

АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ, КОТОРЫЕ МОГУТ ПРИВОДИТЬ К РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ ТВС ВВЭР

**Евдокимов И.А., Лиханский В.В., Сорокин А.А., Зборовский В.Г.,
Кожакин А.Н., Чернецкий М.Г.**

ФГУП «ГНЦ РФ-ТРИНИТИ», 142190, Троицк, Москва, Россия

Шестаков Ю.М., Семеновых А.С.

ОАО «ВНИИАЭС», 109507, Москва, Россия



При эксплуатации ядерного топлива на АЭС возможна разгерметизация оболочек твэлов, в результате чего возрастает активность в теплоносителе первого контура. В оболочках негерметичных твэлов накапливается водород. При некоторых условиях это может приводить к образованию крупных вторичных дефектов в оболочке. При значительных повреждениях оболочки из негерметичных твэлов может выноситься топливная композиция, что приводит к загрязнению первого контура. В случае разгерметизации топлива на АЭС приходится проводить дорогостоящие мероприятия по поиску и замене негерметичных ТВС и снижению последствий разгерметизации. Это может приводить к значительным экономическим потерям. Представлены результаты анализа данных по ТВС ВВЭР, в которых в период с 2003 по 2013 гг. разгерметизировались оболочки твэлов. Описаны результаты анализа данных визуального осмотра и послереакторных исследований ТВС с негерметичными твэлами в горячих камерах. Приведены установленные закономерности состояния негерметичных твэлов в зависимости от условий эксплуатации. Оценены условия, приводящие к существенной деградации свойств твэлов после разгерметизации и значительному росту выхода активности в теплоноситель первого контура. Накопленный массив данных обобщен с точки зрения возможного влияния эксплуатационных факторов на причины разгерметизации.

Ключевые слова: негерметичные твэлы, разгерметизация оболочки, вторичные дефекты, контроль герметичности оболочек (КГО) твэлов, визуальный осмотр, послереакторные исследования.

ВВЕДЕНИЕ

В 2006 г. в атомной отрасли США была принята программа «Достижение нулевого отказа к 2010 г.». Целью программы являлась разработка и проведение комплекса мероприятий для улучшения показателей эксплуатации ядерного топлива на АЭС и снижения уровня разгерметизации твэлов. За несколько лет выполнения программы были достигнуты значительные успехи. К концу 2010 г. 94% всех коммерческих энергоблоков США эксплуатировались без негерметичных твэлов в активной зоне [1]. Хотя полностью исключить случаи разгерметизации не удалось, с 2010 г. программа по повышению эксплуатационной надежности топлива в США была продолжена под названием

© *И.А. Евдокимов, В.В. Лиханский, А.А. Сорокин, В.Г. Зборовский, А.Н. Кожакин, М.Г. Чернецкий, Ю.М. Шестаков, А.С. Семеновых, 2014*

«Движение к нулевому отказу». Ее задачей является дальнейшее снижение случаев с отклонением от нормальной эксплуатации топлива.

В настоящее время в России также получили развитие программы, целью которых в перспективе является достижение «нулевого уровня» отказов и эксплуатация энергоблоков ВВЭР без негерметичных твэлов в активной зоне. Для обеспечения возможности выработки адекватных мер по снижению случаев разгерметизации топлива были выполнены работы по анализу и систематизации накопленных данных по разгерметизации и деградации состояния негерметичных твэлов на российских АЭС с реакторами ВВЭР.

ОБОБЩЕНИЕ ДАННЫХ ПОСЛЕРЕАКТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТВС ВВЭР С НЕГЕРМЕТИЧНЫМИ ТВЭЛАМИ

Топливо для энергоблоков ВВЭР-1000. До настоящего времени в ГНЦ НИИАР исследовано всего девять негерметичных ТВС ВВЭР-1000 с российских АЭС. Исследованные ТВС отработали от одной до пяти топливных кампаний (ТК). Среднее выгорание топлива в них варьируется от 4.6 до 65.4 МВт·сут/кгU. Все ТВС эксплуатировались в топливном цикле с 12-месячными кампаниями при 100%-ой мощности энергоблока. Характеристики исследованных ТВС показаны на рис. 1. В последние 10 лет исследовались только негерметичные ТВС после одного года или пяти лет эксплуатации.

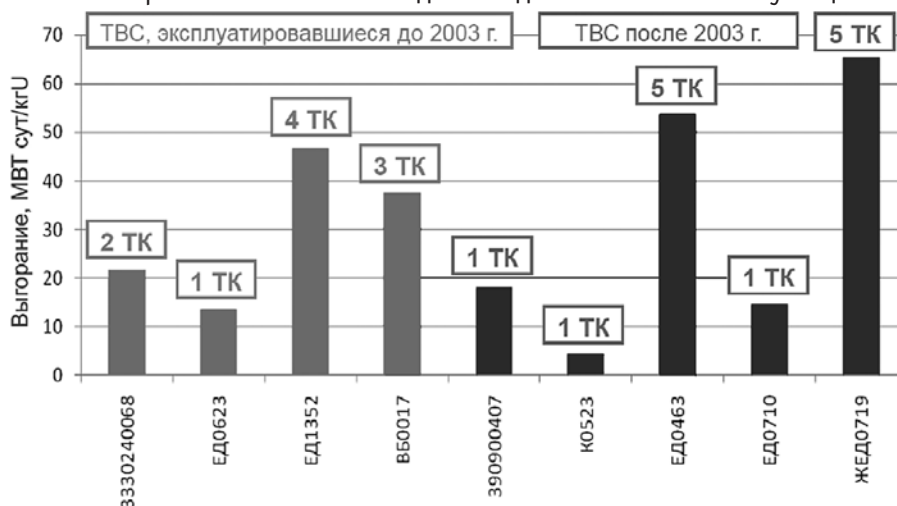


Рис. 1. Выгорание и количество отработанных кампаний для исследованных ТВС

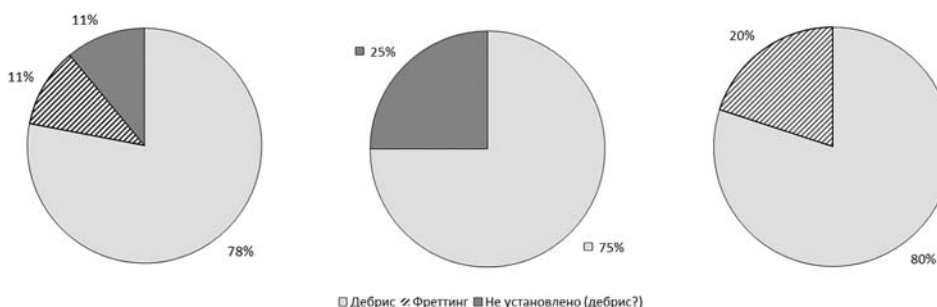


Рис. 2. Причины разгерметизации исследованных ТВС ВВЭР-1000

При послереакторных исследованиях в большинстве случаев удалось установить причину разгерметизации. Для семи ТВС из девяти причиной разгерметизации однозначно являлось дебрис-повреждение оболочки вследствие попадания посторонних предметов в первый контур. Только в одном случае (ТВС ЕД0463) причиной разгерметизации являлся фреттинг-износ

в районе антивибрационной решетки. Для ТВС ВБ0017 причина разгерметизации однозначно не установлена, однако имеются следы дебрис-воздействия на оболочку. Распределение ТВС по причинам разгерметизации показано на рис. 2. Поскольку общее количество исследованных ТВС мало, полученные статистические распределения непредставительны. Тем не менее ясно, что основная причина разгерметизации ТВС ВВЭР-1000 до 2009 г. была связана с дебрис-повреждением оболочки.

Следует отметить, что, согласно результатам послереакторных исследований, во всех ТВС ВВЭР-1000 разгерметизировался только один твэл. Во всех негерметичных твэлах были обнаружены вторичные дефекты (в большинстве случаев – сквозные).

Чтобы установить корреляцию между изменением условий эксплуатации топлива и фактами разгерметизации твэлов, моменты разгерметизации сопоставлялись с данными по изменению мощности ТВС и режимных параметров энергоблока. Для большинства негерметичных ТВС, исследованных в ГНЦ НИИАР, однозначно определить момент разгерметизации не удастся. Это связано с тем, что эти ТВС были не единственными негерметичными сборками в активной зоне на момент проведения контроля герметичности оболочек (КГО) твэлов на остановленном реакторе. Наличие других ТВС с негерметичными твэлами приводит к неопределенностям по времени разгерметизации и по времени работы твэла в негерметичном состоянии.

Из эксплуатационных факторов, которые могли бы повлиять на разгерметизацию твэлов, анализировались изменения мощности энергоблока (или непосредственно мощности твэлов в негерметичной ТВС). Также анализировались доступные данные по изменению режима работы системы спецводоочистки (СВО) – вариации расхода теплоносителя на фильтры очистки и эффективности работы фильтров. В переходных условиях работы системы СВО могут заметно (в пределах установленных норм) меняться показатели водно-химического режима теплоносителя (ВХР). В стационарных условиях отклонения показателей ВХР от установившегося уровня обычно существенно меньше. Изменения ВХР могут приводить к смыву отложений, в которые могут быть интегрированы мелкие дебрис-частицы.

Сопоставление оценочного времени разгерметизации с условиями эксплуатации ТВС на энергоблоках показало следующее.

Признаки влияния режима работы системы СВО на разгерметизацию твэлов в ТВС ВВЭР-1000, исследованных в ГНЦ НИИАР, отсутствуют. Разгерметизация твэлов во всех ТВС не связана с работой при высокой мощности. Энерговыделение во всех негерметичных твэлах не превышало 22 кВт/м. Показано, что прослеживается некоторая корреляция между разгерметизацией и наличием сбросов (подъемов) мощности блока значительной амплитуды. Это может быть связано с тем, что при маневрах в первом контуре происходят возмущения, которые, в частности, могут способствовать дополнительному перемещению посторонних предметов с потоком теплоносителя и (или) усилению воздействия этих предметов на оболочку (например, за счет усиленной вибрации твэлов). Это означает, в частности, что во время первых кампаний на новых блоках за счет циклических изменений мощности при физических испытаниях оборудования возникает повышенная опасность разгерметизации ТВС.

В целом по результатам анализа данных был сделан вывод, что изменение режима работы энергоблоков не являлось коренной причиной разгерметизации твэлов в ТВС ВВЭР-1000, исследованных в горячих камерах ГНЦ НИИАР.

Негерметичные ТВС ВВЭР-440. Согласно данным послереакторных исследований, в ТВС ВВЭР-440 разгерметизировались от одного до восьми твэлов. Основная причина разгерметизации – дебрис-повреждение оболочки и фреттинг-износ. Проблема фреттинг-износа до 2002 г. была достаточно актуальной для Кольской АЭС. Об этом свидетельствуют результаты осмотра ТВС по завершении 24-й топливной кампании на блоке №2. При проведении телевизионного осмотра нижних опорных решеток 276-ти рабочих кассет (РК) установлено, что 40 РК имели повреждение узла крепления твэлов в нижней решетке (смещение или разрушение хвостовиков нижних заглушек твэлов).

В целом можно отметить, что все кампании, во время которых произошла разгерметизация исследованных ТВС, характеризовались наличием глубоких разгрузок мощности энергоблока.

Критерии образования вторичных дефектов. На основе физического моделирования процессов в негерметичных твэлах в работах [2, 3] были установлены критериальные зависимости, связывающие возможность локального массивного гидрирования оболочки с составом пароводородной смеси в негерметичном твэле, температурой оболочки, толщиной оксидной пленки на ее внутренней поверхности и интенсивностью облучения. Числовые коэффициенты в разработанных зависимостях были определены путем взаимного анализа данных послереакторных исследований негерметичных ТВС ВВЭР и условий облучения дефектных твэлов в исследованных сборках. В результате для негерметичных твэлов ВВЭР-1000 был получен консервативный критерий

$$\tau = 750 - 37.5 LP, \quad (1)$$

где τ – время работы твэла на мощности после разгерметизации (сут); LP – линейная мощность негерметичного твэла (кВт/м). Соотношение (1) представляет оценку минимального времени до образования сквозного вторичного дефекта и является аналогом критерия [8] для топлива ВВЭР.

Имеющиеся эксплуатационные данные АЭС по негерметичным топливным сборкам приводят к значительным неопределенностям для разработанного критерия образования сквозных вторичных дефектов. Главным образом, это связано с тем, что во время эксплуатации исследованные негерметичные ТВС оказались не единственными негерметичными сборками в активной зоне.

Установленные закономерности образования вторичных дефектов могут быть использованы в дальнейшем для выработки мер по предотвращению или смягчению негативных последствий деградации характеристик твэла после разгерметизации.

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА РАЗГЕРМЕТИЗАЦИЮ

Сбор данных по условиям эксплуатации ТВС ВВЭР. Для систематизации имеющейся информации о негерметичных ТВС ВВЭР и выявления возможного влияния эксплуатационных факторов на разгерметизацию твэлов был собран значительный массив данных, на основании которых выявлены все ТВС ВВЭР, которые разгерметизировались в период с 2003 по 2013 гг. Для каждой негерметичной ТВС был рассмотрен весь период эксплуатации. Если ТВС эксплуатировалась в течение нескольких циклов, то для каждой кампании отбирались данные по удельным активностям реперных радионуклидов в теплоносителе первого контура и по параметрам работы реакторной установки, включая тепловую мощность, расход теплоносителя на очистку и эффективность фильтров СВО.

Для большинства негерметичных ТВС были собраны данные по индивидуальным характеристикам эксплуатации. Эти данные включали в себя координаты ТВС в активной зоне с учетом последовательных перестановок в различные топливные кампании, результаты нейтронно-физических расчетов АЭС по изменению средней мощности и коэффициентов неравномерности энерговыделения в ТВС за весь период эксплуатации. Для ряда негерметичных ТВС с АЭС были получены данные о результатах их визуального осмотра во время планово-предупредительного ремонта (ППР) блока.

Обобщение результатов КГО. С 2003 по 2012 гг. на российских АЭС с реакторами ВВЭР было выявлено 897 ТВС с негерметичными твэлами. На энергоблоки ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 пришлось 90,7 % (814 ТВС) и 9,3 % (83 ТВС) соответственно. Доли отказавших ТВС от общего числа ТВС с негерметичными твэлами составляли 7,6 % (62 ТВС) для реакторов ВВЭР-440 и 6,0 % (пять ТВС) для ВВЭР-1000. Отказавшей по функции герметичности является ТВС, при проверке которой стендовым методом КГО удельная активность ^{131}I в пробе воды превышает предельное значение, установленное в технических

условиях на ТВС в договоре на поставку ядерного топлива.

В среднем количество негерметичных ТВС ВВЭР-1000 за каждый отчетный год было на порядок меньше аналогичного показателя для всех энергоблоков ВВЭР-440. Число разгерметизаций твэлов в ТВС ВВЭР-1000 сопоставимо со значением для ВВЭР-440, определенным только для четырех энергоблоков Кольской АЭС – без учета третьего и четвертого блоков Нововоронежской АЭС (рис. 3).

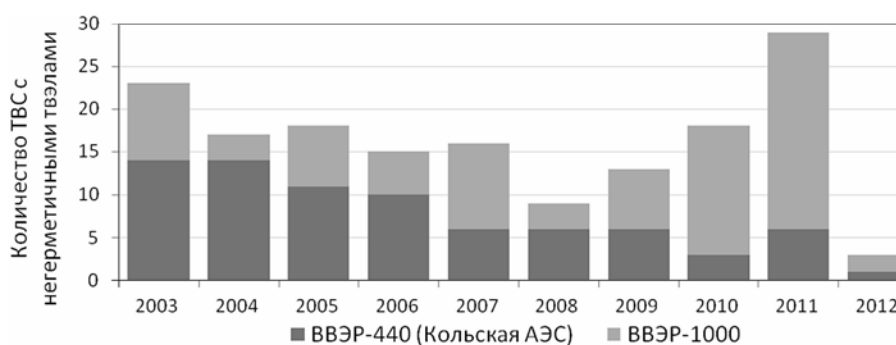


Рис. 3. Количество ТВС с негерметичными твэлами на энергоблоках ВВЭР-440 (только КолАЭС, без учета третьего и четвертого блоков НВ АЭС) и ВВЭР-1000

Наибольший уровень разгерметизации топлива ВВЭР-440 наблюдался до 2010 г. на третьем и четвертом блоках Нововоронежской АЭС и на втором блоке Кольской АЭС. На третьем и четвертом энергоблоках НВ АЭС до 2010 г. наиболее значимым механизмом разгерметизации являлась локальная язвенная коррозия под отложениями, обусловленная наличием в теплоносителе первого контура большого количества шлама продуктов коррозии. Заметная доля разгерметизаций произошла также в результате дебрис-повреждений оболочек твэлов. Массовая разгерметизация твэлов на втором энергоблоке Кольской АЭС была обусловлена проблемой фреттинг-коррозии оболочек твэлов под дистанционирующими решетками (ДР). Это связано с повышенными вибронагрузками на ТВС после реконструкции второго блока. Разработка и выполнение специальных мероприятий для исключения указанных факторов на Кольской и Нововоронежской АЭС позволили существенно снизить уровень разгерметизации топлива на блоках ВВЭР-440.

На блоках ВВЭР-1000 наибольшие проблемы с разгерметизацией топлива в прошедшие 10 лет наблюдались на первом и третьем блоках Калининской АЭС. На первом энергоблоке Калининской АЭС в последние годы наблюдались проблемы с повреждением ободов ДР. Это могло приводить к механическим повреждениям твэлов при перегрузке топлива и к увеличению частиц дебриса в теплоносителе. На третьем блоке при визуальном осмотре негерметичных ТВС в нескольких случаях были обнаружены посторонние предметы. Однако причину разгерметизации других ТВС установить не удалось. Было рекомендовано выборочно отправить негерметичные ТВС с третьего блока на послереакторные исследования в ГНЦ НИИАР. В будущем можно также использовать стенд инспекции для более детального исследования дефектных сборок, находящихся в бассейне выдержки.

Низкие уровни разгерметизации были достигнуты на Балаковской, Ростовской и пятом блоке Нововоронежской АЭС. Одним из возможных факторов, обеспечивающих высокую эксплуатационную надежность ядерного топлива на Балаковской и Ростовской АЭС, является эксплуатация модификаций ТВС-2. На блоках Калининской АЭС с повышенным уровнем разгерметизации эксплуатируются различные модификации ТВСА.

В целом более благополучная ситуация с надежностью топлива наблюдается на блоках ВВЭР-1000. Можно ожидать, что достижение «нулевого уровня» отказов и эксплуатация АЭС без негерметичных ТВС в активной зоне в перспективе возможна, в первую очередь, на блоках этого типа.

Опыт контролируемой повторной загрузки негерметичных ТВС в реактор. До недавнего времени на отечественных энергоблоках ВВЭР использовалась концепция, которая допускает загрузку в активную зону ТВС с негерметичными твэлами. Продолжение эксплуатации негерметичных ТВС допускается, если при стендовом КГО не превышен критерий отказа, заданный в технических условиях или в договорах на поставку ТВС.

На российских АЭС с ВВЭР в период с 2003 по 2012 гг. в активные зоны были контролируемо загружены 20 ТВС с негерметичными твэлами для продолжения эксплуатации (восемь ТВС на энергоблоках ВВЭР-440 и 12 – на блоках ВВЭР-1000). Начиная с 2006 г. загрузка ТВС с негерметичными твэлами производилась, в основном, на энергоблоках ВВЭР-1000.

Влияние повторной загрузки в активную зону негерметичных ТВС на уровень активности теплоносителя первого контура можно проанализировать с помощью показателя герметичности ядерного топлива FRI (Fuel Reliability Indicator – показатель надежности топлива), используемого БАО АЭС [4]. Показателем FRI по сути является значение удельной активности ^{131}I в теплоносителе первого контура, связанной с выходом только из негерметичных твэлов.

Для оценки влияния повторной загрузки негерметичных ТВС на уровень активности теплоносителя сравнивались значения показателя FRI до и после контролируемой загрузки негерметичных ТВС в активную зону. Результаты сравнения приведены на рис. 4. Как видно, значительного влияния на уровень активности теплоносителя контролируемая повторная загрузка ТВС с негерметичными твэлами не оказывала.

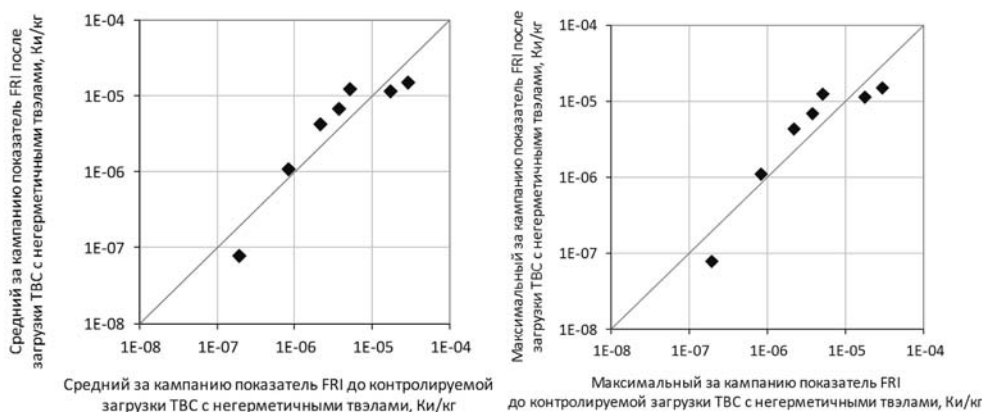


Рис. 4. Средние и максимальные значения показателя герметичности FRI до и после контролируемой повторной загрузки ТВС с негерметичными твэлами

В целом опыт по продолжению эксплуатации негерметичных ТВС, не достигших критерия отказа, можно признать успешным. Такой подход позволяет снизить затраты на топливо и сократить сроки перегрузки реактора, если необходимо ждать ТВС на замену негерметичным сборкам. Однако у данной практики имеются и недостатки. Возможны экономические потери, связанные с загрязнением оборудования первого контура и бассейнов выдержки долгоживущими радионуклидами ^{134}Cs и ^{137}Cs . По этой причине увеличивается количество радиоактивных отходов и дозозатрат персонала. Существующие на АЭС с ВВЭР системы СВО практически не очищают теплоноситель от радионуклидов цезия. В результате цезий накапливается на поверхностях парогенераторов и в воде бассейна выдержки (БВ).

Совсем недавно на отдельных зарубежных АЭС «дожигание» не достигших проектного выгорания ТВС с негерметичными твэлами считалось приемлемым. Так на протяжении более двадцати лет на всех АЭС французской компании EDF (58 энергоблоков типа PWR, введенных в эксплуатацию с 1977 по 1999 гг.) ТВС с незначительными по размеру сквозными дефектами в оболочке твэла оставляли в активной зоне для работы в последующих кампаниях [5].

Однако несмотря на большой практический опыт, показавший, что контролируемая эксплуатация ТВС с негерметичными твэлами может быть успешной, в 2002 г. было принято решение о прекращении данной практики на энергоблоках EDF. Основными причинами для принятия этого решения послужили риски, связанные с переходом на высокие выгорания ядерного топлива и удлиненные топливные кампании. При переходе на 18- и 24-месячные топливные кампании резко увеличивается вероятность развития вторичных дефектов в оболочках. Наличие даже одного негерметичного твэла со вторичными дефектами может привести к возрастанию активности продуктов деления в теплоносителе первого контура до значения, близкого к эксплуатационному пределу [6, 7].

С учетом перехода на длительные кампании, повышения мощности энергоблоков ВВЭР и возможности маневренных режимов эксплуатации концепция обращения с негерметичными ТВС в настоящее время пересматривается. В перспективе в качестве основного направления обращения с негерметичными ТВС ВВЭР следует использовать практику загрузки в реактор только герметичных (или отремонтированных) ТВС. Однако целесообразность полного отказа от возможности контролируемой повторной загрузки негерметичных ТВС в активную зону ВВЭР может быть установлена только после проведения тщательного экономического обоснования.

Систематизация данных визуального осмотра негерметичных ТВС. Наиболее простым и дешевым методом исследования состояния негерметичных ТВС является их визуальный осмотр с помощью телекамеры в штанге машины перегрузочной (МП). Если на атомной станции отсутствует стенд инспекции и ремонта (СИР), визуальный осмотр – единственное средство получения информации о состоянии сборки.

Визуальный осмотр – обследование внешней поверхности ТВС, при котором у бесчехловых ТВС (штатные ТВС ВВЭР-1000) видны только наружные участки поверхности периферийных твэлов и верхние (нижние) концы твэлов. Осматривая верхние хвостовики, можно оценить разновысотность тепловыделяющих элементов. Иногда по разновысотности можно отследить положение негерметичного твэла. У чехловых ТВС (применяются на пятом блоке НВ АЭС и на всех энергоблоках ВВЭР-440) практически вся поверхность твэлов недоступна для осмотра. При визуальном осмотре ТВС на Кольской АЭС удавалось обследовать состояние нижних хвостовиков твэлов. Заметим, что в настоящее время компанией ОАО «ТВЭЛ» разработаны бесчехловые ТВС ВВЭР-440 нового поколения. Опытная эксплуатация таких ТВС проходит на Кольской АЭС.

Всего с 2003 по 2013 гг. на блоках ВВЭР-1000 из 92-х обнаруженных негерметичных ТВС в штанге МП было осмотрено 88 сборок. Замечания были сделаны только по 25-ти ТВС. Зафиксированные замечания к внешнему виду ТВС можно разделить на несколько категорий: обнаружение сквозного дефекта в оболочке твэла; подозрение на наличие сквозного дефекта; локальная деформация вздутия оболочки; наличие коррозионных отложений; разновысотность твэлов; повреждение ободов ДР; наличие постороннего предмета. Большая часть выявленных отклонений от нормального состояния не указывала однозначно на причину повреждения твэлов. Только при обнаружении постороннего предмета можно было с достаточной степенью уверенности полагать, что причина разгерметизации связана с дебрис-повреждением оболочки.

Обобщение данных визуального осмотра ТВС ВВЭР-1000 с точки зрения выявления механизмов повреждения представлено на рис. 5. Как видно, указание на дебрис-повреждение как на возможную причину разгерметизации удалось обнаружить только в 9% случаев, в 14% случаев (все случаи – на первом блоке КланАЭС) зафиксированы дефекты ДР. В конечном счете повреждения ДР могут приводить к увеличению числа частиц дебриса в теплоносителе первого контура и разгерметизации твэлов по механизму дебрис-фреттинга.

По негерметичным ТВС ВВЭР-440 анализировались результаты осмотров на втором

блоке Кольской АЭС после топливных кампаний №25 и №26 (2003 и 2004 гг.). Массив данных по осмотренным ТВС, к которым были замечания, включает в себя 58 герметичных и 17 негерметичных ТВС. Все осмотренные ТВС – чехловые. В связи с этим замечания визуального осмотра касались только повреждений хвостовиков твэлов, центральной трубы и наличия посторонних предметов. Отметим, что наличие посторонних предметов далеко не всегда приводило к разгерметизации ТВС.

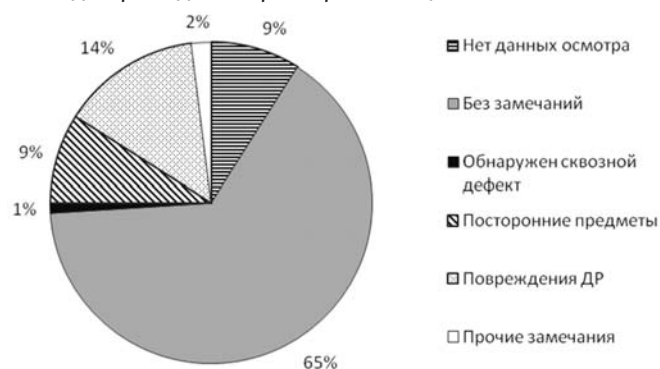


Рис. 5. Общие данные осмотров негерметичных ТВС ВВЭР-1000 с точки зрения выявления механизмов повреждения твэлов

В целом проведенный анализ позволяет заключить, что средствами визуального осмотра негерметичных ТВС в штанге МП причину разгерметизации удастся определить в небольшой доле случаев. Для получения представительных данных по механизмам разгерметизации твэлов необходимо внедрение СИР на АЭС с ВВЭР или более масштабные исследования негерметичных ТВС в горячих камерах. Результаты визуального осмотра в штанге МП и эпизодических выборочных исследований ТВС в горячих камерах может быть недостаточно для выработки адекватных мер по снижению уровня разгерметизаций на блоках ВВЭР.

Оценка состояния реактора в момент разгерметизации твэлов проводилась на основании сопоставления данных о мощности энергоблока и поведения активности продуктов деления в теплоносителе первого контура с учетом параметров работы фильтров СВО. Обработывались данные по всем кампаниям с 2003 по 2013 гг. Все случаи разгерметизации относительно состояния реактора условно разделили на три основные группы: разгерметизация при работе на стационарном уровне мощности; разгерметизация при переходном режиме работы; установить момент разгерметизации твэлов не удалось.

Последняя группа объединяет случаи, когда в течение одной кампании разгерметизировалось несколько твэлов в одной или разных ТВС. При этом достоверно оценить можно только первый случай разгерметизации, который является наиболее контрастным относительно фоновых значений активности радионуклидов.

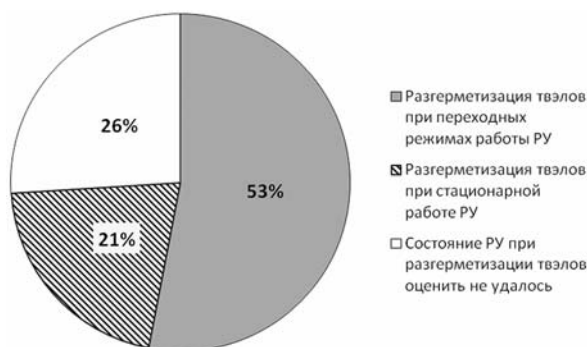


Рис. 6. Результаты оценки состояния РУ в моменты разгерметизации твэлов ВВЭР-1000 для топливных кампаний, завершенных с 2003 по 2013 гг.

Проведенная оценка состояния блоков ВВЭР-1000 в моменты разгерметизаций твэлов показала, что в 53% случаев разгерметизация твэлов произошла во время переходных режимов работы реакторной установки (РУ), в 21% случаев твэлы разгерметизировались при стационарной работе РУ, в 26% случаев состояние РУ во время разгерметизации достоверно оценить не удалось (рис. 6).

Как видно из рисунка, в большинстве случаев разгерметизация твэлов произошла во время переходных режимов работы РУ. Дополнительное исследование, проведенное для первого, второго и третьего энергоблоков Калининской АЭС, не выявило прямой зависимости между уровнем разгерметизации топлива и количеством циклов нагружения ТВС, связанных с маневрами мощности и подключением (отключением) оборудования первого контура. Следовательно, циклы нагружения ТВС не являются первопричиной разгерметизации оболочек твэлов. Повреждение ядерного топлива во время переходных режимов работы РУ должно быть обусловлено дополнительными негативными факторами, которые в сочетании с циклами нагружения в конечном счете приводят к разгерметизации оболочек твэлов. При отсутствии таких дополнительных факторов эксплуатация топлива должна идти в нормальном режиме.

Оценка объема исследований негерметичных ТВС ВВЭР. Исследования негерметичных ТВС и установление причин разгерметизации являются основой повышения надежности эксплуатации топлива. Послереакторные исследования, выполненные в ГНЦ НИИАР, дают детальную информацию о состоянии ОТВС в целом и различных твэлов в отдельности. Однако общее количество негерметичных ТВС ВВЭР, исследованных в ГНЦ НИИАР с 1991 г. по настоящее время, относительно мало – всего 12 штук. Чем ограниченнее информация по негерметичным ТВС, тем сложнее принимать адекватные и эффективные меры по борьбе с разгерметизацией топлива. С точки зрения реализации мероприятий по достижению нулевого уровня отказа ядерного топлива в России целесообразно сравнить объем проведенных исследований с мировым опытом.

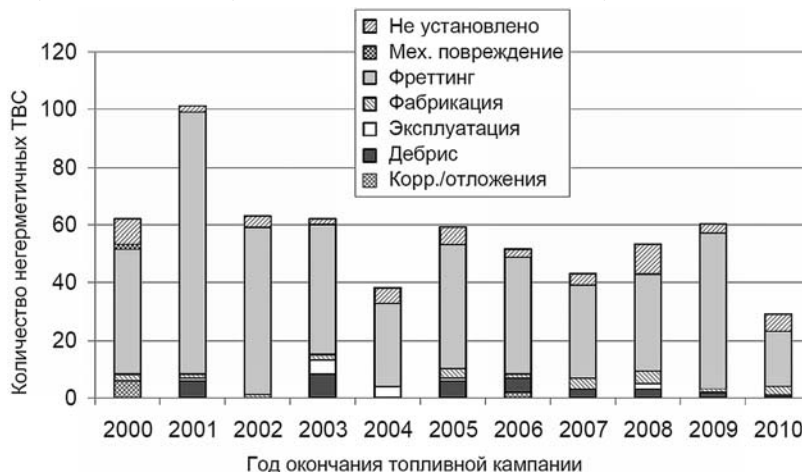


Рис. 7. Количество ежегодно исследованных негерметичных ТВС PWR на АЭС США в период 2000 – 2010 гг. с указанием установленных причин разгерметизации [1]

В качестве ориентира естественно использовать результаты выполнения программы «Достижение нулевого отказа к 2010 г.» [1]. Одним из факторов, который внес ключевой вклад в успех данной программы, является увеличенное количество обследований ТВС в соответствии с выпущенным в рамках программы [1] руководящим документом по надзору и инспектированию топлива. Инспекции проводились как для герметичных, так и для негерметичных сборок. Обследования эксплуатируемого топлива могут требовать заметных затрат (это зависит от объема исследований и конструкции ТВС). Тем не менее, было решено, что регулярные инспекции герметичных ТВС являются необ-

ходимым компонентом повышения надежности эксплуатации топлива.

Для негерметичных ТВС инспекции проводились с целью выяснения коренных причин разгерметизации. Количество ежегодно исследуемых негерметичных ТВС на блоках PWR показано на рис. 7. Видно, что для реализации программы [1] и выработки адекватных мер по снижению случаев отказа топлива использовалась широкая база данных по результатам эксплуатации топлива. Для блоков PWR эта база ежегодно пополнялась данными в среднем по 50-ти новым обследованным негерметичным ТВС. Такой объем исследований уже является статистически представительным и позволяет корректно отслеживать изменение причин разгерметизации с течением времени. По всем ключевым механизмам деградации, обнаруженным при исследованиях, были приняты решения. Это обеспечило успешное выполнение программы [1].

Следует отметить, что большинство обследований ТВС на АЭС США проводились на стендах инспекции и ремонта. Количество исследований в горячих камерах было заметно меньше.

ВЫВОДЫ

1. По данным послереакторных исследований в большинстве негерметичных твэлов ВВЭР образуются вторичные дефекты. Установленные при анализе данных закономерности образования вторичных дефектов могут быть использованы для выработки мер по предотвращению или смягчению негативных последствий разгерметизации.

2. В период 2003 – 2013 гг. основной причиной разгерметизаций ТВС ВВЭР являлось дебрис-повреждение оболочек твэлов. Большинство разгерметизаций произошло во время переходных режимов работы РУ. Установлено, что циклы нагружения ТВС не являются первопричиной разгерметизаций и только в сочетании с дополнительными негативными факторами (например, наличие посторонних предметов в теплоносителе) они могут в конечном счете приводить к разгерметизации оболочек твэлов.

3. Для успешной реализации мероприятий по достижению нулевого уровня отказа ядерного топлива на российских АЭС необходимо значительно расширить исследования негерметичных (поврежденных) ТВС. Одним из средств для этого является ускоренное внедрение стенда инспекции и ремонта ТВС ВВЭР.

Литература

1. Edsinger K., Cheng B., Daum R., Deshon J., Hussey D., Kucuk A., Mader E.V., Pytel M., Peitmeyer M., Yagnik S.K., Yueh K. Zero by 2010 and recent U.S. fuel reliability experience. Proc. Water Reactor Fuel Performance Meeting (TopFuel), Chengdu, China, Sept. 11-14, 2011, paper T2-41.
2. Evdokimov I.A., Likhanskii V.V. In-Pile Criteria for the Initiation of Massive Hydriding of Zr in Steam-Hydrogen Environment. Journal of ASTM International. Vol.5. No.1. 2008.
3. Evdokimov I.A., Likhanskii V.V., Aliev T.N., Sorokin A.A., Kanukova V.D. Secondary Hydriding Criteria Under Irradiation Conditions. Nuclear Eng. and Design. 2011. T. 241. PP.1414-1420.
4. Fuel Reliability Reference Manual. Справочник по надежности топлива. Официальный сайт БАО АЭС. URL: <http://www.wano.info/en-gb> (дата обращения 04.06.2014).
5. Bairiot H., et al. Fuel failure in normal operation of water reactors: experience, mechanisms and management. IAEA-TECDOC-709, Vienna, Austria, 1993.
6. Alvarez L., et al. Review of fuel failures in water cooled reactors. IAEA Nuclear Energy Series No.NF-T-2.1, Vienna, Austria, 2010.
7. Perrota J.A., et al. Fuel Failure in Water Reactors: Causes and Mitigation. IAEA-TECDOC-1345, Vienna, Austria, 2003.
8. Locke D.H. The behaviour of defective reactor fuel // Nuclear Engineering and Design. 1972. Vol. 21, No.2. PP. 318-330.

Поступила в редакцию 02.06.2014 г.

Авторы

Евдокимов Игорь Анатольевич, зам. начальника отдела – начальник лаборатории
E-mail: evdokimov@triniti.ru

Лиханский Владимир Валентинович, начальник отдела

E-mail: likhansk@mail.ru

Сорокин Анатолий Александрович, начальник лаборатории

E-mail: aa40@bk.ru

Зборовский Вадим Гарольдович, начальник лаборатории

E-mail: vadim_z@triniti.ru

Кожакин Алексей Николаевич, младший научный сотрудник

E-mail: kozhakin@triniti.ru

Чернецкий Михаил Георгиевич, инженер

E-mail: mike@triniti.ru

Шестаков Юрий Митрофанович, начальник отдела

E-mail: shestakovym@mail.ru

Семеновых Антон Сергеевич, главный специалист

E-mail: semenovykh@gmail.com

UDC: 621.039.548

ANALYSIS OF OPERATIONAL FACTORS THAT CAN LEAD TO FUEL FAILURE IN WWER UNITS

Evdokimov I.A., Likhanskij V.V., Sorokin A.A., Zborovskij V.G., Kozhakin A.N., Chernetskij M.G., Shestakov Yu.M. *, Semenovykh A.S. *

FSUE «SRC RF TRINITI», 142190, Moscow, Troitsk, Russia

*JSC «VNIIAES», 109507, Moscow, Russia

ABSTRACT

Fuel failure is likely to occur during operation of nuclear power units. Failure may result in escalation of primary coolant activity. Hydrogen uptake by cladding is high in failed fuel rods. Under certain conditions it may lead to secondary degradation and formation of coarse defects in cladding. Fuel washout becomes possible in case of severe cladding degradation with ensuing contamination of primary circuit. Fuel failure necessitates high-cost activities on detection of leaking fuel. Expensive mitigating procedures may be needed as well. The present paper is focused on fuel failure in WWER units in the period of 2003 through 2013. The data of visual inspections and post-irradiation examinations of leaking fuel assemblies in hot cells are reported. Degradation of defective fuel rods is related to fuel operation conditions. The threshold conditions are estimated which lead to severe secondary degradation of leaking fuel and substantial increase in release of fission products into primary coolant. The accumulated data are summarized in relation to possible impact of operational factors on the rate and causes of fuel failures.

Key words: leaking fuel rods, cladding failure, secondary degradation, leakage tests, visual inspection, post-irradiation examinations.

REFERENCES

1. Edsinger K., Cheng B., Daum R., Deshon J., Hussey D., Kucuk A., Mader E.V., Pytel M., Peitmeyer M., Yagnik S.K., Yueh K. Zero by 2010 and recent U.S. fuel reliability experience. [Proc. Water Reactor Fuel Performance Meeting (Top Fuel)]. Chengdu, China, Sept. 11-14, 2011, paper T2-41.
2. Evdokimov I.A., Likhanskii V.V. In-Pile Criteria for the Initiation of Massive Hydriding of Zr in Steam-Hydrogen Environment. Journal of ASTM International, v.5, no.1, 2008.
3. Evdokimov I.A., Likhanskii V.V., Aliev T.N., Sorokin A.A., Kanukova V.D. Secondary

Hydriding Criteria Under Irradiation Conditions. *Nuclear Eng. and Design*. 2011, v. 241, pp.1414-1420.

4. Spravochnik po nadezhnosti topliva. Ofitsialnyj sait VAO AES (Fuel Reliability Reference Manual. Official site of WANO) Available at: <http://www.wano.info/en-gb> (accessed 04.06.2014)

5. *Bairiot H., et al.* Fuel failure in normal operation of water reactors: experience, mechanisms and management. IAEA-TECDOC-709, Vienna, Austria, 1993.

6. *Alvarez L., et al.* Review of fuel failures in water cooled reactors. IAEA Nuclear Energy Series No.NF-T-2.1, Vienna, Austria, 2010.

7. *Perrota J.A., et al.* Fuel Failure in Water Reactors: Causes and Mitigation. IAEA-TECDOC-1345, Vienna, Austria, 2003.

8. *Locke D.H.* The behaviour of defective reactor fuel // Nuclear Engineering and Design. 1972. v.21, no.2, pp. 318-330.

Authors

Evdokimov Igor' Anatol'evich, Deputy Head of Department – Head of Laboratory

E-mail: evdokimov@triniti.ru

Likhanskij Vladimir Valentinovich, Head of Department

E-mail: likhansk@mail.ru

Sorokin Anatolij Aleksandrovich, Head of Laboratory

E-mail: aa40@bk.ru

Zborovskii Vadim Garoldovich, Head of Laboratory

E-mail: vadim_z@triniti.ru

Kozhakin Aleksey Nikolaevich, Junior Researcher

E-mail: kozhakin@triniti.ru

Chernetskij Mihail Georgievich, Engineer

E-mail: mike@triniti.ru

Shestakov Yuriy Mitrofanovich, Head of Department

E-mail: shestakovym@mail.ru

Semenovkykh Anton Sergeevich, Chief Specialist

E-mail: semenovkykh@gmail.com