УДК 620.179.1

НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБНАРУЖЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ НЕГЕРМЕТИЧНЫХ ОБЛУЧЕННЫХ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

© 2019 г. С.В. Павлов^{1,*}

¹ООО НПФ «Сосны», Россия 433507 Ульяновская обл., Димитровград, пр-т Димитрова, 4а *E-mail: pavlov@sosny.ru

Поступила в редакцию 21.01.2019; после доработки 22.02.2019 Принята к публикации 08.05.2019

Представлена методология обнаружения и исследования облученных негерметичных тепловыделяющих элементов ядерных реакторов водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР-1000), которая основана на последовательном применении нескольких неразрушающих методов контроля: оптического и визуального, ультразвукового, вихретокового, радиационного и пневматического пузырькового. По результатам исследований негерметичных тепловыделяющих сборок главной причиной разгерметизации тепловыделяющих элементов является образование сквозных дефектов в их оболочках вследствие взаимодействия с посторонними предметами, находящимися в теплоносителе ядерного реактора. Обнаружение негерметичных тепловыделяющих элементов и дефектов в них может осуществляться по одиннадцать различным сценариям, которые отличаются друг от друга как по продолжительности, так и по трудоемкости их реализации. Приведены описания и характеристики установок неразрушающего контроля ядерного топлива. Показана необходимость совершенствования существующих или разработки новых неразрушающих методов обнаружения негерметичных тепловыделяющих элементов без поэлементной разборки тепловыделяющей сборки.

Ключевые слова: ядерный реактор, тепловыделяющий элемент, тепловыделяющая сборка, неразрушающие методы контроля, ультразвук, вихретоковая дефектоскопия, негерметичность, дефект.

DOI: 10.1134/S0130308219070078

введение

Радиационная безопасность ядерных реакторов во многом обеспечивается системой физических барьеров, препятствующих распространению радиоактивных элементов как внутри реактора, так и за его пределы, — в окружающую среду. Основным источником радиоактивных элементов в ядерном реакторе являются тепловыделяющие элементы (твэлы), внутри которых происходят ядерные реакции и выделение тепла. Металлическая защитная герметичная оболочка твэла выполняет функцию одного из первых физических барьеров и должна сохранять свою герметичность на протяжении всего времени эксплуатации твэлов.

Надежность твэлов постоянно повышается. Так, показатель уровня разгерметизации твэлов водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР) — основы ядерной энергетики России — находится в диапазоне от 10^{-5} до 10^{-6} [1]. Тем не менее даже единичные случаи разгерметизации оболочки твэлов могут привести к заметным экономическим потерям для атомных электростанций (АЭС), а также к дополнительным дозовым нагрузкам для обслуживающего персонала. Поэтому обнаружение негерметичных твэлов, установление причин их разгерметизации, определение типов дефектов, их размеров и расположения важно как с точки зрения безопасности эксплуатации АЭС, так и с научно-технической при совершенствовании и разработке новых типов ядерного топлива.

Поиск негерметичных твэлов осуществляется в ходе комплексных материаловедческих исследований и на стендах инспекции тепловыделяющих сборок (TBC) на АЭС [2], и в защитных камерах ядерных исследовательских центров [3]. При этом используется комбинация неразрушающих и разрушающих методов контроля и исследования облученного ядерного топлива. Неразрушающие методы дают первичную и во многих случаях достаточную информацию о наличии в твэлах дефектов, их параметрах и характеристиках [4].

В статье описаны методология, методы и оборудование для обнаружения и исследования негерметичных твэлов ВВЭР-1000. Рассмотрены проблемы и возможные пути их решения.

1. КОНСТРУКЦИЯ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК И ТВЭЛОВ ВВЭР-1000

Твэлы ВВЭР-1000 состоят из цилиндрической оболочки из циркониевого сплава Zr+1%Nb (Э110) или его модификаций, внутри которой расположены таблетки ядерного топлива из диокси-



Рис. 1. Схематичное изображение таблетки топлива (*a*) и тепловыделяющего элемента (твэла) (*б*): *l* — оболочка твэла; 2 — таблетка топлива; 3 — верхняя заглушка; 4 — газосборник; 5 — пружинный фиксатор; 6 — нижняя заглушка; тепловыделяющей сборки TBC-2 (*в*) и TBCA (*г*):

1 — головка; 2 — пучок твэлов; 3 — направляющие каналы ПС СУЗ; 4 — дистанционирующие решетки; 5 — нижняя (опорная) решетка; 6 — хвостовик; 7 — уголки.

да урана (UO₂) (рис. 1*a*, *б*). Наружный диаметр оболочек 9,15 мм, длина ~4000 мм, толщина стенки ~0,65 мм (зависит от модификаций твэла). Сверху и снизу оболочка герметизируется приваренными заглушками, столб из топливных таблеток фиксируется от перемещения внутри твэла с помощью пружины. В верхней части твэла таблетки отсутствуют, эта часть называется «газосборник» и служит для компенсации давления внутри твэла при выходе из таблеток газовых продуктов деления (ГПД) ядерного топлива при эксплуатации в реакторе. Внутренний объем твэла заполнен гелием под давлением 2,0 МПа.

Твэлы упорядоченным образом собраны в TBC, которые устанавливаются в активную зону (A3) ядерного реактора. Кроме упорядоченного расположения твэлов в A3, TBC обеспечивают отвод тепла от твэлов путем прокачки через сборку теплоносителя (вода), а также выполнение транспортно-технологических операций при загрузке-выгрузке ядерного топлива из реактора.

В настоящее время на энергоблоках ВВЭР-1000 эксплуатируются два типа ТВС, отличающихся друг от друга в первую очередь конструкцией несущего каркаса — это ТВС-2 [5, 6] (рис. 1*в*), ТВСА [7] (рис. 1*г*) и их модификации. Каждая ТВС содержит 312 твэлов, расположенных по гексагональной решетке с шагом 12,75 мм. Каркас состоит из головки и хвостовика ТВС, соединенных между собой центральной трубой (ЦТ) и 18 направляющими каналами (НК), в которых перемещаются поглощающие стержни системы управления и защиты реактора (ПС СУЗ). Направляющие каналы соединены с головкой с помощью цангового соединения, благодаря которому она может дистанционно демонтироваться, а затем обратно устанавливаться на место. В нижней части ТВС НК и ЦТ приварены к нижней решетке, которая, в свою очередь, приварена к хвостовику.

Крепление твэлов в TBC осуществляется установкой нижней заглушки твэлов, имеющей цанговый хвостовик, в нижнюю решетку, а дистанционирование твэлов по гексагональной решетке обеспечивается 15 или 12 дистанционирующими решетками (ДР), расположенными по высоте TBC.

Различие в конструкциях каркаса в TBC-2 и TBCA заключается в способах крепления ДР и наличии уголков жесткости в TBCA, расположенных по ребрам сборки (рис. 1*г*). В TBC-2 ДР приварены к HK, а в TBCA — к уголкам.

2. РАЗНОВИДНОСТИ ДЕФЕКТОВ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ И ПРИЧИНЫ ИХ РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ

Наиболее вероятные причины возникновения в оболочках твэлов ВВЭР-1000 дефектов, развитие которых может привести к разгерметизации твэлов, известны и хорошо изучены [8—10]. К ним относятся:

гидрирование оболочки твэла из-за наличия влаги в топливе (нарушение технологии изготовления твэлов);

коррозия оболочки твэлов;

взаимодействие оболочки с ДР ТВС (фреттинг-коррозия);

взаимодействие оболочки с посторонними предметами, находящимися в теплоносителе реактора (debris-повреждения);

взаимодействие оболочки с топливными таблетками.

Результаты исследований нескольких десятков ТВС ВВЭР-1000 показали, что наиболее часто встречаются дефекты, образующиеся в результате взаимодействия оболочки с посторонними предметами в теплоносителе реактора, что также является основной причиной разгерметизации твэлов. Намного реже встречаются дефекты оболочки в результате ее взаимодействия с ДР, а также связанные с нарушением технологии изготовления твэлов.

Посторонние предметы, движущиеся вместе с теплоносителем через ТВС, как правило, застревают в элементах сборок. На рис. 2*a* в качестве примера показан фрагмент ТВС, в котором между оболочкой твэла и ДР застрял посторонний предмет — стружка.



ó

Рис. 2. Пример образования debris-дефекта: *а* — посторонний предмет под ДР; *б* — вид после извлечения постороннего предмета; *в* — поперечный разрез твэла в области сквозного дефекта (*1* — оболочка твэла; *2* — сквозной дефект в оболочке твэла; *3* — таблетка топлива UO₂).



Из-за пульсаций давления теплоносителя застрявшие посторонние предметы начинают вибрировать, при этом происходит истирание оболочки твэла в месте ее контакта с предметом. На рис. 26 отчетливо виден дефект в оболочке после удаления стружки, а на рис. 26 представлен для примера поперечный шлиф твэла со сквозным дефектом оболочки.

При разгерметизации твэла возможно возникновение в оболочке новых дефектов, которые могут существенно влиять на ее целостность и являться причиной ее разрушения. Такие дефекты называются вторичными, а дефект, который привел к разгерметизации оболочки, — первичным.

Вода через первичный дефект поступает в зазор между топливом и оболочкой твэла, в результате чего происходит их локальное окисление в районе расположения дефекта. Образовавшийся при этом водород вместе с паром перемещается по зазору между топливом и оболочкой в верхнюю часть твэла, где поглощается циркониевой оболочкой [10].

При этом в материале оболочки образуются скопления гидридов циркония ZrH₂, которые приводят к охрупчиванию материала оболочки, появлению вторичных дефектов и часто к разрушению твэлов во время исследований и транспортно-технологических операций.



Рис. 3. Вторичные повреждения: *а* — разрушение оболочки; *б* — следы от пружины в газосборнике; *в* — гидриды в оболочке в месте контакта с пружиной.

На рис. 3 приведены примеры образования вторичных дефектов в негерметичных твэлах: разрушения негерметичного твэла в районе газосборника из-за охрупчивания оболочки (рис. 3a), скопления гидридов в местах с повышенными механическими напряжениями в оболочке — в месте контакта пружинного фиксатора с оболочкой (рис. 3δ), при этом гидриды выходят на наружную поверхность оболочки (рис. 3b) поперечного шлифа фрагмента оболочки. Гидрид циркония имеет меньшую плотность, чем циркониевые сплавы оболочек твэлов, поэтому образование скопления гидридов приводит к распуханию оболочки в этом месте.

Таким образом, негерметичным является твэл с дефектом или дефектами, через которые продукты деления ядерного топлива могут поступать в теплоноситель реактора.

3. МЕТОДОЛОГИЯ ОБНАРУЖЕНИЯ НЕГЕРМЕТИЧНЫХ ТВЭЛОВ И ДЕФЕКТОВ В НИХ

Процесс и способы обнаружения негерметичных твэлов и дефектов в их оболочках являются составной частью материаловедческих исследований ТВС и твэлов в защитных камерах и на стендах инспекции на АЭС [9]. Основными неразрушающими методами обнаружения негерметичных твэлов и дефектов, приводящих к их разгерметизации, являются визуальный осмотр и оптические методы контроля; ультразвуковой метод обнаружения воды под оболочкой негерметичного твэла; вихретоковая дефектоскопия оболочки твэла; радиационный метод контроля количества газовых продуктов деления (ГПД) ядерного топлива под оболочкой твэла и пневматический пузырьковый метод.

Разгерметизация твэлов при эксплуатации в реакторе фиксируется по повышению уровня радиоактивности теплоносителя, в который из негерметичного твэла через дефект в оболочке поступают продукты деления ядерного топлива. При этом определить, в какой из 163 ТВС (количество ТВС в АЗ реактора ВВЭР-1000) появились негерметичные твэлы, невозможно. Негерметичную ТВС (в которой есть негерметичные твэлы) определяют в процессе перегрузки реактора с помощью радиационных методов контроля по регистрации выхода радиоактивных продуктов деления из каждой ТВС в отдельности в специальный замкнутый контролируемый объем. Таким образом, перед началом материаловедческих исследований известно состояние ТВС: герметичное или негерметичное.

Если ТВС негерметична, то в процессе исследований необходимо обнаружить и исследовать негерметичные твэлы. На рис. 4 приведен алгоритм поиска негерметичных твэлов и дефектов в них.

Любые исследования облученных ТВС начинаются с их осмотра, который проводится либо с помощью радиационно стойких телекамер и перископических систем, либо оператором через смотровое окно защитной камеры. Зачастую при осмотрах удается обнаружить негерметичные твэлы, если они находятся в первых двух внешних рядах твэлов в ТВС (см. рис. 2). Обнаружение негерметичных твэлов во внешних рядах не означает отсутствие негерметичных твэлов внутри ТВС. Поэтому, независимо от того, были обнаружены при осмотре негерметичные твэлы или нет, поиск негерметичных твэлов продолжается путем инспекции всех 312 твэлов в ТВС.

В [10] показано, что если выгорание твэлов в ТВС не превышает $B_{\text{max}} = 45 \text{ MBt} \cdot \text{сут/кгU}$, то для обнаружения негерметичных твэлов можно использовать ультразвуковой метод КГО (кон-



Рис. 4. Блок-схема поиска негерметичных твэлов и дефектов в них.

троль герметичности оболочки), который основан на регистрации воды внутри твэла, попавшей туда после его разгерметизации [11]. Контроль твэлов проводится после демонтажа с TBC головки, когда обеспечивается доступ ко всем верхним заглушкам твэлов. Ультразвуковой датчик устанавливается на торец верхней заглушки твэла (рис. 5*a*) и с его помощью в оболочке возбуждаются ультразвуковые волны, которые распространяются по оболочке до нижней заглушки, отражаются и после прохождения по оболочке в обратном направлении регистрируются этим же датчиком.

Если твэл герметичный, то на осциллограмме наблюдается принятый полезный сигнал (рис. 56). При наличии воды под оболочкой происходит дополнительное, в сравнении с герметичным твэлом, рассеяние энергии волн внутрь твэла и амплитуда полезного сигнала уменьшается практически до уровня фона (рис. 56). Метод показал высокую надежность и эффективность при инспекции негерметичных ТВС.

Обнаруженные негерметичные твэлы извлекаются из ТВС для дальнейших исследований. С помощью специального инструмента твэл захватывается за верхнюю заглушку и медленно вытягивается из каркаса ТВС. Во время извлечения твэл протягивается через вихретоковый датчик проходного типа и проводится его вихретоковая дефектоскопия.

В послереакторных исследованиях облученных твэлов хорошо зарекомендовал себя импульсный метод вихретокового контроля [12, 13]. В его основе лежит импульсное возбуждение внешнего электромагнитного поля в широком частотном диапазоне, которое, в свою очередь, индуцирует в материале оболочки твэла вихревые токи различной частоты.

Первичным преобразователем является датчик проходного типа с тремя катушками индуктивности: двумя измерительными, включенными по дифференциальной схеме, и одной возбуждающей. Измерительные обмотки регистрируют изменения электромагнитного поля вихревых токов, наводимых в оболочке твэла возбуждающей обмоткой, на которую подается импульс тока. Анализ результатов контроля осуществляется путем сравнения параметров откликов от искусственных дефектов контрольных образцов и сигналов, обнаруженных при вихретоковом сканировании исследуемого твэла.



Рис. 5. Ультразвуковой метод обнаружения негерметичных твэлов в ТВС: *а* — схематичное изображение датчика и инспектируемого твэла; *б* — А-сканограмма герметичного твэла; *в* — А-сканограмма негерметичного твэла; *1* — сигнал возбуждения датчика; *2* — полезный сигнал.

Характеристики дефектов оцениваются по А-сканограммам (рис. 66), а также по огибающим выходного сигнала вихретокового датчика (рис. 66), которые используются также для построения годографов, по параметрам которых (форме, амплитуде, углу наклона) оценивают дефекты оболочки (рис. 6г).



Рис. 6. Главное окно программы с результатами ВТ-контроля фрагмента имитатора с наружным (1), сквозным (2) и внутренним (3) дефектами:

а — D-скан; б — А-сканограммы в окрестности сквозного дефекта; *в* — огибающие сигнала; *г* — годографы.

Импульсный вихретоковый метод дефектоскопии твэлов позволяет идентифицировать сквозные, наружные, внутренние дефекты оболочки, локальные изменения диаметра оболочки, электропроводящие магнитные и немагнитные включения, а также неэлектропроводящие магнитные включения [14].



Рис. 7. Результаты вихретоковой дефектоскопии негерметичного твэла: *a* — огибающая сигнала; *б* — внешний вид сквозного дефекта; *в* — микроструктура оболочки в месте расположения вторичного дефекта; *I* — сигнал от сквозного дефекта; *2* — сигнал от вторичного дефекта.

Оценка чувствительности метода выполнялась по искусственным дефектам. Минимальные размеры дефектов, которые уверенно регистрируются, следующие [14]: наружная кольцевая риска (ширина 0,06, глубина 0,06 мм); наружное глухое отверстие (диаметр 0,7, глубина 0,3 мм); сквозное отверстие (диаметр 0,7 мм); продольная наружная трещина (ширина 0,06, длина 9, глубина 0,09 мм); продольная внутренняя трещина (ширина 0,08, длина 12, глубина 0,15 мм).

В качестве примера на рис. 7*а* приведена вихретоковая диаграмма негерметичного твэла ВВЭР-1000, в нижней части которого был обнаружен сквозной дефект (рис. 7*б*), в верхней части оболочки — множество вторичных (не сквозных) дефектов в виде скоплений гидридов циркония (рис. 7*в*).

После извлечения негерметичного твэла из каркаса ТВС проводился его подробный осмотр на установке визуально-оптической инспекции твэлов (рис. 8). Твэл вертикально перемещали относительно перископа, при этом оператор учитывал результаты вихретоковой дефектоскопии и фотографировал участки оболочки, где были зафиксированы дефекты (см. рис. 3*a*, *б* и 7*б*). Фотографирование сопровождалось видеосъемкой твэла. Установка позволяет производить 10-кратное увеличение изображения твэла.

Если во всех обнаруженных негерметичных твэлах идентифицированы дефекты, приведшие к их разгерметизации, то задача поиска негерметичных твэлов и дефектов в них считается выполненной. Далее эти твэлы направляются на подробные материаловедческие исследования с использованием разрушающих методов.

Если же при осмотре и вихретоковой дефектоскопии дефекты в твэлах не обнаружены, то необходимо убедиться в том, что эти твэлы действительно негерметичные. Для этого были сде-

ланы прокол оболочки твэлов и анализ газа под оболочкой, результаты которого позволяют однозначно идентифицировать негерметичные и герметичные твэлы.

Если твэл признается герметичным, это означает, что при проведении ультразвукового КГО была перебраковка и данный твэл в действительности герметичный. В случае подтверждения негерметичности твэла обнаружение сквозных дефектов в оболочке продолжается с помощью так называемого «пузырькового» метода, который заключается в следующем. Через отверстие в оболочке, выполненное в результате ее прокола, в твэл под давлением закачивается газ (гелий, азот или воздух). Твэл помещают в прозрачный сосуд с водой и наблюдают выход пузырьков газа через сквозные дефекты, тем самым определяя их местоположение. На этом процесс обнаружения негерметичных твэлов и дефектов заканчивается и твэл передается дальше на подробные материаловедче-



Рис. 8. Схема установки визуально-оптической инспекции твэлов: *1* — твэл; 2 — устройство позиционирования; 3 — перископ. ские исследования с использованием разрушающих методов (микроскопии, механических испытаний и т.п.).

Если в результате ультразвукового КГО негерметичные твэлы не обнаружены, то приступают к полной потвэльной разборке ТВС с осмотром и вихретоковой дефектоскопией всех твэлов (см. рис. 4). К полной потвэльной разборке ТВС приступают также в том случае, когда выгорание твэлов в ТВС превышает пороговое значение и поэтому нельзя использовать ультразвуковой метод КГО.

При обнаружении с помощью осмотра и вихретоковой дефектоскопии сквозных дефектов в оболочке твэлов эти твэлы идентифицируются как негерметичные. В этом случае задача поиска негерметичных твэлов и дефектов в них считается выполненной.

Если по результатам осмотра и вихретоковой дефектоскопии негерметичные твэлы не обнаружены, то их поиск продолжается с помощью гамма-спектрометрического метода, основанного на измерении активности ⁸⁵Кг в газосборнике твэлов [15].

При эксплуатации твэлов в реакторе в результате деления ядер ²³⁵U образуются газовые продукты деления, такие как Xe и Kr, часть которых выходит из матрицы UO₂ во внутритвэльную атмосферу.

После извлечения негерметичной ТВС из реактора давление газа внутри негерметичного твэла сравняется с давлением окружающей твэл среды и будет приблизительно в 20–30 раз меньше, чем давление в герметичных твэлах. Таким образом, регистрация количества газовых продуктов деления ядерного топлива в газосборнике позволяет обнаружить негерметичные твэлы. Для этого регистрируют гамма-излучение радиоизотопа ⁸⁵Кг, который в результате спонтанного распада ядер излучает гамма-кванты с энергией ~ 514 кэВ, к тому же имеет достаточно большой период полураспада — ~10,8 года, и, следовательно, контролировать герметичность по этому радиоизотопу можно в течение достаточно продолжительного времени (до ~10 лет и больше) после извлечения ТВС из реактора.

Измерение интенсивности гамма-излучения от газосборника твэлов проводится с помощью установки, выполненной на базе защитного контейнера, который устанавливается над защитной камерой с исследуемыми твэлами (рис. 9).

Исследуемый твэл с помощью подъемного устройства через отверстие в потолке защитной камеры втягивается в контейнер таким образом, чтобы газосборник находился напротив горизонтального коллиматора, выполненного в стенке контейнера. С обратной стороны коллиматора находится германиевый детектор с гамма-спектрометром, с помощью которого регистрируется гаммаспектр излучения от газосборника твэла.

На рис. 10 в качестве примера приведены гамма-спектры для герметичного и негерметичного твэлов. У герметичного твэла на спектре четко наблюдается пик в области энергии 510—514 кэВ, что соответствует гамма-излучению ⁸⁵Кг, в то время как для негерметичного твэла этот пик отсутствует. Это говорит об отсутствии или о небольшом количестве ⁸⁵Кг под оболоч-

кой твэла и, следовательно, указывает на его негерметичность.

Если в результате контроля радиометрическим методом негерметичных твэлов не обнаружено, а также с учетом ранее выполненного осмотра и вихретоковой дефектоскопии, ТВС признается герметичной. Отнесение ее к классу негерметичных в результате инспекции на АЭС было ошибочным.

Обнаруженные негерметичные твэлы отправляют на прокол оболочки (см. рис. 4). При этом еще раз убеждаются в их негерметичности, а также подготавливают твэлы к применению «пузырькового» метода для обнаружения сквозных дефектов в оболочке. После обнаружения дефектов задача поиска негерметичных твэлов и дефектов в них считается выполненной.

Рис. 9. Схема установки для измерения интенсивности гамма-излучения ⁸⁵Кг в газосборнике твэла:

I — сосуд Дьюара; 2 — свинцовая защита детектора; 3 — детектор; 4 — коллиматор; 5 — твэл; 6 — защитный контейнер; 7 — подъемное устройство; 8 — пенал для твэла.



Рис. 10. Гамма-спектры газовой полости герметичного (а) и негерметичного (б) твэлов.

4. АНАЛИЗ МЕТОДОЛОГИИ ПОИСКА НЕГЕРМЕТИЧНЫХ ТВЭЛОВ

Анализ блок-схемы на рис. 4 показывает, что поиск негерметичных твэлов может выполняться по одиннадцати различным сценариям, которые делятся на две группы. К первой группе (три сценария) относятся сценарии контроля, в которых не требуется выполнять полную потвэльную разборку ТВС, в то время как в остальных восьми сценариях (вторая группа) для обнаружения негерметичных твэлов требуется разборка ТВС с извлечением и контролем всех твэлов.

Разборки всей ТВС не требуется, если в результате использования ультразвукового КГО обнаружены негерметичные твэлы. При обнаружении в негерметичных твэлах в результате осмотра и вихретоковой дефектоскопии сквозных дефектов в их оболочках поставленная задача решена. Этот сценарий требует минимум времени и ресурсов по сравнению со всеми остальными сценариями поиска негерметичных твэлов и дефектов в их оболочках.

Наиболее сложным с технической точки зрения и требующим максимальных затрат времени и ресурсов является сценарий, в котором проводят потвэльную разборку TBC, а негерметичные твэлы обнаруживают только после использования радиационного метода контроля активности ⁸⁵Kr в газосборниках всех твэлов, так как их осмотр и вихретоковая дефектоскопия не позволили обнаружить в оболочках сквозных дефектов и, следовательно, негерметичных твэлов (см. рис. 4). Для регистрации сквозных дефектов в обнаруженных негерметичных твэлах их оболочки прокалывают, попутно анализируют газ внутри твэлов и пузырьковым методом определяют координаты сквозных дефектов. На этом сценарий заканчивается.

С точки зрения затрат времени и ресурсов для обнаружения негерметичных твэлов и дефектов в них остальные девять сценариев на рис. 4 находятся между рассмотренными выше двумя сценариями.

Основываясь на опыте исследований негерметичных ТВС ВВЭР-1000, можно оценить количество времени на реализацию вышеупомянутых двух сценариев. Так, если на реализацию первого требуется несколько дней, то на реализацию второго — в десятки раз больше, несколько месяцев.

По количеству операций, совершаемых с ТВС и твэлами, эти два сценария также сильно отличаются друг от друга. Если в первом для поиска негерметичных твэлов и дефектов в них требуется несколько десятков операций с ТВС и твэлами, то для второго с полной потвэльной разборкой ТВС количество операций исчисляется тысячами.

Таким образом, очевидно, что для улучшения технико-экономических показателей технологии поиска негерметичных твэлов и дефектов в их оболочках необходимо совершенствовать существующие и разрабатывать новые неразрушающие методы контроля облученных ТВС и твэлов. Это в

первую очередь касается методов обнаружения негерметичных твэлов в составе TBC без ее потвэльной разборки и методов вихретоковой дефектоскопии в части повышения чувствительности к дефектам оболочки твэлов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методология поиска негерметичных твэлов и дефектов в их оболочках основана на последовательном применении оптических, ультразвуковых, вихретоковых, радиационных и пневматических пузырьковых неразрушающих методов контроля. Эффективность этой методологии подтверждена многолетним положительным опытом ее применения для инспекции и исследования негерметичных ТВС ВВЭР-1000 в защитных камерах. В настоящее время исследовано около 20 негерметичных ТВС ВВЭР-1000, во всех ТВС обнаружены и исследованы негерметичные твэлы, дефекты, приведшие к их разгерметизации, и установлены причины разгерметизации.

Недостатком описанной методологии является необходимость потвэльной разборки TBC, если ультразвуковой метод поиска негерметичных твэлов либо не применим из-за высоких выгораний топлива, либо если после его использования негерметичные твэлы обнаружены не были. Ограничения, связанные с применимостью ультразвукового метода, особенно сильно влияют на поиск негерметичных твэлов не в защитных камерах, а под водой, в бассейне выдержки АЭС с помощью специальных стендов инспекции и ремонта TBC, так как в условиях АЭС практически невозможно реализовать полную потвэльную разборку TBC. Поэтому в настоящее время наиболее актуальной задачей по совершенствованию методической и технической базы для поиска негерметичных твэлов является разработка метода, который бы позволял, независимо от выгорания, обнаруживать негерметичные твэлы в составе TBCA и TBC-2M BBЭP-1000 без их потвэльной разборки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марков Д.В., Смирнов В.П., Поленок В.С., Неугодников Д.С., Новоселов А.Е., Кобылянский Г.П. Основные результаты послереакторных исследований усовершенствованного топлива ВВЭР и РБМК / Сборник докладов VIII Российской конференции по реакторному материаловедению (Димитровград, 21—25 мая 2007 г.). Димитровград: ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР», 2007.

2. Иванов Н.А., Бромирский И.А., Павлов С.В., Суров Д.В., Первушин Л.А., Тишков А.Н., Амосов С.В. Стенд инспекции и ремонта тепловыделяющих сборок для проекта АЭС-2006 // Тяжелое машиностроение. 2017. № 4. С. 25—28.

3. *Троянов В.М., Павлов С.В.* Стратегия поиска. Задачи ОАО «ГНЦ НИИАР» в области научно-технического обоснования ядерного топлива для атомных электростанций // Росэнергоатом. 2011. № 4. С. 58—61.

4. *Павлов С.В., Сухих А.В., Сагалов С.С.* Неразрушающая диагностика состояния элементов активных зон ядерных реакторов. Димитровград: Изд-во ДИТИ НИЯУ МИФИ, 2015. 311 с.

5. Рыжов С.Б., Мохов В.А., Васильченко И.Н., Кобелев С.Н., Вьялицин В.В., Кушманов С.А., Семоглазов С.В., Туркин А.В., Махин В.М. Опыт разработки и результаты эксплуатации ТВС-2 и ТВС-2М / Сб. докл. IX Российской конференции по реакторному материаловедению (Димитровград, 14–18 сентября 2009 г.). Димитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР», 2009. С. 46—52.

6. Драгунов Ю.Г., Рыжов С.Б., Васильченко И.Н., Кобелев С.Н. Разработка и внедрение TBC-2M для перспективных топливных циклов // Атомная энергия. 2005. Т. 99. Вып. 6. С. 432—437.

7. Кайдалов В.Б., Преображенский Д.Г., Романов А.И., Самойлов О.Б., Фальков А.А., Шишкин А.А. Тепловыделяющая сборка ТВСА ВВЭР-1000, направления развития и результаты эксплуатации // Атомная энергия. 2007. Т. 102. Вып. 1. С. 43—48.

8. *Markov D., Smirnov V., Smirnov A., Perepelkin S.* Integration of post-irradiation examination results of failed WWER fuel rods / Proc. of the Fifth International Conference WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support, 29 September — 3 October 2003, Albena, Bulgaria. P. 273—278.

9. Павлов С.В. Методология материаловедческих исследований ТВС и ТВЭЛов ВВЭР для оперативного сопровождения внедрения нового топлива на АЭС // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2014. Вып. 3. С. 25—34.

10. Павлов С.В. Ультразвуковой метод обнаружения негерметичных тепловыделяющих элементов ядерных реакторов // Дефектоскопия. 2011. № 5. С. 23—38.

11. Павлов С.В., Сагалов С.С., Амосов С.В. Система неразрушающего контроля облученных твэлов для стенда инспекции тепловыделяющих сборок ВВЭР // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2010. Вып. 3. С. 5—11.

12. Павлов С.В., Сухих А.В., Сагалов С.С. Вихретоковые методы контроля в реакторном материаловедении. Димитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР», 2010. 226 с. 13. Сухих А.В., Сагалов С.С., Павлов С.В., Марков Д.В., Куприенко М.В. Использование импульсного метода вихретокового контроля для дефектоскопии облученных твэлов ВВЭР // Атомная энергия. 2009. Т. 107. Вып. 2. С. 115—118. 14. Сагалов С.С. Разработка средств и методов оперативной вихретоковой дефектоскопии облучен-

14. Сагалов С.С. Разработка средств и методов оперативной вихретоковой дефектоскопии облученных твэлов ВВЭР с оболочками из сплава Zr-1%Nb / Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Димитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР», 2011.

ОАО «ГНЦ НИИАР», 2011. 15. Павлов С.В., Сухих А.В., Сагалов С.С. Гамма-спектрометрия в реакторном материаловедении. Димитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР», 2012. 314 с.