

1. Касперович А.И., Колесов Б.И., Сандлер Н.Г. Водно-химические процессы в реакторных установках атомных ледоколов и плавучих энергоблоков. — Атомная энергия, 1996, т. 81, вып. 4, с. 261—266.
2. Герасимов В.В., Касперович А.И., Мартынова О.И. Водный режим атомных электростанций. М.: Атомиздат, 1976.
3. Юрманов В.А., Советников К.В., Сафонов М.С. и др. Дозовые нагрузки персонала АЭС с ВВЭР и направления совершенствования водного режима первого контура. — Теплоэнергетика, 1990, № 7, с. 8—13.
4. Орленков И.С., Красноперов В.М., Гусев Б.А., Москвин Л.Н. Повышение эффективности вывода продуктов коррозии штатными фильтрами очистки теплоносителя из первых контуров водяных реакторов (ВВР). — Там же, 1998, № 11, с. 17—19.
5. Егоров Ю.А., Носков А.А., Скляр В.П. и др. Исследование и применение модели ТРАКТ-1 для расчета активности продуктов коррозии в технологическом контуре АЭС с канальным реактором. — В сб.: Радиационная безопасность и защита АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1981, вып. 5, с. 10—22.
6. Инженерный расчет защиты атомных электростанций. Под ред. А.П. Веселкина, Ю.А. Егорова. М.: Атомиздат, 1976.

Поступила в Редакцию 11.05.05

УДК 621.039.546

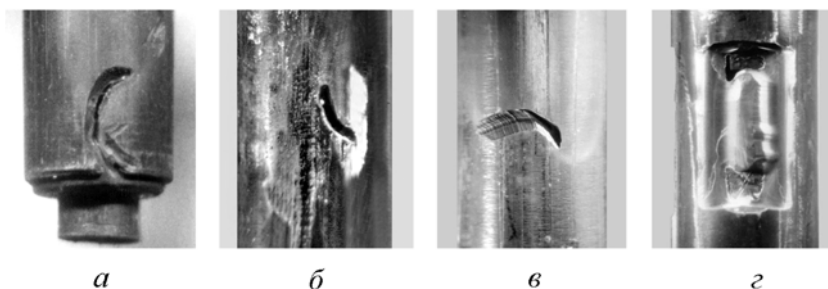
ПРИЧИНЫ РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ И ПОСЛЕРЕАКТОРНОЕ СОСТОЯНИЕ НЕГЕРМЕТИЧНЫХ ТВЭЛОВ ВВЭР И РБМК

*Марков Д.В., Перепелкин С.О., Поленок В.С., Смирнов В.П., Смирнов А.В.,
Сухих А.В., Неугодинов Д.С. (НИИАР)*

Случаи разгерметизации серийных ТВС наблюдались в течение всего периода эксплуатации ВВЭР и РБМК. Уровень разгерметизации топлива ВВЭР в настоящее время составляет $\sim 10^{-4}—10^{-6}$ [1].

Эксплуатация в активной зоне ТВС с негерметичными твэлами приводит к росту активности теплоносителя и иным неблагоприятным последствиям, влияющим на безопасность и экономичность АЭС в целом. Поэтому актуальным является установление причин, приводящих к разгерметизации ТВС, а также выявление основных закономерностей состояния и поведения твэлов в зависимости от характера повреждения и длительности эксплуатации после разгерметизации.

Классификация зарегистрированных повреждений оболочек твэлов. В настоящей работе под термином «первичное повреждение» подразумеваются только сквозные дефекты, приведшие к разгерметизации оболочек твэлов и непосредственному контакту топлива и теплоносителя. Обнаруженные первичные сквозные дефекты, образовавшиеся в результате взаимодействия оболочек твэлов либо со шламом и инородными предметами, попавшими в теплоноситель, либо с ячейками дистанционирующих решеток (фреттинг-износ), существенно различны по внешнему виду (рис. 1), поэтому не представляло сложности их классифицировать. Кроме сквозных, на оболочках твэлов наблюдались разнородные несквозные дефекты, но в настоящей работе они не рассматриваются.



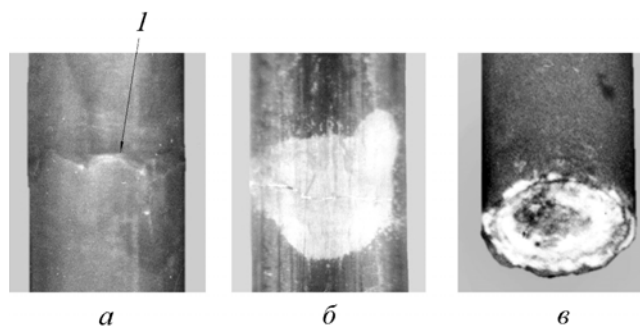
Р и с. 1. Первичные повреждения оболочек твэлов ВВЭР-440 (а), ВВЭР-1000 (б), РБМК-1000 (в) вследствие взаимодействия с инородным предметом и твэла ВВЭР-440 вследствие фреттинг-износа (г)

При наличии первичного дефекта под термином «вторичное повреждение» («вторичный дефект») подразумеваются дефекты, формирующиеся под воздействием теплоносителя, проникшего внутрь твэла через первичный дефект: хрупкий отрыв заглушек, сквозные визуально регистрируемые трещины, а также гидридные пятна, распространяющиеся на наружную поверхность оболочек (рис. 2).

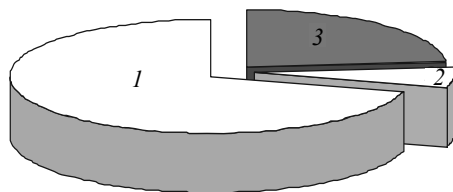
Основные результаты послереакторных исследований. К настоящему времени в НИИАРе исследованы 16 ТВС, разгерметизировавшихся при нормальных условиях эксплуатации: 3, 8 и 5 ТВС ВВЭР-440, ВВЭР-1000 и РБМК-1000 соответственно. ТВС эксплуатировались на разных АЭС в течение одного—четырех топливных циклов (диапазон среднего выгорания топлива от 6,3 до 46,8 МВт·сут/кг). Как следует из данных, приведенных на рис. 3, в настоящее время основным механизмом, ответственным за большинство случаев разгерметизации ТВС ВВЭР и РБМК, является повреждение оболочек твэлов в результате взаимодействия с инородными предметами в теплоносителе.

Механизм протекания процесса хорошо известен [2—4]. Инородные предметы и шлам, попавшие в систему охлаждения реактора, главным образом, при ремонте и профилактике или на стадии строительства, циркулируют в первом контуре и могут попасть в ТВС. Послереакторными исследованиями установлено, что по сечению ТВС ВВЭР эти повреждения оболочек твэлов распределены случайным образом, по высоте их регистрировали либо вблизи опорной решетки, либо около нижних дистанционирующих решеток. Аналогичная картина распределения повреждений наблюдалась и в ТВС РВР [3]. В ТВС РБМК дефекты данного типа наблюдались, как правило, вблизи дистанционирующих решеток верхних пучков и равновероятно обнаруживались как в наружных, так и во внутренних рядах, по высоте распределялись случайным образом.

По данным работы [3] фракционный состав инородных предметов разнообразен. В основном это стружки и обрезки, которые образовались при металлообработке во время ремонтных работ на



Р и с. 2. Вторичные повреждения: трещина на оболочке твэла ВВЭР-440 (а), гидридное пятно на оболочке твэла ВВЭР-1000 (б), отрыв заглушки твэла РБМК-1000 (в); 1 — трещина



Р и с. 3. Причины разгерметизации исследованных ТВС ВВЭР и РБМК: 1, 2 — повреждение вследствие взаимодействия с инородными предметами (70%) и фреттинг-износа (2%) соответственно; 3 — другие причины (24%)

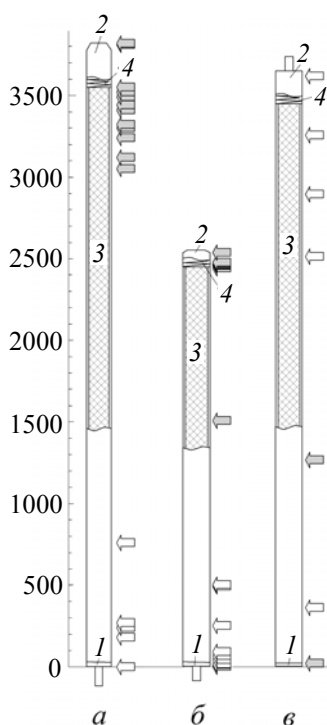
оборудовании первого контура. В отдельных случаях в поврежденных ТВС PWR обнаруживались крупные предметы, такие, как фрагменты инструментов, винты, болты, гайки, металлические зажимы, электроразъемы, куски проволоки различных видов, фрагменты дефектных твэлов, зубья пилы и др. В исследованных ТВС ВВЭР и РБМК присутствовали застрявшие в дистанционирующих решетках фрагменты металлической стружки, а также куски проволоки диаметром до 4,7 мм.

Застревая внутри ТВС, инородные предметы

вибрируют в потоке теплоносителя и приводят к повреждению оболочек контактирующих с ними твэлов. Внешний вид повреждения зависит от многих причин, но в первую очередь определяется формой инородного предмета, его химическим составом и характером взаимодействия с оболочкой твэла (циклическое скольжение, ударное взаимодействие и др.). Наиболее типичными и часто встречающимися являются дефекты серповидной формы (см. рис. 1, а, б, в).

После разгерметизации оболочек теплоноситель через первичный дефект попадает внутрь твэла, где превращается в пар и заполняет зазор между топливом и оболочкой, а также в газосборник, выравнивая давление снаружи и внутри твэла. Механизм вторичного повреждения оболочек детально описан в исследованиях [5—7]. Кислород, образовавшийся при радиоллизе и термической диссоциации паров воды, химически связывается в результате окисления топлива, продуктов деления и внутренней поверхности оболочки. Свободный водород проникает в оболочку, где образуются гидриды циркония и формируются участки массивного локального гидрирования.

В результате увеличения объема образовавшихся гидридов примерно на 16% относительно исходного циркония формируются локальные вздутия оболочки, и под действием механических напряжений происходит ее хрупкое растрескивание (см. рис. 2). В твэлах ВВЭР участки вторичного гидрирования оболочек удалены от первичных дефектов, как правило, на 2500—3000 мм (рис. 4, а, б) и часто вплотную примыкают к верхним сварным соединениям. В твэлах РБМК аналогичные участки наблюдаются в зоне максимального энерговыделения, т.е. вблизи стыка верхнего и нижнего пучков (рис. 4, в). Развитие процессов вторичного гидрирования оболочек существенно зависит от линейной мощности поврежденных твэлов, времени их эксплуатации в негерметичном состоянии, размера первичных дефектов.



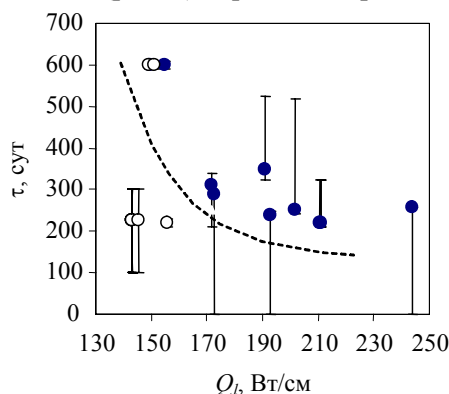
Р и с. 4. Положение первичных и вторичных повреждений негерметичных твэлов ВВЭР-1000 (а), ВВЭР-440 (б), РБМК-1000 (в): $\rightleftarrows$ — первичный и вторичный дефект соответственно; 1, 2 — нижняя и верхняя заглушки соответственно; 3 — топливный сердечник; 4 — фиксатор

Результаты исследования в целях установления корреляции между деградацией дефектных твэлов и параметрами эксплуатации топлива (тепловой поток и время до вторичного отказа в календарных сутках) приведены в работах [5, 6]. На основании опыта эксплуатации дефектных твэлов построена диаграмма и установлен порог между «сильным отказом» и «малым повреждением», известный как граница Локе. Однако следует отметить, что конструкция и технология изготовления исследованных твэлов значительно отличались от таковых для топлива ВВЭР и РБМК. Поэтому применение критерия в виде границы Локе для твэлов этих реакторов некорректно.

Построение аналогичной диаграммы для твэлов ВВЭР и РБМК затруднено вследствие значительной неопределенности данных о линейной мощности негерметичных твэлов и времени образования дефектов. Отсюда возникает большой разброс точек на аналогичной диаграмме для твэлов ВВЭР (рис. 5). При ее построении использовались оценочные параметры, основанные на анализе изменения активности теплоносителя во времени и расчетно-экспериментального выгорания топлива негерметичных твэлов. Несмотря на значительный разброс данных, можно заключить, что для негерметичных твэлов ВВЭР, эксплуатировавшихся в диапазоне линейной мощности 170—215 Вт/см, время развития значимого вторичного повреждения составляет примерно 250 ± 50 календарных суток.

По данным работ [8—10] вторичные дефекты не развиваются при наличии первичного дефекта большого размера. Это согласуется с экспериментальными данными, полученными для негерметичных твэлов ВВЭР. Например, эксплуатация двух негерметичных твэлов ВВЭР-440, имевших сквозные повреждения площадью более 30 мм^2 в течение 600 календарных суток, не привела к развитию вторичных дефектов.

При анализе экспериментальных данных не установлено явной зависимости расстояния между первичным и вторичными дефектами оболочек ни от линейной мощности, при которой эксплуатировались твэлы, ни от времени их эксплуатации в негерметичном состоянии.



Р и с. 5. Зависимость времени развития вторичных повреждений оболочек от линейной мощности негерметичных твэлов ВВЭР: ● — вторичное повреждение; ○ — вторичное повреждение не наблюдалось; --- — условная граница вторичного повреждения

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kirushkin A., Tchirkov V., Sidorova E., Novikov V. Evaluation of operation performance of ВВЭР fuel manufactured by JSC MSZ, Russian Federation. — In: Proc. of the Fourth Intern. Conf. «WWER Fuel. Performance, Modelling and Experimental Support». Varna, Bulgaria, October 1—5 2001, 2002, p. 27—32.
2. Strasser A., Sunderland D. A review of recent LWR fuel failures. — In: Proc. IAEA TCM «Fuel Failure in Normal Operation of Water Reactors: Experience, Mechanisms and Management». Dimitrovgrad, 1992. IAEA-TECDOC-709. Vienna: IAEA, 1993, p. 17—25.

3. **Strasser A., Gingold J.** An evaluation of debris fretting failures and preventive methods. — Ibid., p. 138—143.
4. **Yang R.** Meeting the challenge of managing nuclear fuel in a competitive environment. — In: Proc. Intern. Topical Meeting on Light Water Reactor Fuel Performance. ANS, Portland, Oregon, March 2—6, 1997, p. 3—10.
5. **Locke D.** The behaviour of defective reactor fuel. — Nucl. Engng Design, 1972, № 2, p. 318—330.
6. **Locke D.** Mechanism of deterioration of defected LWR fuel. — In: The Behaviour of Zirconium Alloy Clad Ceramic Fuel in Water Cooled Reactors IWGFPT-6. Vienna: IAEA, 1980, p. 101—112.
7. **Davies J.** Secondary damage in LWR fuel following PCI defection-characteristics and mechanisms. — Ibid., p. 135—147.
8. **Lewis B., Macdonald K., Ivanoff N.** A review of fuel performance and fission product release studies for defected fuel elements. — In: Proc. IAEA TCM «Fuel Failure in Normal Operation of Water Reactors: Experience, Mechanisms and Management». Dimitrovgrad, 1992, IAEA-TECDOC-709. Vienna: IAEA, 1993, p. 79—99.
9. **Mogard H., Grounes M., Tomani H., Lysell G.** Studies in R2 test reactors of secondary damage formation in LWR fuel rods with simulated defects. — Ibid., p. 184—192.
10. **Lundholm L., Grapengiesser B., Schrire D., Hailstadius L.** ABB Atom fuel failure — an overview, S-721 63 Västerås, Sweden. — Ibid., p. 57—63.

Поступила в Редакцию 20.07.05

УДК 621.039.543.343:621.039.548

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ В ОБЛУЧЕННОМ ВИБРОУПЛОТНЕННОМ ОКСИДНОМ ТОПЛИВЕ

*Крюков Ф.Н., Кислый В.А., Кормилицын М.В., Кузьмин С.В., Маершин А.А.,
Никитин О.Н., Строжук С.В., Шишлов О.В. (ГНЦ РФ — НИИАР)*

С увеличением длительности облучения твэла и повышением выгорания топлива возрастает накопление продуктов деления, в том числе химически активных по отношению к оболочке твэла. Это обуславливает необходимость в процессе материаловедческих исследований твэлов тщательного отслеживания распределения в топливе разнообразных продуктов деления, их локальной концентрации, химического состояния, а также влияния на изменение состояния топливных композиций и оболочек. Накопление и систематизация получаемых результатов исследований поведения продуктов деления необходимы не только для прогнозирования возможного физико-химического взаимодействия с оболочкой твэла при высоком выгорании топлива, но и для обоснования безопасности временного хранения и транспортировки, разработки технологии и оптимизации условий переработки облученного ядерного топлива. В настоящей работе представлены результаты исследования распределения продуктов деления в виброуплотненном топливе после облучения в быстрых реакторах.

Уран-плутониевое топливо, получаемое совместным осаждением оксидов, может быть негомогенным по составу (рис. 1, табл. 1). Расположение фаз, отличающихся соотношением урана и плутония, имеет преимущественную ориентацию вдоль радиального направления катодного осадка, приобретенную во время электролиза.

Структура виброуплотненного топлива после облучения характеризуется наличием сформировавшегося центрального отверстия, спеченной зоны во внутренней