

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОБОБЩЕНИЯ ДАННЫХ ПО ОТКАЗАМ ТВС С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ТОПЛИВА

*Евдокимов И.А., Калинин П.М., Хромов А.Г., Афанасьева Е.Ю., Маслова Л.А.,
Сорокин А.А., Горюшин И.О., Бурцев А.Ю., Золотарев С.П., Бабкин С.В.*

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»,
108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушковых, вл. 12



При эксплуатации АЭС к значительным финансовым потерям приводят отказы ядерного топлива. Наиболее распространенной причиной отказов топлива является разгерметизация оболочек твэлов. С целью снижения сопутствующих потерь в большинстве стран с развитой атомной энергетикой инициированы проекты по движению к нулевому уровню отказов ядерного топлива. В ряде стран создаются программные продукты для мониторинга и анализа данных, связанных с отказами топлива на АЭС. С целью оценки основных факторов, которые влияют на отказы ТВС ВВЭР-1000/1200, разработана компьютерная информационно-аналитическая (диагностическая) система. Система реализована в виде программного продукта на базе веб-технологий, является интерактивной и обеспечивает математическую обработку накапливаемых данных, в том числе с применением статистических методов.

В качестве основы для обобщения данных по отказам ТВС разработанная система предоставляет широкий набор средств для анализа показателей (индикаторов) надежности ядерного топлива. Наряду с традиционными показателями надежности рассматриваются дополнительные индикаторы, которые позволяют судить о доминирующих механизмах отказов. Анализ показателей надежности нацелен на выявление отклонений от ожидаемого поведения топлива. Ключевым элементом разработанной системы является интерактивный инструментарий, созданный для определения причин обнаруженных отклонений. Для каждой группы отказов система обеспечивает автоматический подбор всей связанной информации (проектная документация, данные по изготовлению ТВС, отчеты по обоснованию топливной загрузки, акты контроля герметичности твэлов, данные послереакторных исследований и т.п.). В результате пользователь получает полный набор данных для выработки и проверки гипотез об

© Евдокимов И.А., Калинин П.М., Хромов А.Г., Афанасьева Е.Ю., Маслова Л.А.,
Сорокин А.А., Горюшин И.О., Бурцев А.Ю., Золотарев С.П., Бабкин С.В., 2024

основных факторах, которые могли привести к отклонениям по числу отказов. Анализ данных по отказам топлива с помощью созданной системы может быть использован поставщиком топлива и эксплуатирующими организациями для разработки мероприятий, направленных на повышение надежности топлива.

Ключевые слова: АЭС, ВВЭР, ядерное топливо, разгерметизация твэла, отказ ТВС, показатели эксплуатационной надежности, статистика отказов.

Для цитирования: Евдокимов И.А., Калинин П.М., Хромов А.Г. Афанасьева Е.Ю., Маслова Л.А., Сорокин А.А., Горюшин И.О., Бурцев А.Ю., Золотарев С.П., Бабкин С.В. Информационная система для обобщения данных по отказам ТВС с целью повышения эксплуатационной надежности топлива. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2024. – № 1. – С. 42 – 58. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.1.04>

ВВЕДЕНИЕ

При эксплуатации ядерного топлива на АЭС возможна разгерметизация твэлов. Это приводит к значительным финансовым потерям. В последние годы ведущие поставщики ядерного топлива и эксплуатирующие организации приложили значительные усилия для повышения эксплуатационной надежности топлива. Были разработаны программы, нацеленные на снижение экономических потерь, связанных с отказами ТВС. В 2012 г. топливная компания «ТВЭЛ» инициировала международный проект «Нулевой уровень отказа¹ (НУО)» ядерного топлива для реакторов ВВЭР-1000 [1 – 4]. Аналогичные проекты ведутся для реакторов PWR и BWR в США и Европе [5 – 8]. Для ряда атомных станций, в том числе для некоторой группы РУ ВВЭР, в последние годы были достигнуты высокие показатели эксплуатационной надежности. Тем не менее, международный опыт показывает, что совсем исключить разгерметизацию твэлов на АЭС (при разумном уровне затрат) не представляется возможным.

Наиболее полную информацию о причинах отказов дают регулярные обследования состояния ТВС в процессе и по завершении эксплуатации [9, 10]. Наибольшей информативностью характеризуются обследования ТВС на специализированных стендах инспекции [11] и послереакторные исследования [12 – 15] отработавших ТВС в «горячих» камерах. Обследования ТВС на стендах инспекции проводятся, чтобы подтвердить соответствие состояния топлива проектным характеристикам или установить причины несоответствия проекту, если таковые были обнаружены. К последнему случаю относится и разгерметизация твэлов в ТВС. Отправной точкой при разработке мероприятий, направленных на снижение количества отказов топлива, за рубежом являлась надежная идентификация причин и механизмов разгерметизации твэлов в конкретных типах ТВС на конкретных действующих энергоблоках. Ключевым фактором для выявления актуальных механизмов разгерметизации стало расширение обследований на стендах инспекции как негерметичных² ТВС, так и герметичных ТВС на разных этапах эксплуатации [5].

¹ В рамках проекта НУО к отказам относится разгерметизация одного или нескольких твэлов в ТВС, изменение геометрической формы ТВС свыше проектных пределов или механическое повреждение ТВС. В настоящее время большинство отказов топлива ВВЭР связано с разгерметизацией твэлов.

² Имеются в виду ТВС с негерметичными твэлами. Термин «негерметичная ТВС» широко используется для краткости. Соответственно, под «герметичной ТВС» понимается ТВС без негерметичных твэлов.

В настоящее время на АЭС с РУ ВВЭР стенды инспекции на регулярной основе не применяются в связи с тем, что работы на стенде критически влияют на длительность ППР. При этом единственным источником детальной информации о состоянии и механизмах повреждения негерметичных твэлов являются послереакторные исследования ТВС ВВЭР в горячих камерах. Количество послереакторных исследований ТВС ВВЭР-440/1000 весьма ограничено из-за необходимости выдержки ОТВС перед вывозом и высокой стоимости. Исследования ТВС ВВЭР-1200 в настоящее время не проводятся из-за технических ограничений горячих камер в ГНЦ НИИАР по приему контейнера с ОТВС. В этих условиях в рамках проекта НУО для топлива ВВЭР было предложено организовать работу по сравнительному анализу доступной информации о характеристиках и результатах эксплуатации отказавших ТВС. Была поставлена задача разработки методов, позволяющих на основании этой косвенной информации оперативно отслеживать отклонения от ожидаемого поведения топлива и оценивать основные факторы, которые влияют на количество отказов. Мониторинг любых отклонений от ожидаемого поведения топлива во время эксплуатации критически важен для оперативной разработки мероприятий по повышению надежности топлива, снижению количества и последствий отказов.

Информация о результатах эксплуатации и характеристиках топлива на разных АЭС содержится в большом количестве разнородных источников. Систематизация и анализ этой информации является трудоемкой задачей. Эффективным способом обработки и сравнительного анализа разнообразных данных из разных источников является создание компьютерных информационных систем. В настоящее время подобные системы, как правило, создают на базе веб-технологий, обеспечивая возможность удаленной загрузки данных и работы разных групп пользователей по защищенным интернет-соединениям. В качестве примера можно привести южнокорейскую информационную систему (веб-приложение) i-FRIMA [16] для анализа эксплуатационных данных АЭС и китайскую веб-платформу FAFID [17] для анализа данных по отказам топлива на АЭС.

Для анализа данных, связанных с разгерметизацией твэлов на реакторах ВВЭР-1000/1200, по заказу АО «ТВЭЛ» разработана информационно-аналитическая (диагностическая) система «Статистика отказов». Система создана в виде программного продукта на основе веб-технологий. Открытая архитектура системы в перспективе позволяет наращивать ее функциональные возможности и объединять ее по модульному принципу с другими компьютерными программами для решения эксплуатационных вопросов, связанных с разгерметизацией твэлов на АЭС.

ПОДХОДЫ К АНАЛИЗУ ДАННЫХ ПО ОТКАЗАМ ТОПЛИВА

Общепринятым подходом к сопоставлению данных по отказам ТВС является построение так называемых «показателей надежности топлива» [9, 10]. Показатели надежности рассчитываются исходя из эксплуатационных данных АЭС. По сути, это различные варианты представления (преобразования) исходного набора эксплуатационных данных.

Эксплуатирующие, надзорные и исследовательские организации в мире используют разные наборы показателей надежности топлива. Некоторые из применяемых показателей носят более «интегральный» характер, они удобны для анализа тенденций на больших промежутках времени и характеризуют общее состояние дел в отрасли. Некоторые показатели являются более «дифференциальными» и позволяют анализировать зависимость отказов топлива от отдельных факторов (тип ТВС, длительность топливного цикла и

т.п.). В мировой практике можно выделить три широко используемых показателя, которые дают общее представление об эксплуатационной надежности топлива [9, 10]:

- динамика количества энергоблоков, работающих без отказов топлива;
- изменение количества негерметичных ТВС на разных АЭС;
- частота разгерметизации твэлов на разных АЭС.

Информационная система «Статистика отказов» обеспечивает построение указанных показателей в виде интерактивных диаграмм. Помимо «базовых» показателей надежности дополнительно оценивается вероятность разгерметизации твэлов в зависимости от выгорания топлива. Данный показатель предназначен для проверки гипотез о преобладающем механизме отказов (см. ниже). Гибкий интерфейс позволяет работать с различными вариантами отображения каждого показателя и выделять интересующие группы данных по отказам.

Особенностью системы «Статистика отказов» является то, что для каждой группы отказов обеспечивается автоматический подбор всей связанной информации (проектная документация, данные по изготовлению ТВС, отчеты по обоснованию топливной загрузки, акты контроля герметичности твэлов, данные послереакторных исследований и т.п.). В результате пользователь получает полный набор данных для выработки и проверки гипотез об основных факторах, которые могли привести к отклонениям по числу отказов (рис. 11).

ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ТОПЛИВА

Средства отбора и визуализации данных. Интерактивные диаграммы в системе «Статистика отказов» снабжены тремя всплывающими панелями управления, как показано на рис. 1. Все три панели управления (верхняя, нижняя и левая боковая) по умолчанию скрыты. Для вызова панелей управления используются соответствующие кнопки.

1. Верхняя панель управления предназначена для отбора группы энергоблоков и периода времени, для которых требуется провести анализ (обеспечивается фильтрация данных).

2. Левая боковая панель позволяет детализировать каждое значение показателя: можно отобразить вклад в общее значение разных составляющих (например, вклад разных АЭС в общее число отказов (см. рис. 1), вклад ТВС разных конструкций и т.п.). В соответствии с этим каждый элемент диаграммы (на рис. 1 это столбцы³) разбивается на несколько секций.

3. Нижняя горизонтальная панель управления предназначена для выбора информации, отображаемой по горизонтальной оси. На большинстве диаграмм горизонтальная панель инструментов имеет функцию «сгруппировать колонки». В частности, эта функция позволяет объединять интервалы времени по выбору пользователя. Пользуясь этой функцией, можно рассматривать изменение количества негерметичных ТВС, например, за последовательные трехлетние или пятилетние промежутки времени. Также имеется возможность отсортировать элементы диаграммы по возрастанию (убыванию) значения анализируемого показателя.

Показатель «Динамика количества АЭС без отказов топлива». Эксплуатационную надежность всегда рассматривают применительно к некоторой совокупности энергобло-

³ В системе «Статистика отказов» реализован стандартный функционал по выбору типа диаграммы (столбчатая, линейчатая, круговая и т.д.).

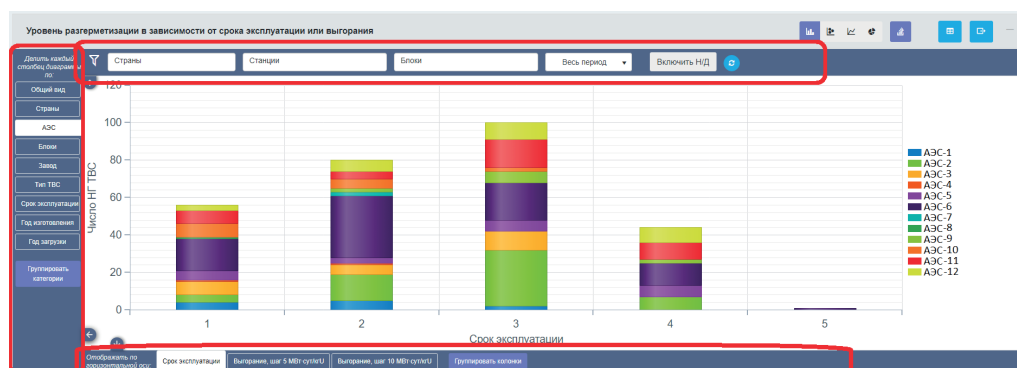


Рис. 1. Пример диаграммы с интерактивными панелями управления: число негерметичных (НГ) ТВС с разным количеством отработанных циклов

ков. При этом надежность часто оценивают с точки зрения количества (доли) энергоблоков, которые отработали определенный период времени без негерметичных ТВС в активной зоне.

Соответствующая информация отображается на первых двух интерактивных диаграммах системы «Статистика отказов»: на первой демонстрируются ежегодные данные по количеству «чистых» энергоблоков и энергоблоков с разгерметизацией твэлов, на второй – данные по отклонению относительной доли «чистых» энергоблоков от целевого уровня (в проекте НУО ставится задача обеспечить работу не менее 95% РУ ВВЭР-1000 без отказов топлива [1]).

Дополнительно обеспечена опция мониторинга «длительной эксплуатационной надежности» [6, 10]. В частности, для каждого энергоблока определяется длительность текущего непрерывного периода эксплуатации без отказов топлива (рис. 2). Кроме того определяется количество энергоблоков, на которых отказов не было несколько (1, 2, 3 и т.д.) лет подряд (рис. 3).

Данные по длительной эксплуатационной надежности демонстрируют насколько стабильны результаты, достигнутые в рамках мероприятий по снижению числа отказов.

Показатель «Динамика количества негерметичных ТВС». Другим традиционным подходом к анализу данных по отказам топлива является оценка эксплуатационной надежности с точки зрения количества отказавших (негерметичных) ТВС [10]. Относительно простое представление данных по количеству отказов напрямую указывает на отличия в результатах эксплуатации топлива.



Рис. 2. Длительность работы без отказов для некоторых энергоблоков ВВЭР-1000/1200 к концу 2022 г.



Рис. 3. Пример отображения данных по длительной надежности для выбранной пользователем группы РУ ВВЭР-1000/1200 (данные на конец 2022 г.)

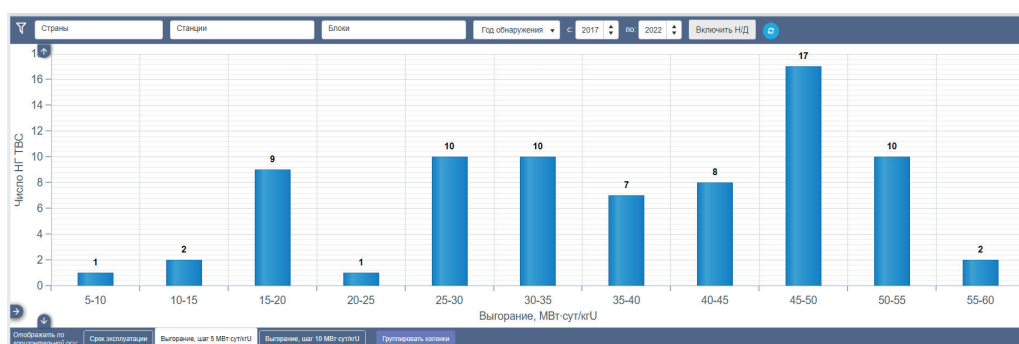


Рис. 4. Количество негерметичных ТВС ВВЭР-1000, обнаруженных с 2017 по 2022 г., в зависимости от выгорания

В системе «Статистика отказов» используются разные варианты представления соответствующих данных: рассматривается эволюция числа отказов во времени, распределение количества негерметичных ТВС по атомным станциям (позволяет выявлять группы энергоблоков с наибольшим и наименьшим количеством отказов), строятся зависимости от типа ТВС, выгорания топлива (рис. 4) и т.д.

Тем не менее, количество негерметичных ТВС не дает исчерпывающей информации о степени надежности топлива. Для сопоставления количества отказов с общим количеством ТВС, которые находятся или находились в эксплуатации, рассчитывается частота разгерметизаций.

Показатель «Частота разгерметизаций». Частоту отказов, как правило, вычисляют как относительную долю негерметичных ТВС среди общего количества ТВС, выгруженных из реактора [9]. Доля отказавших ТВС (твэлов) характеризует регулярные экономические потери АЭС или поставщика топлива. На интерактивных диаграммах системы «Статистика отказов» отображается изменение частоты разгерметизаций во времени, рассматривается распределение частоты отказов по разным АЭС (рис. 5) или типам ТВС.

Рассматривается также «потвэльная» частота разгерметизаций, которая определяется как относительная доля негерметичных твэлов в выделенной группе ТВС⁴.

⁴ ТВС ВВЭР-1000 содержат 312 твэлов. Соответственно, «потвэльная» частота разгерметизаций в 312 раз меньше, чем относительная доля негерметичных ТВС (при условии, что в каждой отказавшей ТВС имеется один негерметичный твэл). Целевым уровнем проектов НУО является «потвэльная» частота разгерметизации не более 10^{-6} (один негерметичный твэл на миллион) [1, 6].



Рис. 5. Средняя частота отказов ТВС (относительное количество негерметичных ТВС, %) за период с 2010 по 2022 г. для некоторых энергоблоков ВВЭР

Показатель «Вероятность разгерметизации в зависимости от выгорания топлива». Разгерметизация твэла может быть вызвана разными механизмами повреждения оболочки. К распространенным механизмам относят дебрис-повреждение, фреттинг-износ в местах контакта оболочки с элементами дистанционирующих решеток, ускоренную локальную коррозию, взаимодействие топлива с оболочкой (главным образом, для твэлов ВВЭР), внутреннее локальное гидрирование оболочки, заводские дефекты [9, 10].

В системе «Статистика отказов» реализована методика, разработанная в АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» для оценки вероятности разгерметизации твэлов при разных значениях выгорания топлива. Данная оценка используется для проверки выдвинутых гипотез о доминирующем механизме отказов. В частности, анализируя влияние выгорания топлива на вероятность разгерметизации твэлов, можно сделать вывод, является ли дебрис-повреждение преобладающим механизмом отказов. Если на АЭС преобладают дебрис-повреждения оболочки, естественно ожидать, что в единицу времени вероятность разгерметизации ТВС с разным сроком эксплуатации будет одинакова. Если имеется тенденция к изменению вероятности отказов по мере выгорания, значит дебрис-повреждение не является единственным механизмом разгерметизации.

Вопрос о преобладающем механизме разгерметизации в используемой методике ставится по отношению к конкретной АЭС или группе атомных станций в течение заданного интервала времени. Для анализа отбираются ТВС, участвовавшие в кампаниях, дата окончания которых приходится на заданный интервал времени. Рассматриваются все ТВС (из анализируемого множества ТВС), у которых выгорание V_i в конце кампании принадлежит заданному интервалу ΔV_i . Далее оценивается вероятность разгерметизации твэлов, выгорание которых находится в выбранном интервале ΔV_i как доля негерметичных ТВС относительно общего количества в выбранном диапазоне выгорания. Предполагается, что факт разгерметизации твэлов в одних ТВС никак не влияет на факт разгерметизации твэлов в других ТВС, эти события независимы. Далее для заданного диапазона выгораний ΔV_i оценивается вероятность разгерметизации в единицу времени.

На рисунке 6 приведен пример оценки вероятности разгерметизации в единицу времени для российских АЭС.

Из рисунка видно, что на рассмотренном интервале времени зависимость от выгорания отсутствует. Это согласуется с гипотезой о том, что основным механизмом разгерметизации на российских АЭС является дебрис-повреждение оболочек твэлов. Тем не менее, подобная «плоская» зависимость наблюдается не для всех энергоблоков ВВЭР.

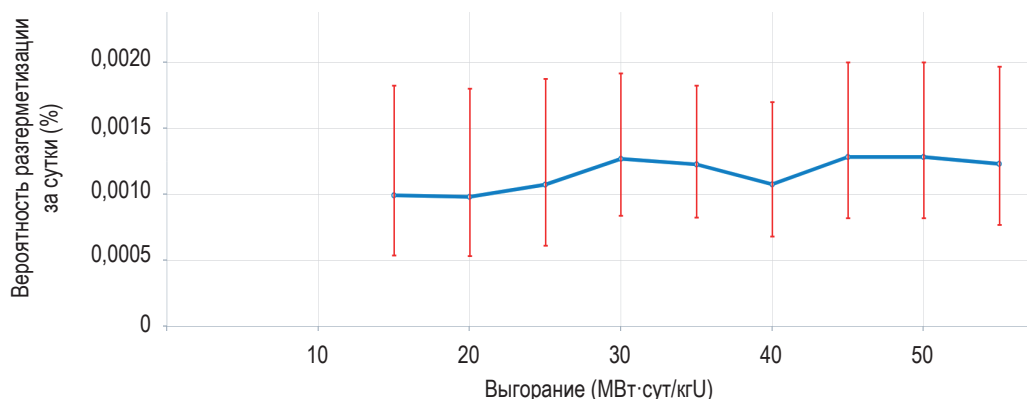


Рис. 6. Вероятность разгерметизации в единицу времени для ТВС на российских РУ ВВЭР-1000 с циклом 3х18 мес в 2011–2017 гг. (красные вертикальные линии соответствуют неопределенности расчетной вероятности разгерметизации)

ПРИВЛЕЧЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО РАССМАТРИВАЕМОЙ ГРУППЕ ОТКАЗОВ

При анализе показателей надежности топлива возникают ситуации, когда требуется проанализировать возможные причины обнаруженных отклонений от общих тенденций по количеству отказов. При этом по отдельным группам отказов необходимо привлечение дополнительных данных, в частности, может потребоваться проектная документация, данные по изготовлению ТВС, отчеты по обоснованию топливной загрузки, акты КГО, история эксплуатации ТВС и т.д. Наличие полного набора взаимосвязанных данных важно для выявления факторов, повлиявших на изменение количества отказов на рассматриваемых АЭС.

Для выстраивания цепочек взаимосвязанных данных применительно к каждому конкретному отказу или группе отказов в системе «Статистика отказов» применяется технология drill down⁵. Эта технология позволяет последовательно извлекать из большого набора данных информацию, непосредственно связанную с исследуемым объектом, постепенно сужая фокус до отказа одной ТВС.

В качестве примера рассмотрим цепочку переходов от интерактивной диаграммы по количеству негерметичных ТВС с разным выгоранием топлива (см. рис. 4) к эксплуатационным данным по конкретной ТВС. При нажатии на интерактивный столбец (например, «50-55») диаграммы осуществляется переход к таблице со сводными данными по всем негерметичным ТВС из выбранного диапазона выгорания (рис. 7).

Таблица содержит интерактивные ячейки, через которые обеспечивается доступ к подробной информации по истории эксплуатации каждой негерметичной ТВС, в том числе к

- схеме перестановок ТВС в активной зоне за весь период эксплуатации;
- характеристикам кампаний, в течение которых эксплуатировалась ТВС;
- истории нагружения ТВС (эволюции мощности и выгорания);
- актам осмотра ТВС на атомной станции и результатам послереакторных исследований.

⁵ Углубление или погружение в данные (англ. яз.) [18]. Специальная техника анализа, используемая при изучении данных, с возможностью перехода от агрегированного представления данных к детальному и наоборот.

Завод...	Г...	Номер...	Завод...	Тип та...	Тип ТВС	АЭС	Номер...	Номер...	П...	Сред...	Сред...	Номер...	Координаты в АЗ
2602595													
N438810813													
481064-04321													
480124-4606	2015	2019	499.00.000...	Завод 1	7,6/1,2	ТВСА-Т	АЭС-3	1	18	3	x		8-31 07-40 x x x
478124-4582	2015	2019	499.00.000...	Завод 1	7,6/1,2	ТВСА-Т	АЭС-3	1	18	3	x		2-25 03-26 01-28 x x x
478124-4601	2015	2019	499.00.000...	Завод 1	7,6/1,2	ТВСА-Т	АЭС-3	1	18	3	x		9-38 03-24 14-35 x x x
480124-4610	2015	2019	499.00.000...	Завод 1	7,6/1,2	ТВСА-Т	АЭС-3	1	18	3	x		5-22 03-26 x x x
486124-4548	2014	2019	499.00.000...	Завод 1	7,6/1,2	ТВСА-Т	АЭС-3	1	18	3	x		16-15,14 07-28 07-22 04-27 x x x
N482311259	-	2019	499.00.000...	Завод 2	7,6/1,2	ТВСА-Т	АЭС-3	1	18	3	x		6-38 03-24 14-35 x x x
N438811999	-	2021	499.00.000...	Завод 2	7,6/1,2	ТВСА-Т	АЭС-3	1	18	3	x		13-30 13-28 02-33 x x x

Рис. 7. Схема переходов к данным по отдельной негерметичной ТВС

Указанные данные предоставляются в виде отдельных файлов или в виде сводного отчета по отказавшей ТВС. Перечень связанных документов доступен в меню по нажатию правой кнопкой мыши на ячейку с номером ТВС.

На рисунке 8 показана вызванная из меню картограмма с перестановками одной из ТВС во время эксплуатации на атомной станции. На рисунке 9 показан пример вызванного PDF-документа с данными об эволюции относительной мощности ТВС.

Общая блок-схема сравнительного анализа данных и практического применения полученных результатов показана на рис. 10.

Механизм выстраивания цепочек взаимосвязанных вспомогательных данных в системе «Статистика отказов» позволяет формировать полные наборы ключевых данных, на основании которых для рассматриваемой группы отказов возможны

- проверка и подтверждение (или опровержение) априорных гипотез об определяющих причинах отказов;
- выработка новых рабочих гипотез о причинах изменения числа отказов (с подборкой фактов в пользу сделанных предположений);
- разработка и валидация новых эксплуатационных критериев (с учетом сделанных выводов о причинах отказов);
- упорядочивание наборов данных для валидации расчетных кодов, предназначенных для анализа поведения топлива и обоснования радиационной безопасности АЭС.

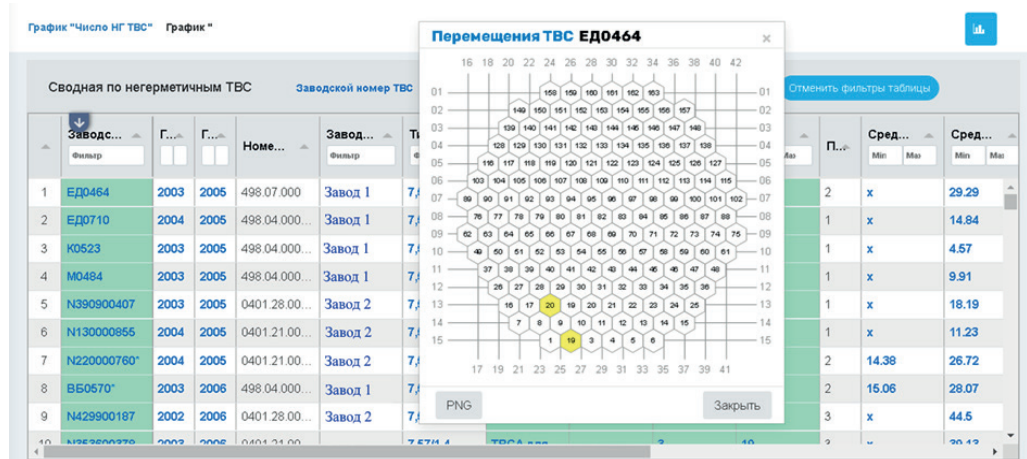


Рис. 8. Картограмма с перемещениями ТВС в реакторе во время эксплуатации на АЭС (на картограмме желтым цветом выделены ячейки активной зоны, в которых ТВС находилась во время разных кампаний)

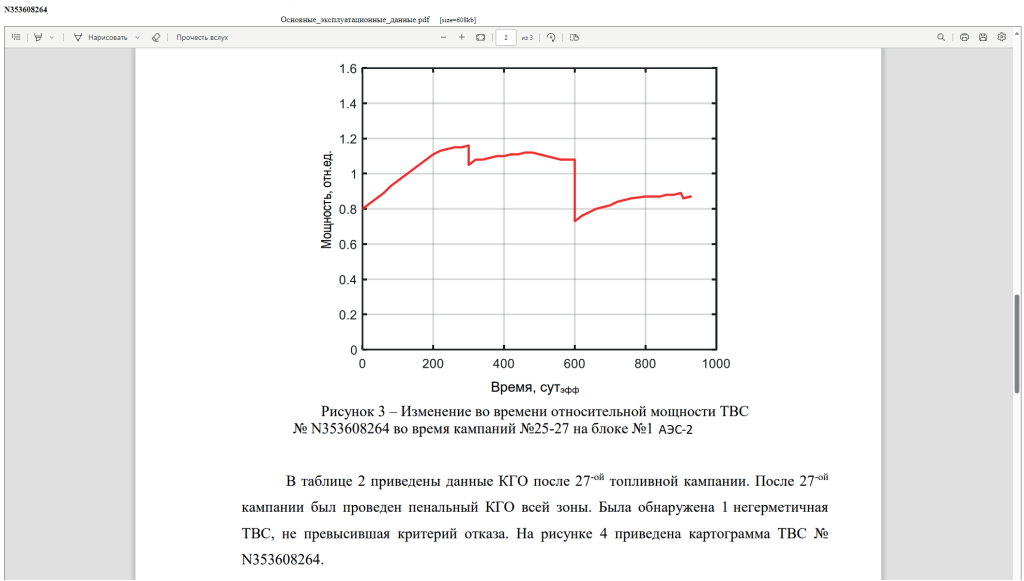


Рис. 9. Пример PDF-документа с данными по истории нагружения одной из ТВС, вызванного из интерактивной ячейки «Сводной таблицы по негерметичным ТВС»

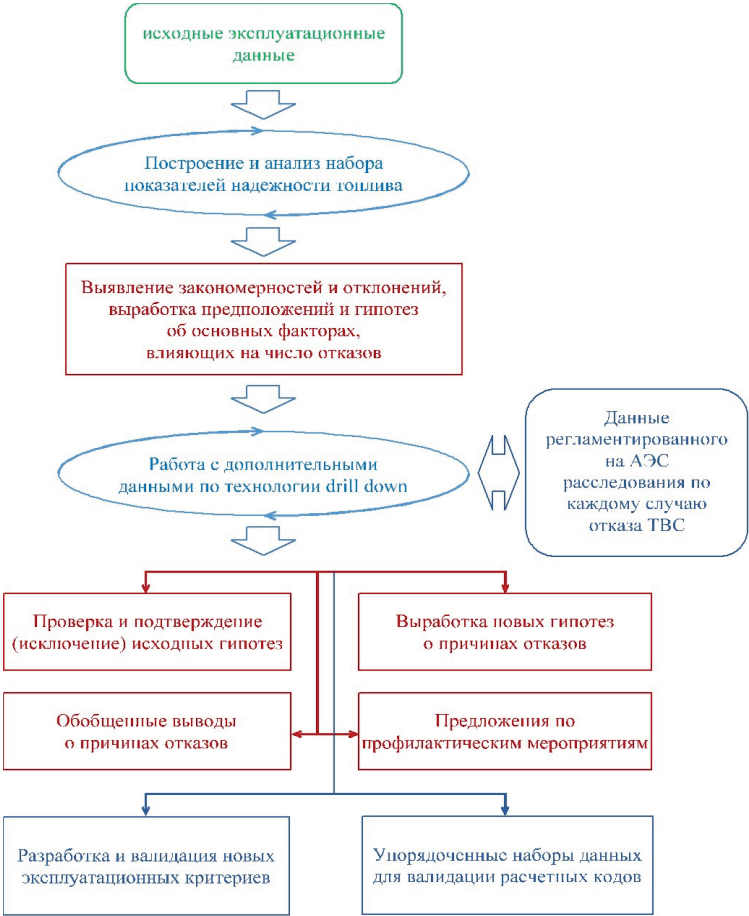


Рис. 10. Блок-схема комплексного анализа данных и практического использования получаемых результатов

Анализ данных, проведенный описанным способом, вообще говоря, не позволяет однозначно выявлять причины отказа, поскольку используются косвенные методы оценок. Однако можно организовать мероприятия для проверки сделанных предположений (например, дополнительные разовые или периодические осмотры группы ТВС на атомных станциях во время ППР). Или можно организовать мероприятия для предотвращения негативного влияния предполагаемых факторов (на основании проведенного анализа) и отслеживать изменение количества отказов после выполнения этих мероприятий.

ОБЩАЯ СТРУКТУРА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ «СТАТИСТИКА ОТКАЗОВ»

Состав и схема работы. Общая структура и схема работы системы «Статистика отказов» показаны на рис. 11.

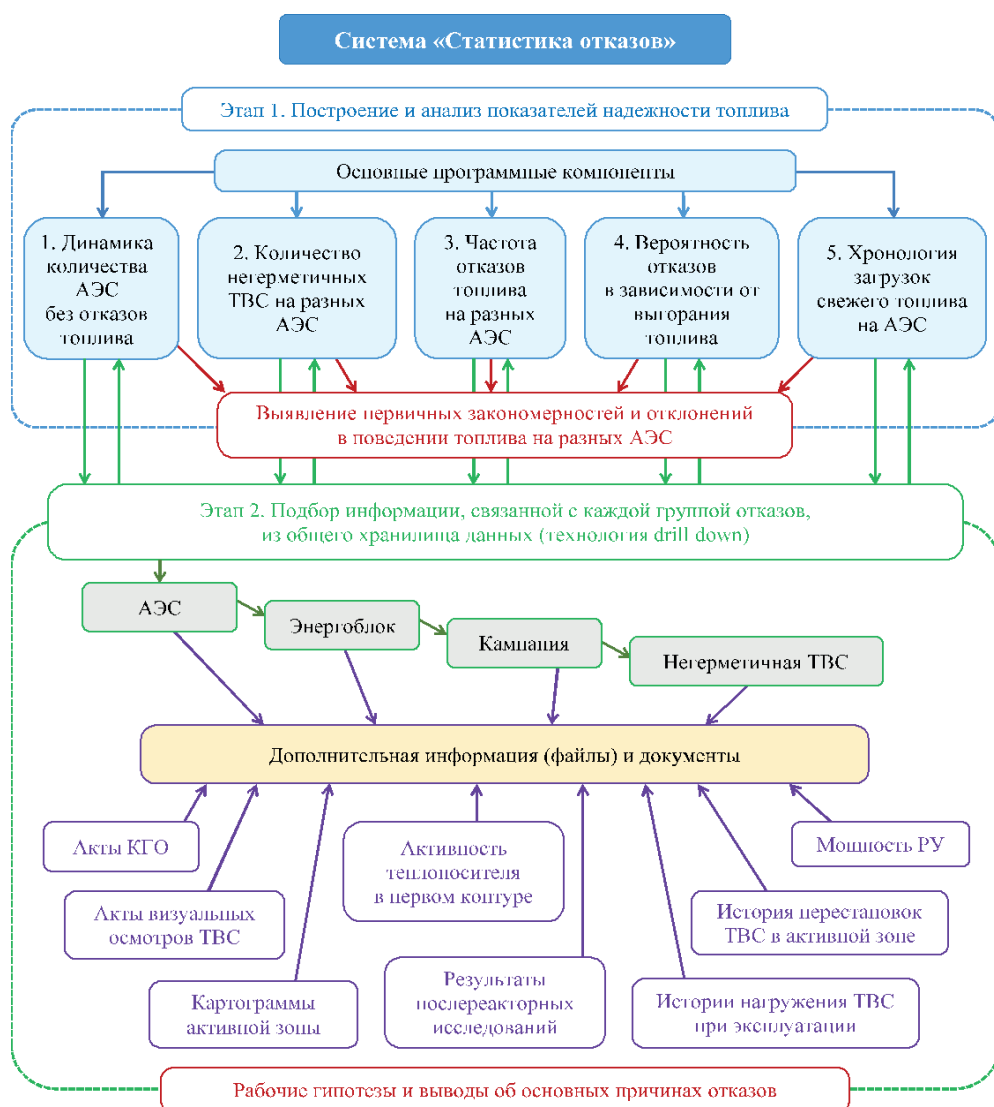


Рис. 11. Общая структура и схема работы системы «Статистика отказов»

Работа с системой ведется в два этапа. Первый этап (см. рис. 11) заключается в сравнительном анализе показателей надежности топлива на основании результатов эксплуатации. Расчет различных показателей надежности реализован в четырех из пяти основных программных компонентов системы «Статистика отказов». Пятый компонент «Хронология загрузок свежего топлива на АЭС» используется в справочно-информационных целях. Целью анализа на первом этапе является получение предварительных выводов (предположений) об изменении надежности топлива и о факторах, которые могли повлиять на изменения числа отказов. Фактически первый этап сводится к постановке вопросов, которые затем должны исследоваться более детально.

На втором этапе для выяснения причин обнаруженных изменений в надежности топлива проводится анализ с привлечением дополнительных данных (см. предыдущий раздел). Таким образом, обеспечивается комплексный взгляд на динамику эксплуатационных показателей и на соответствующие причины наблюдаемых значений.

Загрузка данных в систему. Информация (по энергоблокам, кампаниям, отказам ТВС) загружается в хранилище системы «Статистика отказов» в виде Excel-таблиц или документов в формате pdf. Импорт подготовленных файлов с данными осуществляется через специальную веб-страницу. Используется интуитивно-понятный интерфейс, который максимально сокращает время загрузки данных. В процессе импорта Excel-таблиц автоматически проверяется формат вводимых данных. Это позволяет избежать ошибок при последующей работе с системой. Если в процессе импорта обнаружены ошибки, система выдает сообщение о соответствующих местах в загружаемых файлах. После внесения исправлений файлы могут быть загружены повторно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана информационная система «Статистика отказов», предназначенная для анализа и обобщения данных по отказам ТВС на атомных станциях с целью оценки основных факторов, которые влияют на разгерметизацию твэлов.

Анализ данных по отказам топлива с помощью системы «Статистика отказов» включает в себя два этапа. На первом этапе результаты эксплуатации сопоставляются на основании построения показателей надежности топлива. На втором этапе для выяснения причин обнаруженных отклонений от ожидаемого поведения топлива (или общих тенденций) проводится анализ с привлечением всех имеющихся данных, которые связаны с отдельными группами отказов.

Расчетные показатели надежности представлены в системе в виде набора интерактивных диаграмм, элементы которых являются гиперссылками на связанные интерактивные таблицы и графики, картограммы активной зоны или ТВС, документы. Последовательные перемещения по интерактивным таблицам и графикам, картограммам и документам позволяют выстраивать цепочки данных, относящихся к выделенной группе отказов ТВС. Реализованные механизмы позволяют формировать полные наборы ключевых данных, на основании которых для рассматриваемой группы отказов возможна проверка имеющихся или выработка новых гипотез об определяющих причинах отказов топлива на АЭС.

Созданная система зарегистрирована в государственном реестре РФ как программа для ЭВМ «Статистика отказов» (свидетельство о регистрации № 2023616035) и является собственностью АО «ТВЭЛ». Технологии, использованные при разработке системы, позволяют в перспективе объединять ее с другими компьютерными программами, которые разрабатываются для решения задач, связанных с разгерметизацией твэлов на АЭС.

Система «Статистика отказов» может использоваться поставщиком топлива и эксплуатирующими организациями для разработки мероприятий, направленных на повышение надежности ядерного топлива российского производства.

Литература

1. *Molchanov V.* Project «Zero Failure Level»: Organization, State, Tasks / XI Intern. Conf. on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support, Varna, Bulgaria, September 26 – October 03, 2015.
2. *Молчанов В.В.* Проект «Нулевой Уровень Отказа (НУО)»: актуальные проблемы, мероприятия, перспективы. / Международный научно-технический семинар АО «ТВЭЛ» «Опыт эксплуатации ядерного топлива российского производства на АЭС с ВВЭР-1000», Болгария, г. Несебр, 26 – 30 сентября 2016 г.
3. *Mečir V.* Zero Level Fuel Defect Project: Effectivity / XII Intern. Conf. on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support, Nessebar, Bulgaria, 18 – 22 September, 2017.
4. *Shestakov Yu. M., Semenovych A.S.* Problems and perspectives of moving toward zero fuel failures and mitigation of fuel failure consequences at NPPs with WWER reactors in Russia / 11th int. conf. «WWER fuel performance, modelling and experimental support» Bulgaria, Varna, September 26 – October 03, 2015.
5. *Edsinger K., Cheng B., et al.* 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.
6. *Deshon J., Whiteside K.* Establishing and Sustaining a Technical Program to Achieve Zero Fuel Failures, (EPRI, INPO) / IAEA Tech. Meet. «Achieving Zero Fuel Failure Rates: Challenges and Perspectives» Nessebar, Bulgaria, 1 – 2 October, 2015.
7. *Mazurkiewicz S., Bretting C., et al.* Meeting the Industry Challenge to Achieve Leak Free Performance, (AREVA) / LWR Fuel Performance Meet (Top Fuel 2016), Boise, Idaho, USA, 11 – 16 September 2016, pp.1405–1414.
8. *Faulkner C., Arimescu I., Mazurkiewicz S., Schneider R., O’Cain M.* Fuel failures recent experience and their mitigation: a US perspective / Tech. Meet. Fuel Failures in Normal Operation of Water Reactors: Experience, Causes and Mitigation, IAEA, 14 – 18 December 2020. Электронный ресурс: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-2004web.pdf> (дата доступа 01.09.2023).
9. *Alvarez L., Daniels T. et al.* Review of fuel failures in water cooled reactors. IAEA Nuclear Energy Series No.NF-T-2.1, IAEA, Vienna, 2010. Электронный ресурс: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1445_web.pdf (дата доступа 01.09.2023).
10. *Alonso P.J.M., Armstrong J. et al.* Review of fuel failures in water cooled reactors (2006-2015): an update of IAEA Nuclear Energy Series no. NF-T-2.1. – Vienna: IAEA Nuclear Energy Series no. NF-T-2.5. – 2019. – PP. 2 – 28. Электронный ресурс: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1864_web.pdf (дата доступа 01.09.2023).
11. *Na A., Zhibin S.* Inspection and repair of damaged fuel assembly / Technical Meeting on Fuel Failure in Normal Operation of Water Reactors: Experience, Causes and Mitigation, IAEA, 14 – 18 December 2020. Электронный ресурс: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-2004web.pdf> (дата доступа 01.09.2023).
12. *Corbett S.* Recent Experience and Related Developments in Post Irradiation Examinations at Canadian Nuclear Laboratories to Support Defect Root Cause Examinations for Canadian PHWR Utilities / Technical Meeting on Fuel Failure in Normal Operation of Water Reactors: Experience, Causes and Mitigation, IAEA, 14 – 18 December 2020. Электронный ресурс: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-2004web.pdf> (дата доступа 01.09.2023).
13. *Строжок А.В., Звир Е.А., Жителев А.В., Боков А.А., Волкова И.Н.* Результаты исследований негерметичных твэлов ВВЭР-1000, проведенных в АО «ГНЦ НИИАР» в период 2016 – 2017 гг. / XI МНТК, Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики. Москва, АО «Концерн Росэнергоатом», 23 – 24 мая, 2018 г.

14. Волкова И.Н., Горячев А.В., Звир Е.А., Жителев В.А., Никитин О.Н., Строжук А.В. Результаты исследования структуры оксидной пленки на участках повышенного окисления оболочек твэлов ТВС-2М, отработавшей на 4-м энергоблоке Балаковской АЭС в течение одной ТК / XI МНТК, Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики. Москва, АО «Концерн Росэнергоатом», 23–24 мая, 2018 г.

15. Звир Е.А., Жителев В.А., Захаров А.В., Крюков Ф.Н., Шишин В.Ю. Основные результаты после-реакторных исследований, выполненных в АО «ГНЦ НИИАР» в 2014–2018 годах / XI конф. по реакторному материаловедению. ГНЦ НИИАР, 28-30 мая 2019 г., Дмитровград. Электронный ресурс: https://www.niiar.ru/sites/default/files/safety20/sb_tez_xi_konf_orm_2019.pdf (дата доступа 01.09.2023)

16. Kim K.-Y., Yang S.-T., Kim Y.-S. Development of Comprehensive Fuel Reliability Monitoring and Analysis Workstation i-FRIMA (Integrated Fuel Reliability Management System) / Proceedings of 2010 LWR Fuel Performance/TopFuel/WRFPM (Orlando, Florida, USA, September 26–29, 2010), Paper 059. Электронный ресурс: <https://www.ans.org/meetings/file/view-194> (дата доступа 01.09.2023).

17. Xin L., Changzheng L., Yang W., Hongyang Z., Yongjun D. Construction of the Failed Fuel Information Database Platform / 29th International Conference on Nuclear Engineering. Shenzhen, China, August 8–12, 2022. Paper No: ICONE29-93281, V014T14A008.

18. Wodtke C., Govella A. Information Architecture: Blueprints for the Web. Pearson Education, 2009, 312 p. Электронный ресурс: <https://pdfdrive.to/filedownload/information-architecture-blueprints-for-the-web> (дата доступа 01.09.2023).

Поступила в редакцию 08.09.2023

Авторы

Евдокимов Игорь Анатольевич, зам.директора департамента,

E-mail: evdokimov@triniti.ru

Калиничев Петр Михайлович, научный сотрудник,

E-mail: kalinichev@triniti.ru

Хромов Андрей Григорьевич, научный сотрудник,

E-mail: cprec@triniti.ru

Афанасьева Елена Юрьевна, старший научный сотрудник,

E-mail: afanasieva@triniti.ru

Маслова Людмила Анатольевна, научный сотрудник,

E-mail: maslova@triniti.ru

Сорокин Анатолий Александрович, начальник лаборатории,

E-mail: sorokin@triniti.ru

Горюшин Игорь Олегович, старший инженер,

E-mail: epspot@triniti.ru

Бурцев Александр Юрьевич, старший инженер,

E-mail: burtsev@triniti.ru

Золотарев Сергей Петрович, старший инженер,

E-mail: zolotarev@triniti.ru

Бабкин Сергей Викторович, старший инженер,

E-mail: babkin@triniti.ru

UDC 621.039.548

Diagnostic Information System for Analysis of Data on Fuel Failures Aimed at Enhancing Fuel Reliability**Evdokimov I.A., Kalinichev P.M., Khromov A.G., Afanasieva E.Yu., Maslova L.A., Sorokin A.A., Goryushin I.O., Burtsev A.Yu., Zolotarev S.P., Babkin S.V.***JSC «SRC RF TRINITI»,
12 Pushkovykh Str., 108840 Troitsk, Moscow, Russia***Abstract**

Fuel failures lead to significant financial losses during operation of a nuclear power plant (NPP). The most common fuel failures are due to a fuel assembly (FA) containing one or more leaking fuel rods. In order to reduce the concomitant losses, the most countries with advanced nuclear industry launched projects for approaching to «zero failure level». Some countries developed software codes for monitoring and analysis of data related to fuel failures at NPPs.

For assessing the main factors influencing failures of WWER-1000/1200 fuel, the analytical (diagnostic) information system was developed. The system is a web-based interactive software code that provides mathematical processing of accumulated data using, among others, statistical methods.

As a base for assessment of data on fuel failures, the developed system provides a wide range of tools for analysis of fuel reliability indicators. Along with common reliability indicators, additional ones are considered that allow assessing of the predominant failure mechanisms. The analysis of the reliability indicators is aimed at detection of deviations from expected normal fuel behavior. The key component of the system is an interactive toolkit designed for defining causes of the detected deviations. The system provides automatic selection of data related to each group of failures including design documentation, data on FA fabrication, reports on validation of the fuel cycle, reports on detection of leaking fuel, data of post-irradiation examinations and so on. The result is that the user obtains the full set of data for formulation and verification of hypotheses on the main factors that could have led to deviations in the failure rate. Analysis of data on fuel failures supported by the developed system can be used by fuel vendors and nuclear utilities for elaboration of measures aimed at enhancing the fuel reliability.

Key words: NPP, WWER, nuclear fuel, fuel failure, leaking fuel, fuel reliability, failure statistics.

For citation: Evdokimov I.A., Kalinichev P.M., Khromov A.G., Afanasieva E.Yu., Maslova L.A., Sorokin A.A., Goryushin I.O., Burtsev A.Yu., Zolotarev S.P., Babkin S.V. Diagnostic Information System for Analysis of Data on Fuel Failures Aimed at Enhancing Fuel Reliability. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024, no. 1, pp. 42–58; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.1.04> (in Russian).

References

1. Molchanov V.V. Project «Zero Failure Level»: Organization, State, Tasks. *11th Int. conf. «WWER fuel performance, modelling and experimental support»*. Bulgaria, Varna, September 26 – October 03, 2015.
2. Molchanov V.V. Project «Zero Failure Level»: current problems, events, prospects. *Intern. Meet. of TVEL JSC «Experience of operation of Russian-made nuclear fuel at nuclear power plants with VVER-1000»*. Nessebar, Bulgaria, 26 – 30 September 2016 (in Russian).
3. Mečir V. Zero Level Fuel Defect Project: Effectivity. *XIIth Intern. Conf. on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*. Nessebar, Bulgaria, 18 – 22 September, 2017.

4. Shestakov Yu.M., Semenovych A.S. Problems and perspectives of moving toward zero fuel failures and mitigation of fuel failure consequences at NPPs with WWER reactors in Russia. *11th Int. conf. «WWER fuel performance, modelling and experimental support»*. Bulgaria, Varna, September 26 – October 03, 2015.
5. 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.
6. Deshon J., Whiteside K. Establishing and Sustaining a Technical Program to Achieve Zero Fuel Failures, (EPRI, INPO). *IAEA Tech. Meet. «Achieving Zero Fuel Failure Rates: Challenges and Perspectives»*. Nessebar, Bulgaria, 1 – 2 October, 2015.
7. Mazurkiewicz S., Bretting C., Petit C., Borum G., Friend B., Zialetsev D., Zoladz B. Meeting the Industry Challenge to Achieve Leak Free Performance, (AREVA). *LWR Fuel Performance Meet. (Top Fuel 2016)*. Boise, Idaho, USA, 11–16 September 2016, pp. 1405 – 1414.
8. Faulkner C., Arimescu I., Mazurkiewicz S., Schneider R., O’Cain M. Fuel failures recent experience and their mitigation: a US perspective. *Tech. Meet. Fuel Failures in Normal Operation of Water Reactors: Experience, Causes and Mitigation*. IAEA, 14–18 December 2020. Available at: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-2004web.pdf> (accessed 01 Sep. 2023)
9. Alvarez L., Daniels T., Dangoulème D., Doria F., Edsinger K., Fujiwara, S., Inozemtsev V., Ip M., Kamimura K., Killeen J., Kucuk A., Lewis B., Novikov V., Onufriev V., Pageau, F., Prasad P. N., Reid P., Sun A., Suk E., Tayal M., Tran T. *Review of fuel failures in water cooled reactors*. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2010, pp. 13 – 17. (IAEA nuclear energy series, ISSN 1995-7807; no. NF-T-2.1). Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1445_web.pdf (accessed date Sept. 01, 2023).
10. Alonso P.J.M., Armstrong J., Bertsch J., Bragg-Sitton S.M., Chan, P.K., Choithramani Becerra S., Chrapciak V., Druenne H., Evdokimov I., Kucuk A., Lewis B., Meyogan T., Novikov V., Onufriev V., Rossiter G., Shams M.Y., Sokolov N., Veshchunov M. *Review of fuel failures in water cooled reactors (2006-2015): an update of IAEA Nuclear Energy Series no. NF-T-2.1*. Vienna. 2019, IAEA Nuclear Energy Series, no. NF-T-2.5, pp. 2 – 28. (IAEA). Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1864_web.pdf (accessed 01 Sep. 2023).
11. Na A., Zhibin S. Inspection and repair of damaged fuel assembly. *Technical Meeting on Fuel Failure in Normal Operation of Water Reactors: Experience, Causes and Mitigation*. IAEA, Vienna, 14 – 18 December 2020. Available at: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-2004web.pdf> (accessed date Sept. 01, 2023).
12. Corbett S. Recent Experience and Related Developments in Post Irradiation Examinations at Canadian Nuclear Laboratories to Support Defect Root Cause Examinations for Canadian PHWR Utilities. *Technical Meeting on Fuel Failure in Normal Operation of Water Reactors: Experience, Causes and Mitigation*, IAEA, Vienna, 14 – 18 December 2020. Available at: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-2004web.pdf> (accessed 01 Sep. 2023).
13. Strozhuik A.V., Zvir E.A., Zhitelev A.V., Bokov A.A., Volkova I.N. The results of the study of leaky fuel rods VVER-1000, conducted in JSC «SSC NIIAR» in the period 2016 – 2017. *11th ISTC «Safety, efficiency and economics of nuclear energy»*. Moscow, Rosenergoatom Concern JSC, May 23–24, 2018 (in Russian).
14. Volkova I.N., Goryachev A.V., Zvir E.A., Zhitelev V.A., Nikitin O.N., Strozhuik A.V. Results of the study of the structure of the oxide film in areas of increased oxidation of fuel element shells of TVS-2M spent at the 4th power unit of the Balakovo NPP during one TC. *11th ISTC «Safety, efficiency and economics of nuclear energy»*. Moscow, Rosenergoatom Concern JSC, May 23 – 24, 2018 (in Russian).
15. Zvir E.A., Zhitelev V.A., Zakharov A.V., Kryukov F.N., Shishin V.Yu. The main results of post-reactor studies performed at JSC «SSC NIIAR» in 2014 – 2018. *11th conf. on reactor materials science*. SSC NIIAR, May 28 – 30, 2019, Dimitrovgrad. Available at: https://www.niiar.ru/sites/default/files/safety20/sb_tez_xi_konf_orm_2019.pdf (accessed 01 Sep. 2023) (in Russian).
16. Kim K.-Y., Yang S.-T., Kim Y.-S. Development of Comprehensive Fuel Reliability Monitoring and Analysis Workstation i-FRIMA (Integrated Fuel Reliability Management System). *Proceedings of 2010 LWR Fuel*

Performance/TopFuel/WRFPM. Orlando, Florida, USA, September 26 – 29, 2010. Paper 059. Available at: <https://www.ans.org/meetings/file/view-194> (accessed 01 Sep. 2023).

17. Xin L., Changzheng L., Yang W., Hongyang Z., Yongjun D. Construction of the Failed Fuel Information Database Platform. *29th International Conference on Nuclear Engineering*. Shenzhen, China, August 8 – 12, 2022, Paper No: ICONE29-93281, V014T14A008.

18. Wodtke C., Govella A. *Information Architecture: Blueprints for the Web*. Pearson Education, 2009, 312 p. Available at: <https://pdfdrive.to/filedownload/information-architecture-blueprints-for-the-web> (accessed 01 Sep. 2023).

Authors

Igor A. Evdokimov, Deputy director of the department,

E-mail: evdokimov@triniti.ru

Peter M. Kalinichev, research scientist,

E-mail: kalinichev@triniti.ru

Andrey G. Khromov, research scientist,

E-mail: cprec@triniti.ru

Elena Yu. Afanasieva, senior research scientist,

E-mail: afanasieva@triniti.ru

Ludmila A. Maslova, research scientist,

E-mail: maslova@triniti.ru

Anatoliy A. Sorokin, head of laboratory,

E-mail: sorokin@triniti.ru

Igor O. Goryushin, senior engineer,

E-mail: epspot@triniti.ru

Alexandr Yu. Burtsev, senior engineer,

E-mail: burtsev@triniti.ru

Sergey P. Zolotarev, senior engineer,

E-mail: zolotarev@triniti.ru

Sergey V. Babkin, senior engineer,

E-mail: babkin@triniti.ru