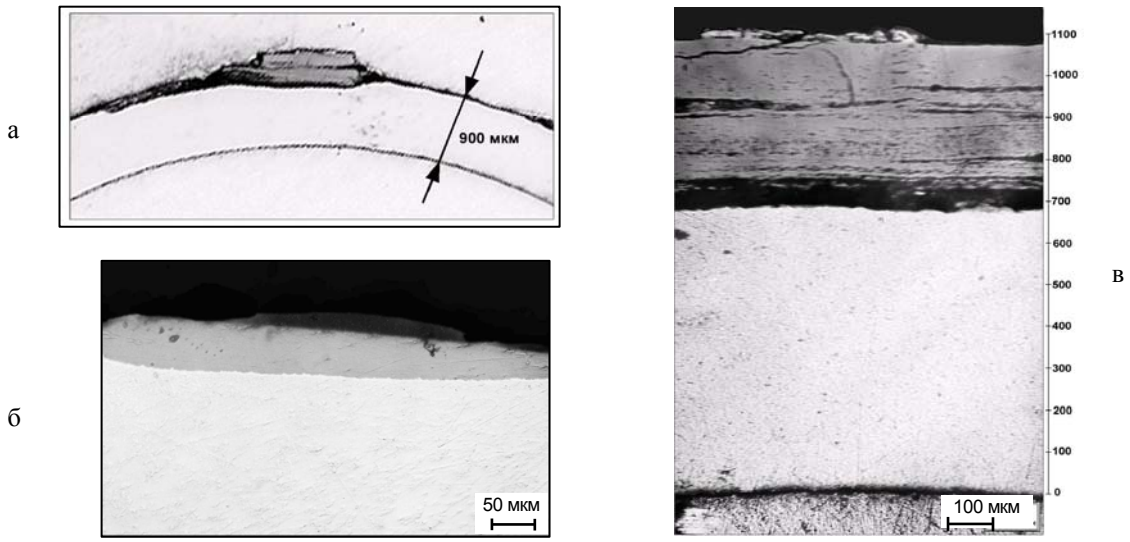


Рис. 4.36 – Внешний вид повышенного окисления оболочки под СДР (а), микроструктура оболочки между (б) и под дистанционирующими решётками (в) твэла ТВС № 587

Для нодулярной коррозии характерна значительная неравномерность распределения по длине и периметру оболочек твэлов, поэтому измерения толщины оксидов проводились не только в аксиальном, но и азимутальном направлениях. Такая организация послереакторных исследований позволила определить для каждой ТВС максимальную толщину оксидов и их местоположение.

В табл. 4.7 приведены параметры коррозионного состояния наружной поверхности твэлов, а также основные характеристики конструкции и эксплуатации исследованных ТВС.

Таблица 4.7 – Максимальная толщина оксидов на поверхности твэлов ТВС, отработавших на ЛАЭС до различного выгорания

Заводской номер ТВС	Условный номер ТВС	Материал ДР	Время работы на мощности, сутки	Средняя мощность ТВС, МВт	Выгорание топлива, МВт·сут/кгU	Макс. толщина оксидов между ДР, мкм	Макс. толщина оксидов под ДР, мкм
4-26-57997-96	997	сталь	336	2,0	6,1	20	35
1-24-31608-91	608	сталь	573	1,3	6,3	40	100
11-26-90342-05	342	сталь	728	2,2	14,3	100	240
4-26-54626-95	626	сталь	978	2,1	18,6	55	285
4-24-16671-88	671	Э110	1077	2,0	18,9	70	150
1-20-7917-81	917	сталь	1093	2,0	19,5	55	270
4-24-6004-87	004	сталь	1343	2,1	25,1	210	380
11-28-83079-03	079	Э110	1387	2,2	26,4	175	225
10-26-70360-00	360	Э110	1514	2,0	27,5	60	270
1-24-31587-90	587	сталь	1525	2,0	26,2	70	400
10-26-90424-05	424	сталь	1709	1,9	28,4	100	350
4-26-54361-95	361	сталь	2000	1,7	31,3	100	450
4-24-16570-88	570	Э110	2304	1,2	24,8	190	300
10-26-67761-99	761	сталь	2358	1,7	35,7	100	230
1-24-20567-89	567	сталь	2654	1,0	24,0	240	540
1-24-20012-89	012	сталь	3101	0,9	24,5	345	615

Коррозия оболочек на участках между дистанционирующими решётками. При исследовании влияния параметров эксплуатации на нодулярную коррозию из анализа были исключены результаты измерений для ТВС №№ 342, 079 и 004, имевших существенные отличия от остальных сборок. В ТВС № 342 использовались твэлы, не прошедшие финишные операции травления и анодирования. Оболочки твэлов сборки № 079 были изготовлены из сплава Э110 на основе губчатого, а не электролитического циркония. ТВС № 004 после двух лет эксплуатации 10 лет находилась в прореакторном бассейне выдержки, а затем вновь была поставлена на облучение. Это привело к большему (в 5 раз) содержанию меди в отложениях продуктов коррозии на поверхности её твэлов по сравнению с остальными сборками, которые находились в бассейне выдержки не более трёх лет [47]. Как известно, наличие меди способствует образованию плотных отложений, что существенно ускоряет окисление оболочек в условиях кипящего теплоносителя [37].

На рис. 4.37 в графическом виде представлены результаты измерения максимальной толщины нодулей на участках твэлов между ДР. Из анализа рисунка 4.37, а следует, что в группе сборок с мощностью энерговыделения $P_{ТВС}$ = 1,7–2,1 МВт прирост толщины оксидов происходил линейно с увеличением выгорания и составлял около 3 мкм на 1 МВт·сут/кгU, а в ТВС 012, 567 и 570, работавших на мощности 0,9–1,2 МВт, оболочки твэлов окислялись значительно интенсивнее (8–14 мкм на 1 МВт·сут/кгU). Данные, при-

ведённые на рис. 4.37, б, подтверждают, что степень коррозии оболочек зависит не только от длительности эксплуатации, но и от уровня P_{TBC}: в сборках с энерговыделением 1,7–2,1 МВт толщина оксидов росла линейно в среднем на 0,05 мкм/сут, а в ТВС 012, 567 и 570 – на 0,1 мкм/сут. Скорость роста толщины нодулей определялась по формуле:

$$V_{нод.} = h^{макс}_{междуДР} / t_{эфф.}, \qquad (4.4)$$

где $h^{макс}_{междуДР}$ – максимальная толщина оксидов на участке между ДР, мкм;

$t_{эфф.}$ – продолжительность эксплуатации ТВС на мощности, сут.

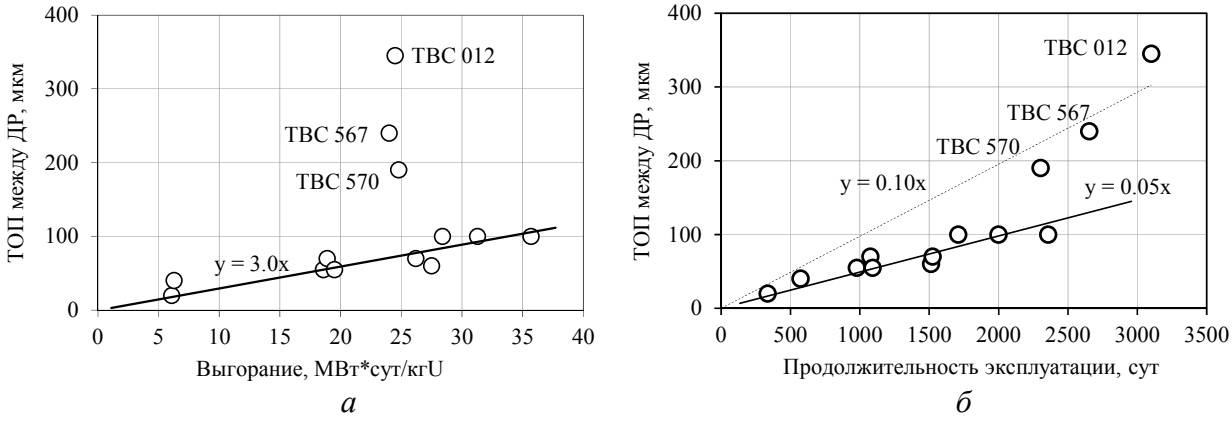


Рис. 4.37 – Максимальная толщина нодулей на поверхности оболочек твэлов между ДР в зависимости от выгорания (*а*) и продолжительности эксплуатации на мощности (*б*)

Таким образом, для более точного прогнозирования развития нодулярной коррозии на поверхности твэлов РБМК необходимо учитывать не только $t_{эфф.}$, как в работах [45, 48, 49], но и мощность энерговыделения сборки. Зависимость между P_{TBC} (в МВт) и скоростью роста толщины нодулей (в мкм/сут) на участках между ДР (рис. 4.38) хорошо описывается степенной функцией:

$$V_{нод.} \approx 0{,}09 P_{TBC}^{-0{,}9}. \qquad (4.5)$$

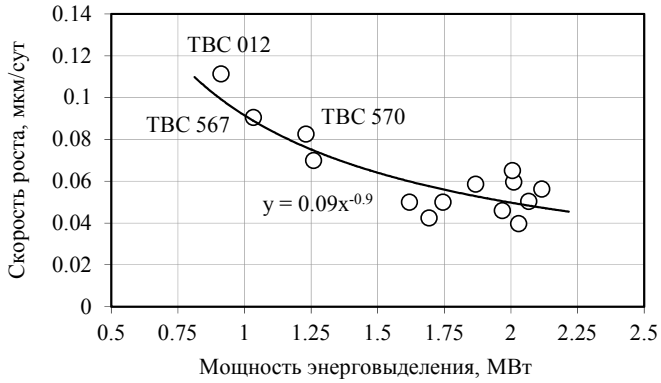


Рис. 4.38 – Зависимость скорости роста максимальной толщины нодулей между ДР от мощности ТВС

Замедление роста оксидов с повышением мощности ТВС может быть обусловлено изменением теплогидравлических параметров потока теплоносителя, приводящим к улучшению теплосъёма с поверхности оболочки и снижению её температуры [50]. Не исключено также влияние окислительных продуктов радиолиза, концентрация которых у поверхности твэлов перераспределяется в зависимости от скорости и фазового состояния теплоносителя [51, 52]. Тепловыделяющие сборки пониженной мощности эксплуатировались в технологических каналах на периферии активной зоны реактора, где скорость теплоносителя была существенно меньше, чем в районе плато.

Используя формулы (4.4) и (4.5), получим уравнение для прогнозного расчёта максимальной толщины нодулей на оболочках твэлов реактора РБМК-1000 по двум эксплуатационным факторам – $t_{эфф.}$ и $P_{ТВС}$:

$$h^{макс}_{междуДР} \approx 0{,}09 P^{-0{,}9}_{ТВС} t_{эфф.} \,. \qquad (4.6)$$

Для исследованных ТВС с длительностью эксплуатации 300–3000 суток и мощностью энерговыделения 0,9–2,1 МВт наблюдается весьма высокая корреляция между максимальной толщиной нодулей на участках между ДР и параметром $X = P^{-0{,}9}_{ТВС} t_{эфф.}$ (рис. 4.39).

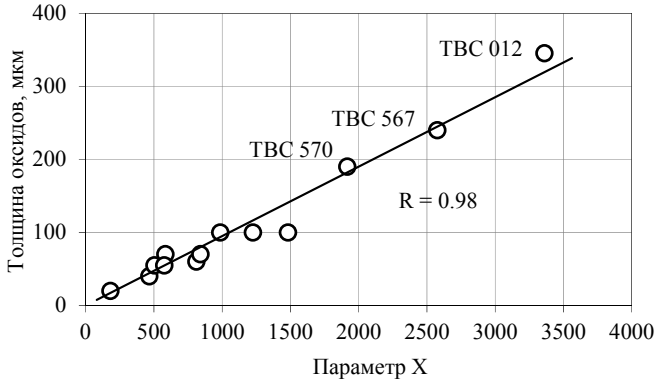


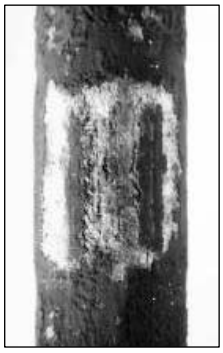
Рис.4.39 – Зависимость толщины оксидов на участках между ДР от параметра X, учитывающего влияние $P_{ТВС}$ и $t_{эфф.}$

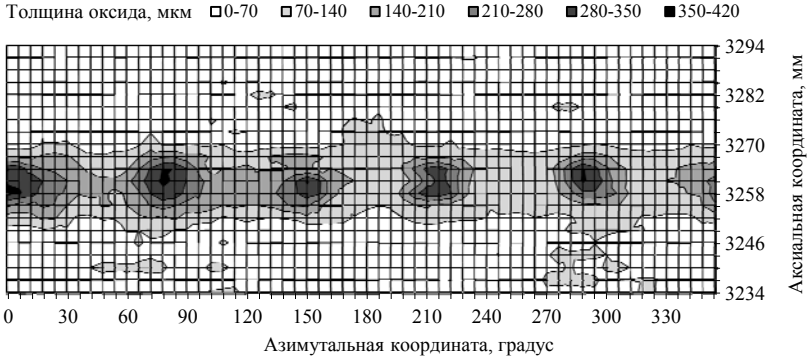
Коррозия оболочек на участках под дистанционирующими решётками. При анализе закономерностей коррозии под ДР были исключены результаты измерений по ТВС 761, имевшей люфты в ячейках решёток и явные признаки механического разрушения оксидного слоя в местах контакта с ними.

Из экспериментальных данных, представленных в табл. 4.7, следует, что оболочки твэлов окисляются под дистанционирующими решётками в значительно большей степени, чем на участках между ними. Ускорение окисления оболочек под решётками может быть обусловлено так называемой теневой коррозией (shadow corrosion), которую наряду с рав-

номерной и нодулярной относят к числу основных видов коррозии циркониевых сплавов в условиях реакторов с кипящим теплоносителем [53]. В настоящее время нет полного понимания всех тонкостей механизма теневой коррозии, но установлено, что теоретически она хорошо согласуется с гальванической и наблюдается только в радиационных полях [54]. В реакторах BWR, где впервые была обнаружена теневая коррозия, на твэлах она появлялась под дистанционирующими решётками в виде пятен, по форме напоминавших тень от ячеек ДР [55].

Аналогичный эффект был выявлен при визуальном осмотре и измерении азимутального распределения толщины оксидов на оболочках твэлов реактора РБМК-1000 в районе взаимодействия со стальными дистанционирующими решётками (рис. 4.40). Результаты исследований показали наличие участков повышенного окисления в виде поясков шириной 16–20 мм с максимумами под пуклёвками ячеек ДР. Усиление коррозии оболочек могло быть обусловлено наличием гальванической пары из разнородных материалов «циркониевая оболочка – стальная ДР».





а б

Рис. 4.40 – Внешний вид оболочки твэла (а) и распределение толщины оксидов (б) на участке под стальной дистанционирующей решёткой

На рис. 4.41 приведены результаты измерения толщины оксидов под пуклёвками ячеек стальных и циркониевых ДР. Из анализа представленных данных следует, что с увеличением продолжительности эксплуатации наблюдается постепенное замедление процесса коррозии. Для ТВС, отработавших практически в идентичных условиях, под циркониевыми ДР зарегистрировано меньшее окисление оболочек, чем под

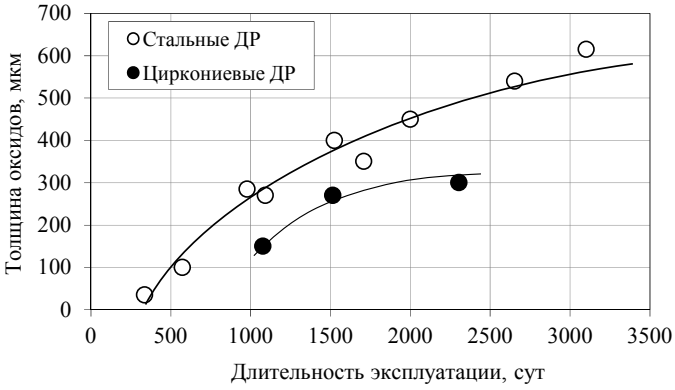


Рис. 4.41 – Максимальная толщина оксидов под пуклёвками ячеек стальных и циркониевых ДР

стальными. Поскольку конструкции решёток были одинаковыми, то разница в окислении связана, очевидно, с заменой стали на циркониевый сплав. Следует отметить, что под циркониевыми ДР пояски повышенной коррозии на поверхности твэлов были выражены в значительно меньшей степени. Исключение составили только твэлы ТВС № 079 с оболочками из губчатого циркония [56] (см. рис. 3.2, 3.3).

Исходя из вышеизложенного, можно предположить, что коррозия под дистанционирующими решётками является результатом двух процессов, идущих в основном автономно: нодулярной коррозии и дополнительной, возникающей под ДР из-за близкого расположения материалов с разными электрохимическими потенциалами (условимся называть её «теневой»). Тогда вклад «теневой» коррозии в первом приближении:

$$h_{тен.} = h_{подДР} - h_{междуДР} . \qquad (4.7)$$

где $h_{подДР}$ и $h_{между\ ДР}$ – толщина оксидов под решётками и между ними, мкм.

Для расчёта $h_{тен.}$ в качестве исходных значений $h_{подДР}$ использованы результаты определения максимальной толщины нодулей из табл. 4.7, а значения $h_{между\ ДР}$ получены при измерениях на участках рядом с решётками, под которыми была выявлена наибольшая коррозия оболочек. Результаты вычислений по формуле (4) для сборок со стальными ДР приведены на рис. 4.42, из анализа которого следует, что по мере эксплуатации «теневая» коррозия замедляется и при толщине оксидов около 450–500 мкм почти прекращается. Вероятно, оксидный слой такой толщины снижает ток гальванической пары «оболочка – стальная ДР» до пренебрежимо малых значений.

Высказанное предположение хорошо согласуется с данными работы [54], указывающими на зависимость скорости теневой коррозии от суммы сопротивлений оксидного слоя и водного зазора между оболочкой и ячейкой ДР. Поскольку сопротивление оксида значительно превышает сопротивление воды в кипящем реакторе, то первоначально, при

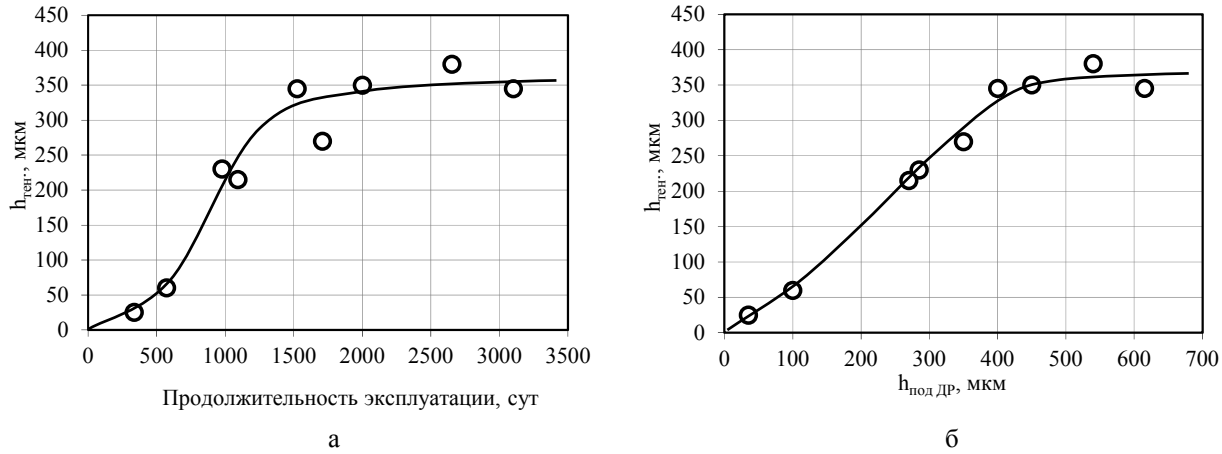


Рис. 4.42 – Взаимосвязь величины «теневой» коррозии под стальными ДР с длительностью эксплуатации (*а*) и общей толщиной оксидного слоя (*б*)

малой толщине оксидного слоя, скорость коррозии максимальна, но по мере его роста скорость постепенно снижается до нуля.

Таким образом, возможной причиной замедления окисления твэлов реактора РБМК-1000 под пуклёвками ячеек ДР с ростом продолжительности эксплуатации является снижение скорости теневой коррозии по мере утолщения оксидов. Не исключено, что установка изолятора на границе раздела «оболочка твэла – пуклёвка ячейки ДР» позволит значительно уменьшить теневую коррозию в ТВС реактора РБМК-1000.

Следует отметить, что продукты теневой коррозии уменьшают зазор между ячейкой ДР и оболочкой, ухудшают теплосъём на этом участке и соответственно ресурсные характеристики твэла. Поэтому указанная разновидность окисления требует дальнейшего изучения, с привлечением статистически более значимой выборки экспериментальных данных.

С помощью вихретокового контроля были выявлены случаи существенного отличия в величине ТОП на оболочках твэлов, стоящих рядом в составе одной ТВС [20, 56]. На рис. 4.43, а ,б приведены в качестве примера ВТ-диаграммы твэлов 8 и 9 из нижнего пучка ТВС 671, отработавшей до выгорания 18,9 МВт·сут/кгU. Визуальный осмотр подтвердил наличие у твэла 8 значительной коррозии и практически полное её отсутствие у твэла 9 с минимальными ВТ-сигналами под и между ДР (рис.4.43, в, г).

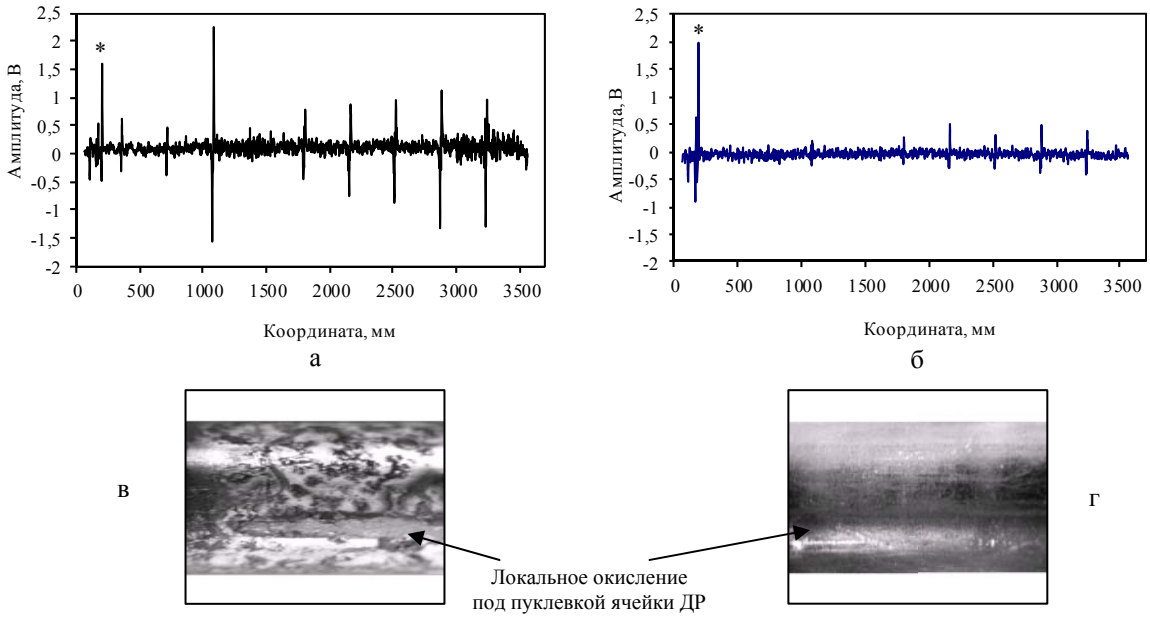


Рис. 4.43 – ВТ-диаграммы (а, б) и внешний вид поверхности (в, г) твэлов 8н и 9н соответственно ТВС 671 (* – сигнал от фиксатора топливного сердечника)

На основании проведённого анализа результатов послереакторных исследований коррозионного состояния твэлов ТВС реактора РБМК-1000 можно сделать следующие выводы:

– в твэлах с фиксатором топливного сердечника из сплава ЭК-173ИД окисление внутренней поверхности оболочек практически отсутствует (менее 1 мкм). Фиксатор такого типа обеспечивает плотное поджатие топливного сердечника во всех штатных режимах работы реактора, что снижает вероятность заклинивания таблеток топлива и их взаимодействия с оболочкой твэла;

– наряду с временем облучения твэлов важнейшим эксплуатационным фактором, влияющим на скорость нодулярной коррозии наружной поверхности оболочек, является средняя мощность энерговыделения ТВС. Уменьшение этого параметра с 2,1 до 0,9 МВт приводит к ускорению окисления более чем в 2 раза;

– дополнительное окисление твэлов РБМК под стальными ДР по условиям появления, внешним признакам и кинетике развития имеет характерные черты теневой коррозии. Не исключено, что снижение скорости этого процесса по мере роста толщины оксидной плёнки приводит к замедлению окисления оболочек под пуклёвками ячеек дистанционирующих решёток после эксплуатации ТВС в течение 1000–1500 суток;

– при выяснении причин появления отличий в коррозионном состоянии оболочек соседних твэлов из одной ТВС следует отдать предпочтение внутренним факторам, определяющим сопротивление коррозии сплава Э110. Возможно, специальные исследования стойких к окислению твэлов, постоянно выявляемых ВТ-методом в составе ТВС РБМК, позволят найти способ защиты от нодулярной коррозии, связанный с технологией изготовления оболочечных труб, оптимизацией химического состава или снижением содержания примесей в сплаве Э110.

4.5.3 Аксиальная и азимутальная асимметрия окисления оболочек

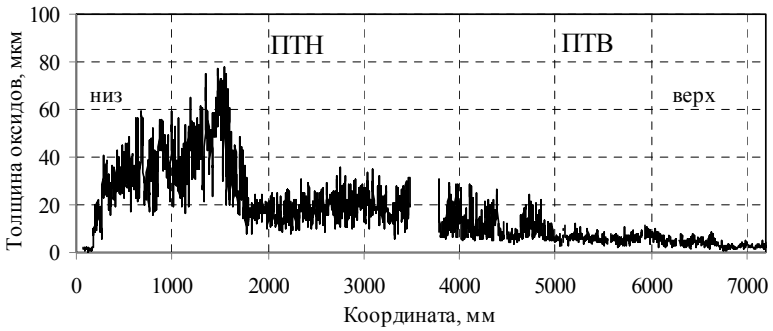
На рис. 4.44 приведены типичные распределения средней толщины оксидов по длине твэлов нижнего и верхнего пучков ТВС, отработавших в технологических каналах мощностью около 2 МВт до различного выгорания топлива. Из анализа полученных результатов следует, что:

– наибольшие по толщине оксиды наблюдаются в нижней части твэлов ПТН;

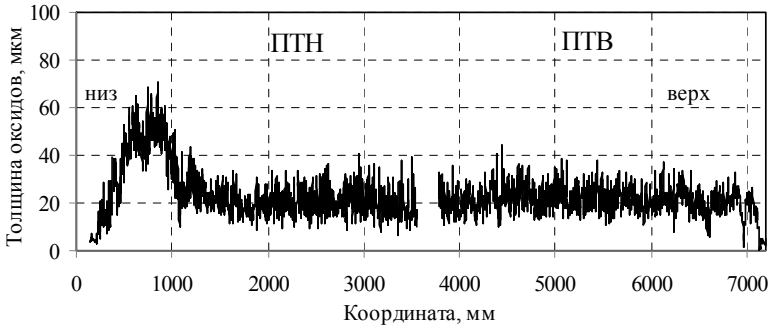
– выше участка с максимальным окислением происходит резкий спад толщины оксидного слоя;

– протяжённость зон повышенного окисления оболочек варьируется в широком диапазоне.

Из работ, обобщающих опыт изучения коррозионного состояния твэлов тепловых реакторов с водным теплоносителем, известно, что скорость окисления оболочек из циркониевых сплавов, наряду с другими факторами, существенно зависит от дозы радиаци-



а



б

Рис. 4.44 – Распределение средней толщины оксидов по длине твэлов ТВС № 13-26-77442 (а) и № 10-26-67761 (б), отработавших до выгорания 26,1 и 35,7 МВт·сут/кгU соответственно (результаты измерений под ДР из графиков исключены)

онного облучения и температуры. Облучение влияет на физико-химические характеристики циркониевой оболочки и окружающей среды посредством радиолизного, деструктирующего и фоторадиационного эффектов [57]. Первый эффект обусловлен повышением коррозионной активности водного теплоносителя из-за появления окисляющих продуктов радиолиза, второй – ухудшением структуры оксидной плёнки вплоть до полной потери ею защитных свойств, третий (фоторадиационный) связан с изменением полупроводниковых характеристик оксида при поглощении энергии излучения. Рост температуры приводит к ускорению процесса коррозии.

При изучении коррозионного состояния оболочек твэлов ВВЭР было обнаружено, что толщина оксидных плёнок растёт пропорционально увеличению температуры оболочки. На рис. 4.45, а представлены распределения температуры теплоносителя и наружной поверхности твэла по высоте активной зоны (АЗ) реактора ВВЭР-1000 [58]. Изменение температуры некипящего теплоносителя T(z) рассчитывалось по формуле:

$$T(z) = T_{вх} + \left(\frac{1}{G_k G_p}\right) f_t \int_0^z q_v(z)dz\,, \qquad (4.8)$$

где $q_v(z)$ – удельное тепловыделение по высоте активной зоны;

$T_{вх}$ – температура теплоносителя на входе в ТВС;

G_k – расход теплоносителя;

G_p – удельная теплоёмкость водного теплоносителя;

f_t – площадь поперечного сечения топлива в твэле.

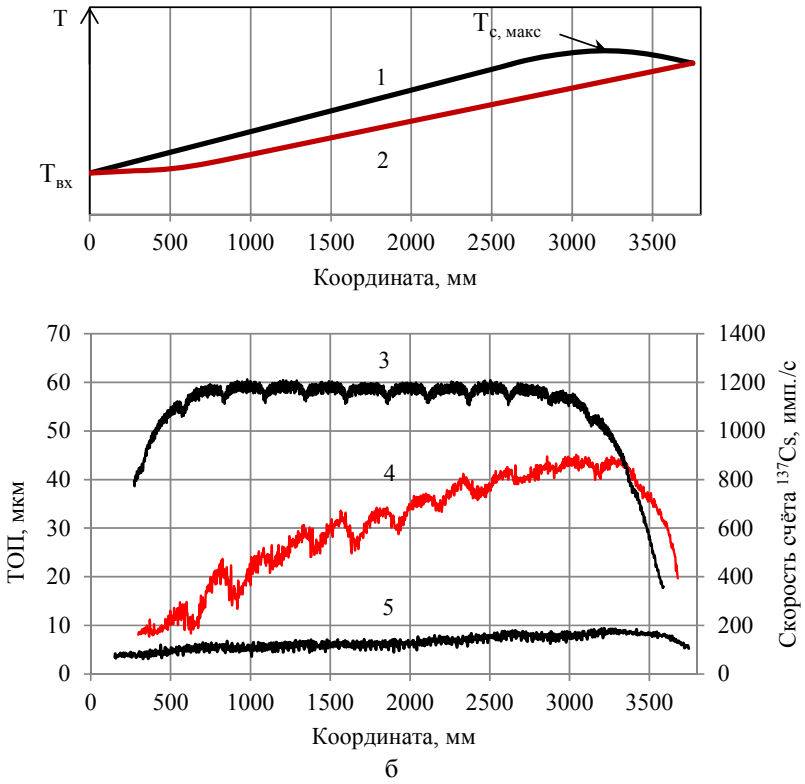
Температура наружной поверхности стенки (оболочки) твэла $T_c(z)$ определялась из уравнения:

$$T_c(z) = T(z) + \frac{q_c(z)}{\alpha(z)}, \qquad (4.9)$$

где $q_c(z)$ – удельный тепловой поток с единицы площади твэла;

$\alpha(z)$ – коэффициент теплоотдачи от стенки твэла к теплоносителю.

На рис. 4.45, б представлены типичные распределения толщины оксидной плёнки (ТОП) по длине твэлов с оболочками из циркониевых сплавов Э110 (Zr-1%Nb) и Э635 (Zr-1,2%Sn-1,0%Nb-0,35%Fe). Величина ТОП измерялась методом вихретокового сканирования твэлов с использованием накладного датчика. Выборочные измерения толщины оксидных плёнок способом оптической металлографии поперечных шлифов твэлов показали хорошее совпадение с данными неразрушающего ВТ-контроля.



б

Рис. 4.45 – Распределения характеристик теплоносителя и твэлов ВВЭР-1000 по высоте АЗ: 1 – температура оболочки, 2 – температура теплоносителя, 3 – накопление продукта деления ^{137}Cs в топливе, 4 – ТОП на поверхности оболочек из сплава Э635, 5 – ТОП на поверхности оболочек из сплава Э110

Из анализа графиков, приведённых на рис. 4.45, следует, что ТОП растёт от низа к верху твэла пропорционально увеличению температуры оболочки. Наличие максимума в верхней четверти АЗ объясняется тем, что выше этого участка оболочки значение $q_v(z)$ падает. Распределение ^{137}Cs показывает уменьшение флюенса на краю АЗ, а также на уча-

стках с дистанционирующими решётками (ДР), происходящее из-за паразитного захвата нейтронов компонентами циркониевого сплава. Наличие дозной зависимости скорости коррозии циркониевых оболочек от потока нейтронов подтверждается падением величины ТОП в районе расположения ДР на 5–10 %, а также в верхней части твэла.

На основании вышеизложенного можно предположить, что в РБМК, как и в ВВЭР коррозионное состояние оболочек определяется температурой и профилем флюенса нейтронов по длине твэлов. При этом следует учитывать, что на большей части АЗ кипящего канального реактора температура оболочек выше температуры насыщения воды при заданном давлении, и на поверхности твэлов возникает пузырьковое кипение. Вследствие переноса пузырями пара скрытой теплоты парообразования, а также из-за более интенсивного перемешивания жидкости у поверхности нагрева коэффициент α(z) при объёмном кипении существенно больше, чем в твэлах ВВЭР, омываемых некипящим теплоносителем.

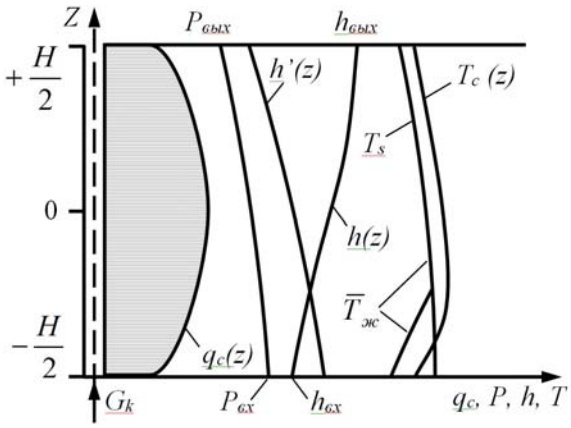


Рис. 4.46 – Распределение по высоте парогенерирующего канала средних значений плотности теплового потока $q_c(z)$, давления P, энтальпии h(z), температуры теплоносителя $T_ж$ и оболочки твэла $T_c(z)$

Для реакторов, охлаждаемых кипящей водой, на первое место выдвигаются вопросы теплообмена и гидродинамики двухфазного потока при течении пароводяной смеси по высоте технологических каналов (ТК). В силу сложности и малой изученности переноса тепла при пузырьковом кипении практические расчёты теплоотдачи базируются на полуэмпирических формулах, с помощью которых, однако, удаётся получить полезные соотношения для определения распределения температуры по длине оболочек твэлов РБМК.

На рис. 4.46 представлены основные теплофизические параметры, реализуемые в парогенерирующем канале кипящего реактора с размещённой в нём тепловыделяющей сборкой [50]. Плотность теплового потока по высоте канала изменяется по косинусоидальному закону, давление насыщения на выходе из АЗ считается заданным, а гидравлическое сопротивление составляет $P_{вх} - P_{вых}$ = 3–4 бар. Поскольку падение давления по высоте ТВС происходит линейно, с помощью таблиц термодинамических свойств водяного пара определяют профиль энтальпии насыщения воды h'(z) и температуры насыщения $T_s(z)$. Изменение энтальпии по высоте ТК находят из соотношения:

$$h(z) = h_{вх} + \frac{f_k}{G_k} \int_{-h/2}^{z} q_v(z)dz\,, \qquad (4.10)$$

где $h_{вх}$ – энтальпия пароводяной смеси, поступающей на вход технологического канала;

G_k – расход теплоносителя через ТК;

f_k – суммарная площадь поперечного сечения топливных стержней ТВС;

$q_v(z)$ – мощность тепловыделения на координате z.

Точка пересечения h(z) с h'(z) соответствует началу кипения водного теплоносителя, когда его температура $T_ж$ достигает температуры насыщения T_s. В технологическом канале кипящего реактора температура воды у оболочки твэла выше, чем в ядре потока. Поэтому можно представить случай, когда среднемассовая температура жидкости остаётся ниже температуры насыщения, но на поверхности оболочки уже возникает кипение. Для этого необходимо, чтобы температура оболочки несколько превышала температуру насыщения. Данный процесс называется кипением недогретой жидкости или кипением с недогревом.

Таким образом, парогенерирующий канал разбивается на три участка, для каждого из которых используется своя полуэмпирическая формула определения температуры стенки твэла T_c. Если на входе в сборку $T_c < T_s$, то имеет место однофазная конвекция (экономайзерная зона):

$$T_c(z) = \overline{T}_ж(z) + \frac{q_c(z)}{\alpha_{конв.}}\,, \qquad (4.11)$$

где $\overline{T}_ж(z)$ – среднемассовая температура жидкости в данном сечении;

$\alpha_{конв.}$ – коэффициент теплообмена при однофазной конвекции.

На участке кипения с недогревом ($T_c(z) > T_s > T_ж(z)$):

$$T_c = T_s(z) + \frac{q_c(z) - \alpha_{конв.}(T_s - \overline{T}_ж)}{\alpha_{тр}}\,, \qquad (4.12)$$

где $\alpha_{тр} = \alpha_{конв.}\sqrt{1 + (\alpha_{кип.}/\alpha_{конв.})^2}$ – коэффициент теплоотдачи при кипении в трубах в условиях вынужденного движения;

$\alpha_{кип} \approx 3{,}1 p^{0{,}25} q_c^{2/3}$ (p – давление, бар; q_c – тепловой поток, Вт/м^2) – коэффициент теплоотдачи при развитом кипении воды в трубах.

На участке с объёмным кипением ($\overline{T}_ж = T_s$):

$$T_c(z) = T_s + \frac{q_c(z)}{\alpha_{кип}}\,. \qquad (4.13)$$

Поскольку значения $\alpha_{кип}$ высоки, то температура оболочки незначительно превышает температуру насыщения жидкости. Максимум температуры оболочки твэла T_c обычно располагается на участке кипения с недогревом (см. рис. 4.46), т.е. в нижней части тепловыделяющей сборки.

Таким образом, температура оболочки может оказывать влияние на аксиальное распределение величины коррозии, которая максимальна в нижней части твэлов (см. рис. 4.44). Однако резкое падение толщины оксидного слоя после участка с максимальной коррозией трудно объяснить только температурным фактором. Согласно теплогидравлическим расчётам на участке однофазного течения теплоносителя температура оболочки твэла растёт, достигает максимума в районе поверхностного кипения, а далее, в области объёмного кипения, плавно уменьшается вплоть до верхней части тепловыделяющей сборки (см. рис. 4.46).

Как известно, наряду с температурой значительное влияние на интенсивность нодулярной коррозии оказывают продукты радиолиза воды [59]. В реакторах кипящего типа содержание радиолитических газов H_2 и O_2 изменяется по высоте активной зоны в зависимости от фазового состояния теплоносителя [52, 60, 61]. На участке однофазного течения (экономайзерная зона) их концентрации растут по мере увеличения плотности потока ионизирующего излучения. С началом кипения кислород, наряду с водородом, начинает переходить в пар, и его содержание в жидкой фазе значительно уменьшается (рис. 4.47).

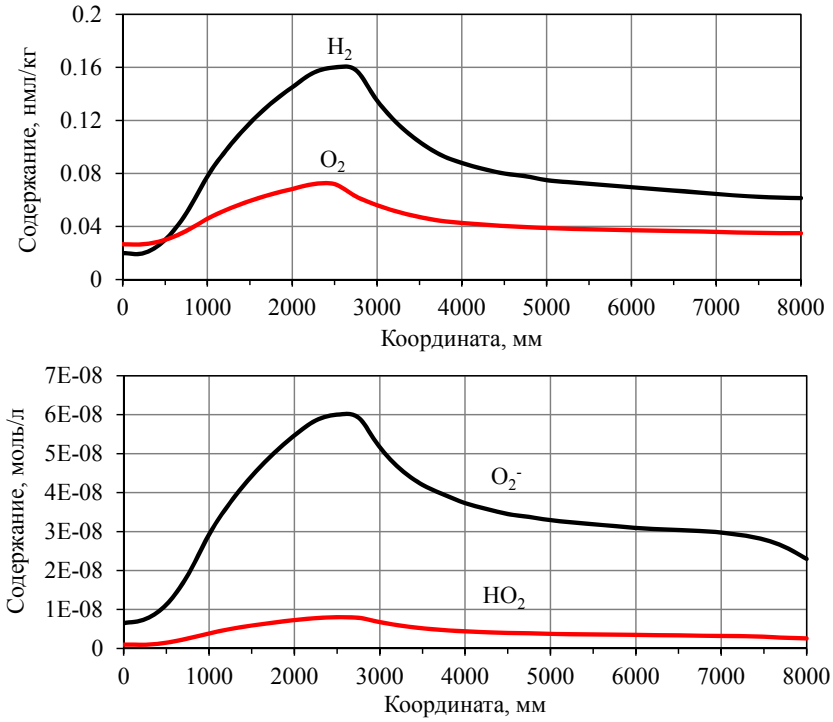


Рис. 4.47 – Распределение концентраций продуктов радиолиза в жидкой фазе теплоносителя по высоте активной зоны реактора РБМК-1000 [52]

Это приводит к изменению концентраций и других окислительных продуктов радиолиза. После закипания воды наблюдается, в частности, быстрое уменьшение в жидкой фазе содержания гидропероксидного и супероксидного радикалов HO_2 и O_2^-, которые существенно влияют на окислительные свойства теплоносителя по отношению к циркониевому сплаву [62, 63].

Отличия в протяжённости зон повышенного окисления можно объяснить следующим образом. Согласно техническому проекту типичные поля аксиального энерговыделения в ТВС кипящего реактора большой мощности имеют коэффициент неравномерности $k_Z \approx 1{,}4$, а температура теплоносителя на входе в технологический канал при номинальном уровне мощности может изменяться в пределах 265–270 °С [8]. Поэтому специфической особенностью реактора РБМК-1000 является то, что при эксплуатации ТВС на различных уровнях энерговыделения и температуры теплоносителя на входе может существенно изменяться длина экономайзерной зоны, а также участков с поверхностным и объёмным кипением.

Наряду с аксиальной в большинстве из исследованных сборок была обнаружена азимутальная асимметрия окисления твэлов между дистанционирующими решётками. На поверхностях оболочек, ориентированных к центру ТВС, толщина оксидов была максимальной (рис. 4.48).

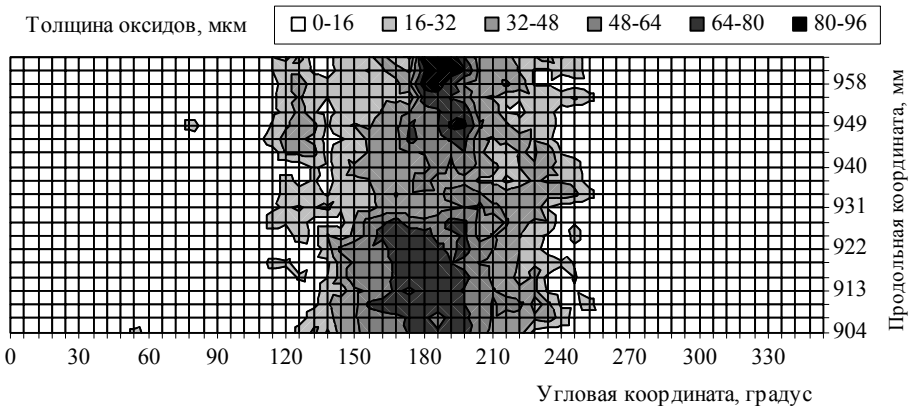
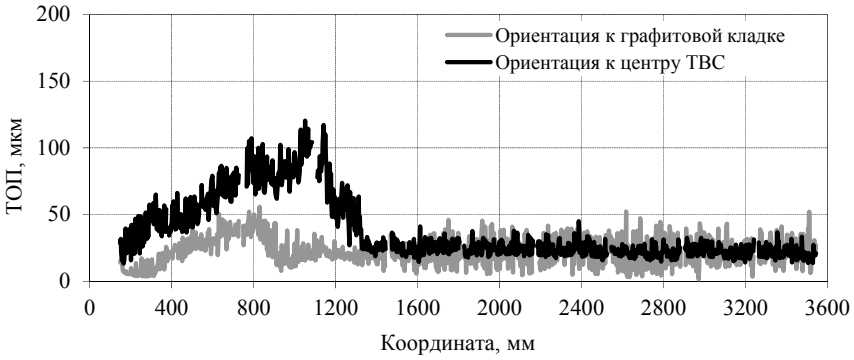
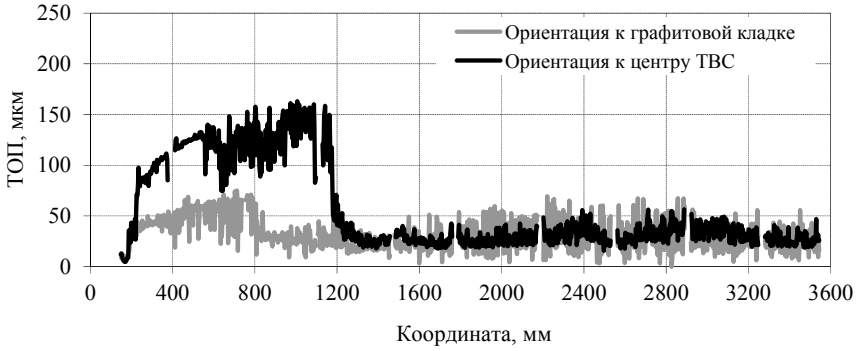


Рис. 4.48 – Распределение толщины оксидов по периметру оболочки твэла между дистанционирующими решётками в ТВС № 11-26-90342, отработавшей до выгорания 14,3 МВт·сут/кгU: 0º – ориентация по направлению к графитовой кладке, 180º – ориентация внутрь ТВС

Во многих сборках на поверхностях твэлов, обращённых к центру, наибольшими были и протяжённости участков с повышенным окислением (рис. 4.49). Следует отметить, что в некоторых ТВС на поверхностях твэлов ПТН, ориентированных к графитовой кладке, характерное увеличение окисления в нижней части отсутствовало, а по всей высоте активной зоны толщина оксидов не превышала 10–20 мкм (рис. 4.50). При этом с противоположной стороны она достигала в 5–10 раз больших величин.

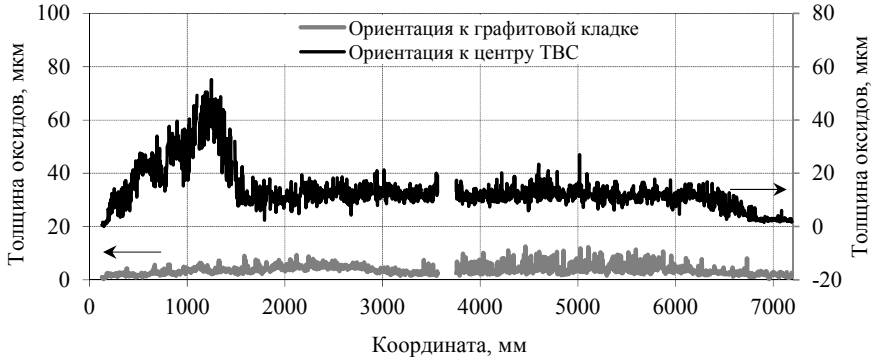


а

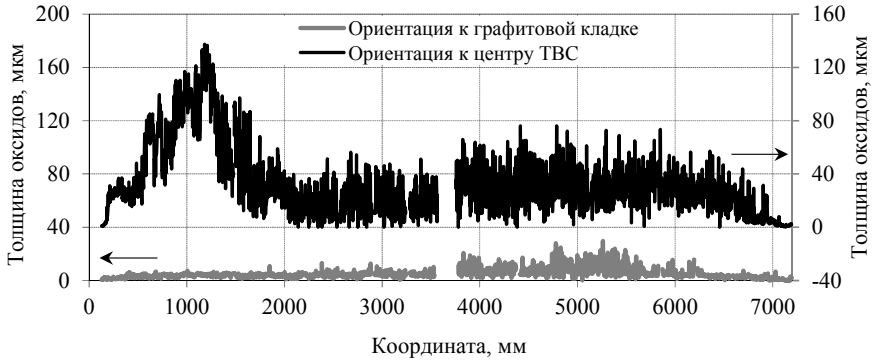


б

Рис. 4.49 – Распределение толщины оксидов у твэлов нижнего пучка ТВС № 10-26-90424 (а) и ТВС № 11-28-88038 (б) с выгоранием 28,4 и 34,3 МВт·сут/кгU соответственно (участки под ДР исключены)



а



б

Рис. 4.50 – Распределение ТОП на поверхности твэлов, обращённой к центру сборки и графитовой кладке в ТВС №11-26-90342 (а) и №11-28-83079 (б) с выгоранием 14,3 и 26,4 МВт·сут/кгU соответственно (участки под ДР из графиков исключены)

Похожие эффекты были обнаружены и в твэлах BWR [64]. На рис. 4.51 в качестве примера представлены распределения толщины оксидов на оболочке одного из твэлов корпусного кипящего реактора американской АЭС River Bend.

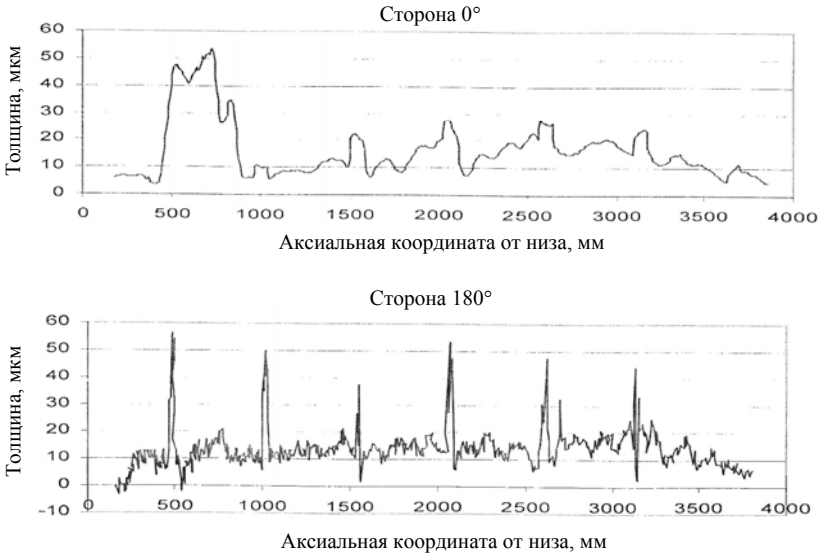


Рис. 4.51 – Результаты вихретоковых измерений толщины оксидов/отложений на поверхности твэла наружного ряда ТВС: 0° – направление к периферии, 180° – направление к центру активной зоны

Причиной возникновения азимутальной асимметрии окисления оболочек твэлов является, вероятно, наличие в ТВС РБМК-1000 радиальной неравномерности потока нейтронов [65, 66]. Коэффициент радиальной неравномерности $k_R \approx 1{,}15$ обусловлен депрессией потока тепловых нейтронов со стороны графитовой кладки во внешнем и внутреннем рядах твэлов (рис. 4.52).

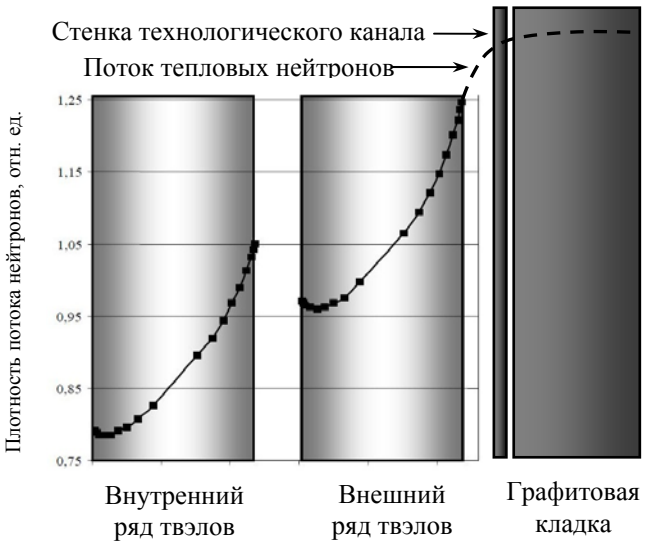


Рис. 4.52 – Распределение плотности потока тепловых нейтронов по радиусу ТВС РБМК [65]

Согласно результатам гамма-спектрометрических исследований выгорание топлива в двух рядах твэлов отличается на 10–15 % [24]. Это приводит к реализации максимального теплового потока со стороны, ориентированной к графитовой кладке, и более раннему по высоте вскипанию теплоносителя в сравнении с противоположной стороной. На подогрев теплоносителя способен оказать существенное влияние и тепловой поток со стороны стенки технологического канала, температура которой может достигать 325 °С [6].

В составе ТВС №№ 1-24-31587 и 10-26-70360, отработавших до выгорания 26,2 и 27,5 МВт·сут/кгU соответственно, было выявлено большое количество твэлов, у которых отсутствовал характерный участок с повышенным окислением на поверхностях, обращённых как к графитовой кладке, так и внутрь сборки (рис. 4.53). Возможно, при их эксплуатации были созданы благоприятные условия (температура на входе, содержание кислорода, скорость теплоносителя, влияющая на концентрацию продуктов радиолиза в воде), что позволило снизить коррозию циркониевых оболочек между ДР до минимального уровня, сопоставимого с ТОП в твэлах ВВЭР-1000 (10–20 мкм).

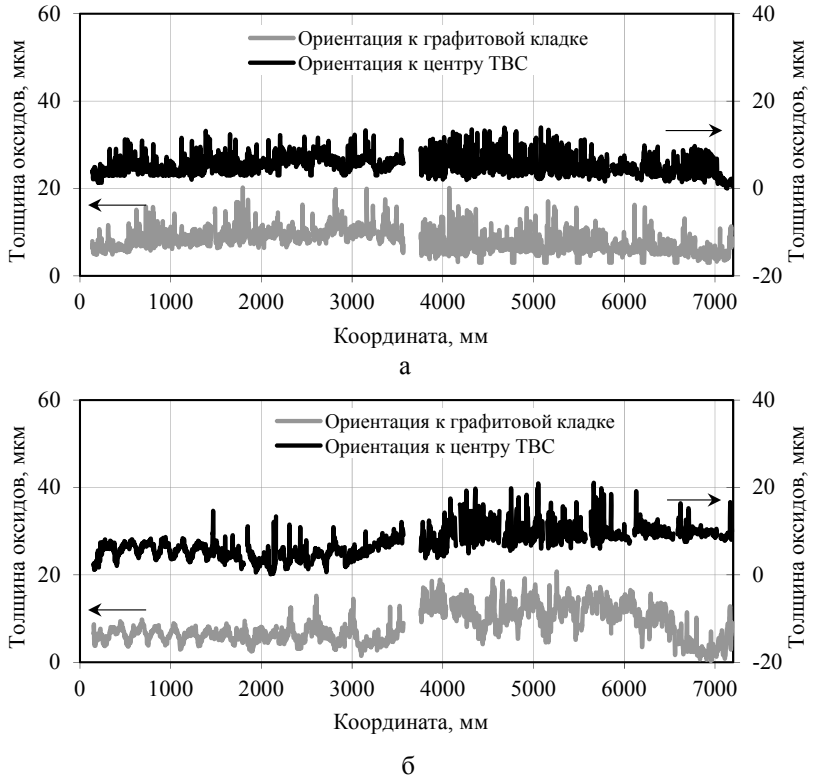


Рис. 4.53 – Типичное распределение средней толщины оксидов на поверхности твэлов ТВС № 10-26-70360 (а) и № 1-24-31587 (б) (участки под ДР исключены)

Подводя итог вышеизложенному, можно констатировать следующее:

– максимальная величина оксидов на поверхности твэлов РБМК наблюдается в нижней части ТВС на участках подогрева и поверхностного кипения теплоносителя, где реализуются наибольшие значения температуры оболочки и концентрации окислительных продуктов радиолиза;

–азимутальная асимметрия окисления обусловлена, вероятно, неравномерным подогревом теплоносителя по сечению технологического канала вследствие радиальной депрессии потока тепловых нейтронов во внешнем и внутреннем рядах твэлов, а также тепловыделения со стороны графитовой кладки. Влияние указанных факторов приводит к более раннему по высоте вскипанию теплоносителя на поверхности твэла, обращённой наружу ТВС, снижению температуры оболочки и концентрации окислительных радикалов;

–существует потенциальная возможность значительного уменьшения коррозии

оболочек из сплава Э110 путём оптимизации режимов эксплуатации, которые позволят минимизировать протяжённость экономайзерной зоны, снизить температуру поверхности твэлов и окислительные свойства паро-водяного теплоносителя.

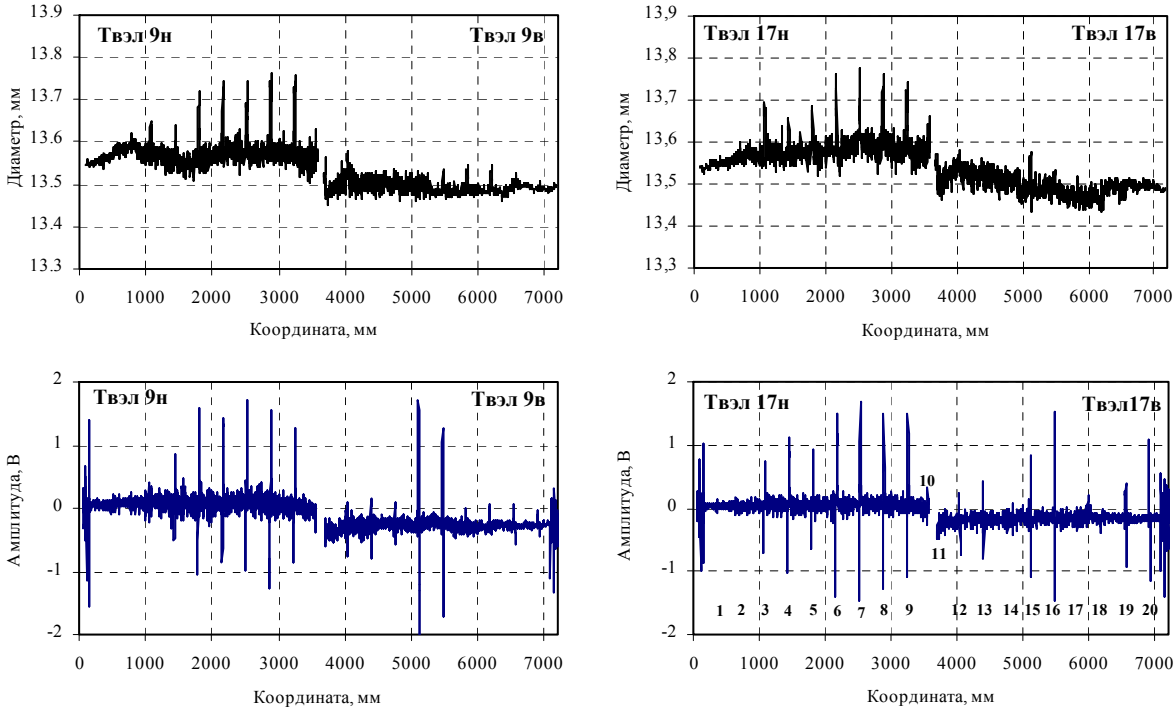
Исходя из научной и практической значимости рассматриваемой проблемы, необходимо проведение целенаправленных исследований по выяснению причин аксиальной и азимутальной асимметрий окисления оболочек твэлов из циркониевого сплава в условиях кипящего теплоносителя. В настоящее время отсутствуют методы экспериментального определения содержания короткоживущих (менее 0,3 с) продуктов радиолиза воды O_2^- и HO_2 по высоте технологического канала, но их концентрация может быть рассчитана методом компьютерного моделирования, например, по программе «Радиолиз – РБМК», использующей поканальные теплофизические данные с действующих энергоблоков АЭС [52]. Для контроля за распределением температур по высоте технологического канала могут быть применены термометрические ТВС с термопарами, размещёнными в различных точках по высоте и периметру оболочек твэлов [4].

Организация оптимальных условий теплосъёма, снижение окислительных свойств водного теплоносителя не только улучшит коррозионную стойкость материалов активной зоны из циркониевых сплавов, но и повысит технико-экономические показатели и надёжность эксплуатации энергоблоков с реакторами РБМК-1000, производящих почти половину электроэнергии, вырабатываемой всеми АЭС Российской Федерации.

4.6 Фреттинг-износ оболочек твэлов под пуклёвками дистанционирующих решёток

На поверхности отдельных твэлов некоторых исследованных ТВС наблюдались следы взаимодействия с пуклёвками дистанционирующих решёток. Фреттинг-износ под циркониевыми ДР был незначительным и имел обычно вид тёмных продольных полос. Под пуклёвками ячеек стальных ДР иногда обнаруживались следы взаимодействия в виде продольных углублений (см. рис. 3.9–3.11).

Наибольший по глубине фреттинг-износ оболочек твэлов был выявлен в ТВС 917, отработавшей на 2-ом блоке ЛАЭС до выгорания 19,5 МВт·сут/кгU. Средние усилия страгивания (219 Н) и извлечения твэлов (68,5 Н) в ПТВ этой сборки были существенно меньше, чем в ПТН – 1497 и 137 Н соответственно. Анализ результатов вихретоковой дефектоскопии и профилометрии твэлов ТВС 917 показал, что в ПТН наблюдается, а в ПТВ отсутствует (рис. 4.54) корреляция между локальными увеличениями диаметра и уменьшением «живого» сечения оболочки [26, 40, 43].



а б

Рис. 4.54 – Профилограммы и ВТ-диаграммы твэлов из наружного (а) и внутреннего (б) рядов ТВС 917

В твэлах верхнего пучка этой тепловыделяющей сборки, отличающихся меньшим на 100 мкм средним диаметром оболочки, были обнаружены значительные по амплитуде ВТ-сигналы от поверхностных дефектов. С помощью визуального осмотра и металлографических исследований был выявлен существенный фреттинг-износ оболочек под пуклёвками стальных дистанционирующих решёток (рис. 4.55).

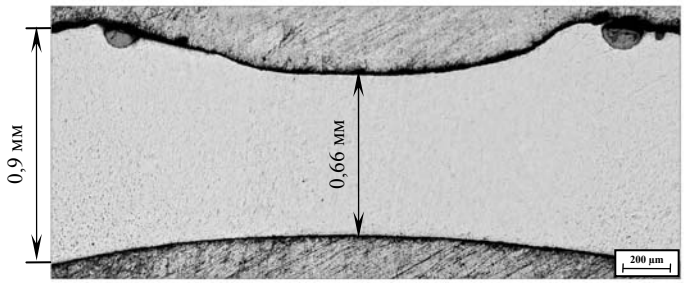
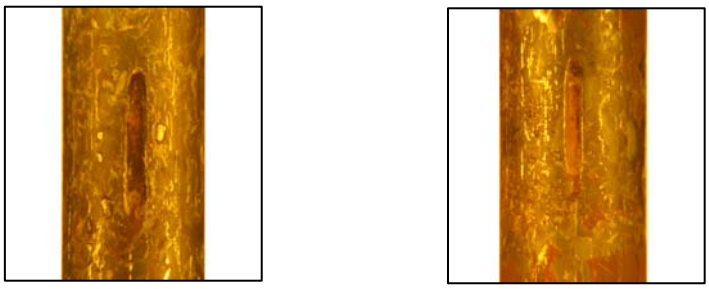


Рис. 4.55 – Микроструктура оболочки твэла №9 ПТВ ТВС 917 в районе фреттинг-износа под СДР16

Проведённый анализ причин появления этого эффекта показал, что повышению вероятности появления фреттинг-износа способствовали ранее существовавшие большие допуска на диаметр оболочечных труб ($13{,}58^{+0{,}05}_{-0{,}07}$ мм) и наружный диаметр твэлов ($13{,}63_{-0{,}18}$ мм). Слабый натяг в звене «твэл–пуклёвка ячейки СДР», реализованный в ПТВ из-за использования партии оболочечных труб с малым исходным диаметром, привёл к фреттинг-износу до 50% «живого» сечения защитных оболочек. Благодаря принятым мерам по совершенствованию технологии изготовления оболочечных труб в ОАО «ЧМЗ» и твэлов в ПАО «МСЗ» этот опасный для работоспособности твэлов эффект

был минимизирован и практически не наблюдался в тепловыделяющих сборках, отработавших до проектного выгорания.

Только в ТВС 761 с выгоранием 35,7 МВт·сут/кгU в процессе визуального осмотра был обнаружен существенный фреттинг-износ оболочек твэлов под пуклёвками стальных ДР. Оценка глубины истирания оболочек, проведённая по фотографиям внешнего вида (рис. 4.56), показала, что для твэлов ПТВ значения этого параметра находятся в интервале 280–300 мкм. В твэлах ПТН максимальная глубина фреттинг-износа не превышала 150 мкм.

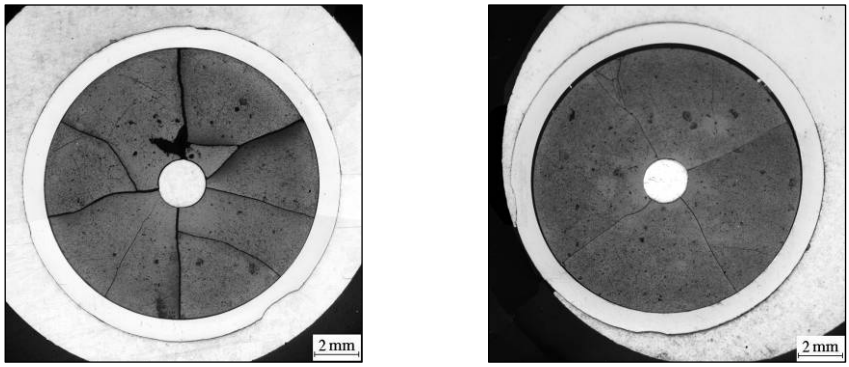


а б

Рис. 4.56 – Внешний вид поверхности твэла 7в ТВС 761 на участке взаимодействия с пуклёвками ДР13 (а) и ДР19 (б)

Отличия в величине истирания оболочек твэлов ПТВ и ПТН могут быть обусловлены более значительной вибрацией, реализуемой в верхней части ТВС, где скорость и турбулентность потока теплоносителя максимальны. Это согласуется с фактом большего количества твэлов ПТВ с люфтами в ячейках ДР, обнаруженными при исследовании ТВС 761 с глубоким выгоранием топлива (см. рис. 2.12).

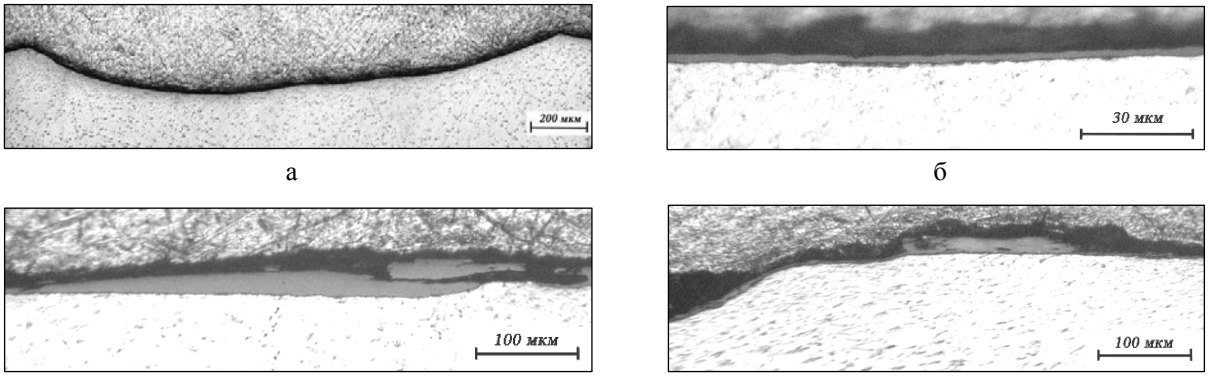
Металлографические исследования поперечных шлифов твэлов подтвердили результаты, полученные при визуальном осмотре (рис. 4.57). Максимальный фреттинг-износ зафиксирован в твэле 7в под СДР13. Минимальная толщина стенки оболочки на этом участке составила 0,67 мм (глубина истирания 276 мкм).



а б

Рис. 4.57 – Макроструктура поперечных сечений твэла 7в под СДР13 (а) и СДР17 (б)

На поверхности оболочки в зоне износа обнаружена оксидная плёнка толщиной 2–4 мкм (рис. 4.58, а, б). По обе стороны от зоны истирания (рис. 4.58, в, г) наблюдалась более толстая оксидная плёнка (до 47 мкм).



а б в г

Рис. 4.58 – Оксидные плёнки на наружной поверхности твэла 7в ТВС 761 под СДР13: на участке фреттинг-износа (а, б), вблизи зоны истирания (в, г)

Очевидно, что обнаруженное истирание стало возможным вследствие ослабления натяга в звене «твэл–ячейка ДР» при эксплуатации. Дополнительным фактором, способствующим износу оболочки, могут служить выявленные в результате исследований ТВС 761 случаи частичного разрушения ячеек стальных ДР, вызванного выкрашиванием зёрен или растрескиванием ядра сварки по предполагаемым механизмам межкристаллитной коррозии и коррозионного растрескивания под напряжением в водном теплоносителе (см. рис. 5.12, глава 5).

4.7 Debris-взаимодействие и последствия попадания воды внутрь твэла

Мировая статистика случаев разгерметизации твэлов кипящих реакторов типа BWR показывает, что 20% из них связано с фреттинг-износом оболочек в местах контакта с пуклёвками ДР. Столько же выходов из строя наблюдается вследствие нарушения технологии изготовления и эксплуатации ТВС в реакторе (дефекты сварных соединений, влага в топливе, перегревы в переходных режимах и т.п.). Самое большое число разгерметизаций твэлов (60%) обусловлено debris-взаимодействием с посторонними предметами, попавшими в теплоноситель.

В реакторах РБМК-1000 debris-взаимодействие чаще всего наблюдалось у твэлов верхнего пучка ТВС. Рис. 4.59 иллюстрирует вихретоковую диаграмму негерметичного твэла 7в из ТВС 997, отработавшей на 2-ом блоке ЛАЭС до выгорания 6,07 МВт·сут/кгU. Первичный сквозной дефект в его оболочке появился вследствие механического взаимодействия с инородным телом – куском металлической ленты, застрявшей в СДР19 (рис. 4.60).

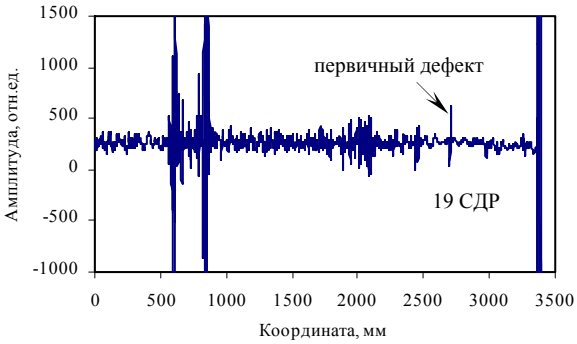


Рис. 4.59 – ВТ-диаграмма (50 строб) негерметичного твэла 7в ТВС 997

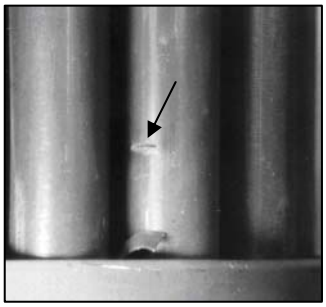
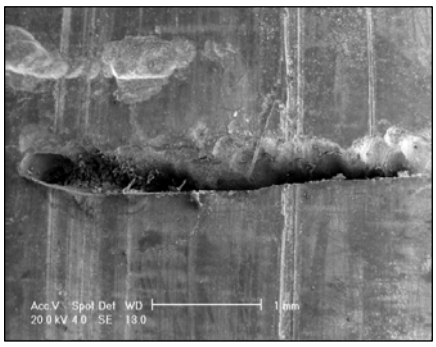
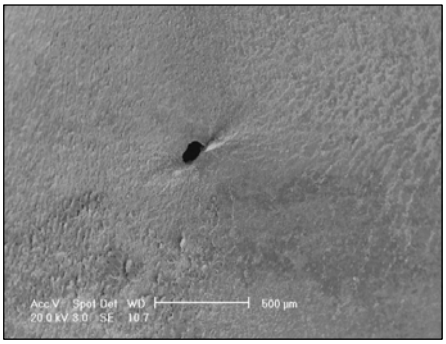


Рис. 4.60 – Вид металлической ленты, застрявшей в СДР19 (стрелкой показан debris-дефект)

Вид наружной поверхности оболочки в области первичного повреждения представлен на рис. 4.61, а. Исследование оболочки в районе debris-дефекта с внутренней стороны выявило наличие отверстия площадью 0,01 мм^2 (рис. 4.61, б).



а

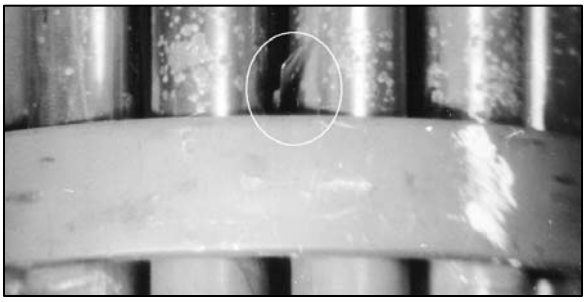


б

Рис. 4.61 – Наружная (а) и внутренняя (б) сторона оболочки негерметичного твэла 7в в районе debris-дефекта

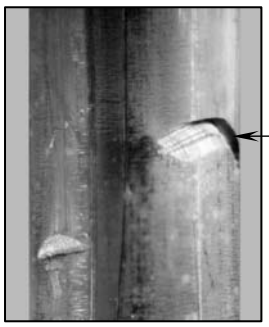
Твэл 3в внешнего ряда ПТВ ТВС 626 (выгорание 18,65 МВт·сут/кгU) потерял герметичность также вследствие взаимодействия с металлическим предметом, застрявшим в СДР20. Рис. 4.62 и рис.4.63 иллюстрируют вид инородного тела и двух дефектов оболочки (поверхностного и сквозного) в районе верхней ДР.

Твэл 3в



ДР20

Рис. 4.62 – Вид металлического тела, застрявшего в ДР20 ТВС 626

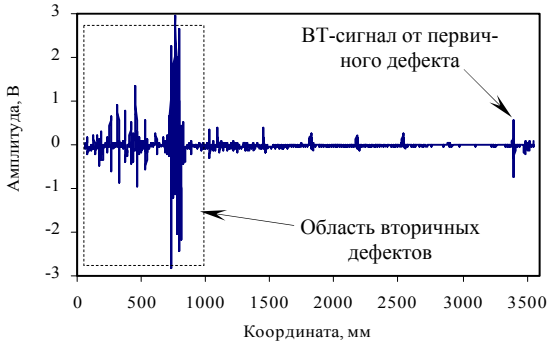


Сквозной дефект оболочки

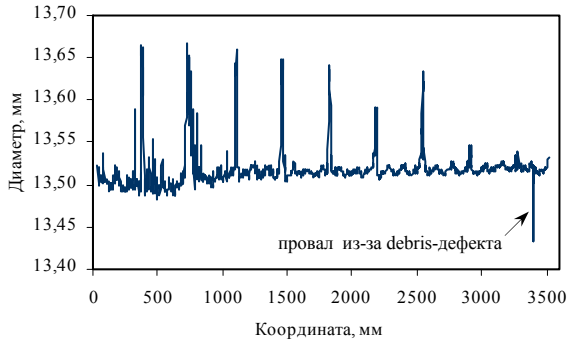
Рис. 4.63 – Вид дефектов оболочки негерметичного твэла 3в

На рис. 4.64 приведена ВТ-диаграмма и профилограмма этого твэла. Из анализа представленных данных следует, что ниже ДР14, как и в твэле 7В (см. рис. 4.59), наблюдаются большие по амплитуде ВТ-сигналы, связанные с последствиями процессов, протекавших в топливе и оболочке после её разгерметизации.

В образцах оболочек негерметичных твэлов, отобранных из участков с максимальной амплитудой ВТ-сигналов, обнаружено наводороживание и наличие гидридов типа «sunburst» (рис. 4.65). Массовая доля водорода в оболочках дефектных твэлов (~10^{-1} %) была значительно больше, чем в герметичных 7–10·10^{-3} %. Охрупчивание циркониевого сплава сопровождалось появлением сквозных трещин в оболочке негерметичного твэла.

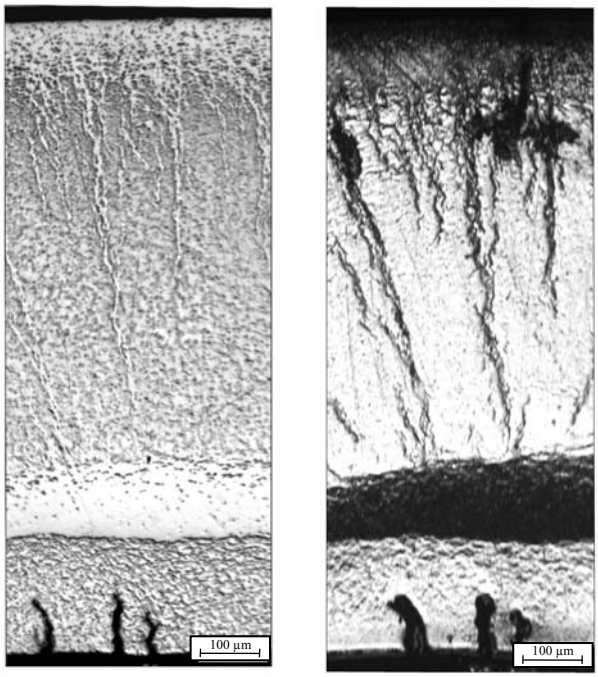


а



б

Рис. 4.64 – ВТ-диаграмма (а) и профилограмма (б) негерметичного твэла ПТВ ТВС 626



а б

Рис. 4.65 – Микроструктура оболочки негерметичного твэла в районе вторичных дефектов после полировки (а) и травления (б)

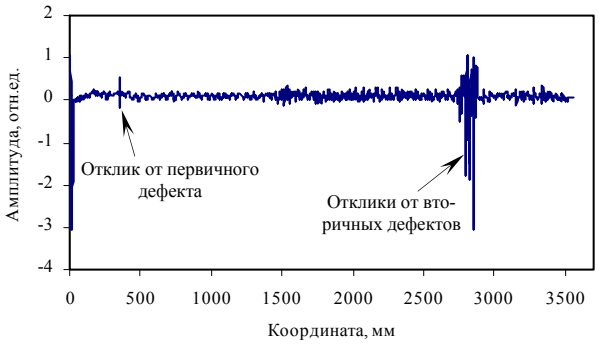


Рис. 4.66 – ВТ-диаграмма негерметичного твэла 5н из нижнего пучка ТВС, отработавшей до выгорания 4,6 МВт·сут/кгU

В шести из семи исследованных дефектных ТВС РБМК было обнаружено по одному негерметичному твэлу из ПТВ. На рис. 4.66 представлена ВТ-диаграмма негерметичного твэла из ПТН ТВС 609, отработавшей на ЛАЭС до выгорания 4,6 МВт·сут/кгU. Как и в твэлах верхнего пучка наибольшее гидрирование оболочки после проникновения воды

через debris-дефект в районе ДР1 наблюдается на участке максимального энерговыделения (между ДР7 и ДР8).

Особенно много следов debris-взаимодействия было обнаружено на поверхности твэлов РБМК, эксплуатировавшихся до 2000 года. После выяснения в НИИАР причин разгерметизации ТВС и очистки тупиковых зон раздаточных групповых коллекторов от шлама количество дефектов такого типа на оболочках твэлов РБМК резко сократилось.

4.8 Содержание водорода в оболочках твэлов

Поглощение водорода, выделяющегося в реакции окисления $Zr+2H_2O \rightarrow ZrO_2+2H_2$, происходит одновременно с процессами коррозии поверхности твэлов кипящих реакторов. При превышении предела растворимости в циркониевом сплаве водород выделяется в виде гидридов глобулярной и пластинчатой формы. Новодороживание и появление пластинчатых гидридов неблагоприятной радиальной ориентации ведёт к охрупчиванию и деградации механических характеристик оболочек твэлов.

Ранее для определения содержания водорода использовался спектрально-изотопный метод, сущность которого заключалась в том, что образцы оболочек твэлов размещались в замкнутом объёме, и при определённой температуре производилось изотопное уравновешивание между водородом, содержащимся в образце, и известным количеством дейтерия. В уравновешенной возбуждённой газовой смеси измеряли интенсивность спектральных линий водорода и дейтерия, а затем по полученным данным производили расчёт массовой доли водорода с погрешностью не более 13%. В таблице 4.8 представлены результаты измерения концентрации водорода в оболочках герметичных твэлов пяти ТВС РБМК, полученные с использованием этого метода.

Таблица 4.8 – Содержание водорода в оболочках твэлов ТВС РБМК

Номер ТВС	Пучок твэлов	Номер твэла	Исследуемый участок оболочки	Массовая доля водорода, $\times 10^{-3}$, %
570	ПТВ	14	район заглушки	5,2
			газосборник	3,3
	ПТН	11	район заглушки	3,7
			газосборник	4,4
587	ПТВ	7	газосборник	2,4
			под СДР11	5,5
	ПТН	9	под СДР10	3,2
			между СДР8 и СДР9	2,3
			газосборник	4,7
567	ПТВ	2	между ДР11 и ДР12	3,2
			Под ДР12	6,4
	ПТН	12	Под ДР9	6,0
			между ДР9 и ДР10	3,5

626	ПТВ	5	газосборник	6,9
			под СДР11	11
	ПТН	1	под СДР10	7,9
997	ПТВ	6	район заглушки	3,0
			185 мм от заглушки	5,0
	ПТН	6	район заглушки	4,0
			185 мм от заглушки	5,0

В настоящее время концентрацию водорода в образцах из сплава Э110 определяют методом восстановительного плавления на газоанализаторе Eltra OH-900: образец при высокой температуре плавят в графитовом тигле в потоке аргона, экстрагируют содержащиеся в образце газы, очищают их от оксидов углерода и измеряют количество выделившегося водорода с помощью детектора теплопроводности. Относительная погрешность измерения массовой доли водорода таким способом составляет ± (4–7)% .

В таблицах 4.9–4.11 представлены экспериментальные результаты определения содержания водорода в образцах оболочек твэлов трёх ТВС, отработавших в 1999–2009 гг. на ЛАЭС до различного выгорания, с использованием нового, более точного метода.

Таблица 4.9 – Содержание водорода в оболочках твэлов ТВС 342
(выгорание 14,3 МВт·сут/кгU)

Номер твэла	Участок оболочки	Массовая доля водорода*, 10^{-3}, %
16н	между ДР3 и ДР4	3
	район ДР4	4
	район ДР9	3
8в	район ДР12	5
10в	между ДР12 и ДР13	4
	район ДР13	4
	район ДР16	3
13в	район ДР16	3

*Примечание: указанные значения относятся к суммарному содержанию водорода в материале оболочки и оксидной плёнке, которая не удалялась с поверхности образца

Таблица 4.10 – Содержание водорода в оболочках твэлов ТВС 079
(выгорание 26,4 МВт·сут/кгU)

№ твэла	Участок оболочки	Массовая доля водорода*, 10^{-3}, %
1н	между ДР9 и ДР10	2
	между ДР3 и ДР4	6
	газосборник	8
1в	газосборник	5
	между ДР15 и ДР16	6
	между ДР12 и ДР13	9

*Примечание: содержание водорода определяли после механического удаления оксидной плёнки с поверхности образца

Таблица 4.11 – Содержание водорода в оболочках твэлов ТВС 761 (выгорание 35,7 МВт·сут/кгU)

№ твэла	Участок оболочки	Массовая доля водорода*, 10^{-3}, %
16н	рядом с ДР1	4
	между ДР9 и ДР10	2
	между ДР3 и ДР4	2
16в	между ДР11 и ДР12	4
	между ДР15 и ДР16	2
7в	между ДР17 и ДР18	2

*Примечание: образцы оболочек перед измерениями не очищались от оксидной плёнки

Из анализа представленных в таблицах 4.9–4.11 данных следует, что массовая доля водорода в оболочках герметичных твэлов РБМК не превышает $9 \cdot 10^{-3}$% и не зависит от высотной координаты, а также местоположения твэлов в пучках ТВС. Результаты металлографических исследований показали, что выделения гидридной фазы представляют собой небольшие равномерно распределённые глобулы с незначительным количеством мелких единичных, хаотично ориентированных пластин (рис. 4.67). Поэтому можно уверенно утверждать, что такое количество водорода с данной морфологией гидридов не может отрицательно сказаться на служебных характеристиках материала оболочек твэлов.

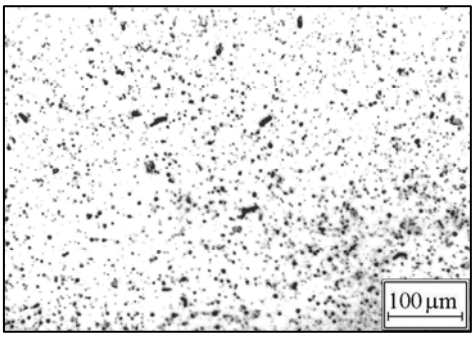


Рис. 4.67 – Гидриды в оболочке твэла ТВС 587

В таблице 4.12 представлены результаты определения содержания водорода спектрально-изотопным методом на различных участках оболочек негерметичных твэлов ТВС, вышедших из строя при достижении различного уровня выгорания топлива.

Таблица 4.12 – Содержание водорода в оболочках негерметичных твэлов дефектных ТВС

Номер ТВС	Выгорание, МВт·сут/кгU	Номер твэла	Координата от заглушки твэла, мм	Массовая доля водорода, $\times 10^3$, %
997	6,07	7в	20	48,0
			780	43,0
			3580	5,0
608	6,3	17в	в зоне отрыва заглушки	55,0
			2500	7,2
			3580	8,4
626	18,65	3в	газосборник	6,0
			400	13,0
			30	10,0

671	18,9	1в	в зоне отрыва заглушки	12
			1250	58
			3400	2,5
			в районе debris-дефекта	3,1
917	19,5	11в	в зоне отрыва заглушки	46,0
			в районе debris-дефекта	8,0
			верх газосборника	10,0

Из анализа представленных в таблице 4.12 результатов следует, что массовая доля водорода в оболочках негерметичных твэлов коррелирует с данными вихретокового сканирования. Максимальное наводороживание (на порядок больше, чем в герметичных твэлах) наблюдается в аномальных по результатам ВТ-дефектоскопии участках дефектных твэлов (см. рис. 4.70).

4.9 Кратковременные механические характеристики материала оболочек

Герметичные твэлы

Механические свойства оболочек твэлов при кратковременном растяжении определяли по результатам испытаний кольцевых образцов высотой 3 мм. Испытания проводили на разрывной машине 1794-У5 при комнатной и рабочей (350 °С) температурах. Скорость перемещения активного захвата составляла 1 мм/мин. За толщину оболочки при расчёте прочностных характеристик принимали значение 0,9 мм. По результатам механических испытаний определяли предел прочности σ_B, условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, общее δ_O и равномерное δ_P относительное удлинение.

В таблицах 4.13 и 4.14 приведены значения механических характеристик оболочек на различных участках твэлов ПТН и ПТВ ТВС 079 и 761, отработавших на ЛАЭС до выгорания 26,4 и 35,7 МВт·сут/кгU соответственно.

Таблица 4.13 – Механические свойства оболочек твэлов ТВС 079

Номер твэла	Участок	$T_{исп.}$, °С	σ_B, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_O, %	δ_P, %
13в	Газосборник	20	602	519	14	2,8
		350	391	347	16	2,2
	Между ДР15 и ДР16	20	607	567	11	1,8
		350	392	318	14	3,2
	Между ДР12 и ДР13	20	607	546	13	2,6
		350	400	362	14	1,5
13н	Между ДР8 и ДР9	20	596	519	11	3,2
		350	414	385	15	1,7
	Между ДР5 и ДР6	20	615	585	12	1,7
		350	421	395	12	1,5
	Газосборник	20	632	582	12	2,4
		350	400	373	13	1,7

Таблица 4.14 – Механические свойства оболочек твэлов ТВС 761

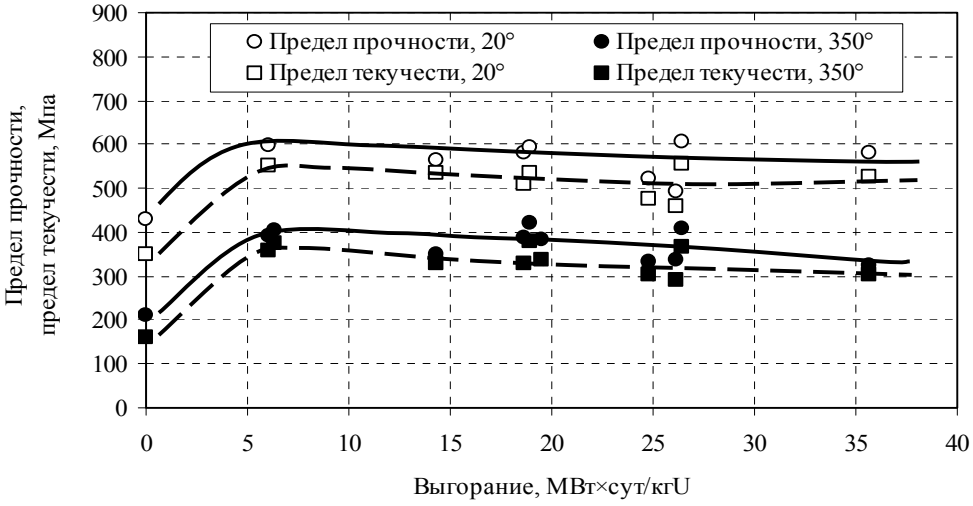
Номер твэла	Участок	$T_{исп.}$, °С	σ_B, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_O, %	δ_P, %
16в	Между ДР11 и ДР12	20	578	510	12	2,3
		350	330	303	13	1,6
	Между ДР15 и ДР16	20	563	510	8,8	2,0
		350	322	306	11	1,1
	Между ДР18 и ДР19	20	585	519	10	2,2
		350	309	280	10	1,5
16н	Газосборник	20	593	531	14	2,2
		350	330	290	15	3,2
	Между ДР3 и ДР4	20	600	562	15	1,7
		350	319	287	11	1,4
	Между ДР9 и ДР10	20	581	514	11	2,2
		350	327	300	11	1,6

Прочностные свойства (σ_B и $\sigma_{0,2}$) оболочек по всей длине исследованных твэлов двух ТВС с наибольшим выгоранием топлива находятся на достаточно высоком уровне. Пластические характеристики (δ_O и δ_P) имеют некоторый разброс, обусловленный, по-видимому, неравномерным коррозионным поражением наружной поверхности оболочек твэлов.

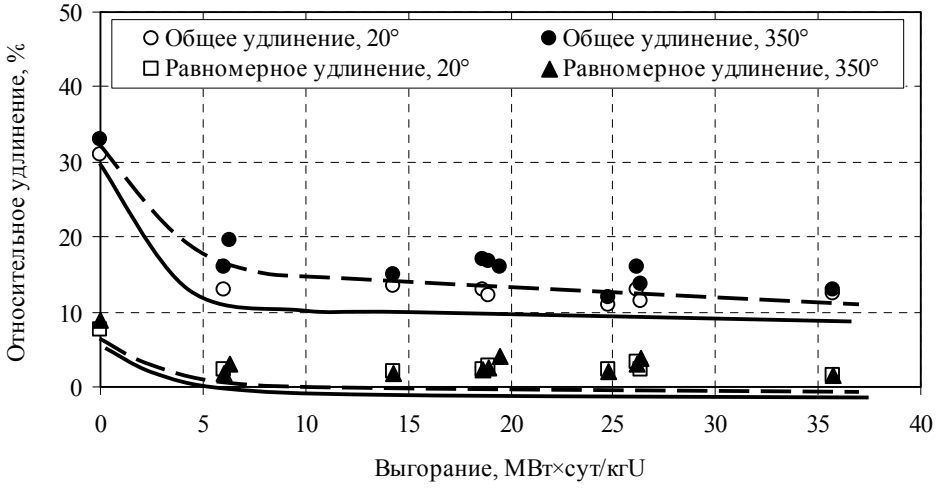
Обобщённые результаты механических испытаний оболочек твэлов десяти ТВС РБМК представлены в таблице 4.15 и на рис. 4.68.

Таблица 4.15 – Механические характеристики оболочек твэлов

Номер ТВС	Выгорание топлива, МВт·сут/кгU	Температура испытаний, °С	Механические характеристики			
			σ_B, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_O, %	δ_P, %
Исходное состояние		20	430	350	31,0	7,5
		350	210	160	33,0	9,0
997	6,07	20	597	553	13,0	2,35
		350	392	359	16,0	1,85
608	6,3	350	405	375	19,5	3,15
342	14,3	20	565	534	13,5	1,95
		350	351	329	15,0	1,85
626	18,65	20	579	510	13,0	2,35
		350	386	327	17,0	2,35
671	18,9	20	594	536	12,3	2,8
		350	421	379	16,7	2,6
917	19,5	350	382	338	15,9	4,0
570	24,8	20	521	474	11,0	2,25
		350	332	301	12,0	2,0
587	26,2	20	492	460	13,0	3,25
		350	338	290	16,0	3,0
079	26,4	20	606	554	11,5	2,3
		350	406	365	13,7	3,9
761	35,7	20	582	526	12,5	1,55
		350	325	301	13,0	1,50



а

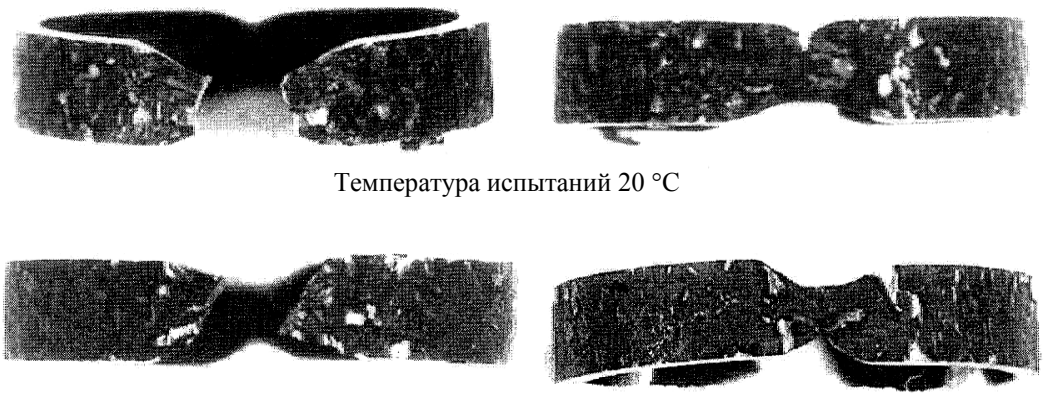


б

Рис. 4.68 – Прочностные (а) и пластические (б) свойства оболочек твэлов РБМК

Из анализа представленных данных следует, что прочностные характеристики материала оболочек твэлов выходят на максимальные значения при выгорании около 5 МВт·сут/кгU (рис. 4.68, а). Пластичность оболочек в процессе эксплуатации плавно снижается и при достижении выгорания около 10 МВт·сут/кгU величины общего и равномерного удлинения становятся почти в 2,5 раза ниже исходных. При максимально достигнутом выгорании 35,7 МВт·сут/кгU параметры δ_O и δ_P не ниже 10 и 2% соответственно (рис. 4.68, б).

Внешний вид кольцевых образцов оболочек после механических испытаний представлен на рис. 4.69. При температурах испытаний 20 и 350 °С разрушение происходит с образованием «шейки», что характерно для пластичных материалов.



Температура испытаний 20 °С

Температура испытаний 350 °С

Рис. 4.69 – Образцы оболочек после механических испытаний

Измерение содержания водорода в материале оболочки (см. табл. 4.11–4.14), а также наблюдаемая при металлографических исследованиях морфология выделений гидридной фазы – размер, распределение и ориентация (см. рис. 4.67) показывают, что их влияние на характеристики прочности и пластичности сплава Zr-1%Nb незначительно.

Таким образом, с учётом отсутствия изменения размеров зёрен металла в процессе эксплуатации, можно утверждать, что основной вклад в упрочнение материала оболочек под воздействием облучения вносят радиационные дефекты. После набора определённой повреждающей дозы нейтронного облучения плотность радиационных дефектов выходит на насыщение, и значения предела прочности и условного предела текучести сохраняются практически неизменными при дальнейшем увеличении продолжительности эксплуатации.

Негерметичные твэлы

Механические характеристики материала оболочек негерметичных твэлов пяти дефектных ТВС РБМК приведены в таблице 4.16.

Таблица 4.16 – Механические свойства оболочек негерметичных твэлов

Номер ТВС (выгорание, МВт·сут/кгU)	Номер негерметичного твэла	Координата от торца заглушки, мм	$T_{исп.}$, °С	σ_B, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_O, %	δ_P, %
997 (6,07)	7в	100–150	20	576	530	12	2,8
			350	412*	379	10*	2,6*
		815–865	20	Хрупкое разрушение			
			350	Хрупкое разрушение			
		Газосборник	20	548	501	18	3,0
			350	345	307	22	5,3
608 (6,3)	17в	Район отрыва заглушки	350	387	361	15	2,4
		2521	350	419	400	21	2,8
		3585 (газосборник)	350	408	369	23	4,0

626 (18,65)	3в	100	20	539	506	14	1,4
			350	379**	344**	14**	1,6**
		800	20	Хрупкое разрушение			
			350	Хрупкое разрушение			
		Газосборник	20	573	543	15	1,4
			350	360	336	18	1,8
671 (18,9)	1в	Район отрыва заглушки	20	144 615 36	– 531 –	0 8,1 0	0 2,9 0
			350	215 51 396	– – 393	0 0 3,2	0 0 1,0
		1230	20	96 134 20	– – –	0 0 0	0 0 0
			350	170 < 20 < 20	– – –	0 0 0	0 0 0
		Газосборник	20	639	567	11,1	2,5
			350	444	376	16,6	2,9
917 (19,5)	11в	Район отрыва заглушки	350	382	338	13,2	4,2
		382	350	382	337	17,5	3,5
		Газосборник	350	381	339	18,4	4,7

Примечание: * - два образца из трёх разрушились хрупко,

** - один образец из трёх разрушился хрупко.

Из анализа представленных результатов следует, что в одних негерметичных твэлах (7в из ТВС 997, 3в из ТВС 626 и 1в из ТВС 671) наблюдалось хрупкое разрушение при кратковременном растяжении кольцевых образцов, а в других (17в из ТВС 608, 11в из ТВС 917) механические свойства оболочек находились на удовлетворительном уровне, в том числе и на участках, расположенных вблизи сквозного дефекта оболочки и места отрыва заглушки.

Представленные в таблице 4.16 результаты могут быть объяснены путём сопоставления вихретоковых диаграмм и металлографических снимков поперечных шлифов оболочек из различных участков негерметичных твэлов пяти дефектных ТВС (рис. 4.70–4.72).

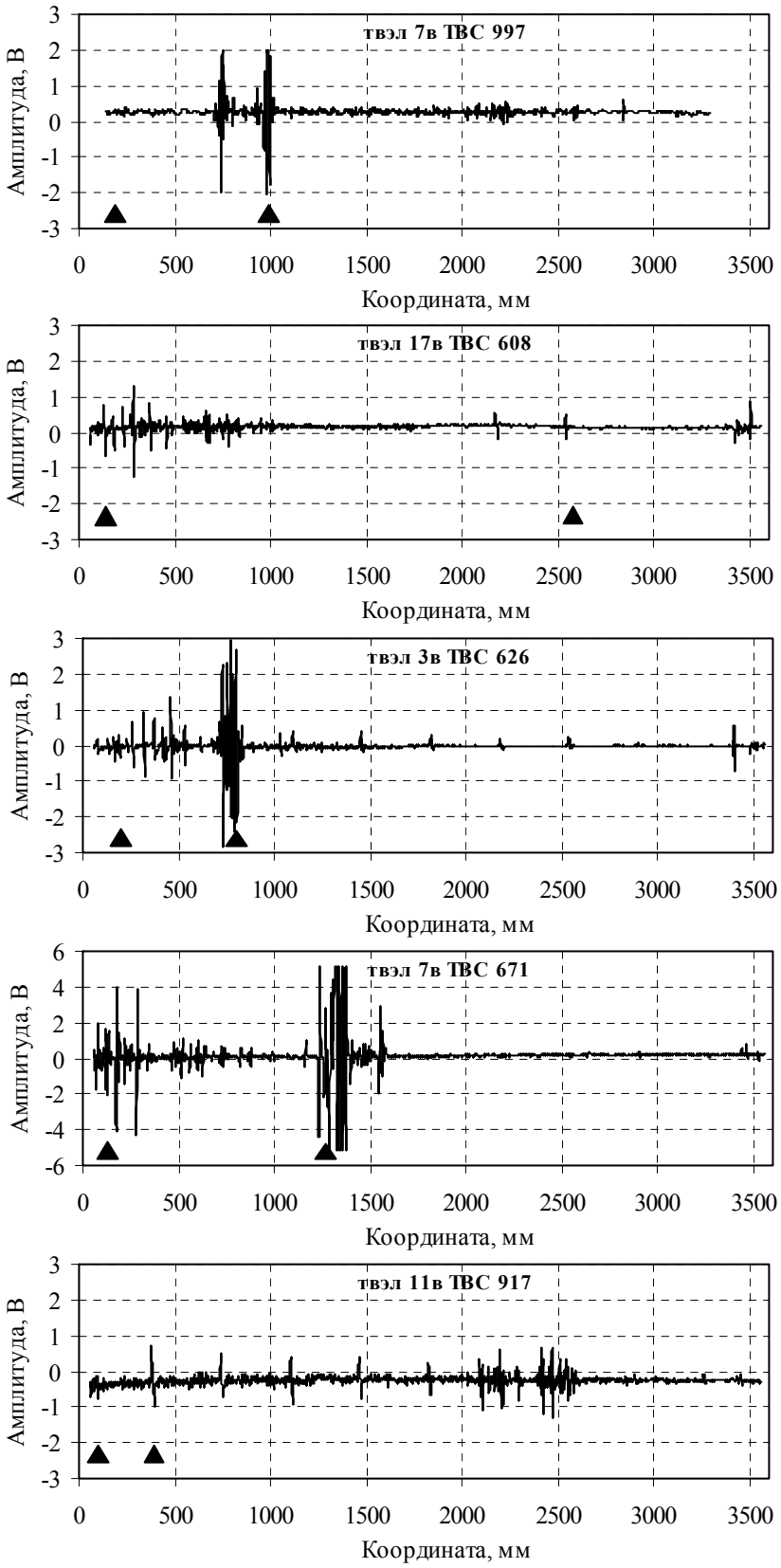


Рис. 4.70 – Вихретоковые диаграммы негерметичных твэлов дефектных ТВС РБМК: ▲ – места отбора кольцевых образцов для механических испытаний

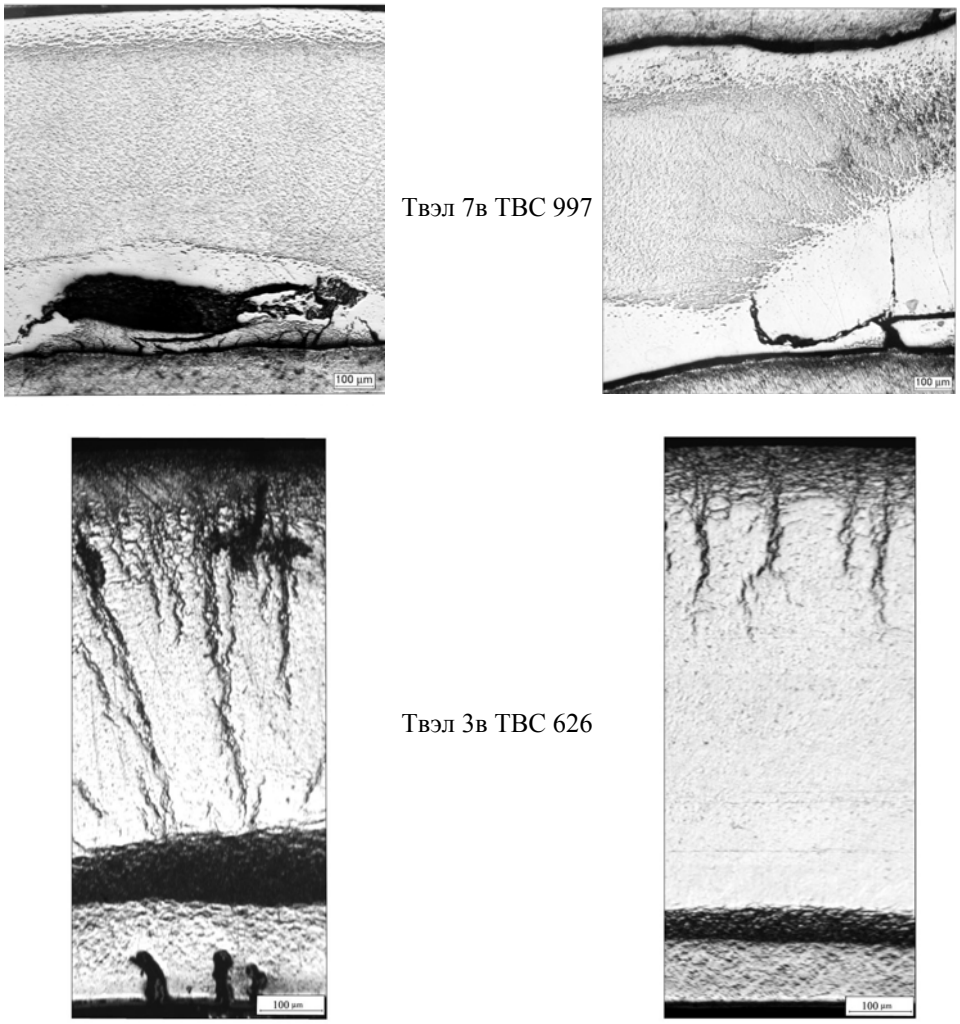
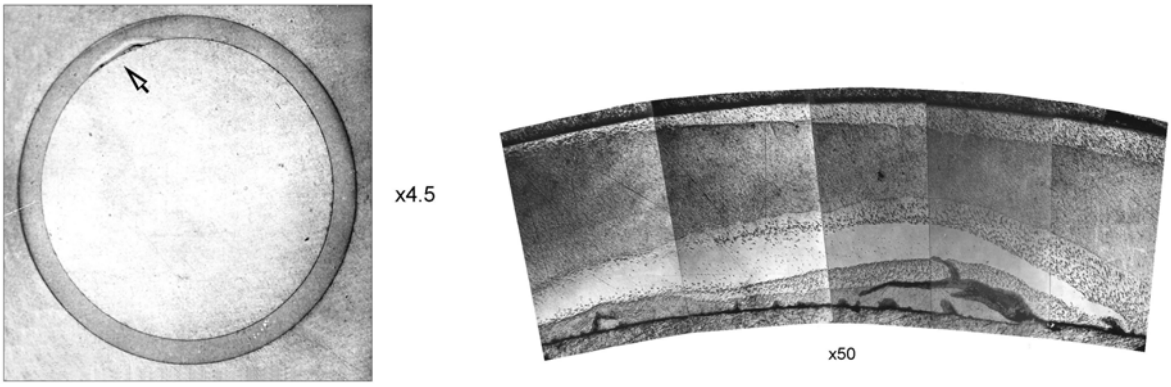


Рис. 4.71. Структура оболочек негерметичных твэлов дефектных ТВС на участках, являющихся аномальными согласно результатам ВТ-дефектоскопии



а б

Рис. 4.72. Макро- (а) и микроструктура (б) участка оболочки негерметичного твэла 17в ТВС 608 на расстоянии 125 мм от места отрыва заглушки

Анализ приведённых данных показал наличие корреляции между показаниями вихретокового дефектоскопа, результатами механических испытаний и структурой мате-

риала оболочек, выявленной в процессе металлографических исследований образцов негерметичных твэлов.

У негерметичных твэлов ТВС 997, 626 и 671 на участках максимальной амплитуды ВТ-сигналов (см. рис. 4.70) структура оболочек существенно изменена по сравнению с исходной и содержит крупные выделения гидридов типа «sunburst» (см. рис. 4.71). Повышенная концентрация гидридов наблюдается практически по всему периметру защитных оболочек. Появление гидридов радиальной ориентации и возникновение продольных поперечных трещин – основная причина полного охрупчивания оболочки в аномальных районах негерметичных твэлов. Вне зон повышенной амплитуды ВТ-сигналов проходного датчика структура оболочки близка к исходной и результаты механических испытаний показывают приемлемые характеристики прочности и пластичности материала (Э110), из которого она изготовлена.

Как известно, изменения, происходящие в оксидном топливе и оболочках, связаны с проникновением водного теплоносителя через дефект внутрь твэлов. Время от возникновения первичного сквозного дефекта до значительного разрушения, связанного с гидрированием оболочки и сварных швов, определяется «кривой Локке», зависит от удельной тепловой нагрузки, выгорания топлива, а также длительности эксплуатации твэла в негерметичном состоянии [67]. Поскольку вторичное разрушение приводит к существенному загрязнению теплоносителя радиоактивными веществами, то эксплуатация ТВС до предельного состояния (отрыв заглушки, потеря части таблеток и т.п.) недопустима, тем более что извлечение негерметичных сборок из технологических каналов может быть осуществлена «на ходу» – без останова реактора РБМК-1000.

4.10 Компонентный состав и толщина отложений продуктов коррозии контура реактора на поверхности твэлов

Параметры отложений продуктов коррозии контура на оболочках твэлов изучались в шести из исследованных ТВС. Отложения с поверхности твэлов отбирались химическим методом в специальном кварцевом пенале с использование раствора минеральных кислот, состоящего из 60% соляной и 20% азотной кислот, а также 20% дистиллированной воды [68, 69].

До и после снятия отложений проводился визуальный осмотр и профилометрия оболочечных труб. Было замечено, что после удаления красно-коричневых отложений поверхность твэлов приобретала характерный блеск, а белые пятна и разводы стали просматриваться более отчётливо. Однако структура и расположение неровностей, тёмных разводов и отслоений на поверхности остались неизменными.

Диаметры оболочек и характер их распределения по длине твэлов до и после снятия отложений были идентичными. Это указывает на то, что толщина отложений, удалённых химическим методом, была сравнима с погрешностью измерения диаметра, т.е. не превышала 15 мкм.

Полученные пробы в виде однородных прозрачных растворов анализировались на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой «Spectroflame Modula S». Количественные спектрометрические измерения проводились с применением эталонов, содержащих контролируемые элементы в известных концентрациях.

Типичные результаты анализ проб полученных растворов с поверхности твэлов (на расстоянии 500 мм от заглушки) верхних пучков твэлов пяти исследованных ТВС представлены в таблице 4.17.

Таблица 4.17 – Химический состав проб отложений

Элемент	Номер ТВС				
	567	570	587	626	997
	Концентрация элемента, $\times 10^{-3}$ г/л				
Железо	133,3	166,0	150,0	76,1	2,8
Медь	45,5	101,6	3,5	1,4	0,1
Никель	17,2	6,0	6,2	6,6	0,2
Кальций	10,3	6,1	0,3	0,3	0,3
Хром	14,2	2,5	3,1	14,0	0,3
Цирконий	9,6	1,6	1,1	24,5	–
Цинк	5,0	4,7	0,9	0,1	0,1
Марганец	10,6	2,3	1,9	0,6	0,1

Из анализа результатов, представленных в таблице 4.17, следует, что основой отложений продуктов коррозии контура является железо (железноокисные отложения). В пробах отложений с твэлов ТВС 570 и 567, эксплуатировавшихся на 2-ом блоке ЛАЭС около года до ППР, по сравнению с остальными обнаружена аномально высокая концентрация меди [47], оказывающей значительное влияние на коррозионное состояние конструкционных элементов из циркониевых сплавов в условиях кипения теплоносителя [37].

Исходя из теоретических расчётов была проведена оценка толщины слоёв отложений на анализируемом участке твэлов с учётом следующих допущений:

– отложения состоят только из контролируемых элементов;
– все элементы находятся в оксидной форме и имеют высшую степень окисления;
– отложения распределены равномерно по поверхности анализируемого участка.

Результаты расчётной оценки приведены в таблице 4.18.

Таблица 4.18 – Расчётная толщина слоя отложений

Участок активной зоны	Номер ТВС									
	567		570		587		626		997	
	ПТН	ПТВ	ПТН	ПТВ	ПТН	ПТВ	ПТН	ПТВ	ПТН	ПТВ
	Толщина слоя отложений, мкм									
Верх	–	0,4	–	–	–	0,21	–	–	–	0,32
Центр	–	3,75	–	4,67	2,17	1,84	1,65	–	0,34	0,36
Низ	–	–	–	–	0,34	–	0,44	–	0,34	–

На рис. 4.73 приведены распределения толщины отложений продуктов коррозии контура в трёх точках по высоте исследованных ТВС.

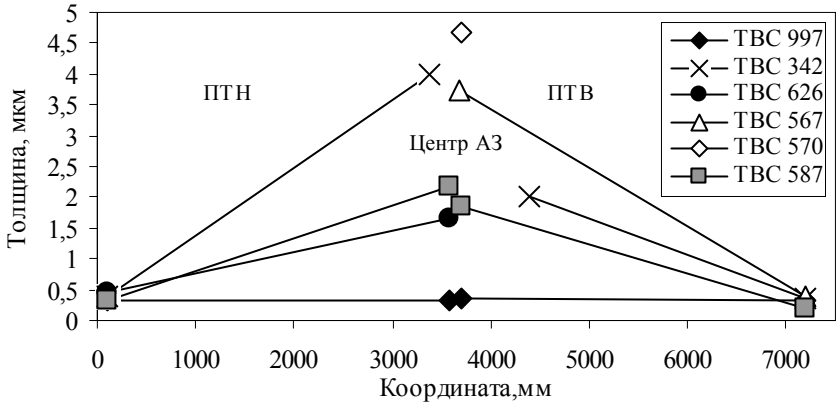


Рис. 4.73 – Распределение толщины слоя отложений по высоте ТВС

Результаты, представленные в таблице 4.18 и на рис. 4.73, указывают на заметно большую толщину слоя отложений на поверхности твэлов ТВС 570 с максимальной продолжительностью эксплуатации. При этом зависимость толщины слоя отложений от продолжительности эксплуатации практически линейная (рис. 4.74).

Для снятия отложений с твэлов ТВС 342, отработавшей на 1-ом блоке ЛАЭС до выгорания 14,3 МВт·сут/кгU, было использовано специальное устройство, позволяющее осуществлять последовательный отбор проб с участков оболочек длиной 55 мм [70]. Твэл пропускали через боковые отверстия в камеру из фторопласта до заданной координаты, герметизировали отверстия уплотнительными узлами, заливали мерное количество раствора минеральных кислот и осуществляли нагрев до 70 °С в течение 30 мин. После чего раствор сливали и использовали для анализа на спектрометре

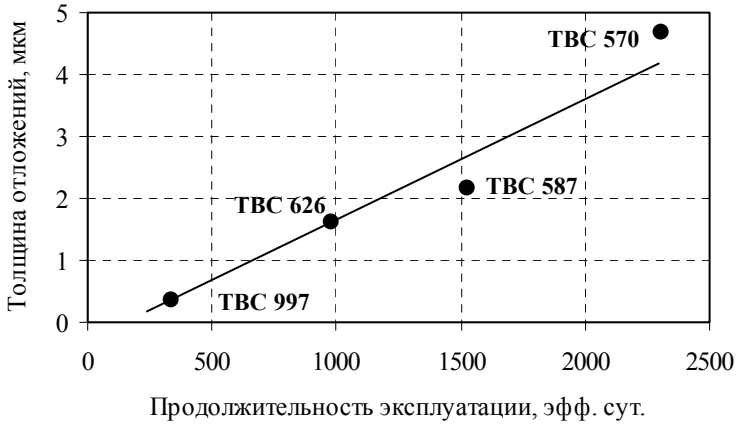


Рис. 4.74 – Зависимость толщины слоя отложений от продолжительности эксплуатации

«Spectroflame Modula S». Относительная погрешность измерения для контролируемых элементов составляла 2–5%. Результаты исследования двух твэлов из нижнего и верхнего пучков ТВС 342 представлены в таблицах 4.19 и 4.20.

Таблица 4.19 – Содержание контролируемых элементов на оболочке твэла 5н ТВС 342, мкг/см^3

Элемент	Координата центра исследуемого участка (от КР ПТН), мм						
	557	1527	2007	2687	2987	3167	3442
Железо	135,2	280,4	437,5	316,2	386,7	576,1	145,1
Медь	4,36	44,5	35,4	65,3	75,4	67,1	66,2
Никель	5,39	12,48	15,72	12,96	19,33	23,96	4,40
Хром	8,12	10,71	16,88	15,14	24,28	32,58	4,50
Кальций	6,92	6,00	3,72	5,87	7,67	9,81	5,49
Магний	0,95	1,53	1,16	1,13	1,43	1,45	1,33
Цирконий	39,45	50,77	25,75	15,31	14,90	16,78	7,47
Марганец	1,09	5,35	5,39	5,35	5,59	5,61	3,38
Цинк	1,33	4,57	3,55	3,96	4,23	5,28	3,24
Натрия	2,86	3,48	5,63	1,88	2,46	8,42	4,23
Кремний	2,35	3,75	2,39	1,67	1,16	2,10	2,35

Таблица 4.20 – Содержание контролируемых элементов на оболочке твэла 5в ТВС 342, мкг/см^3

Элемент	Координата центра исследуемого участка (от КР ПТН), мм						
	3812	4087	4267	4567	5247	5727	6697
Железо	152,56	223,22	125,90	387,83	331,91	357,65	75,46
Медь	55,86	60,87	91,42	41,60	37,54	40,07	4,74
Никель	6,14	12,24	6,10	6,68	5,15	6,55	5,32
Хром	6,72	14,49	5,35	7,81	6,48	8,25	7,81
Кальций	4,06	3,21	0,89	0,75	1,53	4,23	66,97
Магний	1,09	0,72	0,85	0,34	0,41	0,95	3,27
Цирконий	12,55	75,09	45,15	60,43	25,58	54,42	24,42
Марганец	3,61	4,06	4,30	2,69	2,01	2,59	0,99
Цинк	2,97	2,83	3,55	1,77	1,47	1,81	0,48
Натрия	1,43	3,31	10,71	2,93	9,62	1,02	1,43
Кремний	3,41	5,80	3,92	4,60	2,32	5,97	6,21

На рис. 4.75 приведено распределение по длине твэлов из нижнего и верхнего пучков ТВС 342 меди – наиболее значимого для коррозии оболочек компонента отложений. На участках с максимальным количеством отложений оценивалась толщина их слоя. Наи-

большая толщина на твэле 5н составила около 4 мкм (участок с координатой 3170 мм), а на твэле 5в – 2 мкм (участок на отметке 4570 мм).

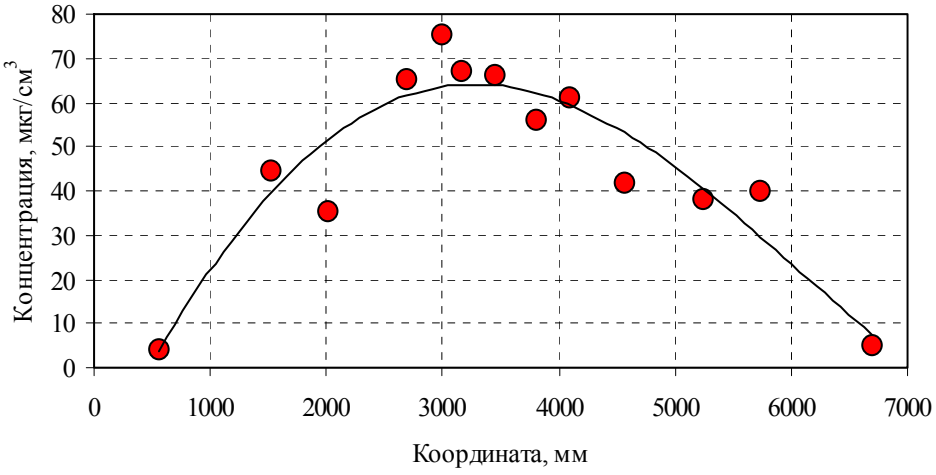


Рис. 4.75 – Распределение концентрации меди в отложениях по длине твэлов ПТН и ПТВС ТВС 342

4.11 Состояние сварных соединений заглушек и наконечников с оболочкой

Состояние сварных швов оболочек с концевыми деталями контролировалось в твэлах ТВС 917, 671, 587, 608, 997 и 442. Исследования показали, что в герметичных твэлах сварные соединения находились в удовлетворительном состоянии. На рис. 4.76 представлен общий вид сварных швов в герметичных твэлах ТВС 442.

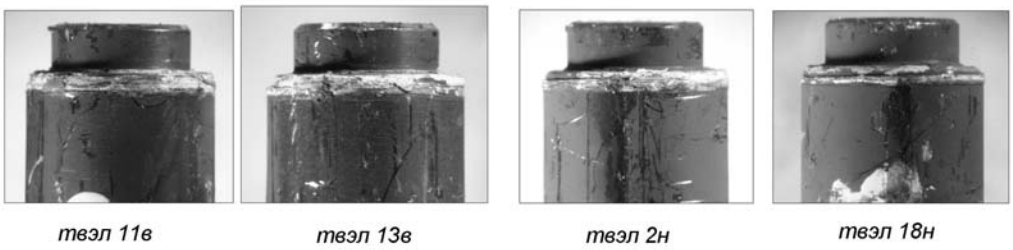


Рис. 4.76 – Вид сварных соединений оболочек с заглушками твэлов

Структура сварных соединений заглушки с оболочкой в продольном сечении типична для контактно-стыковой сварки. Непроваров, пор, трещин или каких-либо других дефектов в области швов не обнаружено. На наружной поверхности оболочек в зоне сварки и на пробках толщина оксидных плёнок была невелика. Травление не выявило наличия гидридной фазы в области сварки. Протяжённость зоны сплошности сварных швов составляла около 2,8 мм (рис. 4.77).

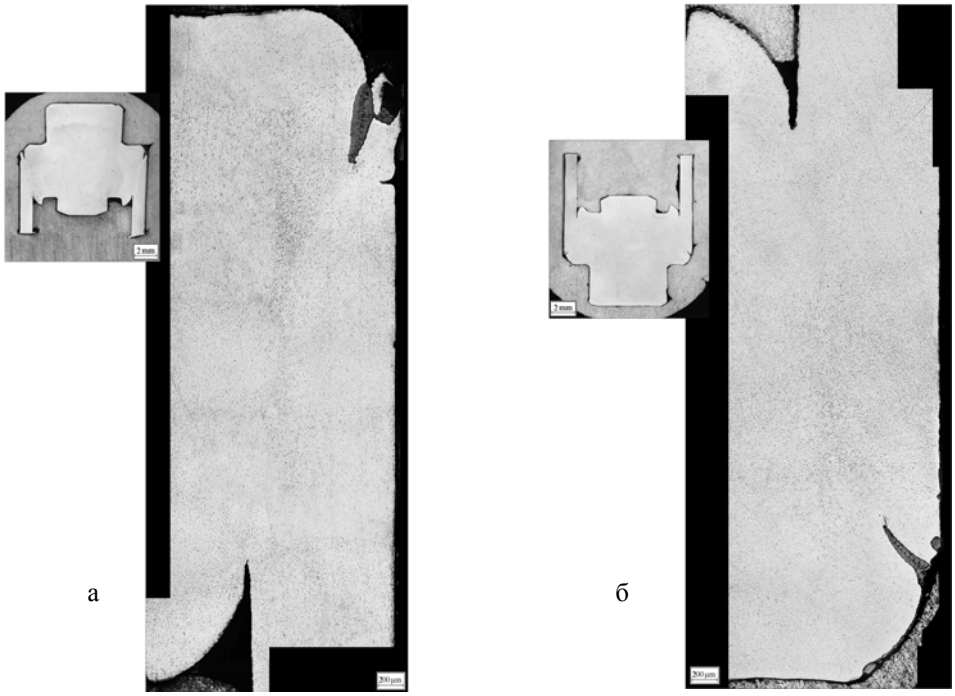


Рис. 4.77 – Макро- и микроструктура сварных соединений заглушек с оболочками твэлов нижнего (а) и верхнего (б) пучков ТВС 626

На рис. 4.78 представлено состояние сварного соединения в продольном направлении, характерное для негерметичных твэлов. В районе внутренней складки обнаружено повышенное гидрирование пробки и оболочки, имеющее вид повреждения типа «sunburst»

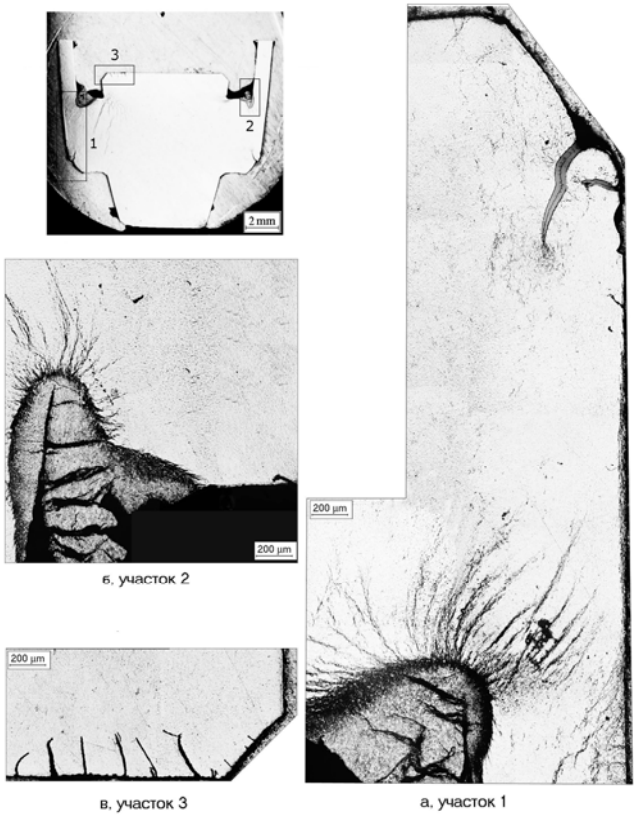


Рис. 4.78 – Макро- (а) и микроструктура (б) на различных участках сварного соединения заглушки с оболочкой негерметичного твэла 7в ТВС 997

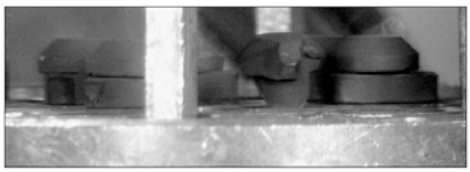
(участки 1 и 2). На внешней поверхности оболочки в зоне сварки наблюдается слой повышенной концентрации гидридов и трещина. Наружная складка окислена и в её окрестности видны выделения гидридной фазы (участок 1). Исследования пробки показали наличие трещин, ориентированных перпендикулярно её внутренней поверхности. Содержание водорода в оболочке вблизи заглушки составило $48 \cdot 10^{-3}$ % масс., т.е. была на порядок выше, чем в герметичных твэлах ($3–5 \cdot 10^{-3}$ % масс.).

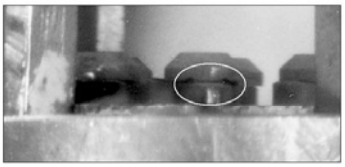
Сварные швы в районе наконечников герметичных твэлов находились в удовлетворительном состоянии. Выделения гидридов были мелкими и немногочисленными. Толщина локальной оксидной плёнки на внешней поверхности оболочки в районе шва не превышала 80 мкм. Сварные швы со стороны наконечников в негерметичных твэлах также не имели каких-либо дефектов, а их структура мало чем отличалась от структуры швов в герметичных твэлах.

4.12 Состояние наконечников и фиксирующих колец твэлов

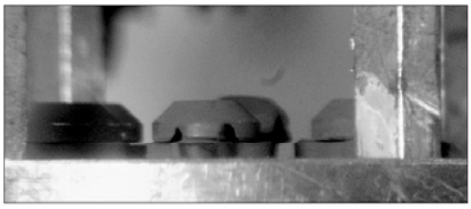
При визуальном осмотре ТВС 360, 361 и 440 были обнаружены следы износа деталей узла крепления твэлов в верхней концевой решётке: наконечников и фиксирующих колец (рис. 4.79). Зарегистрирован случай потери кольца вследствие износа наконечника (рис. 4.79, ТВС 361, верхняя фотография).

ПТВ ТВС 360 (длительность эксплуатации около 5 лет)





ПТВ ТВС 570 (длительность эксплуатации около 10 лет)



ПТВ ТВС 361 (длительность эксплуатации около 6 лет)

ПТВ ТВС 440 (длительность эксплуатации около 5 лет)

Рис. 4.79 – Износ наконечников и фиксирующих колец в ТВС РБМК

В процессе визуального осмотра пучков твэлов экспериментальной ТВС 442 с центральным закреплением твэлов были выявлены следы износа на фиксирующих кольцах четырёх твэлов ПТВ (рис. 4.80).

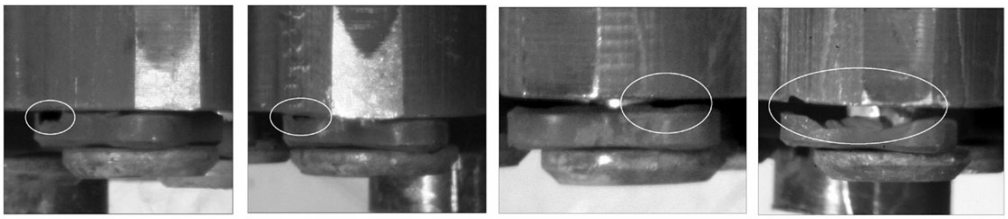


Рис. 4.80 – Следы износа на фиксирующих кольцах твэлов ПТВ ТВС 442

В местах контакта с фиксирующими кольцами в опорной решётке ПТВ наблюдались следы фреттинг-износа (рис. 4.81). Максимальный износ обнаружен вблизи ячеек твэлов 4 и 9. Наибольшее истирание фиксирующего кольца по визуальной оценке составило 1/3 его высоты.

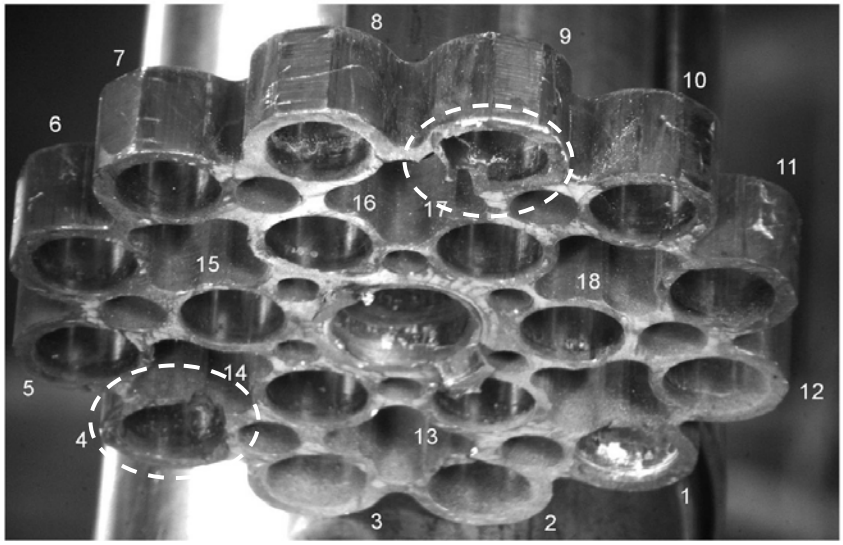


Рис. 4.81 – Вид мест износа опорной решётки ПТВ ТВС 442

После извлечения твэлов из верхней опорной решётки были обнаружены следы истирания на участках наконечников диаметром 6 и 10 мм, особенно значительные у твэлов 4в и 9в (рис. 4.82).

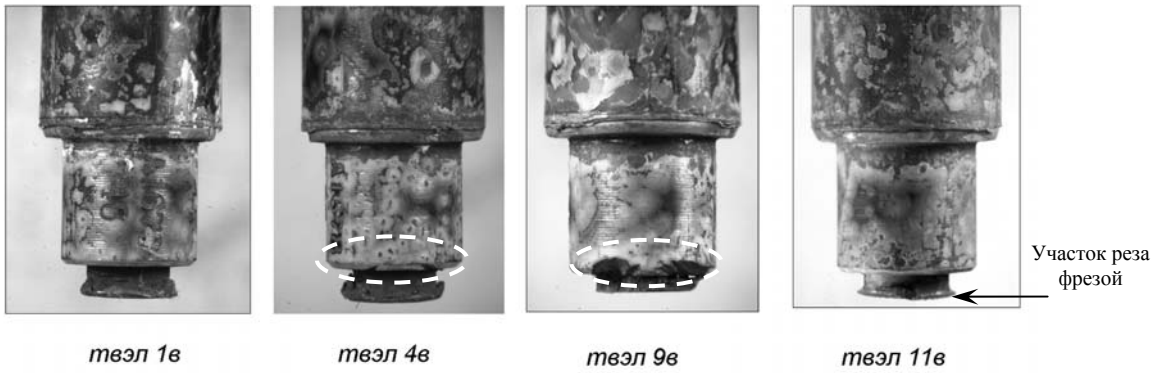
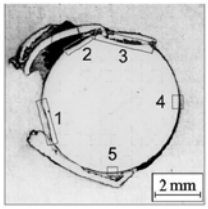
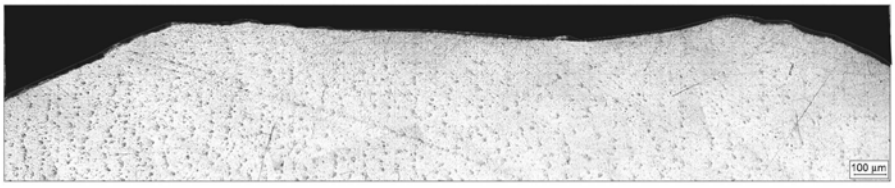


Рис. 4.82 – Внешний вид наконечников твэлов ПТВ ТВС 442

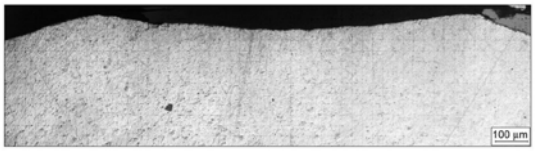
Макро- и микроструктура наконечника твэла 4в представлена на рис. 4.83. Истирание материала наблюдалось на трёх участках с максимальной глубиной и шириной 350 мкм и 1,7 мм соответственно (рис. 4.83, б, в, г). Окисление поверхности в зоне износа не наблюдалось. Вне зоны истирания наконечники были покрыты равномерной (рис.4.83, д) или слоистой (рис. 4.83, е) оксидной плёнкой толщиной 20–50 мкм. Травление не выявило наличия гидридов циркония в материале наконечника твэла 4в.



а

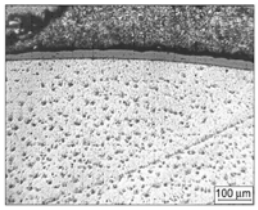


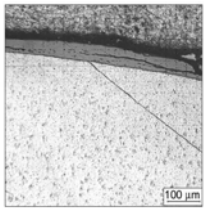
б (участок 1)



в (участок 2)

г (участок 3)





д (участок 5) е (участок 4)

Рис. 4.83 – Макро- (а) и микроструктура (б–е) наконечника твэла 4в на участке диаметром 6 мм

Очевидно, что причиной износа является вибрация фиксирующих колец в потоке быстротекущего теплоносителя. Разрушенные фрагменты колец – один из источников появления debris-дефектов в оболочках твэлов. Кроме того, вибрация и потеря колец могут приводить к вертикальному смещению твэлов из-за потери фиксации в концевых и опорных решётках. Для исключения вибрации колец и увеличения ресурса штатных и экспериментальных ТВС РБМК с ЦЗТ необходимо доработать или изменить конструкцию узла крепления наконечников твэлов.

4.13 Состояние топлива в исследованных ТВС

4.13.1 Плотность топлива

Образцы для измерения плотности топлива таблеток UO_2 вырезались вблизи заглушек (максимум энерговыделения) и на аномальных участках вихретоковых диаграмм твэлов ПТН и ПТВ. Следует отметить, что при отборе образцов не происходило высыпание таблеток и их фрагментов из дефектных твэлов. При разделке герметичных твэлов ТВС с малым выгоранием топлива в вертикальном положении топливные таблетки высыпались в специальную ёмкость. Большая часть из них сохранила первоначальную форму и целостность (рис. 4.84).

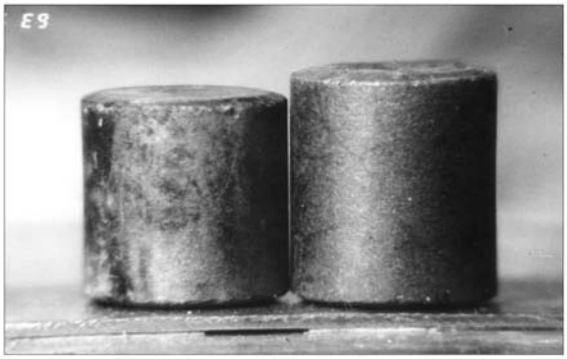


Рис. 4.84 – Вид таблеток UO_2, извлечённых из герметичного твэла ТВС 608 (выгорание 6,3 МВт·сут/кгU)

При разделке твэлов ТВС 587 с выгоранием 26,16 МВт·сут/кгU удавалось освободить от топлива оболочечную трубу длиной 1000 мм путём лёгкого постукивания её нижнего края об металлический поддон. В этом случае топливо высыпалось в виде кусков таблеток UO_2 различных размеров.

Определение плотности фрагментов топлива с массой 10–20 грамм проводилось методом гидростатического взвешивания с погрешностью не хуже 0,5%. Полученные результаты для семи исследованных ТВС представлены в таблице 4.21.

Таблица 4.21 – Плотность топлива в герметичных и негерметичных твэлах

Номер ТВС	Выгорание, МВт·сут/кгU	Плотность топлива, г/см^3	
		Твэлы ПТН	Твэлы ПТВ
997	6,07	10,60 (6н, герм.)	10,50 (7в, негерм.) 10,60 (6в, герм.)
608	6,30	10,64 (17н, герм.)	10,48 (17в, негерм.)
626	18,65	10,50 (1н, герм.)	10,40 (3в, негерм.) 10,50 (5в, герм.)
671	18,90	10,56 (7н, герм.)	10,41 (7в, негерм.)
917	19,50	10,57 (11н, герм.)	10,32 (11в, негерм.)
570	24,78	10,50 (11н, герм.)	10,52 (14в, герм.)
587	26,16	10,53 (9н, герм.)	10,52 (7в, герм.)

Из анализа представленных в таблице 4.21 результатов следует, что в герметичных твэлах плотность топлива составляла 10,4–10,7 г/см^3, т.е. находилась в допустимом для необлученного топлива диапазоне. Это не позволило выявить уменьшение плотности топлива, реально происходящее вследствие накопления твёрдых и газообразных продуктов деления в диапазоне выгораний 6–26 МВт·сут/кгU.

В негерметичных твэлах плотность топлива, как правило, была на ~ 2 % ниже, чем в герметичных. Проникновение теплоносителя через дефект в оболочке приводит к химическому взаимодействию H_2O с облучённым диоксидом урана, ухудшению теплопроводности, перегреву и структурным изменениям в топливе.

4.13.2 Структура топлива в герметичных твэлах

Керамографические исследования структуры топлива проводились на поперечных шлифах твэлов. Образцы топливного сердечника размещали в эбонитовых обоймах и заливали эпоксидной смолой или сплавом Вуда. После шлифовки и полировки образцы просматривали и фотографировали на микроскопе УМСД-2 при пятикратном увеличении, а отдельные участки – на микроскопе МИМ-15 с увеличением в 100, 400 или 1000 раз. Структуру топлива выявляли травлением в реактиве: 90% H_2SO_4 + 10% H_2O_2.

Фотографии макро- и микроструктуры герметичного твэла ТВС 997 с малым выгоранием топлива представлены на рис. 4.85. Из анализа полученных снимков следует, что таблетки UO_2 с центральным отверстием диаметром 2,1 мм фрагментированы в основном радиальными трещинами. Диаметральный зазор между топливным сердечником и оболочкой составляет около 0,25 мм (рис. 4.85, а, б). Размер и количество пор в исследованном сечении практически не меняется по радиусу таблетки. Средний диаметр пор составляет 2–3 мкм. Величина зерна не изменилась и находится в пределах 5–25 мкм (рис. 4.85, в, г).

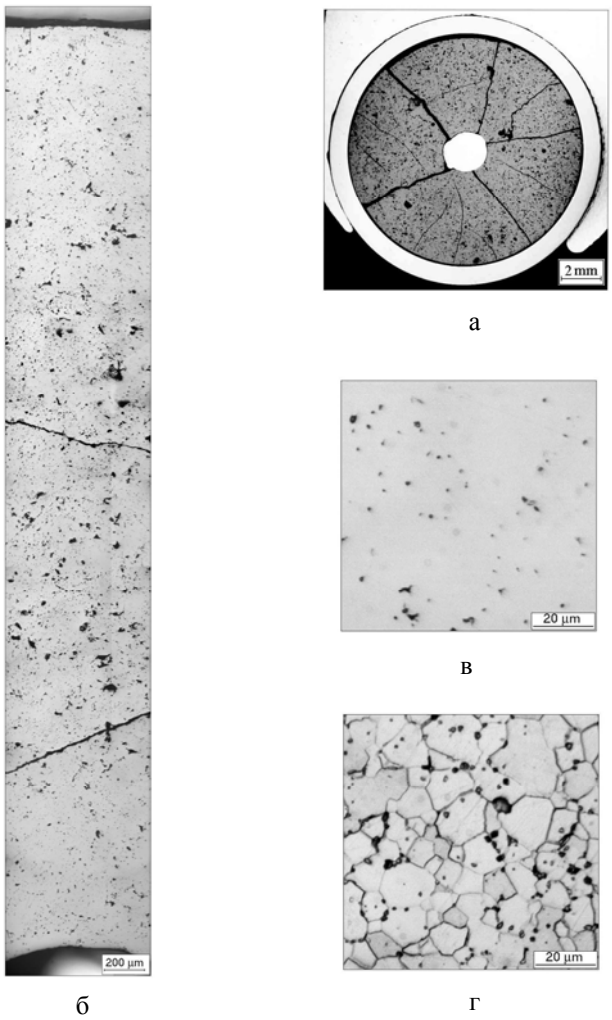
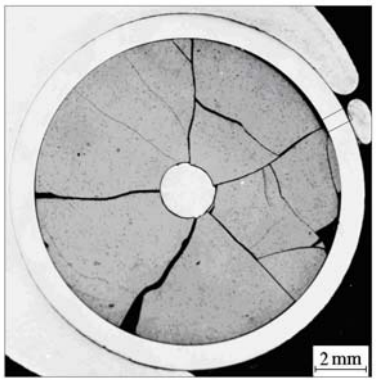
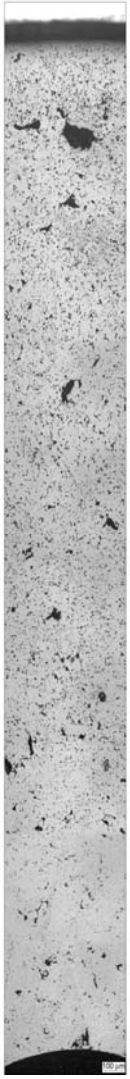


Рис. 4.85 – Макро- (а) и микроструктура уран-эрбиевого оксидного топлива в поперечном сечении твэла ПТВ ТВС 997 (участок между ДР11 и ДР12) после полировки (б, в) и травления (г)

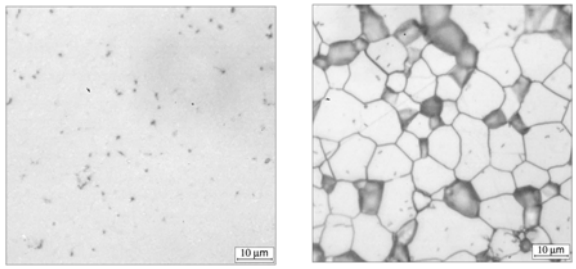
Керамографические исследования поперечных шлифов твэлов ТВС 361 с выгоранием 31,3 МВт·сут/кгU также не выявили существенного изменения макро- и микроструктуры уран-эрбиевого оксидного топлива (рис. 4.86). Таблетки топлива UO_2 + 0,4% Er_2O_3 были фрагментированы радиальными трещинами на 7–12 частей. Диаметральный зазор между топливным сердечником и оболочкой составляет 0,13–0,17 мм. Размер зерна уран-эрбиевого оксидного топлива лежал в пределах 6–18 мкм.



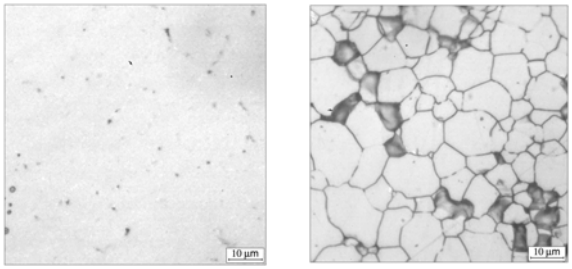
а



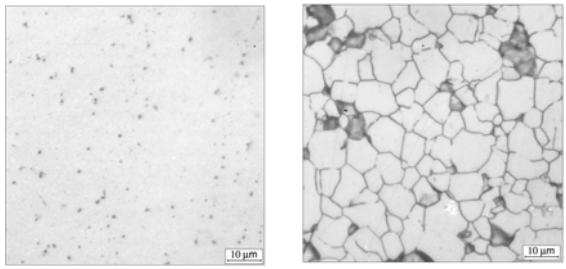
б



в



г



д

После полировки После травления

Рис. 4.86 – Типичная макро- (а) и микроструктура (б, в, г, д) уран-эрбиевого оксидного топлива в поперечном сечении твэла ТВС 361

В таблице 4.22 представлены обобщённые параметры структуры уранового и уран-эрбиевого оксидного топлива в твэлах десяти ТВС РБМК-1000.

Таблица 4.22 – Структурные параметры поперечных шлифов твэлов исследованных ТВС

ТВС	Топливо	Выгорание, МВт·сут/кгU	Размер зёрен топлива, мкм	Размер пор, мкм	Зазор между топливом и оболочкой, мкм	Диаметр центрального канала, мм
997	UO_2 + 0,409% Er_2O_3	6,07	5–25	2–3	220–270	2,0–2,2
626	UO_2 + 0,413% Er_2O_3	18,65	5–40	1–2	200–250	1,9–2,2
671	UO_2	18,90	11–13	3–5	~ 220	–
917	UO_2	19,50	~ 10	1–2	~ 230	–
012	UO_2	24,50	9–12	1–2	~ 200	–
570	UO_2	24,78	5–20	1–2	~ 200	–
442	UO_2 + 0,410% Er_2O_3	26,10	3–25	1–2	~ 175	~ 1,9
587	UO_2	26,16	3–25	1–2	100–250	–
360	UO_2 + 0,410% Er_2O_3	27,50	4–19	~ 2	150–200	~ 1,9
361	UO_2 + 0,4% Er_2O_3	31,30	6–18	~ 2	130–170	~ 1,9

Из анализа представленных результатов следует, что у герметичных твэлов исследованных ТВС, отработавших при штатных условиях на ЛАЭС, в диапазоне выгораний 6,07–31,3 МВт·сут/кгU не обнаружено заметных изменений структуры ни в урановом, ни в уран-эрбиевом оксидном топливе.

4.13.3 Структура топлива в негерметичных твэлах

На рис. 4.87 представлена макро- и микроструктура топлива в поперечном сечении (район ДР14) негерметичного твэла 7в ТВС 997.

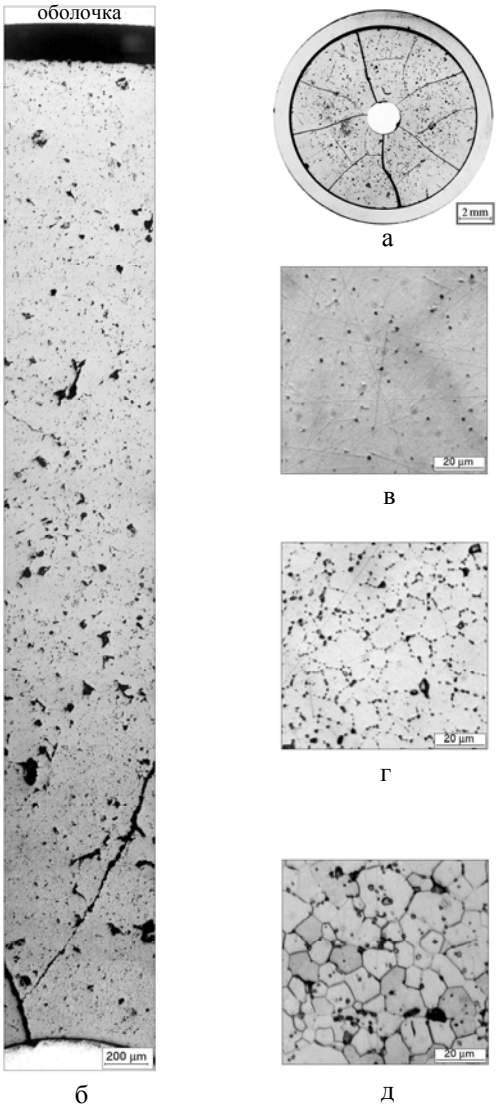


Рис. 4.87 – Макро- (а) и микроструктура топлива в поперечном сечении под ДР14 негерметичного твэла 7в ТВС 997 после полировки (б, в, г) и травления (д)

Из анализа приведённых результатов следует, что макро- и микроструктура негерметичного и герметичного твэлов с малым выгоранием отличаются незначительно. Топливные таблетки негерметичного твэла фрагментированы как радиальными, так и танген-

циальными трещинами на 17–26 фрагментов. Диаметр центрального отверстия составляет примерно 2 мм, диаметральный зазор – 0,24 мм.

Поры равномерно распределены по сечению шлифа, их количество и размер практически не изменяются по радиусу таблетки. Средний размер пор и зёрен UO_2 составляет 1–3 мкм и 4–20 мкм соответственно. В центральной части таблеток большое количество мелких пор располагается преимущественно по границам зёрен (см. рис. 4.87, д).

На рис. 4.88 приведены фотографии макро- и микроструктуры топлива в поперечном сечении негерметичного твэла 11в ТВС 659, отработавшей на ЛАЭС до выгорания 10,79 МВт·сут/кгU. Топливные таблетки фрагментированы радиальными трещинами. Диаметральный зазор топливо–оболочка составляет 0,2 мм. В нижней части твэла (вблизи отрыва заглушки) наблюдаются изменения размера пор по радиусу таблетки. Анализ структуры топлива после травления показал, что размер зерна UO_2 не изменяется по радиусу таблетки.

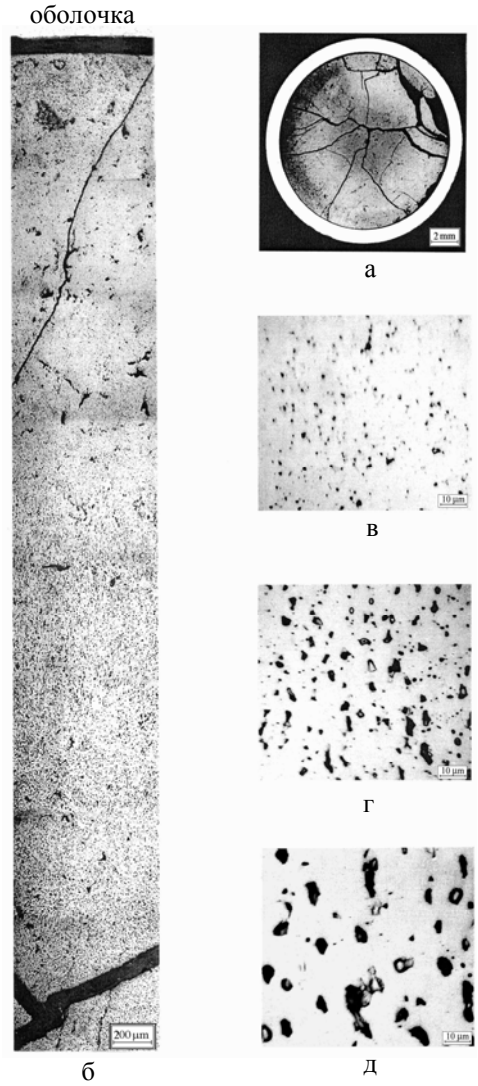


Рис. 4.88 – Макро- (а) и микроструктура (б–д) поперечного сечения негерметичного твэла 11в ТВС 659 вблизи района отрыва заглушки

На рис. 4.89 представлена макро- и микроструктура топлива в поперечном сечении негерметичного твэла 3в ТВС 626, отработавшей на ЛАЭС до выгорания 18,65 МВт·сут/кгU.

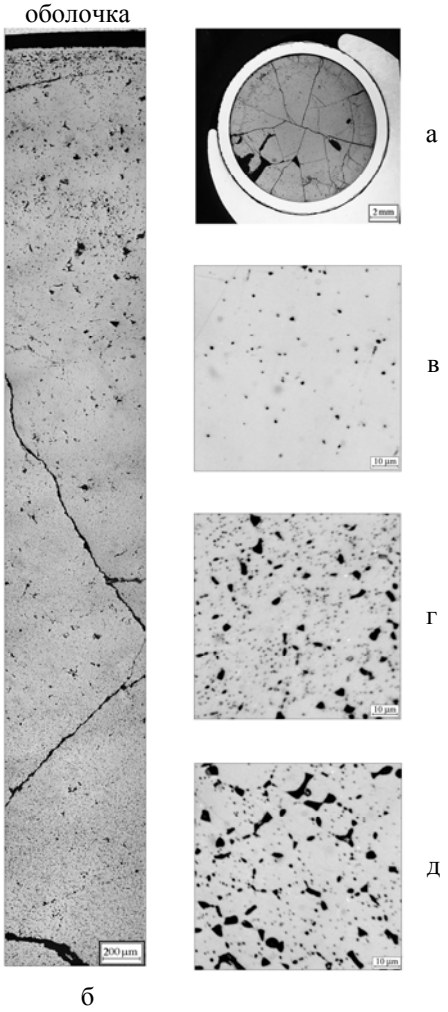


Рис. 4.89 – Макро- (а) и микроструктура (б–д) топлива негерметичного твэла 3в ТВС 626 в поперечном сечении под ДР11 (экранная таблетка)

В твэлах ТВС 626 для снижения всплеска энерговыделения у заглушек (в районе стыка ПТН и ПТВ) использовались две экранные таблетки без центрального отверстия с меньшим (2,4%) обогащением по ^{235}U, чем основная часть топлива с центральным каналом (2,6%).

В поперечном сечении экранной таблетки (участок под ДР11) наблюдалась обычная фрагментация топлива (см. рис.4.89,а). При изучении микроструктуры UO_2 было выявлено изменение размера пор по радиусу экранной таблетки. Наиболее крупные поры (около 5 мкм) были сосредоточены в центральной части таблетки. Рядом с оболочкой концентрация пор снижается, и размер их составляет 1–2 мкм.

Топливо имеет вид смеси фаз с оттенками от светло-серого до тёмно-серого на периферии таблетки и в трещинах (рис. 4.90). Зазор между сердечником и оболочкой местами заполнен серой пористой массой. Там где она отсутствует, периферия таблетки покрыта слоем тёмно-серого цвета. Анализ структуры топлива после травления показал, что размер зерна в исследованном сечении слабо изменяется по радиусу таблетки и составляет 5–20 мкм (рис. 4.91). Состояние топливного сердечника с центральным каналом в районе аномального ВТ-сигнала (см. рис. 4.70) практически такое же, как и в экранной таблетке.

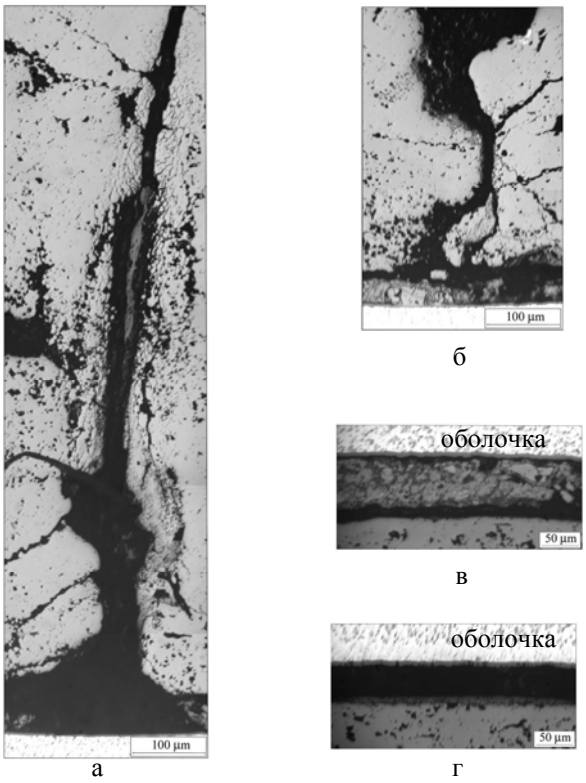


Рис. 4.90 – Микроструктура топлива (а, б) и состояние зазора «топливо–оболочка» (в, г) в негерметичном твэле 3в ТВС 626 в поперечном сечении под ДР11

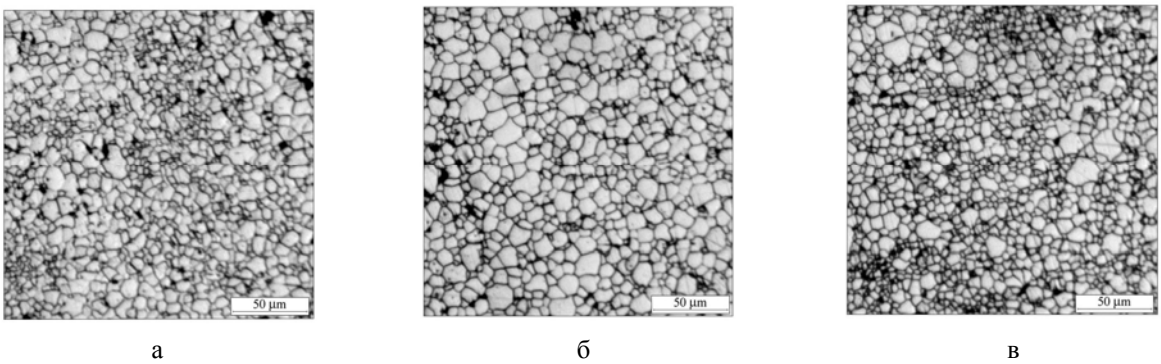


Рис. 4.91 – Микроструктура топлива негерметичного твэла 3в ТВС 626 в поперечном сечении под ДР11 около оболочки (а), в середине радиуса (б) и в центре таблетки (в)

В негерметичном твэле ТВС 671 (выгорание 18,9 МВт·сут/кгU) в районе вторичного дефекта на координате 1090 мм от заглушки было обнаружено существенное изменение структуры топлива. На середине радиуса таблетки размер зерна и пористость увеличились с 8 до 12 мкм и с 3 до 12% соответственно по сравнению с внешним слоем топлива (рис. 4.92).

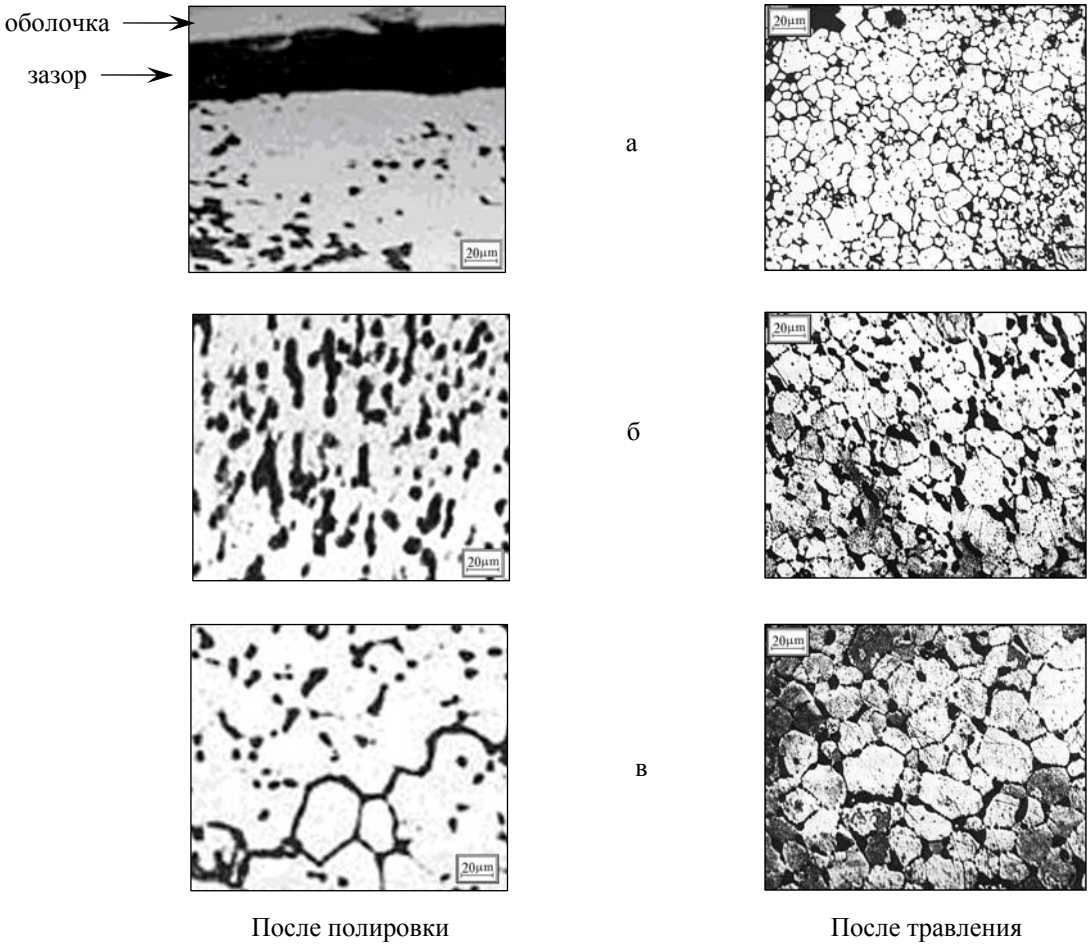


Рис. 4.92 – Микроструктура топлива негерметичного твэла ТВС 671 на координате 1090 м от заглушки: а – вблизи оболочки, б – в зоне вытянутых пор, в – около центра таблетки

На рис. 4.93 представлен график распределения пористости по радиусу топливной таблетки. Измерение пористости производилось с использованием фотоснимков 9 участков по радиусу шлифа твэла. Площадь каждого участка составляла около 0,53 мм^2.

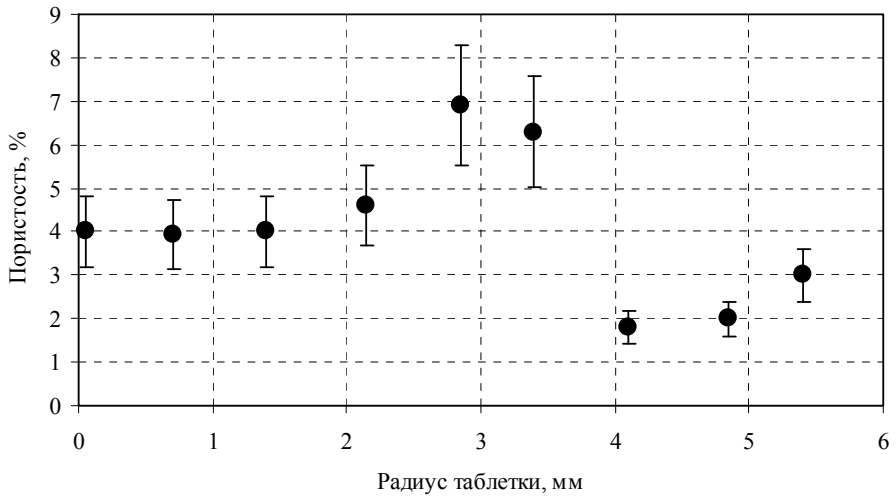


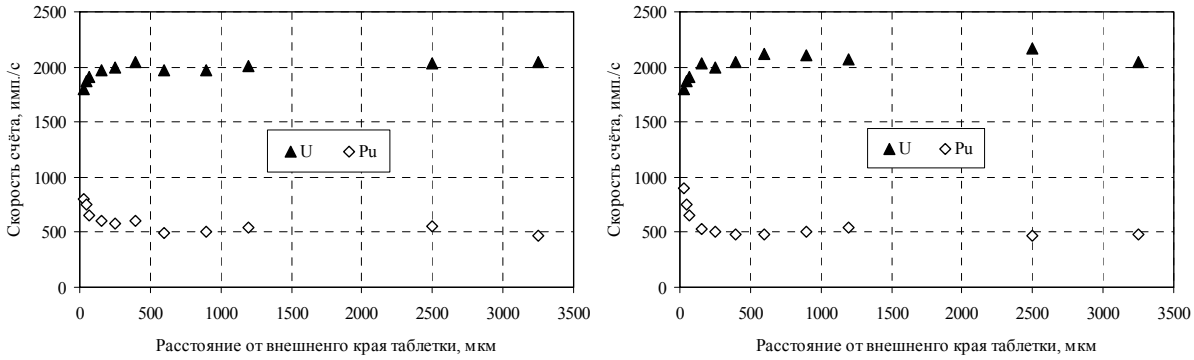
Рис. 4.93 – Изменение пористости по радиусу таблетки негерметичного твэла ТВС 671 в зоне вторичного дефекта

В кольцевой области, ограниченной наружным и внутренним радиусами 3,5 и 1,7 мм, крупные поры имели вытянутую форму с радиальной ориентацией. Пористость в этой зоне достигала максимального значения.

Перечисленные изменения структуры свидетельствуют о повышенной температуре топлива в зоне вторичного дефекта. По характеру структурных изменений можно заключить, что максимальная температура в центре топлива была не менее 1700 °С.

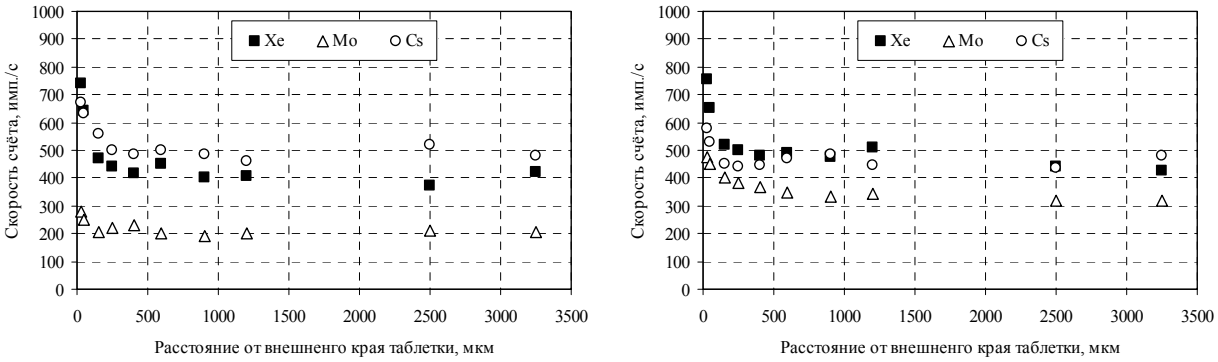
4.13.4 Рентгено-спектральный анализ уран-эрбиевого оксидного топлива

Рентгено-спектральный анализ топлива проводили с помощью волнодисперсионного спектрометра INCA Wave 700, установленного на сканирующем электронном микроскопе XL30 ESEM-TMP. При ускоряющем напряжении 30 кВ величина зоны возбуждения в диоксиде урана составляла 1–2 мкм. Для получения достоверных данных о распределении элементов с малой концентрацией основной упор делали на максимально возможное усреднение измерений. На рис. 4.94 и 4.95 представлены распределения урана, плутония и продуктов деления по сечению поперечных шлифов твэлов 1н и 5в из ТВС 626, отработавшей на 2-ом блоке ЛАЭС до выгорания 18,65 МВт·сут/кгU. Образцы для изготовления шлифов взяты на участках твэлов с максимальным выгоранием. Из анализа представленных данных следует, что массовая доля продуктов деления и плутония повышается, а урана снижается в периферийной зоне таблетки твэла РБМК [71].



а б

Рис. 4.94 – Распределение U и Pu вдоль радиуса шлифов твэлов 1н (а) и 5в (б) из ТВС 626



а б

Рис. 4.95 – Распределение Xe, Mo и Cs вдоль радиуса поперечных шлифов твэлов 1н (а) и 5в (б) из ТВС 626

4.13.5 Газовыделение из топлива при эксплуатации твэлов

В таблице 4.23 представлены для примера количество и состав газа, измеренные в твэлах ТВС 361, отработавшей на ЛАЭС до выгорания 31,3 МВт·сут/кгU.

Таблица 4.23 – Количество и состав газа под оболочкой твэлов ТВС 361

№ твэла	Свободный объём твэла, см3	Объём газа при н.у., см^3	Давление газа в твэ-ле, МПа	Содержание газов, об. %						
				He	N_2	O_2	Ar	CO_2	Kr	Xe
8н	51,7	342,9	0,67	93,22	<0,066	<0,018	<0,004	<0,001	0,67	6,03
13н	50,7	320,9	0,65	95,38	<0,038	<0,011	<0,001	<0,001	0,57	4,00
8в	50,6	315,0	0,63	95,28	<0,04	<0,012	<0,001	<0,001	0,46	4,21
13в	54,1	317,6	0,59	96,90	<0,088	<0,021	<0,003	<0,001	0,31	2,68

Из анализа представленных результатов следует, что содержание азота, кислорода, аргона и углекислого газа под оболочкой твэлов РБМК ничтожно мало. Основные компоненты «твэльной» среды: газ-наполнитель гелий и газообразные продукты деления (ГПД)

Xe и Kr. Максимальный выход ГПД наблюдается в твэлах внешнего ряда (8н, 8в), у которых энерговыделение несколько выше, чем в твэлах центрального ряда (13н, 13в) из-за депрессии потока нейтронов со стороны графитовой кладки. Максимальное количество ГПД под оболочкой твэла 8н равно:

$$N(Xe + Kr) = 342{,}9\ см^3 (6{,}03 + 0{,}67)\% / 100\% = 23\ см^3 .$$

С учётом того, что накопление ксенона и криптона в топливе этого твэла при выгорании 31,3 МВт·сут/кгU составляет около 2800 см^3, выход ГПД под оболочку не превышает 1%.

В таблице 4.24 и на рис. 4.96 приведены максимальные выходы Xe + Kr под оболочку в девяти исследованных ТВС с различным выгоранием топлива.

Таблица 4.24 – Максимальный выход ГПД из топлива под оболочку твэлов исследованных ТВС

Номер ТВС	ТВС с топливом UO_2 (обогащение 2,4 по ^{235}U, без центрального канала)					ТВС с топливом $UO_2 + Er_2O_3$ (обогащение 2,6 по ^{235}U, с центральным каналом)			
	608	917	570	012	587	997	626	360	361
Выгорание, МВт·сут/кгU	6,3	19,5	24,78	24,5	26,16	6,07	18,65	27,5	31,3
Кол-во Xe+Kr, см^3	0,5	5,8	6,7	2,0	13,3	4,3	23,1	22,3	23,0

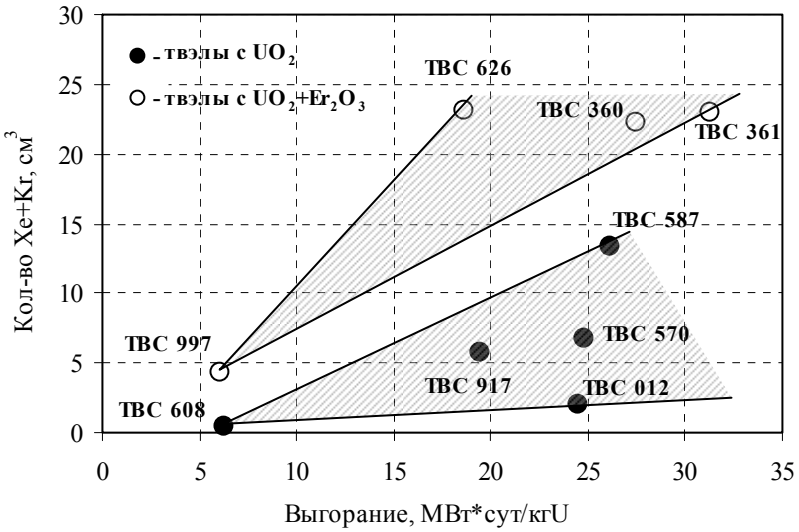


Рис. 4.96 – Зависимость газовыделения от выгорания топлива в твэлах десяти ТВС РБМК

Из анализа представленных результатов следует, что выход ГПД из уран-эрбиевого оксидного топлива (с центральным каналом в таблетках) значительно выше, чем в урановом оксидном топливе (без центрального канала), несмотря на то, что наличие канала существенно (примерно на 150 °С) снижает температуру в центральной части топлива [72]. Полученный результат обусловлен, по всей видимости, меньшей теплопроводностью топ-

лива $UO_2 + Er_2O_3$. Обращает на себя внимание, что в ТВС 012 и 570, эксплуатировавшихся на краю АЗ в технологических каналах низкой мощности (около 1 МВт), выход Xe+Kr самый минимальный среди ТВС, отработавших до выгорания 25 МВт·сут/кгU.

4.13.6 Состояние пружинного фиксатора топливного сердечника

Фиксатор топливного сердечника, выполненный из сплава ЭК-173ИД (ХН40М5Т2ГЮБР-ИД), представляет собой пружину, состоящую компенсирующей и фиксирующей частей с малым и большим диаметром соответственно (рис. 4.97).

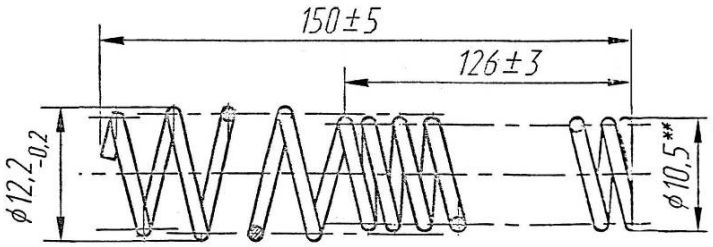


Рис. 4.97 – Эскиз пружинного фиксатора

С целью проведения механических испытаний из твэлов ТВС 761 с максимальным выгоранием были вырезаны фрагменты, содержащие пружинный фиксатор. Координаты вырезки фрагментов определяли по результатам рентгеновского просвечивания твэлов.

Определение жёсткости фиксаторов проводилось по диаграммам нагружения – деформации. Величина жёсткости вычислялась по линейной аппроксимации данных, полученной методом наименьших квадратов.

На рис. 4.98 приведены диаграммы сжатия пружин и рассчитанные значения жёсткости. Исходная жёсткость фиксаторов до эксплуатации согласно конструкторской документации составляла 0,2 ± 0,02 кгс/мм. Из анализа полученных данных следует, что жёсткость пружинных фиксаторов из сплава ЭК-173ИД после эксплуатации существенно не изменилась.

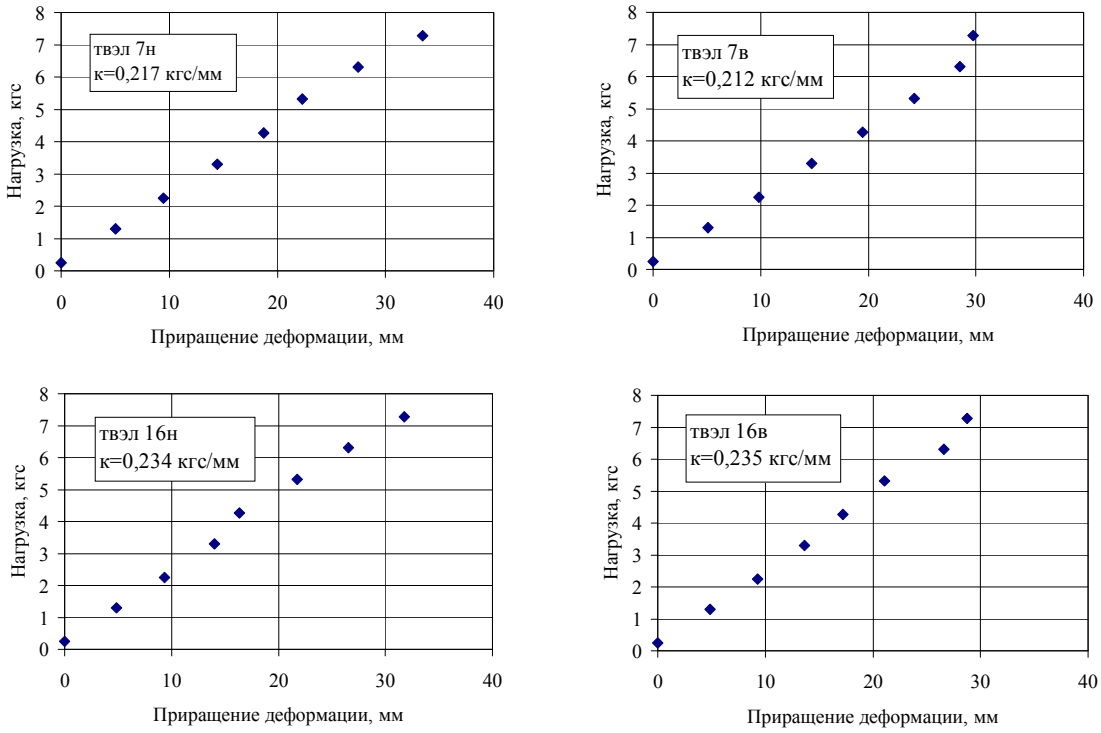
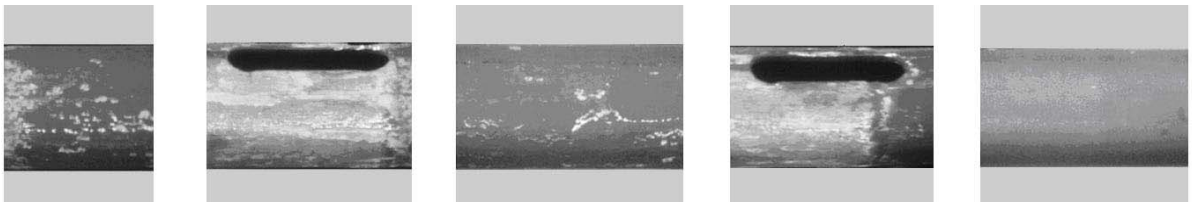


Рис. 4.98 – Диаграммы нагружения пружинных фиксаторов

Глава 5. Результаты исследования конструкционных элементов ТВС

5.1 Каркасная и центральная трубы

Состояние каркасных труб изучалось в ТВС 567, 570 и 587, отработавших на ЛАЭС до 24, 24,78 и 26,76 МВт·сут/кгU. На рис. 5.1 представлен внешний вид КТ ТВС 567 в максимуме энерговыделения на участке крепления восьмой и девятой стальных дистанционирующих решёток ПТН.



Выше ДР9 | Место крепления ДР9 | Между ДР9 и ДР8 | Место крепления ДР8 | Ниже ДР8

Рис. 5.1 – Фотоснимки участков каркасной трубы ТВС 567

Для металлографических исследований каркасной трубы ТВС 570 было выбрано сечение, расположенное в районе девятой циркониевой ДР. На рис. 5.2 приведены снимки, иллюстрирующие макро- и микроструктуру КТ в этом районе, а также состояние её внешней и внутренней поверхностей. На наружной поверхности КТ обнаружены оксидные плёнки равномерного и очагового типа. Толщина очагов составляла 30–150 мкм (рис. 5.2, в), а равномерной оксидной плёнки – около 10 мкм. Минимальная толщина стенки каркасной трубы на исследованном участке (в районе прорези) не превышает 1,2 мм (ис-

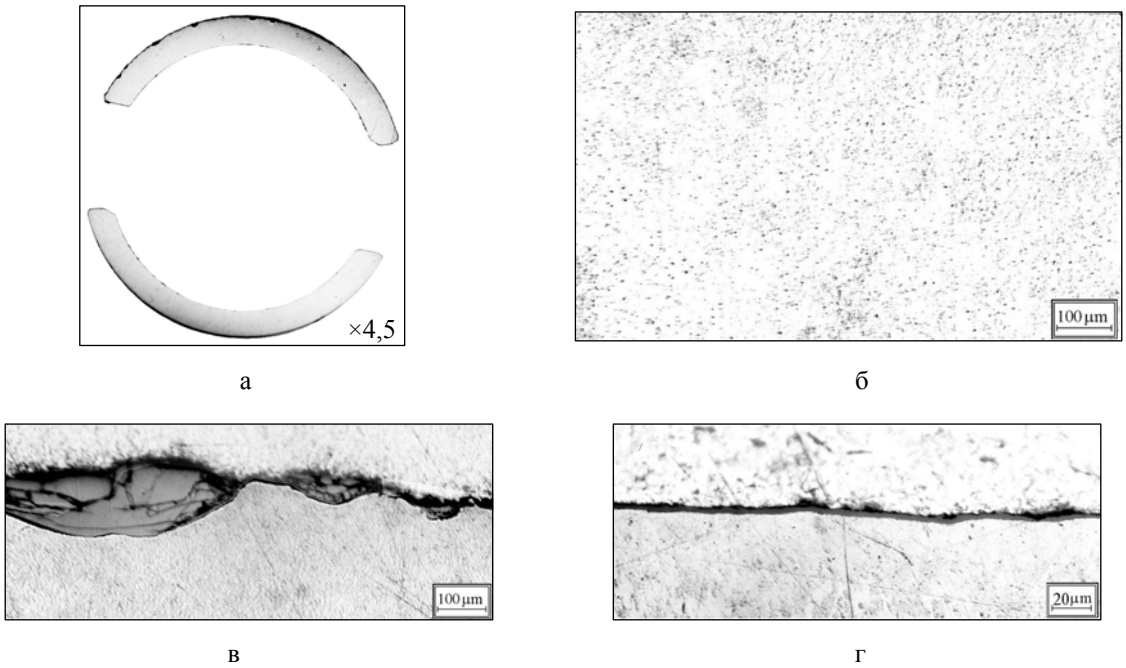


Рис. 5.2 – Макро- (а) и микроструктура (б), оксидная плёнка на наружной (в) и внутренней поверхности (г) каркасной трубы ТВС 570

ходный размер по чертежу 1,45 мм). Внутренняя поверхность покрыта равномерной сплошной оксидной плёнкой толщиной около 3 мкм (рис. 5.2, г).

Для исследования каркасной трубы ТВС 587 выбрано сечение, расположенное в районе паза на уровне размещения стальной ДР10. По данным визуального осмотра на этом участке зафиксирована максимальная толщина оксидной плёнки. На рис. 5.3 приведены снимки микро- и макроструктуры поперечного сечения КТ после полировки. На наружной поверхности наблюдаются оксидные плёнки в виде крупных очагов, которые объединяются и образуют протяжённые зоны. Толщина очагов достигает 230 мкм, а «живого» сечения КТ – 1,15 мм (рис. 5.3, б). Внутренняя поверхность каркасной трубы покрыта равномерной сплошной оксидной плёнкой толщиной до 3 мкм (рис. 5.3, в). Обнаружены очаги коррозии, проникшей со стороны внутренней поверхности паза на глубину приблизительно 25 мкм (рис. 5.3, г).

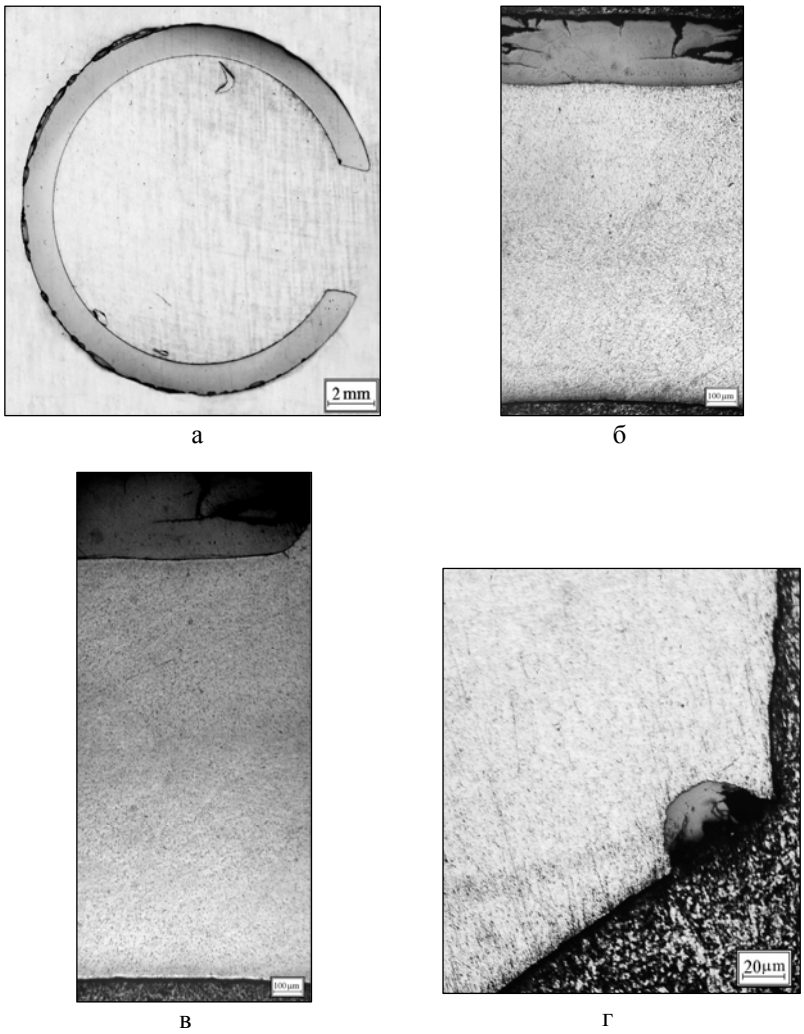


Рис. 5.3 – Макроструктура (а), оксидная плёнка на наружной (б), внутренней поверхности (в) и в районе паза (г) каркасной трубы ТВС 587

Степень гидрирования каркасных труб не велика (рис.5.2, б и рис.5.3, б), но в структуре КТ ТВС 587, в области, примыкающей к крупным очагам коррозии, обнаружены пластинчатые гидриды, ориентация которых перпендикулярна границе раздела «оксид–металл» (рис. 5.4).

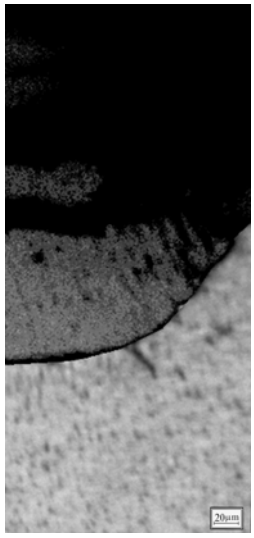


Рис. 5.4 – Микроструктура поперечного сечения КТ ТВС 587 в области максимального окисления (после травления)

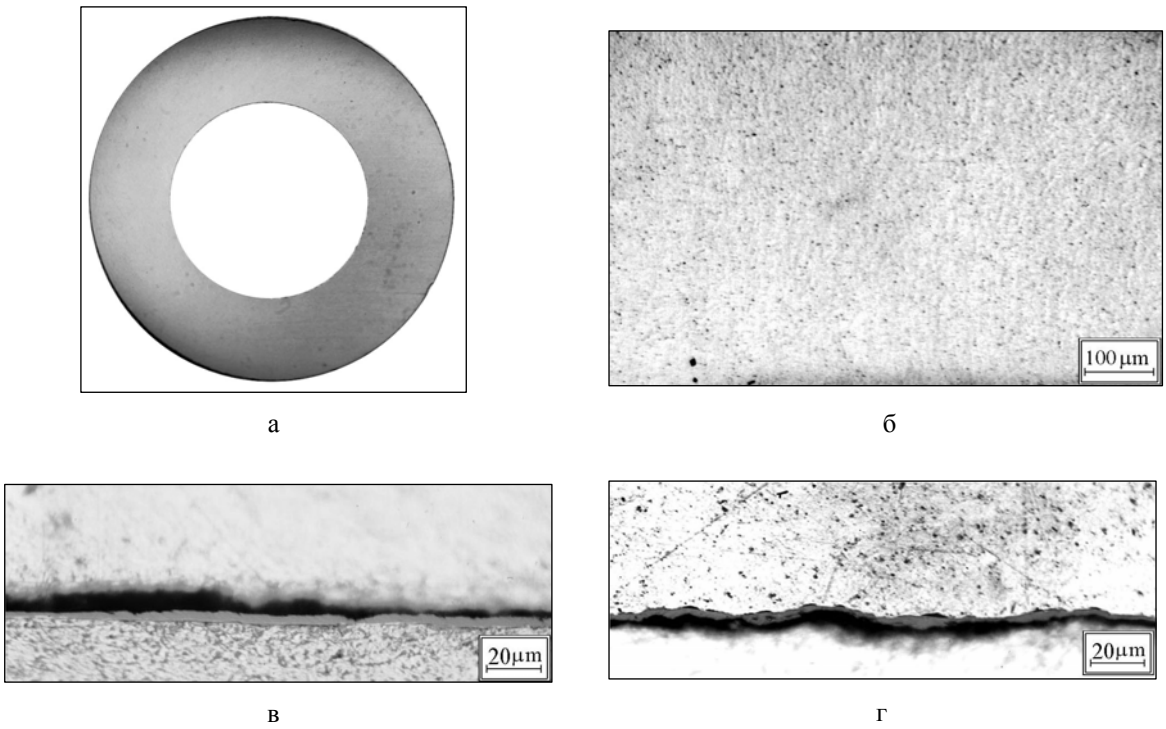
Механические характеристики каркасной трубы определяли на кольцевых образцах, вырезанных из участков, расположенных ниже сливного отверстия. Испытания проводили на машине 1236Р при комнатной и рабочей (350 °С) температурах, устанавливая образцы на двух одинаковых полукруглых опорах диаметром 8 мм. Скорость перемещения активного захвата составляла 1мм/мин. Результаты испытаний приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Механические свойства каркасной трубы ТВС 587

$T_{исп.}$, °С	σ_B, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_B, %	$\delta_{0,2}$, %
20	552, 616, 602	512, 571, 591	9,6; 13; 12	2,8; 1,2; 2,1
	590	558	12	2,0
350	423, 379, 345	412, 345, 306	15, 14 , 12	1,4; 2,0; 4,0
	382	355	14	2,5

Средние значения предела текучести составляют 558 и 335 МПа при комнатной и рабочей температурах соответственно. Минимальный уровень общего относительного удлинения равен 9,6%.

Центральная труба (ЦТ) ТВС 570 исследовалась в сечении на отметке 50 мм выше центра активной зоны. Полученные результаты представлены на рис. 5.5.



а б

в г

Рис. 5.5 – Макро- (а) и микроструктура (б) поперечного сечения центральной трубы, оксидная плёнка на наружной (в) и внутренней поверхности (г) центральной трубы ТВС 570

Оксидная плёнка на наружной и внутренней поверхности ЦТ не превышала 5 мкм (рис. 5.5, в, г). Гидриды в виде мелкодисперсных выделений равномерно распределялись по сечению шлифа центральной трубы (рис. 5.5, б). Микротвёрдость материала КТ и ЦТ была практически одинакова и находилась в пределах 2300–2500 МПа. Таким образом послереакторные исследования показали удовлетворительную эксплуатационную надёжность каркасной и центральной труб ТВС РБМК при выгораниях топлива выше проектных.

5.2 Состояние дистанционирующих решёток в ТВС, отработавших до проектного и повышенного выгорания топлива

В штатных ТВС РБМК-1000, рассчитанных на достижение проектного выгорания, используются стальные, а в экспериментальных – циркониевые дистанционирующие решётки. Повышение конкурентоспособности кипящих канальных реакторов большой мощности связывают с увеличением штатного выгорания ТВС с 20 до 35 МВт·сут/кгU. Возможность достижения такого выгорания основана на использовании уран-эрбиевого оксидного топлива 3%-го обогащения по ^{235}U и дистанционирующих решёток из циркониевого сплава.

Замена стальных ДР на циркониевые существенно повышает положительный баланс нейтронов в активной зоне и снижает вероятность разгерметизации твэлов из-за ло-

кального окисления и фреттинг-износа оболочек под СДР. Улучшение ядерно-физических характеристик АЗ обусловлено уменьшением паразитного захвата нейтронов сплавом Zr-1%Nb по сравнению с легированной хромоникелевой сталью. Повышенное локальное окисление оболочек твэлов под СДР можно объяснить добавкой к обычному процессу образования оксида циркония в пароводяной смеси электрохимической коррозии вследствие образования гальванической пары из разнородных металлов. Большой фреттинг-износ под СДР обусловлен, вероятно, отличиями в коэффициентах трения пар Zr − Zr (0,05) и Zr − сталь (0,35). Состояние стальных и циркониевых ДР изучалось в материаловедческом комплексе НИИАР при проведении исследований двадцати двух ТВС РБМК-1000, отработавших на Ленинградской АЭС до выгорания 4,6–31,7 МВт·сут/кгU.

5.2.1 Конструкция дистанционирующих решёток

Общий вид дистанционирующих решёток ТВС РБМК-1000 представлен схематично на рис. 5.6. Дистанционирующая решётка ТВС РБМК-1000 состоит из обоймы, направляющей втулки, шести ячеек внутреннего и двенадцати ячеек внешнего ряда твэлов. Для уменьшения люфтов пучков твэлов в технологическом канале реактора (исходный внутренний диаметр ТК равен $79^{+0,8}$ мм) на обойме предусмотрены специальные выступы: шесть для стальных ДР и двенадцать для ЦДР. Крепление ячеек ДР друг с другом, направляющей втулкой и обоймой обеспечивается контактно-стыковой сваркой. Ячейки внешнего ряда содержат четыре, а внутреннего – пять пуклёвок – участков, контактирующих с твэлами. Толщина стенок обойм и ячеек как стальных, так и циркониевых ДР – 0,35 мм.

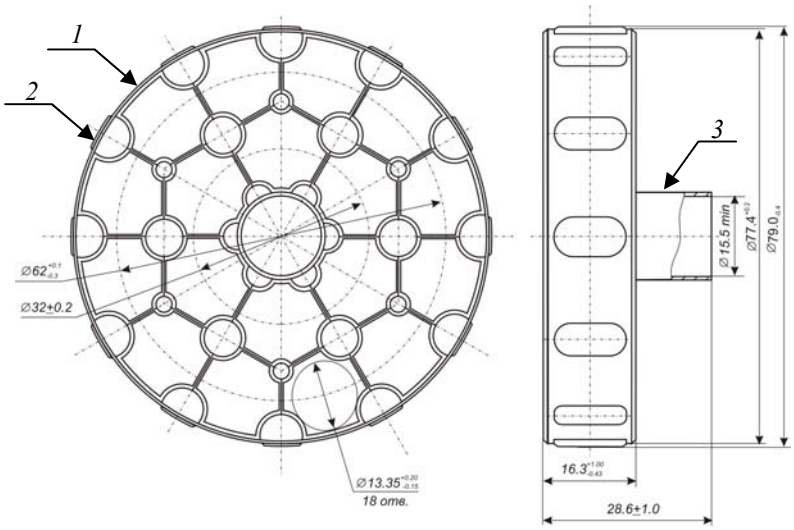


Рис. 5.6 – Конструкция ДР ТВС РБМК-1000: 1 – обойма;
2 – выступы на обойме; 3 – направляющая втулка

5.2.2 Размерные изменения

После разделки ТВС и извлечения твэлов из ПТН и ПТВ проводились измерения диаметра обойм и вписанных окружностей ячеек ДР (далее – ячеек ДР). Для определения диаметрального размера обойм по выступам и впадинам использовалось устройство с индикатором часового типа, тарированное по концевым мерам длины.

Рис. 5.7 иллюстрирует типичные графики распределения геометрических параметров обойм в двух стальных ДР нижнего и верхнего пучков твэлов тепловыделяющей сборки, отработавшей до выгорания 18,6 МВт·сут/кгU. На рис. 5.8 приведены результаты измерения среднего диаметра обойм по выступам всех СДР и ЦДР штатной и опытной ТВС РБМК-1000, отработавших до проектного выгорания топлива (20 МВт·сут/кгU). Анализ полученных результатов выявил тенденцию к уменьшению среднего диаметра обойм по выступам в сторону нижней части ТВС как в стальных (рис. 5.8, а), так и в циркониевых ДР (рис. 5.8, б).

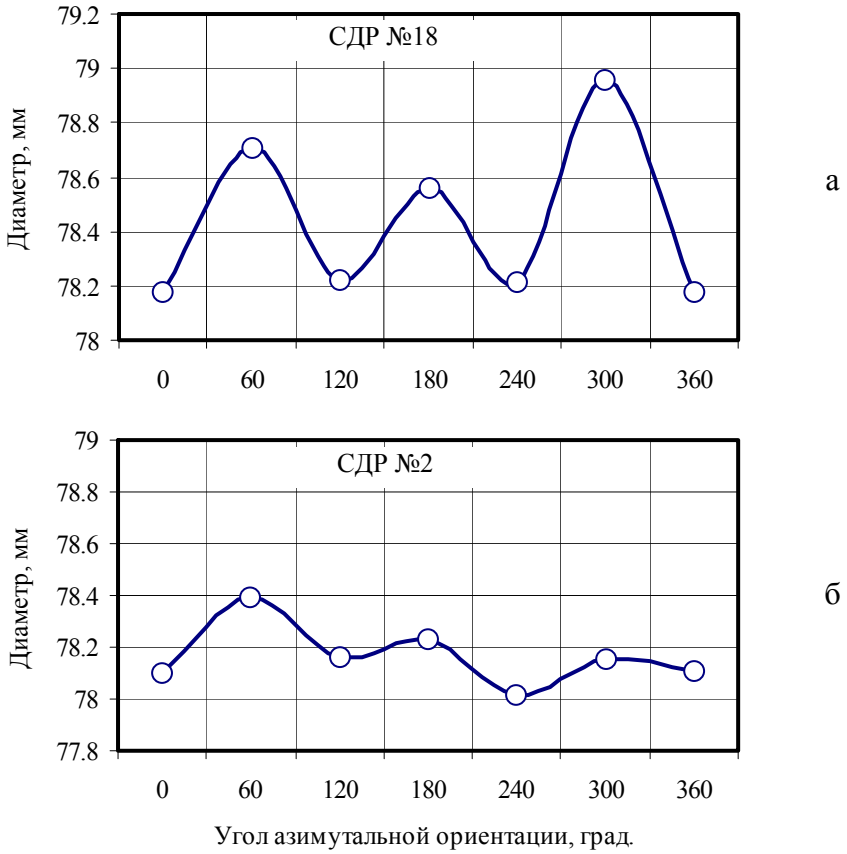


Рис. 5.7 – Диаметр по впадинам (ориентация 0°, 120°, 240°) и выступами (ориентация 60°, 180°, 300°) обойм двух СДР из ПТВ (а) и ПТН (б) штатной ТВС 626

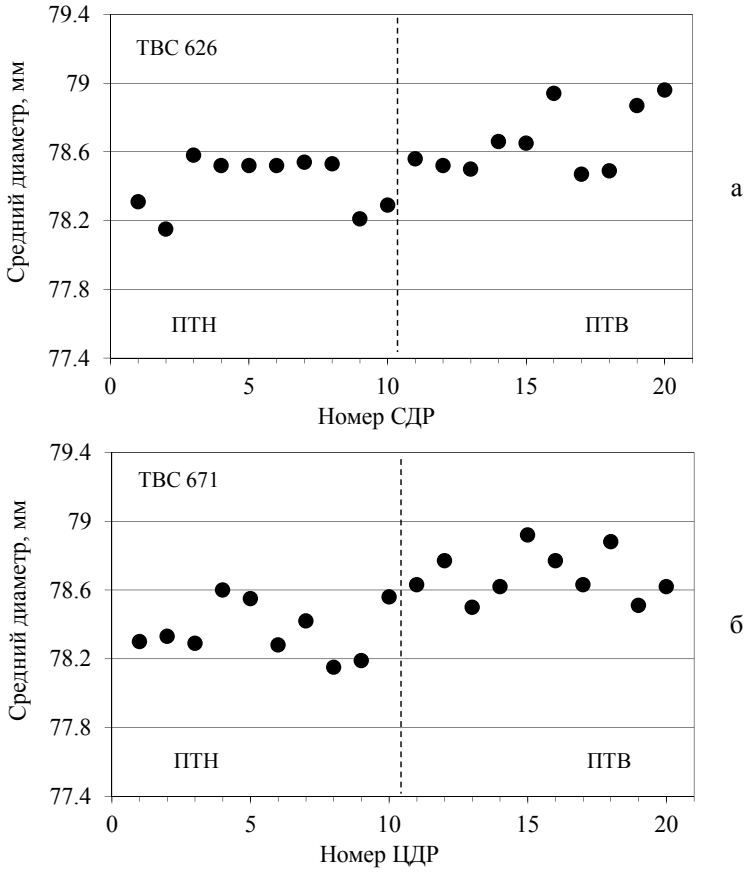


Рис. 5.8 – Изменение среднего диаметра обойм стальных и циркониевых ДР по высоте штатной (а) и опытной (б) ТВС РБМК-1000

Для изучения состояния СДР №2 были отобраны образцы с максимальным (ориентация 60°) и минимальным (ориентация 300°) размером выступов на её обойме (см. рис. 5.7). Из анализа макроснимков шлифов обоймы (рис. 5.9, а) следует, что в первом образце высота выступа не велика (0,3 мм), а во втором выступ вообще не проявляется (рис. 5.9, б).

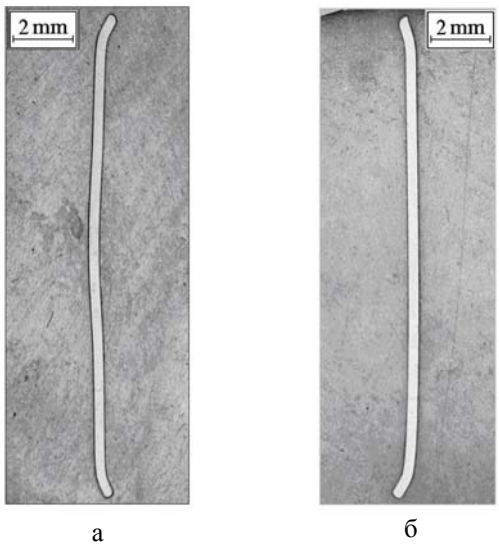


Рис. 5.9 – Макроснимки шлифов образцов обоймы СДР №2 ТВС 626 в районе выступов с ориентацией 60° (а) и 300° (б)

Для измерения диаметра ячеек ДР применялись цилиндрические секционные калибры (шаг калибровки – 0,01 мм). Диаметр ячейки определялся как среднее значение размеров калибра, прошедшего и не прошедшего через ячейку ДР. Анализ полученных результатов показал, что как в штатных (со стальными ДР), так и в опытных ТВС (с циркониевыми ДР) диаметр ячеек увеличивался к центру АЗ.

С целью выяснения причин появления обнаруженного эффекта были проведены измерения диаметра твэлов с помощью контактного профилометра с преобразователем типа «магнитная линейка». Измерения проводились в двух взаимно-перпендикулярных ориентациях дискретно через 2 мм по длине оболочечных труб. Анализ полученных результатов выявил корреляцию между увеличением диаметра твэлов и ячеек ДР. На рис. 5.10 представлены типичные распределения усреднённых диаметров твэлов и ячеек ДР в штатной ТВС 587, отработавшей на ЛАЭС до выгорания выше проектного – 26,16 МВт·сут/кгU. Увеличение диаметра твэлов под ДР связано с локальным окислением оболочки и отличием молярных объёмов ZrO_2 и сплава Zr-1%Nb.

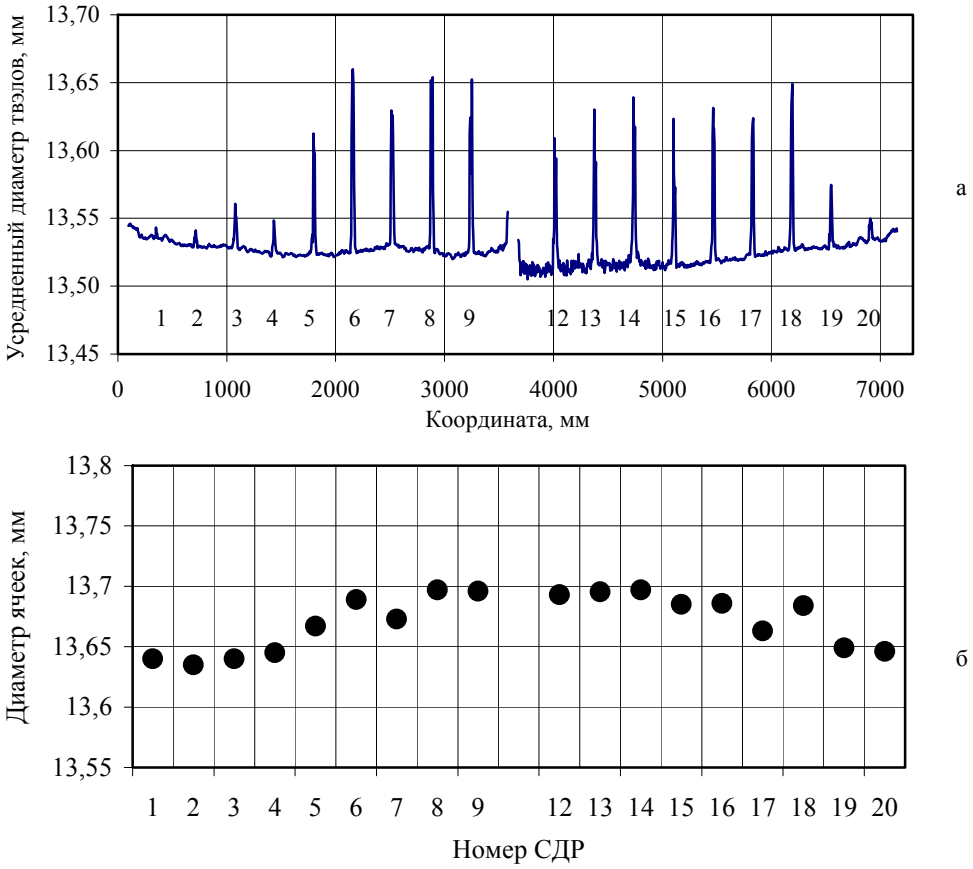


Рис. 5.10 – Распределение среднего диаметра твэлов (а) и ячеек СДР (б) в ТВС 587 (исходный размер ячеек $13{,}35^{+0{,}20}_{-0{,}15}$ мм)

В опытной ТВС с циркониевыми ДР, отработавшей до выгорания 27,5 МВт·сут/кгU, максимальный диаметр ячеек также увеличивался к центру АЗ и достигал

величины 14,1 мм, несмотря на то, что под ЦДР толщина локального окисления была в два раза меньше, чем под СДР.

5.2.3 Упругие и прочностные свойства

Для измерения предела упругого перемещения стенок ячеек ДР использовался груз весом 30 кг, расширительный конус и набор многосекционных калибров. Предел упругих перемещений определялся как максимальное увеличение диаметра ячейки ДР, при котором не наблюдается остаточная деформация её стенки.

Результаты измерений показали изменение $\Delta d_{упр.}$ стенок ячеек стальных ДР с 0,2 до 0,35 мм в диапазоне выгораний 6–31 МВт·сут/кгU. В тепловыделяющих сборках с ЦДР, достигших проектного выгорания, этот параметр составлял 0,18–0,29 мм. В ТВС с большим выгоранием для половины ячеек ЦДР предел упругих перемещений стенок лежал в интервале 0,08–0,27 мм. У остальных ячеек упругие свойства практически отсутствовали. Расширение конической оправкой сразу же приводило к появлению остаточной деформации ячеек ДР.

Для определения прочности материала стенок ячеек стальных ДР вырезались образцы в виде одной ячейки. При измерении разрушающей нагрузки сварного соединения «ячейка–ячейка» использовалась «восьмёрка» в виде двух ячеек ДР. Испытания на растяжение проводили при комнатной температуре на установке Р-1794 с использованием захватов с круглыми консольными опорами. Скорость перемещения захвата составляла 1 мм/мин.

Поскольку форма и размеры образцов не являлись общепринятыми, результаты испытаний на разрыв можно использовать лишь для качественной оценки конструктивной прочности ДР. Анализ полученных результатов показал, что в ТВС с выгоранием выше проектного предел прочности стальных ячеек находился на достаточно высоком уровне ~ 800 МПа. Вид диаграмм растяжения указывал на наличие пластической деформации. Разрушение сварных соединений «ячейка–ячейка» происходило по шву и имело хрупкий характер. Максимальная разрушающая нагрузка составляла 1300 Н.

В ТВС с циркониевыми ДР, отработавших до проектного выгорания, прочность большей части ячеек и сварных соединений находилась на удовлетворительном уровне. Предельная нагрузка разрушения сварных швов и стенок ячеек при комнатной температуре была не ниже 80 и 300 Н соответственно.

Механические испытания элементов ЦДР в ТВС, отработавших до выгорания выше проектного (25–27 МВт·сут/кгU), проводились при температуре 20 и 300 °С. Анализ полученных результатов показал не удовлетворительную прочность циркониевых ДР. Пре-

дельная нагрузка разрушения стенок ячеек ЦДР при комнатной и рабочей температурах была очень низкой и составляла 30–50 и 100–200 Н соответственно. Усилия отрыва сварных соединений «ячейка–ячейка» при температуре 300 °С изменялись от 20 до 40 Н. При температуре 20 °С сварные швы разрушались от незначительных нагрузок.

5.2.4 Морфология дефектов в ячейках решёток

При визуальном осмотре стальных ДР тепловыделяющей сборки с запроектным выгоранием были обнаружены восемь дефектов: пять из них в СДР7, остальные – в СДР8 [41]. Дефекты в виде трещин располагались в пуклёвках – местах контакта ячеек с твэлами (рис. 5.11). Металлографические исследования выявили характер зарождения такого типа дефектов. Рис. 5.12 иллюстрирует макроструктуру поперечного шлифа ячейки в районе пуклёвки после полировки и травления щавелевой кислотой. Трещины, распространяющиеся по границам зёрен, указывают на межкристаллитный характер разрушения материала ячеек стальных ДР.

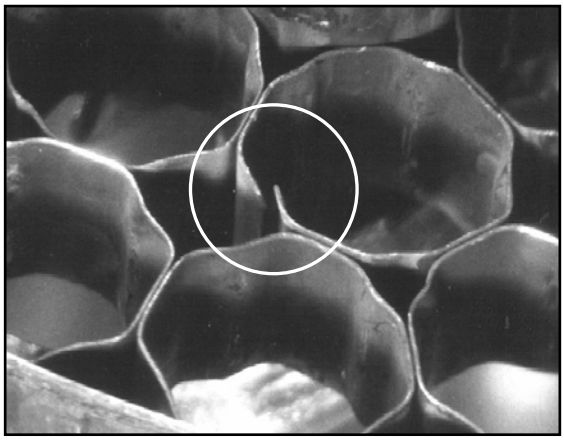


Рис. 5.11 – Типичный вид сквозной трещины в пуклёвке ячейки стальной ДР ТВС 587

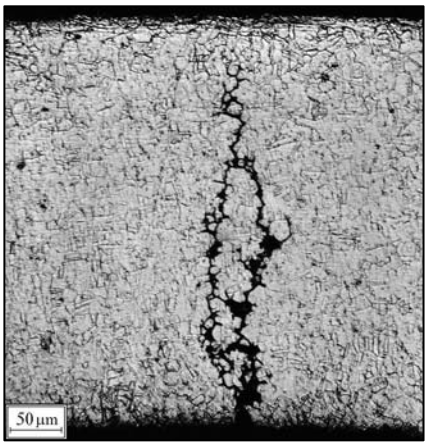
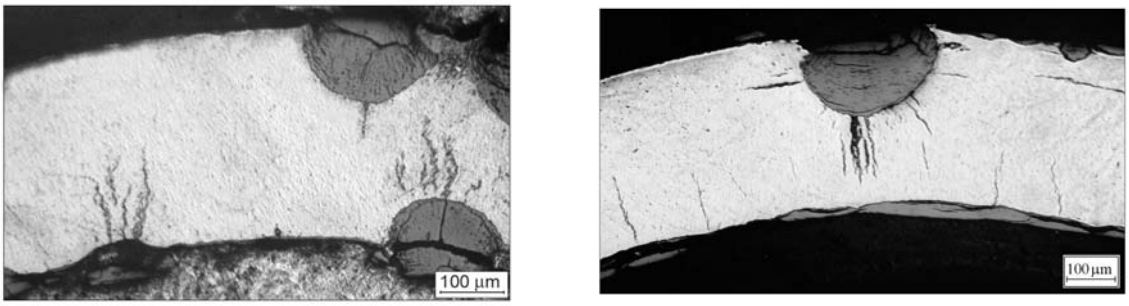


Рис. 5.12 – Микроструктура стенки ячейки стальной ДР на участке контакта с твэлом

Визуальный осмотр и металлографические исследования экспериментальной ТВС, отработавшей до выгорания 27,5 МВт·сут/кгU, выявили дефекты в обоймах, втулках, ячейках и сварных соединениях циркониевых ДР. Трещины в ячейках ЦДР локализовались на участках минимального радиуса (гибов) и в зоне контакта с твэлами [73]. На рис. 5.13 представлены типичные фотографии микроструктуры стенок ячеек ЦДР на этих участках. На всех фрагментах ЦДР наблюдалось значительное локальное окисление. Ячейки в районе гибов и пуклёвок, утонённые из-за очаговой коррозии, содержали пластинчатые гидриды неблагоприятной ориентации. Максимальное содержание водорода в ЦДР, определённое спектрально-изотопным методом, достигало $8 \cdot 10^{-2}$ % масс. При этом гидрирование оболочек твэлов не превышало $(3–5) \cdot 10^{-3}$ % масс.



а б

Рис. 5.13 – Микроструктура ячейки циркониевой ДР на участках с минимальным радиусом (а) и пуклёвкой – места контакта с твэлом (б)

Таким образом, результаты неразрушающих и выборочных разрушающих послереакторных исследований дистанционирующих решёток позволяют сделать следующие выводы:

– стальные ДР сохранили способность фиксировать конфигурацию пучков твэлов до выгорания 31 МВт·сут/кгU. Механические испытания выявили высокую прочность стенок ячеек и сварных соединений СДР. Люфты твэлов отсутствовали из-за сохранения упругих свойств ячеек стальных ДР. Причина появления трещин в пуклёвках ячеек – коррозионное растрескивание под напряжением – типичное явление для хромоникелевых сталей в условиях кипящего реактора с высоким содержанием кислорода в паро-водяном теплоносителе (20 мкг/кг);

– при увеличении длительности эксплуатации до 8–10 лет появляется проблема сохранения работоспособности циркониевых дистанционирующих решёток. Анализ результатов послереакторного исследования 5 экспериментальных ТВС РБМК-1000 с выгоранием 10,5–27,5 МВт·сут/кгU показал, что циркониевые ДР находятся в неудовлетворительном состоянии из-за деградации пластических и прочностных свойств ДР из сплава Zr–1%Nb, обусловленной окислением, наводороживанием и появлением гидридов поперечной ориентации [74].

Причину обнаруженных эффектов следует искать в наличии напряжений, влияние которых недостаточно принималось во внимание при разработке циркониевых ДР. ЦДР создавались путём простого копирования конструкции стальных решёток без учёта особенностей поведения циркониевых сплавов в условиях знакопеременных нагрузок, приводящих к коррозионной усталости материалов. Согласно современным представлениям коррозионную усталость можно классифицировать как особый тип разрушения, которое происходит в коррозионной среде под воздействием циклически меняющихся напряжений [75].

Локальные деформации при знакопеременных нагрузках приводят к возникновению напряжений в слое оксида, всегда присутствующего на поверхности конструкционных элементов из циркониевых сплавов. Напряжения вызывают искажения кристаллической решётки ZrO_2 и появление трещин в защитной оксидной плёнке, что ускоряет диффузию кислорода к металлу и, соответственно, рост оксидного слоя. Повышенное окисление в местах механических напряжений ведёт к увеличению концентрации водорода и появлению пластинчатых гидридов неблагоприятной ориентации [76].

Таким образом, применение ажурной конструкции ЦДР (толщина стенок ячеек и обода 0,35 мм), находящейся при эксплуатации в сложнодеформированном состоянии, создаёт предпосылки для протекания процессов, приводящих к ухудшению её механических характеристик. Повышение жёсткости конструкции, например, путём увеличения толщины стенок ячеек и ободов, использования ячеек с тремя пуклёвками будут способствовать уменьшению амплитуды вибраций в звеньях «твэл–ячейка» и «ТК–ЦДР», но не могут гарантировать полного решения проблемы.

Серьёзным препятствием для планируемого увеличения срока службы ТВС с ЦДР является бескоррекционный (окислительный) водно-химический режим (ВХР), реализуемый в настоящее время на реакторах РБМК. В отечественных кипящих реакторах из-за отсутствия условий для накопления в контуре радиолитического водорода радиолиз не подавляется, и теплоноситель содержит до 20 мкг/л кислорода. В зарубежных АЭС с BWR используется коррекционный ВХР с подавлением радиолиза путём безопасного введения водорода в теплоноситель с помощью твёрдополимерного электролита [77]. Применение водородного ВХР не только повысит стойкость к окислению циркониевых сплавов, но и существенно уменьшит вероятность растрескивания под напряжением стальных конструкций в КМПЦ реактора РБМК-1000 [78].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С 1998 по 2014 год в АО «ГНЦ НИИАР» были проведены материаловедческие исследования 22 ТВС РБМК-1000, отработавших на Ленинградской АЭС до выгорания 4,6 – 35,7 МВт·сут/кгU. Длительность эксплуатации ОТВС в технологических каналах мощностью 0,9–2,2 МВт составляла 0,7–12,3 года (3100 эфф. суток).

Тепловыделяющие сборки, изготовленные в ПАО «МСЗ», отличались друг от друга конструкцией, видом топлива, материалом дистанционирующих решёток и фиксатором топливного сердечника твэлов. К основным инновациям можно отнести:

– внедрение центрального закрепления твэлов в ТВС;

– замену стальных дистанционирующих решёток на циркониевые;

– применение уран-эрбиевого оксидного топлива с содержанием 0,4–0,6 % Er_2O_3;

– увеличение обогащения топлива с 1,8 до 2,8 % по ^{235}U;

– использование таблеток уран-эрбиевого топлива с центральным каналом диаметром 1,9 мм, фасками и лунками на торцах;

– замену материала фиксатора топливного сердечника (сплав Ц2М) на сплав ЭК-173ИД.

В процессе послереакторных исследований тепловыделяющих сборок изучались:

– геометрическая стабильность конструкции ТВС;

– изменение диаметра и длины твэлов;

– коррозия внутренней и внешней поверхности оболочек твэлов;

– причины разгерметизации твэлов;

– образование вторичных дефектов в негерметичных твэлах;

– выход газовых продуктов деления из топлива под оболочку твэлов;

– изменение структуры топлива в герметичных и дефектных твэлах;

– повреждение стальных и циркониевых дистанционирующих решёток при эксплуатации и транспортно-технологических операциях с ТВС;

– фреттинг-износ оболочек твэлов под ячейками ДР;

– debris-взаимодействие с инородными телами в теплоносителе;

– разрушение узлов крепления твэлов в концевых решётках из-за истирания наконечников фиксирующими кольцами;

– толщина и элементный состав отложений на оболочках твэлов;

– изменение механических характеристик конструкционных материалов ТВС и оболочек твэлов;

– наводороживание оболочек герметичных и негерметичных твэлов;

– крепление твэлов в ячейках дистанционирующих решёток;

– механические характеристики ячеек ДР.

Анализ результатов послереакторных исследований ТВС РБМК-1000 позволил сделать следующие выводы:

1. Конструкция ТВС, в том числе и с центральным закреплением твэлов, в целом обеспечивает сохранение геометрической стабильности, как при облучении, так и в процессе обращения с ОТВС после завершения эксплуатации.

Отдельные случаи деформирования обойм ДР, связанные с проведением транспортно-технологических операций, не являются принципиальным препятствием, ограничивающим назначенный ресурс ТВС, если описанная окружность вокруг дефектной ДР имеет диаметр меньше 79 мм (размер технологического канала). Увеличение этого параметра более 79 мм следует рассматривать как повреждение ТВС, которое не позволяет её дальнейшую эксплуатацию и требует применения дополнительных технологических мер при обращении с такими ОТВС. Одним из негативных последствий частичного разрушения ДР является появление посторонних предметов в теплоносителе, приводящих к debris-взаимодействию и разгерметизации оболочек твэлов.

2. Удлинение твэлов РБМК-1000 определяется в основном двумя механизмами: радиационным ростом оболочек из циркониевого сплава и релаксацией тангенциальных и осевых напряжений, возникающих при термо-механическом взаимодействии топливного сердечника с оболочкой.

Радиационный рост – формоизменение материала при отсутствии приложенного напряжения в поле нейтронного облучения – связан с анизотропией свойств циркониевых оболочечных труб и наиболее заметен в продольном направлении. Причиной термомеханического удлинения твэлов является деформация ползучести вследствие локального жёсткого контакта топливного сердечника с оболочкой, возникающего при растрескивании и заклинивании таблеток UO_2 в условиях теплосмен.

Длина твэлов измерялась методом сравнения с эталоном. Анализ полученных результатов выявил влияние типа пружинного фиксатора топливного сердечника на удлинение оболочек твэлов. Фиксатор из сплава Ц2М не обеспечивал возврат таблеток топлива в исходное положение после сброса мощности. Это приводило к попаданию крошек топлива в образовавшиеся зазоры, заклиниванию фрагментированных таблеток UO_2 и необратимой деформации оболочек по механизму «храповика» после очередного выхода реактора на мощность.

Использование фиксатора новой конструкции из сплава ЭК-173ИД с большим свободным ходом компенсирующих витков, возвращающего топливный сердечник в исход-

ное положение после сброса мощности и устанавливаемого в газосборник с фиксацией усилия поджатия, приводило к меньшему удлинению твэлов, в основном за счёт радиационного роста оболочечных труб. Вклад в удлинение твэлов эффекта «храповика» отсутствовал. Снижение напряжённо-деформированного состояния существенно повысило надёжность работы твэлов и ТВС РБМК в целом.

3. На поверхности твэлов после эксплуатации наблюдается два вида кислородной коррозии: равномерная и нодулярная. При равномерной коррозии формируются небольшие по толщине оксидные плёнки, хорошо сцепленные с металлом. В интервале 1500–3000 суток эксплуатации скорость этого вида коррозии снижается и толщина оксидов не превышает 20 мкм.

На величину нодулярной коррозии твэлов наряду с длительностью облучения оказывает влияние средняя мощность энерговыделения сборки. Уменьшение этого параметра с 2,1 до 0,9 МВт приводит к ускорению окисления оболочки на участках между дистанционирующими решётками примерно в 2 раза.

Дополнительное окисление твэлов РБМК, возникающее под стальными дистанционирующими решётками, по условиям появления, внешним признакам и кинетике развития имеет характерные черты «теневой» коррозии. По мере эксплуатации ТВС этот процесс замедляется и при толщине оксидного слоя около 450–500 мкм практически прекращается.

Для твэлов РБМК характерна аксиальная и азимутальная неравномерности окисления наружной поверхности оболочки. Максимальная толщина оксидов наблюдается в нижней части ТВС на участках подогрева и поверхностного кипения теплоносителя, где реализуются наибольшие значения температуры оболочки и концентрации окислительных продуктов радиолиза.

Азимутальная асимметрия окисления обусловлена, вероятно, радиальной депрессией потока тепловых нейтронов по направлению к центру ТВС, а также тепловыделением со стороны графитовой кладки активной зоны реактора. Влияние этих факторов приводит к более раннему по высоте твэла вскипанию теплоносителя на поверхности оболочки, обращённой наружу ТВС, снижению её температуры и концентрации в жидкой фазе окислительных продуктов радиолиза.

4. При эксплуатации возможно появление фреттинг-износа оболочек твэлов в местах контакта с пуклёвками ячеек ДР. Наибольшее истирание оболочек обнаружено в ТВС со стальными ДР, в которых использовались твэлы с большим допуском на наружный диаметр оболочки и оболочечных труб.

Для сборки с выгоранием 35,7 МВт·сут/кгU глубина фреттинг-повреждений оболочек в ПТВ находилась в диапазоне 280–300 мкм, а в ПТВ – не превышала 150 мкм. Бо́льшая глубина износа оболочек в ПТВ объясняется повышенной вибрацией твэлов из-за турбулентности потока теплоносителя в верхней части ТВС РБМК. В сборках с циркониевыми ДР истирание оболочек практически отсутствовало. На поверхности твэлов наблюдаются лишь тёмные продольные полосы в местах контакта с пуклёвками ячеек ДР. Случаев разгерметизации твэлов из-за фреттинг-износа оболочек не обнаружено.

5. Основной причиной появления сквозных дефектов в оболочках твэлов РБМК-1000 является debris-взаимодействие с посторонними предметами, попавшими в теплоноситель. Чаще всего debris-дефекты оболочек твэлов наблюдаются в ПТВ из-за большей пульсации кипящего теплоносителя и вибрации инородных предметов, застрявших в элементах конструкции ТВС.

В образцах, вырезанных из оболочек негерметичных твэлов на участках с максимальной амплитудой ВТ-сигналов, обнаружено повышенное наводороживание (~10^{-1} %) и наличие гидридов типа «sunburst». Наибольшее гидрирование оболочек наблюдается на участках твэлов с максимальной линейной мощностью, т.е. ближе к центру активной зоны реактора. В результате охрупчивания оболочек негерметичных твэлов есть вероятность их разрушения как в процессе эксплуатации, так и при транспортно-технологических операциях с отработавшей ТВС.

6. Массовая доля водорода в герметичных твэлах не превышает $9 \cdot 10^{-3}$ % и не зависит от высотной координаты, а также местоположения твэлов в пучках ТВС. Выделения гидридной фазы представляют собой небольшие равномерно распределённые по объёму материала оболочки включения, форма которых близка к сферической, с незначительным количеством мелких, хаотично ориентированных пластин. В оболочках негерметичных твэлов максимальная концентрация водорода примерно на порядок превышает его содержание в оболочках герметичных твэлов.

7. Кратковременные механические характеристики материала оболочки (σ_B, $\sigma_{0,2}$, δ_0 и δ_p) определялись по результатам испытаний кольцевых образцов при комнатной (20 ºС) и рабочей (350 ºС) температурах. Исследования показали, что до выгорания ~ 35,7 МВт·сут/кгU указанные параметры находятся на довольно высоком уровне и существует определенный ресурс для увеличения длительности эксплуатации твэлов.

Прочностные характеристики материала оболочек твэлов выходят на максимальные значения при выгорании около 5 МВт·сут/кгU. Пластичность оболочек при эксплуатации плавно снижается и при выгорании ~ 10 МВт·сут/кгU величины общего и равно-

мерного удлинения становятся почти в 2,5 раза ниже исходных. При максимально достигнутом выгорании параметры δ_0 и δ_p – не ниже 10 и 2 % соответственно.

Основной вклад в упрочнение материала оболочек под воздействием облучения вносят радиационные дефекты. После набора определенной дозы нейтронного облучения плотность радиационных дефектов выходит на насыщение, и значения предела прочности и условного предела текучести сохраняются практически неизменными при дальнейшей эксплуатации ТВС.

Оболочки негерметичных твэлов в местах повышенного гидрирования охрупчиваются и теряют свою пластичность. Степень гидрирования и расположение зон охрупчивания по длине твэла зависят от многих факторов: расположения первичного дефекта, величины зазора «топливо-оболочка», выгорания, времени работы твэла в разгерметизированном состоянии и т.п.

8. Отложения на поверхности твэлов имеют красно-коричневый цвет, так как основным их элементом является железо (железо-оксидные отложения). Толщина отложений линейно увеличивается и не превышает 5 мкм при продолжительности эксплуатации 2500 эфф.сут. В отдельных ТВС в отложениях было зафиксировано повышенное, в 10–30 раз больше обычной величины, содержание меди, которая оказывает значительное влияние на коррозионное состояние конструкционных элементов из циркониевых сплавов в условиях кипения теплоносителя.

9. Сварные соединения заглушек и наконечников герметичных твэлов находятся в удовлетворительном состоянии. Структура сварных соединений в продольном сечении типична для контактно-стыковой сварки. Непроваров, пор, трещин или каких-либо других дефектов в швах не обнаружено. Гидрирование области сварки незначительно. Протяженность зоны сплошности сварных швов составляет около 2,8 мм. В отличие от герметичных, у негерметичных твэлов в области сварки наблюдаются участки повышенного гидрирования и дефекты в виде трещин.

10. У трех из исследованных ТВС были обнаружены следы износа деталей узла крепления твэлов в верхней концевой решетке: наконечников и фиксирующих колец. В тепловыделяющей сборке с центральным закреплением твэлов следы истирания выявлены и на опорной решетке ПТВ в местах контакта её с кольцами. Причиной истирания наконечников твэлов, фиксирующих колец и поверхности опорной решетки является вибрация колец в потоке теплоносителя. Очевидно, что как в штатной, так и в ТВС с ЦЗТ необходимо изменение конструкции узла крепления твэлов.

11. Керамографические исследования топлива UO_2 и UO_2+0,4 % Er_2O_3 в герметичных твэлах показали, что в интервале выгораний 6÷31 МВт·сут/кгU заметных структурных изменений не происходит. Структура топлива, сформировавшаяся в начале эксплуатации, после этого существенно не изменяется. Размер зерна и пор находится в диапазоне от 3 до 25 мкм и от 1 до 5 мкм соответственно. Размер и количество пор практически не изменяется по радиусу таблетки. Поры преимущественно располагаются по границам зерен. Диаметральный зазор между топливом и оболочкой изменяется в пределах 100–250 мкм. Топливные таблетки фрагментированы радиальными трещинами, как правило, на 9–12 частей. Изменений плотности топлива UO_2 в интервале выгораний 6÷26 МВт·сут/кгU не обнаружено. Её значения лежали в допустимом для необлученного топлива диапазоне – от 10,4 до 10,7 г/см^3.

В негерметичных твэлах на участках с повышенной температурой структура топлива заметно изменяется. Перегрев топлива, связанный с ухудшением его теплопроводности после попадания водного теплоносителя внутрь твэла, приводит к увеличению пористости и размера зёрен .

12. Выход газовых продуктов деления из матрицы топлива невелик. Газовыделение из уран-эрбиевого топлива под оболочку твэла не превышает 1 % от накопления Xe и Kr в процессе эксплуатации до выгорания 31,3 МВт·сут/кгU. Выход ГПД из топлива UO_2 в несколько раз меньше. Повышенный выход газовых продуктов деления из уран-эрбиевого топлива объясняется его меньшей теплопроводностью по сравнению с UO_2 и, как следствие, более высокой температурой при облучении. Из-за небольшого выхода ГПД давление газа под оболочкой увеличивается незначительно и не превышает ~ 0,7 МПа.

13. Жесткость пружинных фиксаторов твэлов из сплава ЭК-173ИД (ХН40М5Т2ГЮБР-ИД) находится в диапазоне от 0,21 до 0,24 кгс/мм и незначительно изменяется относительно исходного значения этого параметра, равного 0,2 ± 0,02 кгс/мм.

14. Состояние каркасных труб ТВС изучалось в диапазоне выгораний от 24 до 26,76 МВт·сут/кгU. Послереакторные исследования показали удовлетворительную эксплуатационную надежность и ресурс каркасных труб ТВС при высоких выгораниях топлива.

15. В штатных конструкциях ТВС используются стальные, а в экспериментальных – циркониевые ДР. Замена стальных ДР на циркониевые повышает положительный баланс нейтронов в активной зоне и снижает вероятность разгерметизации твэлов из-за локального окисления и фреттинг-износа оболочек под стальными ДР.

Результаты исследований дистанционирующих решёток показали следующее:

- средний диаметр обойм по выступам СДР и ЦДР в ТВС, отработавших до проектного выгорания топлива 20 МВт·сут/кгU, находится в диапазоне от 78,2 до 79,0 мм;
- диаметр ячеек как в СДР, так и в ЦДР увеличивается к центру активной зоны – верхняя часть ПТН и нижняя часть ПТВ, что объясняется увеличением диаметра твэлов под ДР из-за локального окисления оболочек твэлов;
- у циркониевых ДР при длительности эксплуатации до 8-10 лет и выгорании до 27,5 МВт·сут/кгU происходит деградация пластических и прочностных свойств сплава Zr-1 %Nb из-за окисления, наводораживания и образования гидридов неблагоприятной, поперечной ориентации, что может приводить к разрушению ДР;
- стальные ДР сохраняют способность фиксировать конфигурацию пучков твэлов вплоть до выгорания 31 МВт·сут/кгU. Стенки ячеек и сварные соединения СДР обладают высокой механической прочностью.

Список литературы

1. Петросьянц А.М., Александров А.П., Доллежаль Н.А. и др. Ленинградская атомная электростанция и перспективы канальных кипящих реакторов // Атомная энергия, 1971. Т.31. Вып. 4. С. 333–343.

2. Доллежаль Н.А., Емельянов И.Я. Опыт создания мощных энергетических реакторов в СССР // Атомная энергия, 1976. Т.40. Вып. 2. С. 117–126.

3. Александров А.П., Доллежаль Н.А. Развитие уран-графитовых канальных реакторов в СССР // Атомная энергия, 1977. Т.43. Вып. 5. С. 337–343.

4. Доллежаль Н.А., Емельянов И.Я. Канальный ядерный энергетический реактор. — М.: Атомиздат, 1980.

5. Петросьянц А.М. Ядерная энергетика. – М.: Наука, 1981.

6. Абрамов М. А., Авдеев В. И., Адамов Е. О. и др. Канальный ядерный энергетический реактор РБМК / Под общ. ред. Ю. М. Черкашова. – М.: НИКИЭТ, 2006.

7. Алексеев П.Н., Алексеев С.В., Андрианова Е.А. и др. Двухкомпонентная ядерная энергетическая система с тепловыми и быстрыми реакторами в замкнутом топливном цикле / Под ред. академика РАН Пономарёва-Степного Н.Н. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016.

8. Габараев Б.А., Черкашов Ю.М., Петров А.А. и др. Обоснование продления срока эксплуатации энергоблоков РБМК // Атомная энергия, 2006. Т.100. Вып. 4. С. 328–335.

9. Калинкин В.И., Крицкий В.Г., Размашкин Н.В. и др. Технологический процесс перевода ОЯТ РБМК-1000 с «мокрого» на «сухое» хранение / ОАО «Головной институт «ВНИПИЭТ». – С.-Пб.: ООО «Типография «Береста», 2010.

10. Канашов Б.А., Дорофеев А.Н., Смирнов В.П. и др. Транспортирование некондиционного ОЯТ реактора РБМК ЛАЭС-1 на переработку на ПО "Маяк" // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды, 2012. №2. С. 142–146.

11. Федосов А.М., Краюшкин А.В., Новиков В.Г., Тишкин Ю.А. Дожигание топлива при выводе реакторов РБМК при эксплуатации. – Сборник докладов Восьмой международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика ядерной энергетики», Москва, 23–25 мая 2012 г. – ОАО «Концерн Росэнергоатом», 2012. С. 227–229.

12. Смирнов В.П., Смирнов А.В, Дворецкий В.Г. и др. Проспект «Отдел исследования ТВС и твэлов. Цели, задачи и возможности». – Димитровград: НИИАР, 1992.

13. Драгунов Ю. Г., Петров А.А, Иванов А.В. Модернизация и продление сроков эксплуатации энергоблоков с РБМК // Атомная энергия, 2012. Т. 113. Вып. 1. С. 6–13.

14. Аден В.Г., Бибилашвили Ю.К., Займовский А.С. и др. Твэл реактора РБМК-1000 // Атомная энергия, 1977. Т.43. Вып. 4. С. 235.

15. Павлов С.В. Неразрушающие ультразвуковые методы исследований облучённого топлива ядерных реакторов. – Димитровград: АО «ГНЦ НИИАР», 2013.

16. Strasser A., Gingold J. Evaluation of debris fretting failures and preventive methods. – Proc. of Technical committeee meeting on fuel failure in normal operation of water reactors: Experience, mechanisms and management; Dimitrovgrad, Russian Federation, 26-29 May, 1992. – IAEA-TECDOC-709, 1993. P. 138–143.

17. Wilson H.W., Miller R.S., Kunishi H. Westinghouse fuel performance experience. Там же. P.133–137.

18. Amosov S.V., Pavlov S.V. Specific features of the determination of the pellet-cladding gap of the fuel rods by nondestructive method. Advanced post-irradiation examination techniques for water reactor fuel. – Proc. of a Technical Committee meeting held Dimitrovgrad, Russian Federation, 14–18 May, 2001. – IAEA-TECDOC-1277, 2002. P.73–79.

19. Методика рентгеновской радиографии облучённых твэлов: Обзор основных исследовательских работ, выполненных в 1990–1991 гг. – Димитровград: НИИАР, 1992. С. 67.

20. Павлов С.В., Сухих А.В., Сагалов С.С. Вихретоковые методы контроля в реакторном материаловедении. − Димитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР», 2010.

21. Сагалов С.С. Разработка средств и методов оперативной вихретоковой дефектоскопии облучённых твэлов ВВЭР с оболочками из сплава Zr-1%Nb: автореферат диссертации на соиск. учён. степ. канд. техн. наук. – Димитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР», 2011.

22. Куприенко М.В., Костюченко А.Н., Дворецкий В.Г., Железнов А.С. Неразрушающие измерения толщины оксидных плёнок на облучённых твэлах с оболочками из циркониевых сплавов. – Сборник трудов ГНЦ РФ НИИАР, 2002. Вып. 2. С. 25–30.

23. Костюченко А.Н. Распределение оксидной плёнки по поверхности цилиндрических элементов отработавших ТВС ВВЭР и РБМК // Атомная энергия, 2007. Т.102. Вып. 6. С. 68–72.

24. Павлов С.В., Сухих А.В., Сагалов С.С. Гамма-спектрометрия в реакторном материаловедении. − Димитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР», 2012.

25. Райлли Д., Энсслин Н., Смит Х., Крайнер С. Пассивный неразрушающий анализ ядерных материалов / пер. с англ. – М.: БИНОМ, 2000.

26. Дубровин К.П., Марков Д.В. Некоторые результаты послереакторных исследований трёх полномасштабных ТВС РБМК. – Сборник докладов научно-технического семинара «Модернизация, совершенствование и повышение эксплуатационной надёжности ядерного топлива РБМК», Электросталь, 25–27 октября, 2000. – Электросталь, 2000. С. 76–94.

27. Молчанов В.Л. Конструкция ТВС нового поколения, пути повышения эффективности использования топлива на АЭС. – Сборник докладов научно-технической конференции (НТК-2002) «Эффективное топливоиспользование для энергетических реакторов на базе конструкции ТВС нового поколения», Москва, 13-14 февраля 2002. – Москва, 2002. С. 4–36.

28. Кириллович А.П., Пимонов Ю.И. Применение масс-спектрометрического метода для исследования состава газовой среды в облучённых твэлах: препринт НИИАР №31 (439) – Димитровград, 1980.

29. Лихачёв Ю.И. Оценка осевого удлинения оболочки стержневого твэла реактора типа РБМК в условиях циклического изменения мощности: препринт: ФЭИ-1089. – Обнинск, 1980.

30. Попов В.В. Оценка осевого удлинения оболочек твэлов РБМК при циклических изменениях мощности // Атомная энергия, 1981. Т. 51. Вып. 6. С. 362–366.

31. Попов В.В., Хмелевский М.Я., Купалов-Ярополк А.И., Филиппов В.Р. Удлинение твэлов реактора РБМК в процессе термомеханического взаимодействия топливо-оболочка. Тезисы докладов Шестой конференции по реакторному материаловедению, Димитровград, 11–15 сентября, 2000 г. – Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 2001. С.25.

32. Aden V.G, Vorontsov B.A, Kalinin V.V. etc. Operating experience of RBMK fuel under normal conditions and analysis of its damage causes. – Proc. of Technical committeee meeting on fuel failure in normal operation of water reactors: Experience, mechanisms and management; Dimitrovgrad, Russian Federation, 26-29 May, 1992. – IAEA-TECDOC-709, 1993. P. 39–45.

33. Тимохин А.Н., Синельников Л.П., Перехожев В.И. и др. Обобщение результатов послереакторных исследований оболочек твэлов ОТВС Ленинградской АЭС с различным ресурсом эксплуатации // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Материаловедение и новые материалы. Вып. 1(68)-2(69): науч.-техн. сб. – М.: [Б.и.], 2007. С.185–193.

34. Смирнов А.В., Смирнов В.П., Петухов А.А и др. Экспериментальное обоснование надёжности штатного топлива ВВЭР в базовых режимах эксплуатации. – Сборник докладов Пятой межотраслевой конференции по реакторному материаловедению, Димитровград, 8–12 сентября 1997 г. В 2- томах. Т.1. Ч.1. – Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 1998. С. 33–46.

35. Юдина Е.В., Рожков В.В., Енин А.А., Локтев И.И. Исследование влияния технологических операций травления и анодирования на коррозионную стойкость и эксплуатационные характеристики твэлов. – Сборник докладов Седьмой российской конференции по реакторному материаловедению, Димитровград, 8-12 сентября 2003 г. – Димитровград: ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР», 2004. Т.2.Ч.4. С. 107–120.

36. Синельников Л.П., Перехожев В.И., Никулина А.В. и др. Закономерности коррозии циркониевых сплавов при длительном облучении. Тезисы докладов Пятой межотраслевой конференции по реакторному материаловедению, Димитровград, 8–12 сентября, 1997 г. – Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 1998. С.96.

37. Андреева А.Б., Кобылянский Г.П. Коррозия циркониевых сплавов. Факторы и механизмы: обзор. – М.: ЦНИИатоминформ, 1989.

38. Займовский А.С., Никулина А.В., Решетников Н.Г. Циркониевые сплавы в ядерной энергетике. – М.: Энергоатомиздат, 1994.

39. Никулина А.В., Синельников Л.П., Коньков В.Ф. и др. Взаимосвязь легирующего состава циркониевых Nb-содержащих сплавов с коррозией и механическими свойствами. – Сборник докладов Седьмой российской конференции по реакторному материаловедению, Димитровград, 8-12 сентября 2003 г. – Димитровград: ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР», 2004. Т. 1. С. 28–59.

40. Марков Д.В., Смирнов А.В., Рябов В.В. и др. Коррозия оболочек твэлов РБМК-1000, отработавших в штатных режимах до выгорания 6,3–19,5 МВт·сут/кгU. – Сборник докладов научно-технического семинара «Модернизация, совершенствование и повышение эксплуатационной надёжности ядерного топлива РБМК», Электросталь, 25–27 сентября 2000. – Электросталь, 2000. С. 161–169.

41. Сухих А.В., Кобылянский Г.П., Маёршина Г.И. и др. Состояние оболочек твэлов и дистанционирующих решёток ОТВС РБМК-1000 при проектных и повышенных выгораниях топлива. – Сборник докладов Седьмой российской конференции по реакторному материаловедению, Димитровград, 8–12 сентября 2003. – Димитровград: ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР», 2004. Т.2. ч.1. С. 170–179.

42. Сухих А.В., Смирнов А.В., Маёршина Г.И., Рябов В.В. Результаты послереакторных исследований твэлов РБМК-1000 с уран-эрбиевым топливом // МСЗ. Ядерное топливо для АЭС, 2003. С. 48–51.

43. Смирнов А.В., Сухих А.В., Марков Д.В. и др. Анализ результатов послереакторных исследований ОТВС РБМК-1000 с урановым и уран-эрбиевым топливом. – Международная конференция «Канальные реакторы: проблемы и решения», Москва – Курчатов, 19–22 октября 2004. Сборник тезисов докладов. С. 58–60.

44. Тимохин А.Н., Купалов-Ярополк А.И., Сухих А.В. и др. Анализ коррозионного состояния и наводороживания оболочек твэлов РБМК после длительной эксплуатации на Ленинградской АЭС. – Тезисы докладов международной научно-технической конференции «Канальные реакторы: проблемы и решения», Москва, 19–22 сентября 2004. – Москва, 2004. С. 64–66.

45. Костюченко А.Н., Чёсанов В.В., Звир Е.А. и др. Окисление оболочек твэлов реактора РБМК-1000 в процессе штатной эксплуатации. – Сборник докладов IX Российской конференции по реакторному материаловедению, Димитровград, 14-18 сентября 2009 г. – Димитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР», 2009. с. 664-669.

46. Марков Д.В., Павлов С.В., Новосёлов А.Е. и др. Топливо ВВЭР и РБМК нового поколения: результаты послереакторных исследований, обоснование надёжности и работоспособности. – Сборник докладов IX Российской конференции по реакторному материаловедению, Димитровград, 14–18 сентября 2009 г. – Димитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР», 2009. С. 24–45.

47. Чёсанов В.В., Марков Д.В., Звир Е.А. и др. Результаты послереакторных исследований ТВС РБМК-1000 // Сборник трудов ГНЦ РФ НИИАР, 2010. Вып. 3. С. 16–21.

48. Петров А.А., Черепнин Ю.С., Иванов А.В. и др. Анализ и обобщение результатов послереакторных исследований ТВС РБМК-1000. – Сборник докладов Восьмой международной научно-технической конференции ОАО «Концерн Росэнергоатом» на тему «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики (МНТК-2012), Москва, 23–25 мая 2012 г. – Москва: ОАО «Концерн Росэнергоатом», 2012. С.253–260.

49. Слободчиков А.В., Черепнин Ю.С., Иванов А.В. и др. «Анализ причин повреждаемости ДР ТВС РБМК-1000, изготовленных из коррозионностойкой стали» – доклад на Десятой Международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (МНТК-2016), АО «Концерн Росэнергоатом», 25-27 мая 2016 г.

50. Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А. Теплообмен в ядерных энергетических установках. – М.: Энергоатомиздат, 1986.

51. D. Franklin, C.-Y. Li. Effects of heat flux and irradiation-induced changes in water chemistry on Zircaloy nodular oxidation. – Zirconium in nuclear industry: Seventh International Symposium, ASTM STP 939, R.B. Adamson and L.F.P. Van Swam, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1987. P. 206–223.

52. Архипов В.В., Ермаков В.А. Радиолиз теплоносителя на АЭС с РБМК и условия применения водородного водно-химического режима. – Сборник докладов Международного научно-технического совещания «Водно-химический режим АЭС», Смоленская АЭС, 13–17 октября 2003 г. – Москва, 2005. С. 312–329.

53. Cox B. Some thoughts on the mechanisms of in-reactor corrosion of zirconium alloys // Journal of nuclear materials, 2005. № 336. P. 331–368.

54. Lysell G., Nystrand A-C., Ullberg M. Shadow corrosion mechanism of Zircaloy // Journal of ASTM International, 2005. Vol. 2. Issue 6. P.445–461.

55. Chatelain A., Andersson B., Ballinger R.G., Wikmark G. Enhanced corrosion of zirconium-base alloys in proximity to other metals: the «shadow» effect. – Proceedings of ANS International Topical Meeting on LWR Fuel Performance, 10–13 April 2000, Park City, UT. Vol.1. P.485–498.

56. С.В. Павлов, А.В. Сухих, С.С. Сагалов. Окисление оболочек твэлов из сплава Zr-1%Nb в кипящем канальном реакторе // Сборник трудов АО «ГНЦ НИИАР», 2015. Вып. 1. С. 11–22.

57. Герасимов В.В., Монахов А.С. Коррозия реакторных материалов. – М.: Атомиздат, 1973.

58. Нигматулин И.Н., Нигматулин Б.И. Ядерные энергетические установки. – М.: Энергоатомиздат, 1986.

59. Waterside corrosion of zirconium alloys in nuclear power plants. – IAEA-TECDOC-996. - Vienna: IAEA, 1998.

60. Ibe E., Nagase M., Sakagami M., Uchida S. Radiolytic environments in boiling water reactor cores // Journal of nuclear science and technology, 1987. Vol. 24 (3). P. 220–226.

61. Nishino Y., Endo M., Wada Y., Yasuda T. Interaction between Zircaloy-2 oxide film and high temperature water under BWR conditions. – Proceedings of 1998 JAIF Int. conf. Water chemistry of nuclear power systems, 13-16 October, 1998, Kashiwazaki, Japan. – JAIF, 1998. P.780–784.

62. Ibe E., Ichikawa N., Shimada S., etc. Evaluation of effects of water radiolysis on Zircaloy corrosion in BWR simulation loop. – Proceedings of BNES conf. on Water chemistry of nuclear reactor systems 7, 13–17 October, 1996, Bournemouth, UK. – Norfolk: Galliard (Printers) Ltd., 1996. Vol. 1. P. 236–242.

63. Радиационная коррозия конструкционных материалов ядерных энергетических установок: Обзор / А.Ф. Нечаев, Н.Г. Петрик, В.М. Седов, Т.Б. Сергеева. – М.: ЦНИИатоминформ, 1988.

64. Rusauskas E.J., Smith D.J. Fuel failures during cycle 11 at River Bend / Proc. Int. Top. Mtg on LWR Fuel Performance, Orlando, 2004, Paper 1016, ANS (2004). P. 221–228.

65. Гольцев А.О., Давыдова Г.Б., Давиденко В.Д. Влияние депрессии потока нейтронов в ячейке РБМК на величину максимальной и средней температуры топлива. – Известия Томского политехнического университета, 2009. Т. 134. №4. С. 5–7.

66. Бабайцев В.Н., Давыдова Г.Б., Захарова Л.Н., Краюшкин А.В. Трехмерные эффекты при расчете температуры топлива в РБМК // Атомная энергия. - 2012. - Т. 112, вып. 5. - С. 282-286.

67. Loche D.N. Mechanisms of deterioration of defected LWR fuel // IWGFPT-6, 101–103 (1980). IAEA specialists meeting on behavior of defected zirconium Alloy Clad Ceramic

Fuel in water cooled reactors, Schalk river, Ontario, Canada, Sept. 17–20, 1979. – Vienna: IAEA, 1980. P. 14–19.

68. Пат. 2263161 РФ, МПК[7] C23G1/12. Способ получения проб продуктов отложений с поверхности оболочек циркониевых твэлов для проведения количественного анализа / Смирнова И.М., Кучкина И.Н., Лядов Г.Д., Марков Д.В. // Бюллетень изобретений и полезных моделей, 2005. №30. С. 725.

69. Смирнова И.М., Кучкина И.Н., Костюченко А.Н., Куприенко М.В. Определение состава продуктов отложений и толщины оксидной плёнки на поверхности твэлов ВВЭР и РБМК // Атомная энергия, 2005. Т. 98. Вып. 1. С. 50–54.

70. Пат. 55371 РФ, МПК7 C23G3/00. Устройство для снятия поверхностных отложений с протяжённых изделий / Смирнова И.М., Кучкина И.Н., Марков Д.В., Неугодников Д.С. // Бюллетень изобретений и полезных моделей, 2006. №22. С. 918.

71. Крюков Ф.Н., Лядов Г.Д., Никитин О.Н. Исследование поведения продуктов деления и компонентов топлива в твэлах РБМК-1000 после штатной эксплуатации и после облучения в реакторе МИР в режиме со ступенчатым подъемом мощности // VII Российская конференция по реакторному материаловедению, Димитровград, 8-12 сентября 2003 г.: Сб. докл. - Т. 2. - Ч. 1. -Димитровград: ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР», 2004. - С. 239 - 248.

72. Решетников Ф.Г., Бибилашвили Ю.К., Головнин И.С. и др. Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов. Книга 2. – М.: Энергоатомиздат, 1995.

73. Марков Д.В., Смирнов В.П., Поленок В.С. и др. Основные результаты послереакторных исследований усовершенствованного топлива ВВЭР и РБМК. – Сборник докладов VIII Российской конференции по реакторному материаловедению, Димитровград, 21–25 мая 2007 г. – Димитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР», 2008. С. 100–113.

74. Павлов С.В., Сухих А.В., Сагалов С.С. Неразрушающая диагностика состояния элементов активных зон ядерных реакторов. – Димитровград: ДИТИ НИЯУ МИФИ, 2015. – 320 с.

75. Коррозия. Справ. изд. Под. ред. Л.Л. Шрайера. Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1981.

76. Шмаков А. А., Калин Б. А., Смирнов Е. А. Водород в сплавах циркония. Гидридное охрупчивание и разрушение циркониевых материалов. – LAP Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, Germany, 2014.

77. Puthawala A. Primary coolant hydrogenation by electrolysis for PWRs and BWRs. – Proceedings of JAIF International Conference on Water Chemistry in Nuclear Power Plants, Kashiwazaki, 13–16 October 1998. – Tokyo: JAIF, 1998. P. 730-737.

78. Архипов В.В., Ермаков В.А., Чабак А.Ф. О необходимости применения водородного водно-химического режима для АЭС с РБМК. – Сборник докладов отраслевого научно-технического семинара «Модернизация, совершенствование и повышение эксплуатационной надёжности топлива РБМК», Колонтаево – Электросталь, 25–27 октября 2000 г. – Электросталь, 2000. С. 150–156.