

Лекция 31

МОНИТОРИНГ И ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ И ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЯЭУ НА БАЗЕ МЕТОДОВ БЕЗОБРАЗЦОВЫХ НЕРАЗРУШАЮЩИХ ИСПЫТАНИЙ

Обеспечение безопасной эксплуатации ядерных энергетических установок, в первую очередь, реакторных установок АЭС, в значительной мере зависит от внедрения современных методов и средств неразрушающего контроля и диагностики. Применение указанных методов позволяет проводить оценку текущего состояния металла оборудования и трубопроводов на всех стадиях жизненного цикла энергетической установки. В свою очередь, анализ этих данных и служебных характеристик ЯЭУ позволяет поддерживать необходимый уровень безопасности ядерной установки. На рис. Л31.1 (слайд 2) показана типовая схема автоматизированного мониторинга служебных характеристик ЯЭУ при внутриреакторном контроле энергоблоков АЭС с ВВЭР.

Условная классификация методов неразрушающих испытаний основного металла и сварных швов трубопроводов и металлоконструкций ЯЭУ представлена на рис Л31.2 (слайд 5).

На стадии изготовления и монтажа оборудование и трубопроводы должны подвергаться инспекционному контролю с применением технологий и средств неразрушающего контроля, обеспечивающих максимальную выявляемость дефектов. В заводских условиях и при монтаже — в отсутствие радиации и практически свободного доступа к контролируемым зонам ЯЭУ, этого результата можно достичь при меньших затратах, за счет использования более простых средств диагностического контроля. В этом случае нет необходимости в средствах дистанционной доставки датчиков и регистраторов к контролируемым зонам оборудования ЯЭУ.

Для управления безопасностью необходимо анализировать в реальном времени информацию о деградации служебных свойств металла компонентов технологического оборудования ЯЭУ. На начальном этапе создания ЯЭУ формируются первичные базы данных о характеристиках и состоянии металла, которые в дальнейшем постоянно пополняются в процессе ее работы. Создается система сбора и анализа информации о факторах риска при эксплуатации ядерной установки.

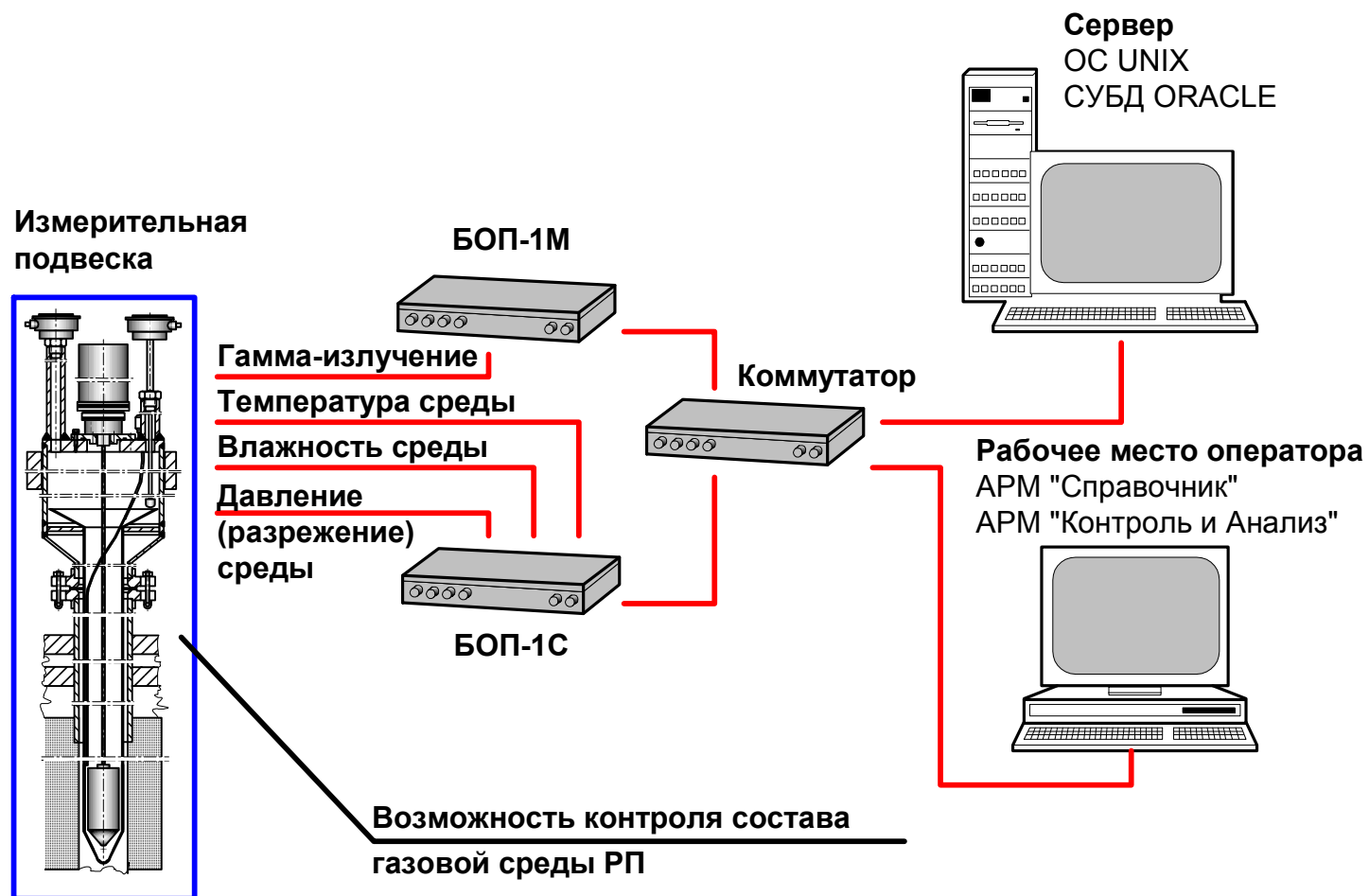


Рис. Л31.1. Типовая схема организации мониторинга служебных характеристик ЯЭУ для внутриреакторного контроля безопасности АЭС с ВВЭР



Рис. Л31.2. Система классификации методов контроля и испытаний материалов ЯЭУ для любого этапа их жизненного цикла

На рис. Л31.3 (слайд 3) показан критерий выбора безопасных условий эксплуатации компонентов ЯЭУ — схема управления сроком службы энергетической установки. На рис. Л31.4, (слайд 4), представлены основные положения модели, применяемой для определения срока службы конструктивных элементов и компонентов ЯЭУ. Основными исходными данными модели являются данные о физико-механических свойствах металла, полученные с помощью безобразцовых (без использования стандартных образцов) методов. Эти данные также используются для расчета прочности, оценки и прогнозирования работоспособности оборудования и трубопроводов.

Безобразцовые методы широко используются как в России, так и за рубежом. Разработаны специальные нормативные документы по применению этих методов. Они включают рекомендации по:

- диагностике и оценке соответствия металла ЯЭУ требованиям конструкторско-технологической документации, сертификатным данным, контролю изменения физико-механических свойств и структуры металлов в процессе эксплуатации (деградация служебных свойств и др.);
- определению и количественной оценке накопленной эксплуатационной повреждаемости металла;
- измерению остаточных механических напряжений в особых зонах оборудования и трубопроводов, в частности, в зонах сварных соединений;
- оценке влияния условий ремонта на состояние металла и сварных швов оборудования и трубопроводов ЯЭУ.

Существующие безобразцовые методы (рис. Л31.2) можно разделить на две группы:

- 1) методы контроля физико-механических свойств;
- 2) методы контроля целостности и поврежденности конструкции.

Все неразрушающие методы контроля физико-механических свойств являются косвенными. Ни один из них не позволяет напрямую измерить физико-механические и прочностные характеристики металла, установленные в Нормах расчета на прочность ПНАЭ Г-7-002-86 и определяющие статическую, циклическую и хрупкую прочность. Последние традиционно определяются только при разрушающих испытаниях стандартных образцов.

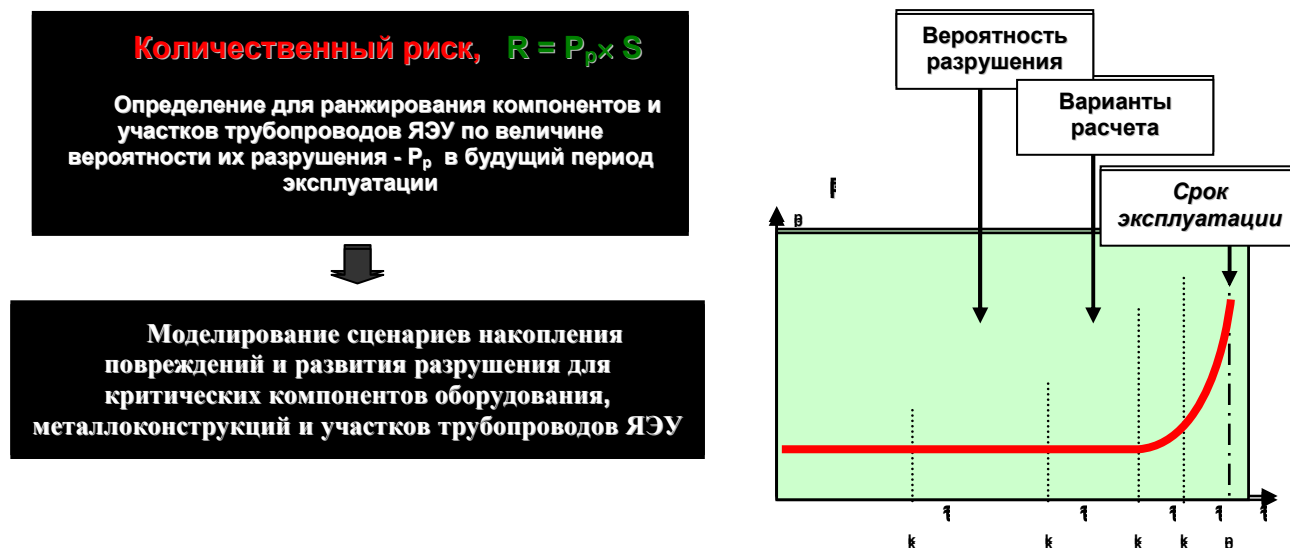


Рис. Л31.3. Схема управления сроком службы ЯЭУ

Модель определения срока службы металла оборудования и трубопроводов АЭС



Рис. Л31.4. Модель определения срока службы металлоконструкций

Методическую основу безобразцовых неразрушающих методов составляют устойчивые корреляционных соотношения между регистрируемыми при контроле параметрами и определяемыми характеристиками конструкционных материалов.

Основное требование к безобразцовым методам — возможность измерения геометрии дефекта, определение его типа (трещина, раковина) и размеров с необходимой точностью.

В настоящее время насчитывается около сотни различных методов контроля состояния материалов, которые формально применимы для косвенного измерения механических свойств металла оборудования АЭС (слайд 6). Все эти методы можно разделить по принципу воздействия на поверхность контролируемого материала на *физические* и *механические* методы.

К основным *физическим* методам относятся акустические, электрические, магнитные, электрромагнитные и радиационные методы контроля. В основе физических методов лежит регистрация изменения параметров соответствующих физических полей при взаимодействии их с объектом контроля, либо регистрация характеристик полей различной физической природы (акустических, электромагнитных и др.), возникающих в результате различных процессов, протекающих в контролируемом объекте.

К *механическим* методам неразрушающего контроля относятся, в первую очередь, методы измерения твердости, приводящие лишь к допустимым повреждениям поверхности в результате локального контактного воздействия индентора (внедряемого тела) с объектом контроля.

Твердость — способность материала сопротивляться внедрению инородного тела. Твердость металла, определяемая безобразцовым методом по сопротивлению внедрению индентора, зависит, прежде всего, от сил сцепления атомов и способности металла к пластическому деформированию. На последнюю влияет множество факторов — структура, размер зерна, состав, термообработки, дефектность металла и др.

Определение твердости существенно отличаются от других видов механических испытаний тем, что деформация протекает в ограниченном приповерхностном объеме металла. Испытания на твердость получили широкое распространение на практике. Они проводятся сравнительно быстро, не требуют сложной подготовки поверхности объектов и дорогостоящего измерительного оборудования.

Эмпирическим путем устанавливаются соотношения между твердостью и другими показателями прочности и механическими свойствами металла. При безобразцовых испытаниях элементов конструкций и изделий ЯЭУ применяются большое разнообразие способов определения твердости. Все они, по сути, сводятся к четырем основным методам:

- методу вдавливания твердого наконечника;
- методу качания;
- методу упругой отдачи;
- методу царапания.

Метод вдавливания твердого наконечника — известный в классическом материаловедении метод Бринелля. В поверхность диагностируемого изделия при заданной нагрузке вдавливается стальной шарик определенного диаметра. Диаметр сферического отпечатка измеряется визуально с точностью 0,1...0,01 мм. Далее по заранее установленным зависимостям для определенных классов конструкционных материалов по размерам отпечатка оцениваются их физико-механические свойства.

В целом как физические, так и механические методы пригодны для определения физико-механических свойств конструкционных сталей ЯЭУ. На практике устанавливаются корреляционные связи между характеристиками, определяемыми физическими методами и значениями механической твердости по Бринеллю или Виккерсу, а также с другими физико-механическими свойствами конструкционных материалов.

Оценка целостности или поврежденности конструкций, как правило, проводится с помощью визуального метода контроля (слайд 8). На действующей АЭС в основном применяют

- прямой визуальный контроль;
- непрямой визуальный контроль.

Эти термины определены в документе DIN EN 13018/1330-10, в зависимости от того, как распространяется свет от контролируемой поверхности к глазу наблюдателя.

Прямой визуальный контроль — контроль с непрерывным ходом лучей между глазами оператора и контролируемой поверхностью конструкции. Этот контроль проводится либо без вспомогательных средств, либо с такими средствами, например, зеркала, линзы, эндоскопы или волоконно-оптические приборы.

Непрямой визуальный контроль — визуальный контроль с прерыванием хода лучей между глазами оператора и контролируемой поверхностью. Непрямой визуальный контроль предполагает применение видео- и фототехники, автоматизированных устройств и робототехнических средств. Условная классификация этих способов визуального контроля применительно к ЯЭУ представлена на рис. Л31.5 (слайд 9).



Рис. Л31.5. Классификация способов визуального контроля для оценки целостности элементов конструкций, трубопроводов и компонентов ЯЭУ

Прямой визуальный контроль целостности элементов конструкций ЯЭУ

В этом случае контролируемая поверхность осматривается непосредственно глазами наблюдателя. Общий осмотр, детальное исследование и оценка мест возможного нахождения дефектов в значительной мере зависят от человеческого фактора.

К наиболее сложно обеспечиваемым условиям действенного визуального контроля относятся хорошая подготовка и опыт оператора, а также наличие детальной инструкции по проведению осмотра. В частности стандарт DIN EN 13018/1330-10 требует, чтобы инструкция предоставлялась по первому требованию.

Прямой визуальный контроль может проводиться как со вспомогательными средствами, так и без них. Вспомогательные средства необходимы, если контролируемая поверхность недоступна или угол поля зрения слишком мал для детального осмотра. DIN EN 13018/1330-10 устанавливает более или менее произвольные границы для угла зрения от 30 градусов относительно контролируемой поверхности (слайд 10). При меньших углах необходимо применение вспомогательных средств, например, зеркал или эндоскопов. Эндоскопы, конструкции которых содержат наборы линз или световолокно, позволяют непосредственно наблюдать недоступные или плохо видимые поверхности диагностируемой конструкции.

Вспомогательные средства, такие как бинокли, перископы и др., широко применяются при диагностических осмотрах элементов конструкций ЯЭУ, прежде всего, для снижения дозовой радиационной нагрузки на персонал. В частности, перископы используются для осмотра состояния внутренней поверхности технологических каналов реакторных установок канального типа, таких как РБМК, ЭПГ-6 и др.

Непрямой визуальный контроль целостности элементов конструкций ЯЭУ

Непрямой визуальный контроль позволяет разделить функции собственно оператора, который, например, непосредственно делает видеоснимок, и специалиста — эксперта-интерпретатора, составляющего заключение, на основе которого принимается решение. В этом случае можно увеличить изображение, провести его цифровую обработку и необходимые измерения для облегчения расшифровки полученного изображения. Однако, при этом, с одной стороны, существует опасность, что из-за плохого качества снимка или изображения на мониторе дефекты не будут обнаружены — ошибка 2-го рода, с другой, можно «переусердствовать» и выдать неверное заключение, приняв световую тень за возможный дефект, то есть допустить ошибку 1-го рода. Например, такие случаи довольно часто происходили при осмотрах технологических каналов РБМК-1000, которые осуществлялись с помощью перископов, соединенных с телевизионной системой дистанционного наблюдения.

Следует специально отметить, что рекомендации стандартов по визуальным осмотрам целостности материалов и конструкций, в частности, стандарта DIN EN 13018/1330-10 требует доказательства, что применяемая при непрямом контроле система отвечает требованиям необходимой достоверности контроля. Для этого применяются стандартные образцы, соответствующие объекту контроля по своей отражающей способности, структуре поверхности, контрасту и доступу, причем используемый метод должен быть проверен в самых неблагоприятных условиях.

На практике стандартный образец можно заменить моделями реальных объектов контроля, сделанными по общепринятым технологиям. Например, при визуальном контроле сварных швов можно использовать слепок поверхности, сделанный в соответствии с рекомендациям DIN EN 1370. В частности в США, согласно рекомендациям американского общества инженеров механиков, при проведении визуального осмотра реального объекта используется специальный стандартный образец, так называемый "greycard". Он представляет собой картонную карту серого цвета с нанесенными на нее линиями различной толщины. Эта карта располагается на поверхности контроля в наихудшем для осмотра

положении. При этом серый оттенок карты не должен отличаться от цвета поверхности диагностируемого объекта. Реализуемая предельная чувствительность определяется минимальной шириной различаемой линии. В ASME-Code линия $W = 0,8$ мм определена как минимальная граница для предельной чувствительности (слайд 10).

Обзорный визуальный диагностический контроль целостности элементов конструкций и трубопроводов ЯЭУ

Обзорным контролем называют глобальный визуальный контроль общего состояния диагностируемого объекта. Целостность диагностируемого объекта оценивается по субъективным характеристикам оператора посредством быстрого осмотра или мгновенной оценки — рекомендация нормативного документа DIN EN 1330-10. Цель обзорного диагностического контроля — определить пригодность объекта для визуального контроля и необходимость проведения детального обследования. Если обзорный контроль проводится методом прямого визуального контроля, то по рекомендациям DIN EN 13018 минимальная освещенность поверхности контроля должна составлять 160 Лк, при этом необходимо обеспечить комфортные условия для наблюдателя (слайд 12).

Местный визуальный диагностический контроль целостности элементов конструкций и трубопроводов ЯЭУ

Этот метод контроля, именуемый также детальным или локальным визуальным контролем, может, согласно рекомендациям DIN EN 13018, проводиться как прямым, так и непрямым методом. Прямой местный визуальный контроль без вспомогательных средств проводится, если объект контроля удален от глаз не более чем на 600 мм, то есть находится в зоне видимости. Например, визуальный контроль качества внешней поверхности оболочек твэлов ядерных реакторов. В том случае, если объект контроля нельзя приблизить, например, из-за его недоступности, токсичности или радиоактивности, необходимо применять вспомогательные средства. Эти средства применяются также, если угол обзора слишком мал.

При проведении визуального диагностического контроля большое значение имеет контраст наблюдаемого объекта или его отображения. Такие дефекты, как трещины, поры, питтинг могут быть выявлены лишь при наличии хорошего контраста между дефектным участком и остальной поверхностью объекта. Добиться удовлетворительного контраста на практике можно за счет:

- предварительной подготовки контролируемой поверхности (уменьшения фона);

— улучшения освещения.

Подготовка поверхности для минимизации фона, если есть возможность, включает ее очистку, иногда шлифовку и полировку. Освещение диагностируемого участка поверхности — необходимый фактор для обеспечения качественных результатов контроля. В документе DIN EN 13018 установлен минимальный уровень освещенности поверхности, необходимый для проведения местного контроля, равный 500 Лк. В то же время практика показывает, что для уверенного и надежного обнаружения дефекта освещенность должна составлять не менее 1000 Лк. С другой стороны, при увеличении яркости освещения при малых углах зрения относительно контролируемой поверхности, возникают блики и, так называемый, "эффект ослепления", что может привести к пропуску некоторых дефектов. Оптимальной является ситуация, когда направление освещения совпадает с направлением осмотра, причем для улучшения контрастности важна также и цветовая температура источника света.

Визуальный метода контроля — яркий пример субъективного мониторинга и оценки технического состояния ЯЭУ. В этом случае неизбежно негативное влияние, так называемого, человеческого фактора. Один из способов его снижения — документированные требования к персоналу — непосредственным исполнителям диагностических работ. Однако в большинстве национальных стандартов отсутствуют квалификационные требования к персоналу, проводящему визуальный контроль.

Общими же требованиями к квалификации персонала для выполнения безобразцовых неразрушающих испытаний являются:

- знание комплекса необходимых правил и норм, а также способность пользоваться необходимыми для контроля информационными и инструментальными средствами, в частности, методиками, измерительными системами, приборами и приспособлениями;
- умение организовать процесс диагностирования;
- способность обеспечить условия при проведении инспекционных диагностических обследований, близкие к условиям эксплуатации объектов.

Перед проведением диагностического обследования составляется подробный план работ. После проведения работ составляется акт и выпускается отчет, в котором приводятся результаты обследования. В плане и отчете указывается перечень характеристик, которые нужно зарегистрировать и измерить, а также приводятся таблицы с фактическими данными. На основе этих данных проводятся необходимые расчеты и формулируются выводы о наличии или отсутствии дефектов. Для дефектов указываются их параметры.

Безобразцовые неразрушающие испытания хорошо зарекомендовали себя при проведении диагностических работ на АЭС (слайды: 13,14,14). Во многих случаях они являются единственными методами оценки фактического состояния металлоконструкций и оборудования энергетической установки. В настоящее время проводятся комплексные научные исследования по разработке новых и адаптации известных безобразцовых методик для использования на АЭС. Эти работы включают:

- разработку новых технических средств и измерительных приборов;
- адаптацию уже имеющихся на рынке приборов, выпускаемых специализированными фирмами, под задачи технической диагностики на АЭС;
- обучение и аттестацию персонала для выполнения диагностического обслуживания АЭС.