

Лекция 32

ДИАГНОСТИКА КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ И ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ ЯЭУ

Эрозионно-коррозионный износ (ЭКИ) и коррозионное растрескивание под напряжением (КРН) являются основными причинами разрушения оборудования и трубопроводов АЭС. Эрозионно-коррозионный износ — наиболее распространенный механизм повреждения оборудования и трубопроводов из сталей перлитного класса.

Нарушения в работе АЭС российского производства по причине ЭКИ трубопроводов происходят с частотой в среднем 3 нарушения в год. С 1986 г. — авария на чернобыльской атомной станции ЧАЭС, до начала текущего века — первый шаг к возрождению атомной энергетики в стране, на АЭС России и Украины было зарегистрировано 45 случаев нарушения в работе станций в результате повреждения трубопроводов по механизму ЭКИ:

- на АЭС с ВВЭР-440 — 19 нарушений;
- на АЭС с ВВЭР-1000 — 17 нарушений;
- на АЭС с РБМК — 7 нарушений.

К сожалению, и в настоящее время ЭКИ является одной из основных причин разрушения технологического оборудования. На рис. Л32.1 показаны выявленные повреждения трубопровода байпаса регулятора питательной воды Ø 106x8 мм 2-го контура по механизму ЭКИ на 2-ом блоке Балаковской АЭС в ноябре 2004 г. На рис. Л32.2 и Л32.3 показаны коррозионное разрушение и механизм ЭКИ повреждения сосуда давления на Смоленской АЭС. Коррозионное повреждение трубок парогенератора произошло недавно при его транспортировке из России в Китай на строящуюся по российскому проекту АЭС.

Статистику повреждения оборудования на АЭС с ВВЭР из-за ЭКИ иллюстрирует рис. Л32.4. На рис. Л32.5 показано распределение по группам теплотехнического оборудования систем 2-го контура АЭС с ВВЭР-1000, подвергнувшиеся коррозионно-эрозионному износу.

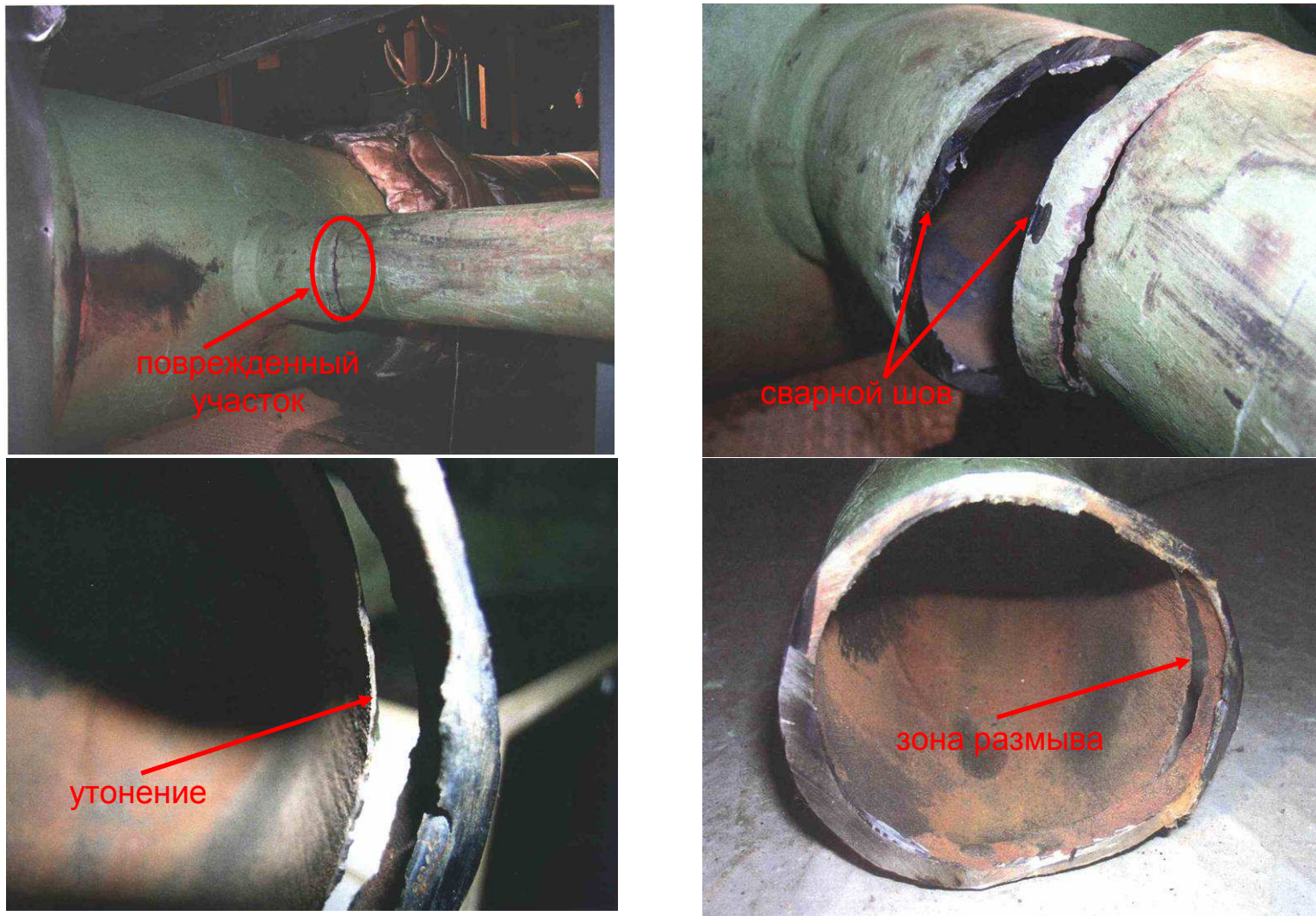


Рис. Л32.1. Коррозионно-эрозионный трубопроводов

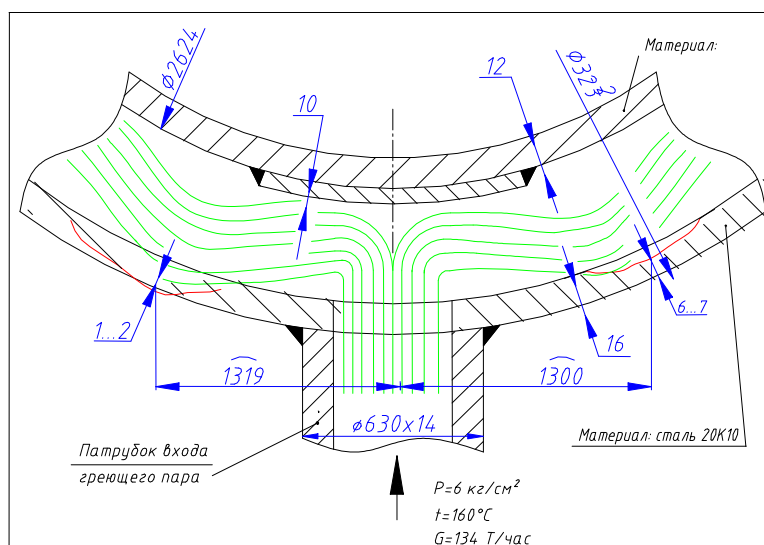


Рис. Л32.2. Схема повреждения по механизму ЭКИ для сосуда давления на Смоленской АЭС



Рис. Л32.3. Результаты наблюдения коррозионного повреждения сосуда давления на Смоленской АЭС

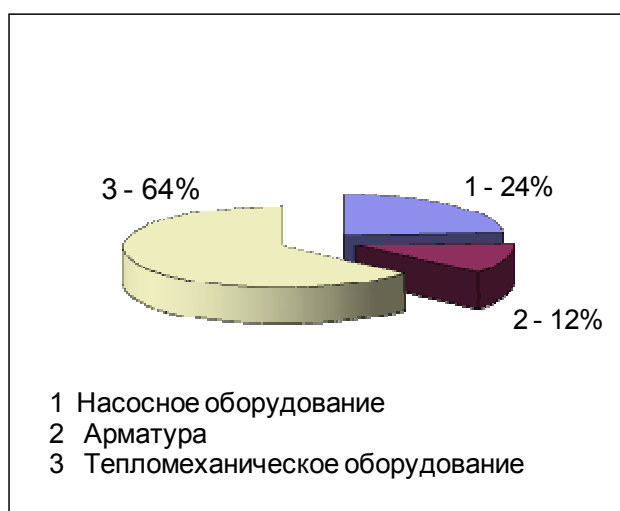
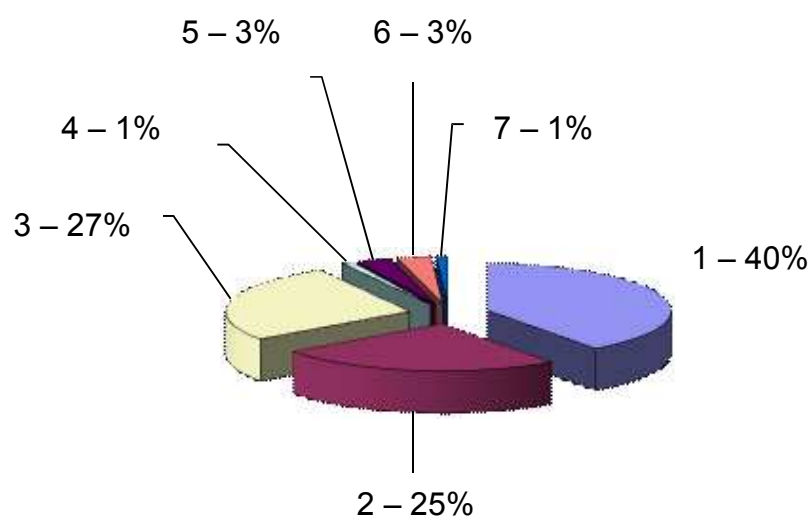


Рис. Л32.4. Статистика ЭКИ на АЭС с ВВЭР-1000



1. Конденсатор основной турбины
2. Трубопроводы
3. Подогреватель высокого давления
4. Сепаратор-подогреватель
5. Турбина основная
6. Эжекторы
7. Регенеративный теплообменник

Рис. Л32.5. Распределение коррозионно-эрозионных повреждений по группам теплотехнического оборудования систем 2 контура АЭС с ВВЭР-1000

Факторы, определяющие протекание ЭКИ

При разработке программ и проведении диагностических работ по выявлению эрозионно-коррозионных повреждений принимаются во внимание факторы, от которых зависят характер и интенсивность протекания ЭКИ:

- показатели водно-химического режима (значение рН, концентрация кислорода, наличие твердых примесей);
- тепло-гидравлические характеристики рабочей среды (скорость, температура);
- химический состав металла (содержание хрома, меди, молибдена);
- уровень фактических напряжений в конструкции в зоне износа и физико-механические свойства металла;
- геометрические параметры и конфигурация диагностируемых объектов (например, внешний диаметр трубопровода, толщина его стенки; конфигурация: гиб, тройник, дросселирующие шайбы, переходники и т.д.);
- длительность эксплуатации оборудования.

Последствия попадания продуктов коррозии в теплоноситель

Попадание и перенос потоком теплоносителя продуктов коррозии приводит к следующим негативным последствиям:

- ухудшение радиационной обстановки во всем контуре, что усложняет диагностические обследование и ремонт оборудования;
- ухудшение теплоотдачи при отложении продуктов коррозии на теплопередающей поверхности твэлов;
- возможность накопления под слоем отложений хлоридов и, как следствие, развитие процессов коррозионного растрескивания;
- ухудшение теплоотдачи может вызвать пристеночное кипение у оболочек твэлов с появлением поверхностей доупаривания, на которых развивается коррозионное растрескивание;
- ухудшение условий работы пар трения вплоть до заклинивания движущихся и трущихся элементов.

Коррозионные свойства конструкционных сталей и особенности протекания коррозионных процессов

Так как современная отечественная ядерная энергетика базируется на корпусных водоохлаждаемых реакторах на тепловых нейтронах с водой под давлением типа ВВЭР, водоподготовке на станциях придается особое значение. Обеспечение качества теплоносителя, а также и поддержание штатных тепловых и гидравлических режимов в контуре теплоносителя способствует снижению ЭКИ металла.

На заре ядерной энергетики, когда практически не было данных о поведении материалов в столь специфических условиях, при выборе конструкционных материалов для теплоэнергетического оборудования использовался опыт, накопленный при разработке сталей для тепловых электростанций, авиа- и судостроения. Но при этом выдвигались повышенные требования к строгому соблюдению их технологии производства и проведению пооперационного контроля качества полуфабрикатов и готовых узлов. К числу обязательных требований к сталям и сплавам для оборудования первого контура относилась высокая сопротивляемость к общей (равномерной) и межкристаллитной коррозии. С обнаружением коррозионного растрескивания аустенитных хромоникелевых сталей, борьба с этим явлением стала одной из основных задач диагностики оборудования.

В настоящее время основным коррозионно-стойким конструкционным материалом ЯЭУ являются аустенитные хромоникелевые стали типа 18-8, стабилизированные титаном — стали марок 1X18H10T и X18H12T с различным содержанием углерода. В воде первого контура циркуляции теплоносителя хромоникелевые стали типа 18-8 T1 имеют скорость общей коррозии не более 0,001-0,002 мм/год и по ГОСТ 13819-98 относятся к конструкционным материалам 1-3-й групп стойкости.

Скорость коррозии перлитных сталей в воде оптимального состава ($\text{pH} = 10$) во время штатной работы энергетического реактора составляет примерно 0,1 мм за 25 лет работы. Это почти на порядок выше по сравнению с аустенитными сталями типа 18-8 T1. При перегрузках и во время остановки реактора из-за повышения концентрации борной кислоты изменяется состав и снижается показатель pH воды — в среднем до 7. По этой причине резко увеличивается выход в контур продуктов коррозии сталей.

Скорость местной, локальной (язвенной или точечной) коррозии материалов первого контура, не должна превышать 0,05 мм/год.

Вероятность появления локальной коррозии возрастает на участках конструкций, где накапливаются агрессивные примеси (обычно хлориды) или имеется недостаток кислорода. Накопление продуктов коррозии наблюдается вблизи границы раздела водной и паровой фаз,

в щелевых и застойных зонах, на теплопередающих поверхностях. В таких условиях существенно возрастает опасность повреждения оборудования. Диагностика подтверждает наличие коррозионного растрескивания в этих зонах. На рис. Л32.6 показана коррозионная язва на наружной, не рабочей, поверхности трубопровода первого контура из стали 08X18H10T. Максимальная глубина язвенного поражения составляет примерно 0,3 мм. Скорость местного утонения - 0,07 мм/год. Таким образом, при определенных условиях, например, при увлажнении наружной поверхности трубы в теплоизоляции, скорость локальной коррозии стали 08X18H10T может превышать допустимую — 0,05 мм/год.

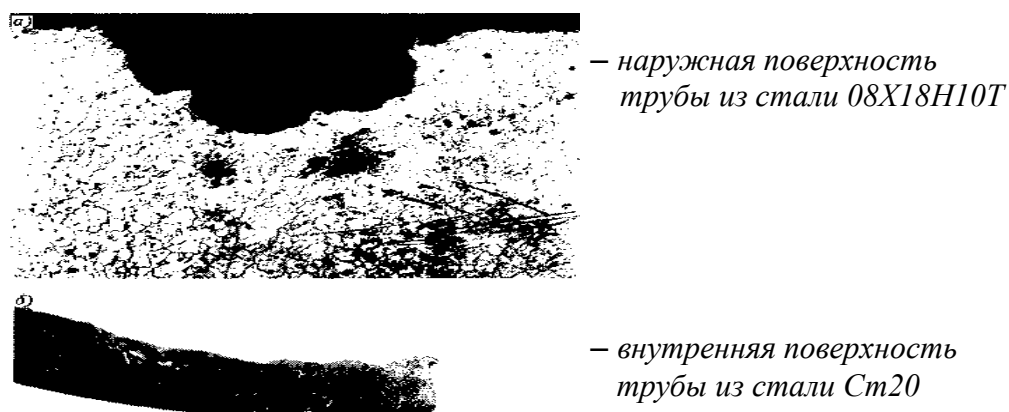


Рис. Л32.6. Вид несквозных ЭКИ поврежденных труб в форме язвенной коррозии; увеличение - 100

Протекание процессов эрозионного и эрозионно-коррозионного износа

Механизм протекания эрозионно-коррозионного износа упрощено представлен на рис. Л32.7.

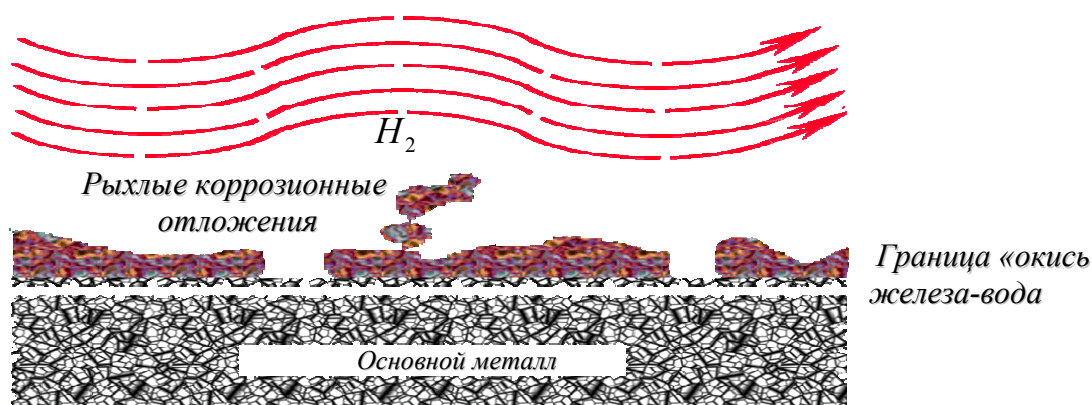


Рис. Л32.7. Механизм протекания ЭКИ

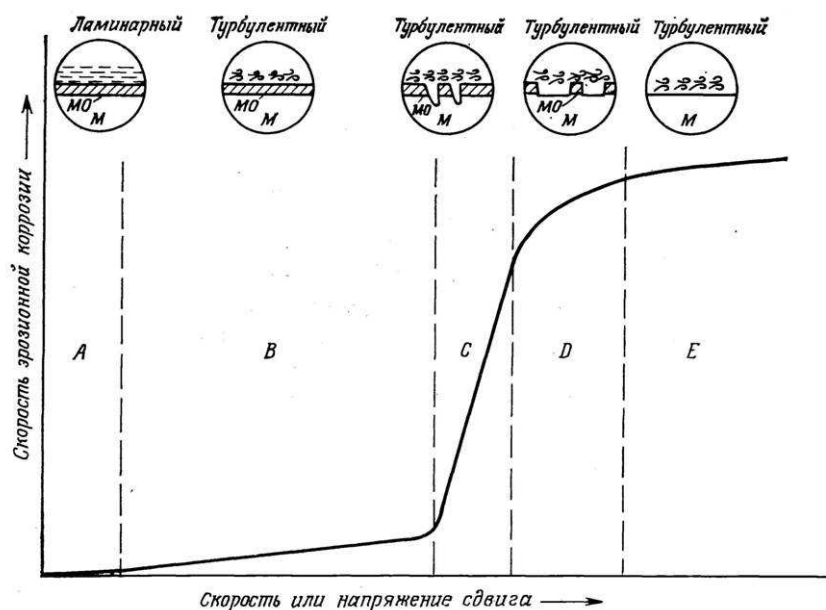


Рис. Л32.8. Основные этапы развития ЭИК в зависимости от скорости теплоносителя

Химически активные реагенты, присутствующие в теплоносителе, например, продукты радиолиза воды, взаимодействуя с металлов, образуют на его поверхности рыхлую пленку продуктов коррозии. Хотя образовавшаяся пленка препятствует проникновению реагентов к поверхности металла и, в какой-то мере, понижает интенсивность коррозии, прочность ее не велика. При достаточно большой скорости прокачки теплоносителя пленка может разрушаться водой на отдельных участках. Продукты коррозии уносятся (смываются) потоком воды, попадая в контур циркуляции теплоносителя, а металл этих таких зон, освобожденный от пленки, вновь подвергает коррозионному воздействию. В зависимости от скорости движения теплоносителя, в развитии коррозионного процесса можно выделить пять этапов, см. рис. Л32.8:

- зона *A* - поток движется ламинарно, и скорость коррозии не велика;
- в зоне *B* скорость потока относительно невелика, но движение потока турбулентно; скорость коррозии в этом случае определяется скоростью переноса химически активных реагентов, находящихся в потоке, к поверхности металла; скорость потока недостаточна, чтобы вызвать разрушение коррозионной пленки на поверхности металла;
- зона *C* - скорость потока довольно велика; за счет взаимодействия потока с пленкой в ней возникают механические напряжения достаточные для ее разрушения и удаления (смыва) с отдельных участков поверхности; эти зоны в

дальнейшем сильно корродируют за счет контактных токов, протекающих между покрытыми пленкой и обнаженными участками металла;

- зона D - коррозионная пленка удаляется (смывается) с больших площадей поверхности, поэтому доля коррозионного повреждения за счет контактных токов снижается, но скорость потери массы металла возрастает, так как воздействию агрессивной среды подвергается значительная поверхность незащищенного пленкой металла; развитая турбулентность затрудняет репассивацию (восстановлению защитной пленки) поверхности металла;
- зона E - за счет мощной турбулентности пленка полностью удаляется с поверхности металла, и репассивация невозможна.

Таким образом, протекание ЭКИ определяется тремя взаимосвязанными процессами:

- коррозией (химической, и электрохимической);
- эрозией (механическое разрушение поверхностного слоя);
- растворением продуктов коррозии (например, пленки окисла).

В свою очередь, различают *кавитационную* эрозию, эрозию при наличии в среде *эродента* и, так называемую, «ветровую» эрозию на границе металл-поток, происходящую под действием касательных напряжений в коррозионной пленке, вызванных прокачкой теплоносителя.

Отметим, что каждый из перечисленных процессов в настоящее время, даже в отдельности, до конца не изучен. Это касается, прежде всего, такого важного для поддержания безопасности АЭС вопроса, как влияние радиоактивного излучения на ход коррозионных процессов.

Организация диагностических работ по выявлению ЭКИ оборудования на АЭС

В настоящее время периодичность проведения эксплуатационного контроля процессов ЭКИ на АЭС регламентируются действующими в атомной отрасли «Типовыми программами эксплуатационного контроля за состоянием основного металла и сварных соединений оборудования и трубопроводов...»: АТПЭ-9-03 (ВВЭР-1000); АТПЭ-2-99 (ВВЭР-440); АТПЭ-10-96, ПЭКМ-ЛАЭС-99.840.07П (РБМК-1000); АТПЭ-11-01 (БН-600); АТПЭ-20-01 (ЭГП-6). Несмотря на обилие нормативных документов, не все зоны с максимальной интенсивностью ЭКИ выявляются при диагностике. Некоторые не включены в программу периодического контроля. С другой стороны, зоны с небольшим износом диагностируются в соответствии с требованиями типовых программ в значительном объеме и излишне часто. Как следствие, имеет место избыточность контроля.

В настоящее время в соответствии с ПНАЭ Г-7-031-91 проводится точечный контроль толщины стенок гибов и участков трубопроводов после регулирующих и дросселирующих устройств, главным образом, методом ультразвуковой толщинометрии. Ключевые положения принятой типовой технологии диагностического контроля ЭКИ оборудования АЭС отражены на рис. Л32.9. Кроме того, на рис. Л32.10 показан типовой набор компонентов теплотехнического оборудования ЯЭУ, подлежащих диагностированию.

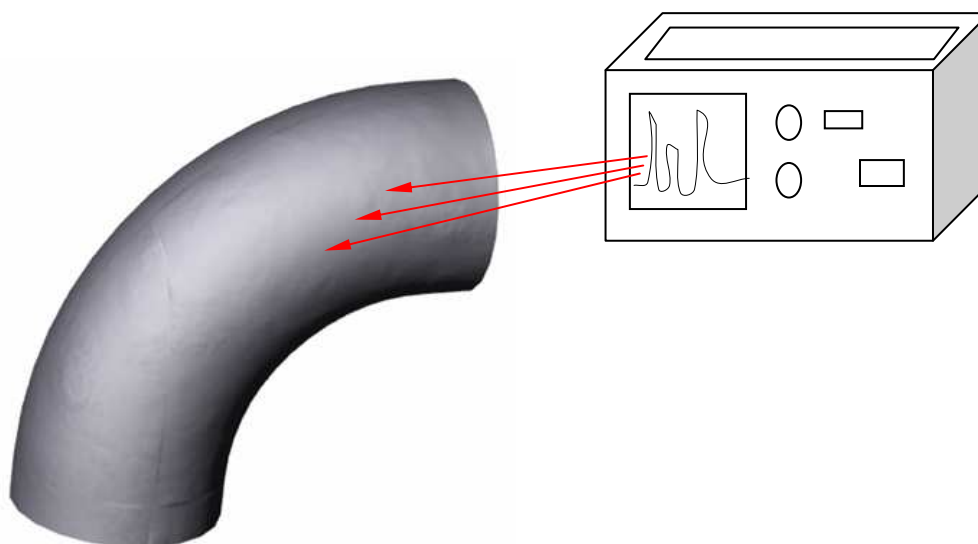


Рис. Л32.9. Схема диагностического контроля изгибов трубопроводов

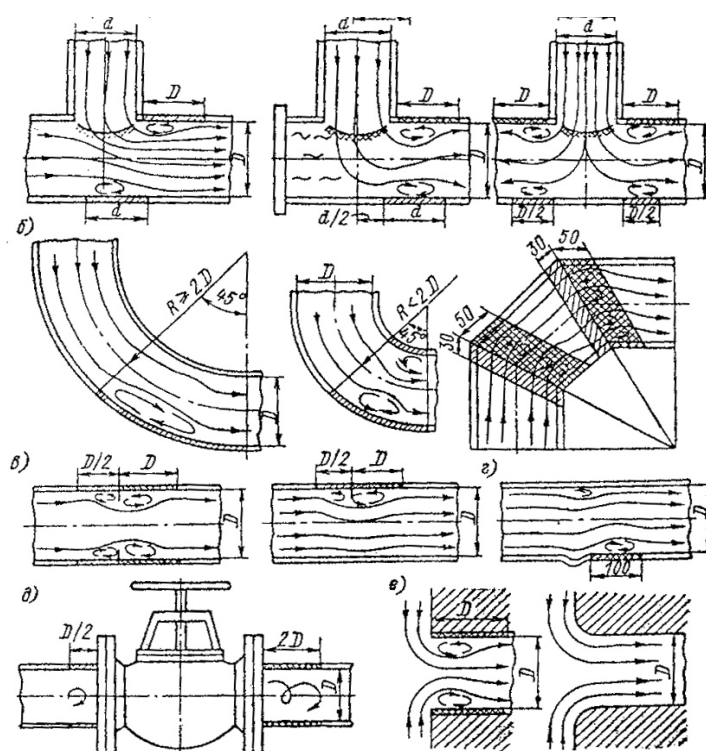


Рис. Л32.10. Основные элементы конструкций теплотехнического оборудования ЯЭУ, составляющие предмет диагностирования процессов ЭКИ

Справедливости ради необходимо отметить основные недостатки точечного контроля:

- требуется предварительной зачистки поверхности металла;
- нельзя получить общую картину износа металла;
- отсутствует 100%-ая гарантия обнаружения локальные зоны максимального утонения стенок;
- не достаточная повторяемость и сопоставимость результатов периодического контроля;
- не решена проблема оценки погрешности контроля толщины стенок методами ультразвуковой толщинометрии из-за влияния на результаты измерений плотных коррозионных отложений на внутренних поверхностях стенок оборудования.

Полученные при проведении диагностического обследования результаты пополняют электронную базу данных с указанием объектов и условий проведения диагностических работ на российских АЭС. База данных является составной частью разветвленной информационной системы с распределенными по ОИАЭ автоматизированными рабочими местами, созданной по заказу концерна «Росэнергоатом». Она содержит следующие информационные блоки (слайд 15):

- «Специальный перечень элементов для управления процессами ЭКИ и ресурсными характеристиками элементов энергоблоков АЭС»;
- «Программа обследования и диагностирования процессов ЭКИ элемента энергоблока с целью оценки технического состояния и фактического ресурса»;
- «Расчеты на прочность элемента конструкции подверженного эрозионно-коррозионному износу»;
- «Заключение о техническом состоянии и остаточном ресурсе диагностируемого элемента по показателям ЭКИ»;
- «Решение о возможности и условиях дальнейшей эксплуатации продиагностируемого элемента ЯЭУ».

База данных, при условиях своевременного поступления информации, предназначена для централизованного сбора, хранения и обмена информацией о техническом состоянии и последствиях ЭКИ для безопасной эксплуатации тепломеханических элементов энергоблоков АЭС и сроках выработки их ресурса. Данные, хранящиеся в базе, используются также при выдаче лицензии на эксплуатацию энергоблока за пределами проектного срока службы.

Список дополнительной литературы по теме

1. Амаев А.Д., Крюков А.М., Платонов П.А. и др. Радиационная повреждаемость и работоспособность конструкционных материалов. – СПб.: Политехника, 1997. – 312 с.
2. Паршин А.М., Тихонов А.Н. Коррозия металлов в ядерном Энергомашиностроении. – СПб.: Политехника, 1994. – 93 с.
3. Диагностика коррозионных повреждений металлоконструкций и трубопроводов объектов использования атомной энергии. Учебное пособие для вузов. /М.Б. Бакиров, Е.М. Кудрявцев, Г.А. Сарычев, И.А. Тутнов — М.: РАДЭКОН, 2004. — 95 с.
4. РД ЭО-0571-2004 по прочностному расчету ЭКИ.
5. Диагностика материалов и конструкций топливно-энергетического комплекса. /В.М. Баранов, А.М. Карасевич, Е.М. Кудрявцев и др. – М.: Наука, 1999. – 360 с.