

Комплексная технология неразрушающего контроля основного металла и сварных швов трубопроводов.

Бадалян В.Г., Вopilкин А.Х. (ООО НПЦ Неразрушающего контроля «ЭХО+»)

1. Введение

В России эксплуатируется большое количество промышленных потенциально опасных объектов в нефтехимическом производстве, энергетике и, в первую очередь атомной, в трубопроводном транспорте, оборонной технике и многих других отраслях промышленности. Случающиеся аварии приводят к человеческим жертвам, экологическим катастрофам, значительным материальным потерям. Особенности состояния промышленности России состоит еще и в том, что в подавляющем числе отраслей заканчивается срок эксплуатации оборудования и изделий. Экономические трудности и временной фактор не всегда позволяют провести плановую замену. Для повышения эксплуатационной безопасности и снижения аварийности все больше внимание уделяется диагностике оборудования, которая позволяет на ранних стадиях проводить оценку их работоспособности, предупреждать возникновение аварийных ситуаций и, по возможности, продлевать сроки эксплуатации объектов.

За рубежом выпускают и предлагают к продаже большой ассортимент диагностических приборов, позволяющих решать многие задачи диагностики. Однако они достаточно дороги, как правило, не адаптированы к Российскому рынку, не снабжены методиками применения к различным объектам, не позволяют создать комплексную технологию, включающую применение нескольких методов и приборов и дающих максимально объективную и полную информацию об объекте.

В настоящей работе анализируется комплексная технология диагностирования широкого круга потенциально опасных объектов, обеспечивающая их безопасную эксплуатацию даже при исчерпании ими ресурса путем применения новых и совершенствования известных методов и приборов неразрушающей оценки технического состояния объекта.

2. Комплексная технология диагностирования объектов

Акустические (ультразвуковые) методы, наиболее широко применяемые для неразрушающего контроля металлоизделий, основаны на создании в объекте поля упругих волн и регистрации искажений этого поля, вызванных наличием в объекте неоднородностей (дефектов). Повышению технико-экономической эффективности методик ультразвукового неразрушающего контроля и диагностики способствует применение совокупности методов контроля четырех типов:

- интегральных методов контроля, задачей которых является обнаружение и локализация проблемных зон контролируемого объекта;
- локальных методов контроля, задачей которых является детальное изучение выявленных проблемных зон и качественная оценка состояния объекта традиционными методами дефектоскопии;
- количественных методов диагностики, задачей которых является классификация выявленных несплошностей – определение типа и реальных размеров дефектов, их локализации в объекте;
- методов оценки состояния макро и микроскопических свойств материала объекта.

Два последних типа методов диагностики дают объективную основу для применения прочностных методов оценки остаточного ресурса объектов, замыкая тем самым диагностическую цепь: предварительная оценка качества объекта - обнаружение несплошности – классификация несплошности – установление остаточного ресурса контролируемого объекта.

На рис. 1 представлена блок – схема комплексной технологии, объединяющей разработанные методы и приборы неразрушающего контроля. В нее вошли четыре группы методов, последовательно решающих задачи увеличения информативности и позволяющие в сумме полу-

читать исчерпывающую информацию о состоянии объекта. На первом этапе решаются задачи интегральной диагностики, т.е. выполнение быстрой и производительной оценки состояния объекта без углубленного его изучения. В качестве этих методов целесообразно использовать акустическую эмиссию и волноводные ультразвуковые методы. На втором этапе применяются ультразвуковые методы, локализирующие дефектные области объектов. Третий этап использует методы ультразвуковой дефектометрии, основанные на когерентных методах измерения типа, реальных размеров дефектов. Решение задачи классификации дефектов и определения их реальных параметров открывает путь для оценки влияния несплошностей металла на работоспособность объекта и, как результат, продление срока его эксплуатации.

В процессе эксплуатации объектов изменяются механические свойства металла и, если необходимо, для оценки их деградации на четвертом этапе используются методы электронно – динамической твердометрии.

Заметим, что применительно к некоторым объектам комплексная технология может включать в себя другие методы, например тепловые, магнитометрию и электрометрию и использовать соответствующие приборы. В зависимости от состояния и важности объекта, комплексная диагностика может включать или весь арсенал методов и приборов, или часть его, достаточную для принятия обоснованного решения о дальнейшей эксплуатации.

Ниже приводятся данные о новых разработанных методах и приборах, а также примеры их использования в различных областях промышленности.

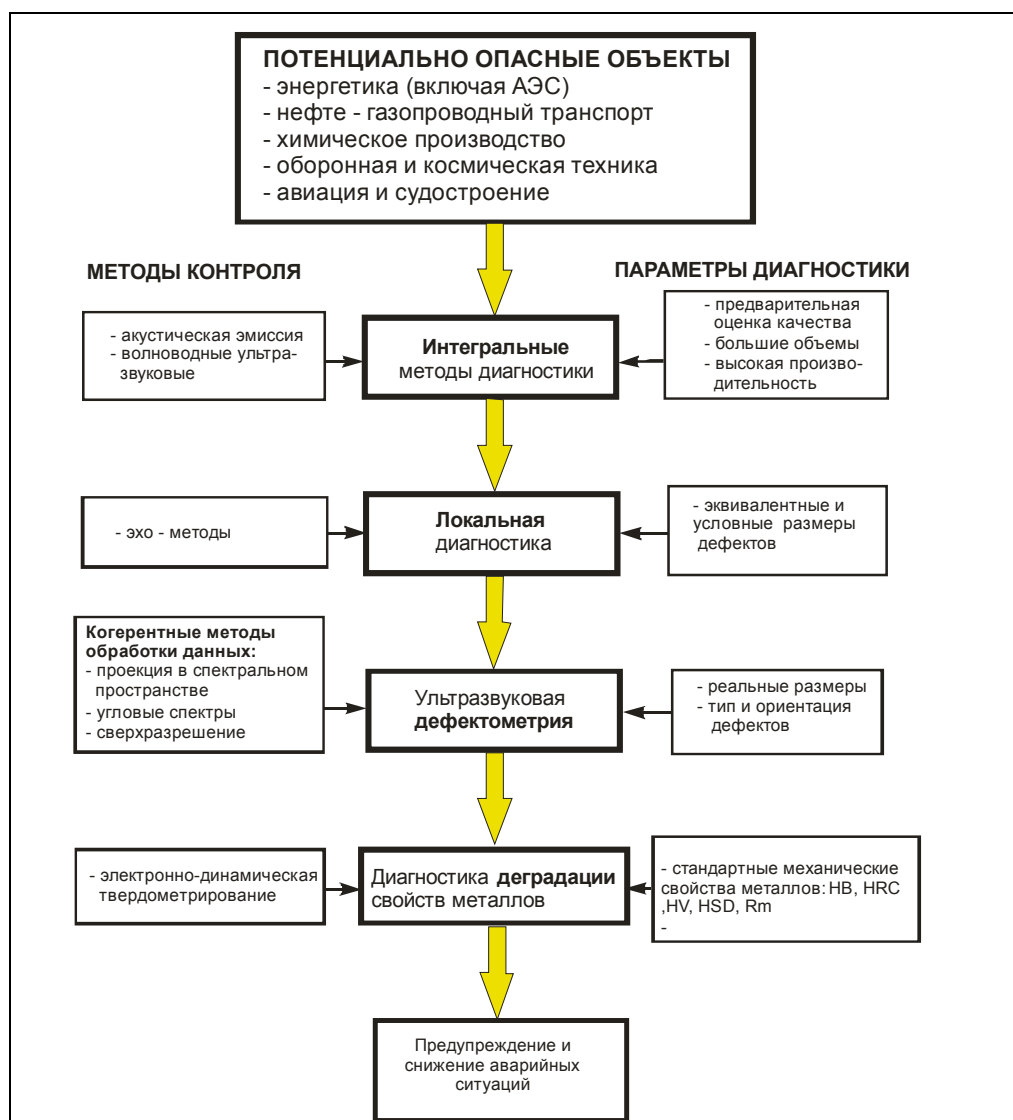


Рис. 1. Комплексная технология диагностики потенциально опасных объектов.

3. Методы и средства реализации комплексной диагностики.

Интегральные методы и приборы диагностики материалов.

Одними из мощных интегральных методов диагностики состояния контролируемого объекта являются метод акустической эмиссии и волноводные методы.

Метод акустической эмиссии (АЭ) хорошо известен. Он основан на регистрации и анализе акустических волн, возникающих в процессе пластической деформации и разрушения (роста трещин) контролируемых объектов. Это позволяет формировать адекватную систему классификации дефектов и критерии оценки состояния объекта, основанные на реальном влиянии дефекта на объект. Характерными особенностями метода АЭ контроля, определяющими его возможности и область применения, являются следующие:

- метод АЭ обеспечивает обнаружение и регистрацию только развивающихся дефектов, что позволяет классифицировать дефекты не по размерам, а по степени их опасности;
- метод АЭ обладает весьма высокой чувствительностью к растущим дефектам, – позволяет выявить в рабочих условиях приращение трещины порядка долей миллиметра;
- метод АЭ обеспечивает контроль всего объекта с использованием одного или нескольких преобразователей АЭ контроля, неподвижно установленных на поверхности объекта. Это позволяет контролировать большие и протяженные объекты, значительно экономя материальные ресурсы;
- положение и ориентация объекта не влияет на выявляемость дефектов.

При развитии дефекта, когда его размеры приближаются к критическому значению, амплитуда сигналов АЭ и темп их генерации резко увеличивается, что приводит к значительному возрастанию вероятности обнаружения такого источника АЭ. Целью АЭ контроля является обнаружение, определение координат и слежение (мониторинг) за источниками акустической эмиссии, связанными с несплошностями на поверхности или в объекте контроля, сварного соединения и изготовленных частей и компонентов.

Приборы акустической эмиссии.

В настоящее время широко применяется диагностическая аппаратура на основе использования акустической эмиссии семейства **A-Line 32D**. Приборы разработаны ООО «ИНТЕРЮ-НИС» под руководством В.Г. Харебова. В последнем поколении приборов A-Line 32D представлены многоканальные цифровые системы сбора и обработки АЭ информации как традиционные – A-Line 32D (PCI-8), с аналоговой передачей данных от предусилителя на центральный компьютер по коаксиальному кабелю, так и новые представители семейства – системы повышенной помехозащищенности модульного типа с последовательным высокоскоростным цифровым каналом передачи данных **Лель** (A-Line 32D (DDM)), оснащенные комплектом цифровой беспроводной связи. Данные системы были специально разработаны для контроля объектов большой протяженности, например, таких как линейная часть трубопроводов.

Система A-Line 32D (PCI-8) представляет собой многоканальные платы регистрации и обработки АЭ данных для установки в персональный компьютер (рис. 2).

Многоканальные АЭ системы, построенные по такой идеологии, характеризуются отличными характеристиками, высокой скоростью обработки информации и одинаково хорошо подходят как для полевых работ, так и для научных исследований.

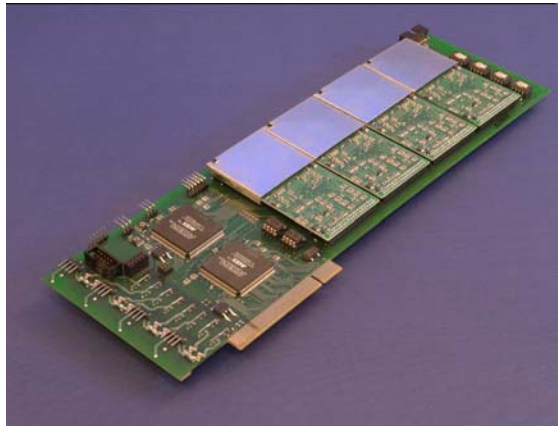


Рис. 2. А-Line 32D(PCI-8) –8-ми канальная АЭ система на плате для РС с полноскоростным PCI интерфейсом (133 Мбайта/с). Ориентирована в первую очередь на полевые измерения.

Платы А-Line 32D(PCI-8) оснащены высокопроизводительными DSP, матрицами FPGA высокой емкости и быстродействующей памятью. Это позволило снабдить каналы высококачественными программируемыми цифровыми фильтрами со спадом до 60 дБ/окт.

К другим достоинствам А-Line 32D(PCI-8) относится высокая точность измерения амплитуды (менее 1 дБ) и большой динамический диапазон (84 дБ), измерение истинной энергии с динамическим диапазоном 120 дБ, временное разрешение равное 1 мкс. для всех соответствующих АЭ параметров.

В А-Line 32D(PCI-8) реализована возможность анализа формы волны и спектра по каждому каналу в реальном времени.

Система Лель (А-Line 32D (DDM)) кардинальным образом отличается от традиционных систем АЭ (рис. 3). Основной особенностью системы Лель стал перенос всей регистрирующей и вычислительной части из центрального компьютера в устройство, непосредственно устанавливаемое на объекте контроля (модуль АЭ).

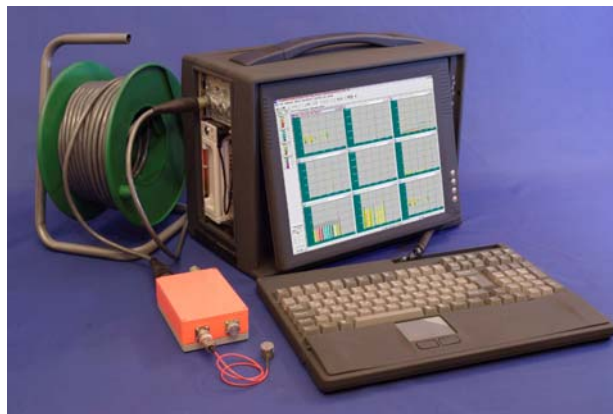


Рис. 3 Система АЭ Лель (А-Line 32D (DDM)) – многоканальная модульная система сбора и обработки акустико-эмиссионной информации с последовательным высокоскоростным цифровым каналом передачи данных.

Она предназначена для выполнения диагностики больших и протяженных объектов и позволяет контролировать линейные участки трубопроводов протяженностью более 2 км одной АЭ системой одновременно.

Система обеспечивает получение комплексной информации о состоянии объекта и технологических параметрах в режиме непрерывного слежения (мониторинга) за счет возможности подключения к модулям сбора данных дополнительно до 3-х параметрических дополнительных датчиков (давления, тензоизмерителей, температуры, влажности, скорости ветра, линейных перемещений, коррозии, и т.п.). Возможность передачи АЭ данных по радиоканалу позволяет контролировать участки трубопроводов с подводными переходами, автомобильными и железнодоро-

рожными магистралями. На рис. 4 приведен пример представления результатов контроля цилиндрического сосуда высокого давления.

Прибор успешно применяется для непрерывного наблюдения за техническим состоянием объекта контроля, пространственного положения элементов конструкций, коррозионной активности среды и параметрами технологического процесса, оптимизации подачи химических реагентов, параметров окружающей среды и т.д. По результатам анализа текущего состояния кислотности и коррозионной активности среды на разных участках установки система в автоматическом режиме подает команды на изменение скорости и объема подачи соответствующих реагентов (нейтрализатора и ингибитора).

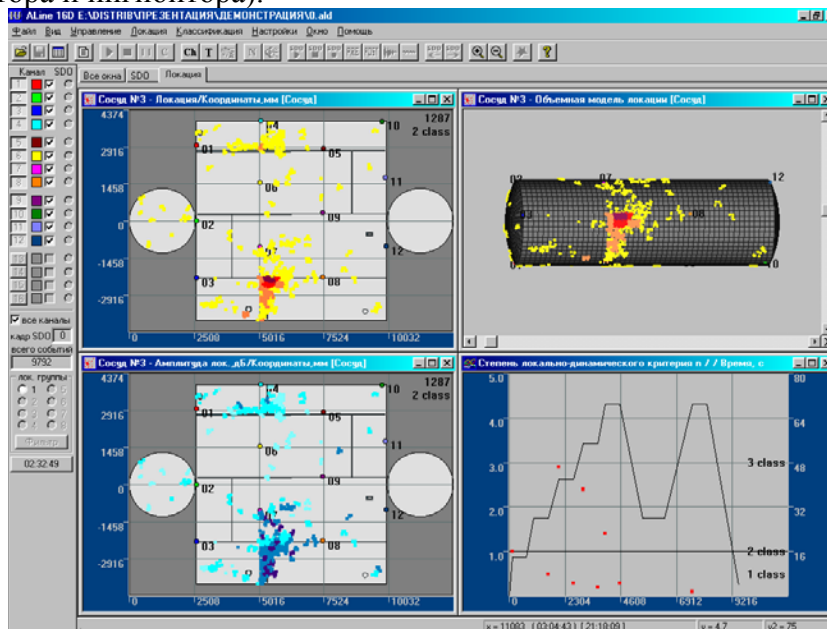


Рис. 4 Представление результатов локации на сосуда цилиндрической формы в ПО A-Line.

Волноводные методы и средства контроля

Высокую производительность и эффективность демонстрируют также волноводные методы контроля, в которых контролируемый объект «озвучивается» упругими волнами достаточной интенсивности из одной позиции электроакустического преобразователя и анализируются зарегистрированные акустические поля. В зависимости от величины этого соотношения для описания упругих волн используют модель полубезграничной среды, в которой могут распространяться объемные и поверхностные волны, или модели волноводного распространения нормальных волн различного типа. Важнейшей практически значимой особенностью нормальных волн является малый спад амплитуды с расстоянием и высокая чувствительность, что и обеспечивает возможность озвучивания и интегральной оценки состояния больших объемов материала.

Для выполнения сплошного ультразвукового контроля металла трубопроводов используется автоматизированный ультразвуковой дефектоскоп Авгур 5.5, в котором зондирование объекта осуществляется ультразвуковыми импульсами в мегагерцовой диапозоне частот. Приборы серии Авгур разработаны в ООО НК НПЦ «Эхо+».

Прибор Авгур 5.5 предназначен для дистанционного контроля трубопроводов. Он позволяет обнаруживать дефекты в металле в виде:

- общей потери металла внутренняя и внешняя, включая:
 - общую коррозию глубиной более 10% от толщины стенки и протяженностью более 20 мм;
 - питтинговую (точечную) коррозию глубиной более 10% от толщины стенки и протяженностью более 20 мм;
- расслоений протяженностью более 30 мм;
- непроваров и трещин в продольных и кольцевых сварных соединениях высотой более 3 мм и протяженностью более 20 мм;

- трещин, включая стресс – коррозионные, высотой более 10% от толщины стенки и протяженностью более 20 мм.

Основные технические характеристики системы Авгур 5.5:

- производительность контроля, м/час: 30;
- дальность обнаружения несплошностей до, м: 2;
- диапазон временной регулировки чувствительности, дБ: 70;
- Визуализация результатов контроля, архивирование результатов контроля в специализированной базе данных;
- Автоматическое определение области локализации несплошности.

Методология проведения 100% диагностики трубопроводов, задачей которой является обнаружение несплошностей и определение места их расположения, представлена на рис. 5.

Заметим, что в зависимости от вида контролируемых сварных соединений используются системы Авгур 5.5 различных комплектаций. Кроме того, требуется удаление изоляции в зоне перемещения преобразователей шириной около 150 мм.

На рис. 6, в качестве примера, приведены результат обнаружения модели коррозии в виде выборки круглой формы в трубопроводе диаметром 1000 мм.

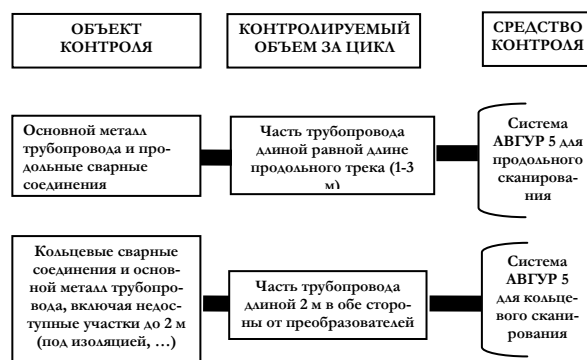


Рис. 5 Методология выполнения 100% контроля трубопроводов системой Авгур 5.5

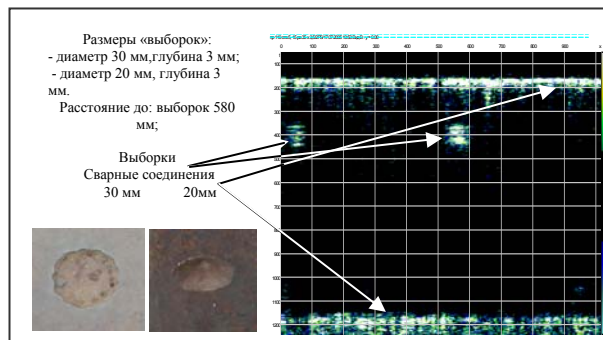


Рис. 6. Изображение моделей коррозии на мониторе системы Авгур 5.5

Методы локальной диагностики

Интегральные методы диагностики, обеспечивая высокую экономическую эффективность, тем не менее, не всегда достаточны для решения практических задач. Для более детального изучения состояния объекта контроля, а также для обеспечения повышенной чувствительности или помехозащищенности необходимо применять традиционные методы, позволяющие выполнять оценку его качества в локальных зонах.

Широко распространенные традиционные эхо – методы используют амплитудную информацию рассеянного акустического поля, что дает возможность описывать выявленную несплошность такими параметрами, как условные размеры, эквивалентная площадь, индикатриса рассеяния и ее производная коэффициент формы, тонкие изменения в спектре эхосигналов от дефекта. Однако все эти параметры далеко не всегда адекватно описывают реальные параметры не-

сплошности, что в ряде случаев недостаточно, для адекватной оценки состояния контролируемого объекта. Для более полного описания несплошностей целесообразно применять методы ультразвуковой дефектометрии.

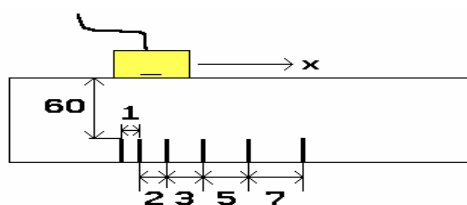
Методы и приборы ультразвуковой дефектометрии.

После выявления несплошности, определения ее качественных параметров необходимо получить количественные характеристики несплошности – определить тип и реальных размеры дефектов, их локализацию в объекте. Начиная с самого появления дефектоскопии, количественному описанию выявленных дефектов уделялось очень большое внимание. Одна из причин больших трудностей, связанных с определением реальных размеров дефектов при использовании традиционных методов, состоит в недостаточности информации, извлекаемой из данных традиционной – некогерентной дефектоскопии. Кардинальное увеличение объема информации, позволяющее выполнять измерения реальных параметров выявленных дефектов, дают когерентные методы дефектоскопии. В них используются данные об амплитудной и фазовой составляющих измеренных данных. В основе этих методов контроля лежат измерения комплексного акустического поля, рассеянного дефектом, построение и оценка акустического изображения выявленного дефекта с целью получения реальных размеров, определения типа дефекта. Именно эта информация о дефектах необходима для эффективного применения результатов прочностных расчетов, позволяющих оценить ресурс работы конструкции, чтобы предотвратить аварийно опасные ситуации.

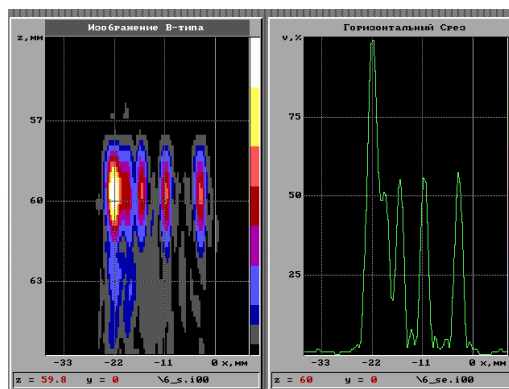
Когерентные методы обработки данных основываются на принципе синтезированной апертуры, которые первоначально были разработаны в радио- и гидролокации. В настоящее время разработаны экономичные и быстрые алгоритмы когерентной обработки данных УЗК для различных схем регистрации и различных объектов, которые предназначены для получения изображений несплошностей с высоким разрешением, основанные на использовании метода проекции в спектральном пространстве. Были разработаны и применяются в практике УЗ дефектоскопии приборы с цифровым построением изображений, использующие алгоритм ПСП – системы серии Авгур.

Полученные изображения имеют ряд отличительных особенностей, которые позволяют выполнять измерение размеров дефектов и определять их тип. Это связано с тем, что основные информативные параметры изображения дефекта, определяющие его размеры, локализацию, весьма стабильны:

- они слабо зависят от амплитуды изображения и, в основном, определяются фазовой информацией, содержащейся в необработанных данных, которые в целом довольно стабильны;
- полученные изображения имеют высокое разрешение и адекватно отражают реальные параметры дефектов (рис. 7). Измерения параметров дефектов, выполненные в течение ряда лет на одном и том же объекте показывают, что их акустические образы, очень индивидуальны, и их легко различать.



а)



б)

Рис. 7. Изображения моделей дефектов, полученные с применением различных алгоритмов восстановления:

а – тест из дюралюминия с моделями трещин раскрытием 50-100 мкм;

б – изображение В – типа моделей трещин (слева); амплитуда изображений (справа)

Приборы, реализующие когерентные методы – системы серии Авгур

Приборы, в которых реализована когерентная обработка данных контроля, дают возможность измерять количественные характеристики выявленной несплошности. В них широко используются компьютеры; они представляют собой автоматизированные системы с получением изображений внутреннего объема контролируемого изделия. При этом компьютер подключается к аппаратуре, осуществляющей активное зондирование изделия и сбор данных о рассеянном акустическом поле. Архитектура построения приборов допускает создание средств неразрушающего контроля, охватывающих самые различные задачи контроля, и имеет очень большие возможности для адаптации к условиям контроля без существенного изменения аппаратной части.

Именно на этих принципах построены приборы ультразвукового неразрушающего контроля с когерентной обработкой серии Авгур.

Системы с когерентной обработкой данных серии Авгур **имеют ряд особенностей:**

- Серия автоматизированных систем Авгур пригодна для использования с широким набором диаметров и толщин трубопроводов, других объектов с радиусом кривизны поверхности от 150 мм до плоскости.
- Системы позволяют осуществлять дистанционный автоматизированный контроль, что связано с возможным использованием в экологически опасных условиях, когда пребывание персонала в непосредственной близости от контролируемого объекта – нежелательно. Например, при работе в условиях радиации, в атмосфере с содержанием вредных примесей, высокой или низкой температуре в области контролируемого объекта и.т.д.
- Система имеет оптимальную комплектацию, обеспечивающую контроль конкретного изделия, с точки зрения мобильности, веса, габаритов, удобства пользования.
- Система имеет два режима работы: поиск несплошностей по всей длине сварного шва (быстрый поисковый режим) и измерительный режим. Задачей которого является определение истинных параметров несплошностей, таких, как координаты, длина, высота, тип. Для обеспечения этого режима необходимо обеспечить детальную регистрацию данных для того, чтобы можно было применить алгоритмы когерентной обработки данных.
- Система должна обеспечивать документацию и долговременное хранение результатов контроля, что является естественным требованием для автоматизированных систем.

Структура аппаратных средств систем серии Авгур ориентирована на широкий класс решаемых задач и, в частности, допускает проведение контроля в условиях с ограниченным временем пребывания оператора вблизи объекта контроля.

Конструктивно система выполнена в виде набора блоков, связанных между собой посредством кабелей (рис. 8). Ядром системы является IBM совместимый промышленный компьютер. Для увеличения надежности и достоверности контроля регистрация данных выполняется с использованием до восьми акустических преобразователей.

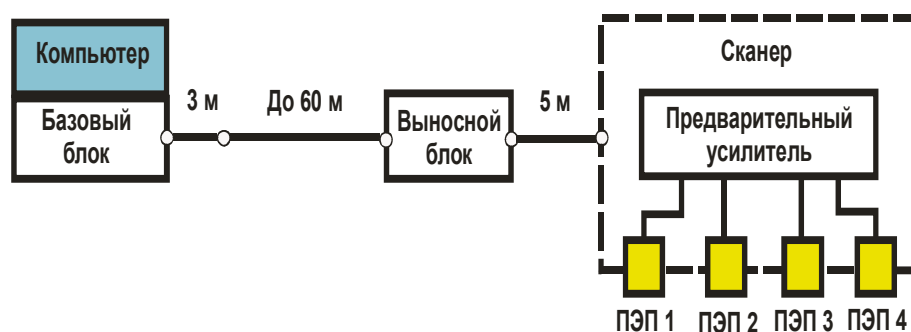


Рис. 8. Структурная схема систем серии Авгур.

На рис 9. приведены комплекты системы Авгур 4.2, предназначенные для контроля кольцевых швов трубопроводов диаметром от 150 мм до 500 мм (а) и кольцевых швов трубопроводов диаметром от 500 мм, а также продольных сварных швов (б). На рис. 10 дан комплект системы Авгур 5.2.

Функциональные возможности систем серии «АВГУР», эффективность и удобство ее использования, определяется не только свойствами ее аппаратной части, но и возможностями программного обеспечения. Основные задачи, которые решаются с помощью программного обеспечения следующие:

- автоматическая регистрация эхо-сигналов, рассеянных несплошностями, залегающими в заданном объеме объекта контроля;
- обработка зарегистрированных эхо-сигналов для получения изображения несплошностей, используя программное детектирование или различные алгоритмы когерентной обработки данных - такие как алгоритм угловых спектров, алгоритмы ПСП и эталонной голограммы;
- отображение наборов эхо-сигналов и результаты их обработки в виде изображений А, В, С и D типа и их различных сочетаний изображений; осуществление различных сервисных операций над полученными данными;
- документация результатов контроля.
- Особое внимание уделено созданию разнообразных средств анализа изображения дефектов.

Для этого предусмотрены следующие возможности:

- представление в растровой форме изображений А, В, С и D типа, в том числе любой их комбинации, например, В+С или В+D;
- анализ амплитудных и фазовых составляющих изображения;
- детальное изучение любой части изображения;
- измерение координат и размеров дефектов с помощью системы маркеров;
- автоматическое определение дефектных зон, для выполнения измерительного контроля;
- автоматическая оценка результатов контроля и формирование протокола контроля.

Так как система Авгур относится к измерительным системам, то был выполнен обширный комплекс исследований, посвященных определению реальной погрешности определения размеров дефектов. Исследования состояли в сопоставлении результатов измерений, выполненных системами серии Авгур (различными операторами), и результатами разрушающих испытаний – металлографических исследований и методом трехточечного изгиба. Исследования показали, что погрешность определения высоты дефекта составляет $\pm 1,5$ мм – в 95 % доверительном интервале, а длины (для выбранной методики контроля) составляет ± 5 мм.



а)



Рис. 9. Комплект системы Авгур 4.2



Рис. 10. Комплект системы Авгур 5.2

Диагностика деградации свойств металлов.

Для выполнения обоснованной оценки состояния объекта важную роль играет неразрушающая экспресс – диагностика структурно – механического состояния металла. Одним из основных научно и экспериментально обоснованных методов решения указанных проблем является твердометрирование узлов и деталей оборудования непосредственно в производственных и эксплуатационных условиях. Этот метод позволяет проводить экспрессную оценку фактического состояния изготавливаемой и эксплуатируемой техники через характеристики твердости, которые достаточно достоверно коррелируют с показателями предела прочности R_m и условного предела текучести $R_{p0,2}$, являющимися одними из основных расчетных характеристик материалов, входящих в нормативную документацию.

Метод твердометрии реализован в серии универсальных электронных портативных приборов ТЭМП (рис.11), разработанных в НПО «ЦНИИТМАШ» под руководством А. Б.Караева.

Твердомер ТЭМП состоит из электронного блока и датчика соединенных кабелем, а также трех элементов питания типа А-316, вставляемых в батарейный отсек корпуса электронного блока. Принцип измерения твердости прибором – динамический, основанный на определении соотношения скоростей падения и отскока ударника датчика, которое преобразуется электронным блоком в условные единицы НL. Единицы НL по соответствующему алгоритму пересчитываются микропроцессором прибора в числа твердости НВ, HRC, HV или HSD.

Прибор позволяет проводить измерения на плоских, выпуклых и вогнутых поверхностях изделий с разным радиусом кривизны.



Рис.11 Общий вид портативного электронного твердомера ТЭМП.

4. Комплексное применение методов и приборов для диагностики потенциально опасных объектов.

Реализация технологии комплексной диагностики с использованием разработанной аппаратуры была выполнена в атомной энергетике, железнодорожном и трубопроводном транспорте, где применяются интегральные методы диагностики – метод акустической эмиссии, методы ультразвуковой дефектометрии – когерентные методы и методы локальной диагностики, позволяющей оценить деградацию свойств материала контролируемого объекта в процессе эксплуатации – твердомерия.

Атомная энергетика

В атомной энергетике использование комплексной технологии диагностирования объектов, было наиболее полным: на отдельных этапах контроля выполнялся интегральный контроль с применением комплексов акустической эмиссии **A-Line 32D**; контроль дефектных изделий с определением типа и реальных параметров дефектов выполнялся системами серии **Авгур**; для измерения локальных характеристик материала контролируемого объекта использовались приборы **ТЭМП**. В результате, полученной совокупности данных было достаточно для выполнения обоснованных прочностных расчетов и определения ресурса.

Применение приборов, реализующих метод АЭ.

Два комплекса **A-Line 32D** используются в Красноярском горно-химическом комбинате: один из которых применяется для диагностики технологического оборудования; второй, модернизированный комплекс **A-Line 32D**, был подготовлен для контроля внешнего купола комбината. Для этих комплексов были разработаны уникальные специальные низкочастотные датчики.

В 2005 г. была разработана технологии проведения выходного контроля выпускаемых теплообменников АЭ методом на «Атоммаш» в г. Волгодонске.

Применение когерентных систем серии Авгур

Начиная с 1996 системы серии **Авгур** успешно применяются при эксплуатационном контроле трубопроводов различных диаметров в атомной энергетике на действующих АЭС, так и при предэксплуатационном контроле (1998-2000 гг.) на 1 блоке Волгодонской АЭС и строящемся блоке Калининской АЭС (2002).

На действующих АЭС с реакторами РБМК: Ленинградской, Курской, Смоленской АЭС основными объектами эксплуатационного контроля являлись перлитные сварные швы трубопроводов первого контура Ду 800 и аустенитные швы трубопроводов первого контура Ду 300 реактора. Работы по эксплуатационному контролю выполнялись также на АЭС с реакторами типа ВВЭР: Балаковской, Волгодонской, Калининской, Кольской, Нововоронежской АЭС. Выполнялся контроль перлитных сварных швов трубопроводов первого и второго контуров – Ду 850, Ду 200 – Ду 600 и аустенитных сварных швов Ду 400, Ду 500.

За это время были проконтролированы свыше двух с половиной тысяч сварных соединений трубопроводов ДУ- 300, два десятка швов приварки коллектора диаметров 1200 мм, свыше четырехсот сварных соединений трубопроводов ДУ- 800 и ДУ- 850, свыше пятидесяти сварных соединений трубопроводов ДУ- 400 и ДУ- 500 на различных АЭС России. Такое разнообразие объектов контроля потребовало индивидуального подхода не только в создании адаптированных методик регистрации данных, но и адаптации методов оценки параметров дефектов к конкретному объекту контроля. Некоторые результаты экспертной оценки параметров дефектов, особенно те, которые указывают на опасный для конструкции характер, сопоставлялись с данными радиографии либо разрушающим контролем с последующим микроструктурным анализом. Такие сопоставления выполнялись в НИКИЭТ, на Смоленской АЭС и Ленинградской АЭС.

Контролю подвергались швы, забракованные по результатам ручного штатного контроля. По действующей технологии они должны быть отремонтированы. Наибольший объем контроля пришелся на сварные швы трубопроводов из нержавеющей стали ДУ - 300 с внешним диаметром 325 мм.

По результатам контроля трубопроводов ДУ - 300 и выполнения прочностного анализа 94% сварных швов были возвращены в эксплуатацию без ремонта и только 6% из них были отправлены в ремонт. Причем контроль системами Авгур показал, что для ручного контроля характерна как перебраковка (около 7% забракованных швов не имела дефектов), так и недобраковка до 30% (пропуск, в том числе и опасных дефектов). В 14% сварных швов при ручном контроле были пропущены дефекты.

Похожая ситуация наблюдается и по другим категориям швов.

Одной из основных целей контроля являлось не только первичная оценка надежности сварных соединений, но также и наблюдение за параметрами дефектов, обнаруженных в прежние годы. В качестве примера на рис. 12 приведены данные по числу аустенитных сварных швов трубопроводов первого контура Ду - 300 в период 1996 – 2004 гг. Здесь различными цветами выделено число сварных соединений, подвергнутых первичному контролю и проконтролированных повторно. Заметим, что некоторые из них контролировались в течение нескольких лет.

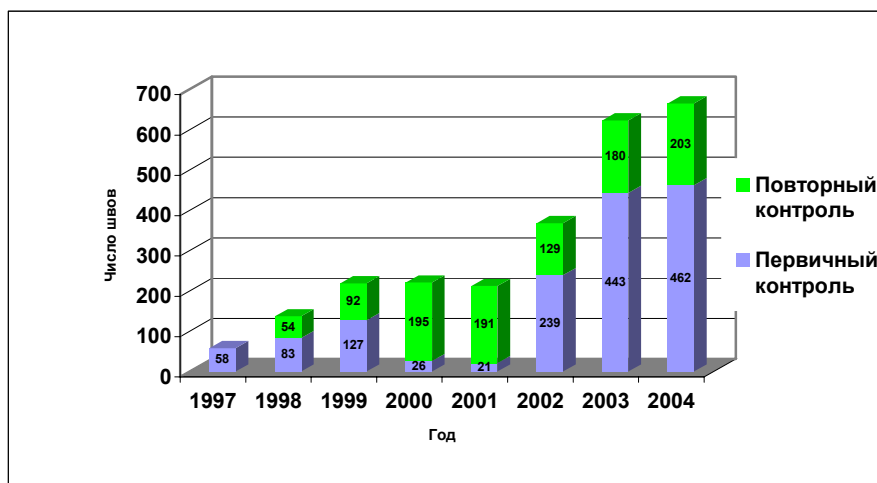


Рис. 12 Контроль аустенитных сварных швов трубопроводов ДУ – 300 первого контура реактора РБМК за период 1997 – 2004гг.

Видно, что в 1997 – 1999 гг. объем швов, подлежащих первичному контролю, увеличивался, а затем стал уменьшаться. Одновременно, начиная с 1998 г. неуклонно возрастала доля повторного контроля. Это связано с тем, что к 2000 г. все сварные швы, подозрительные на содержание дефектов, были проконтролированы системой Авгур. В частности, такой мониторинг осуществляется на Волгодонской АЭС, КуАЭС, ЛАЭС, СмАЭС. Начиная с 2002 г. Объем первично проконтролированных сварных соединений значительно возрос за счет введения в контроль сварных швов трубопроводов блоков, ранее контролировавшихся только ручным контролем.

В 1998 – 2000 гг. был выполнен обширный цикл работ по предпусковому ультразвуковому контролю сварных соединений трубопроводов первого и второго контуров 1 блока Волгодонской АЭС. Всего было проконтролировано свыше 260 сварных шва, в которых по данным штатного контроля имелись несплошности. При этом 173 сварных соединений по результатам ручного контроля были забракованы. Только незначительная часть из них по результатам дефектметрии и прочностных расчетов была отремонтирована (рис. 13).

Подчеркнем, что в соответствии с существующими нормативными документами все 173 сварных шва необходимо было отправить в ремонт, тогда как выполнение прочностных расчетов с введением информации о реальных параметрах дефектов, полученных с использованием систем серии Авгур, позволило пропустить в эксплуатацию 166 сварных швов и только 7 сварных соединений было отремонтировано. При этом пропущенные в эксплуатацию сварные швы подлежат обязательному контролю во время планово – предупредительных работ.

Анализ типов несплошностей, проведенных в забракованных штатным контролем сварных швах, показал, что в большинстве случаев они представляют небольшое смещение кромок труб (до 2,5 мм), либо незначительные провисания в корне шва.

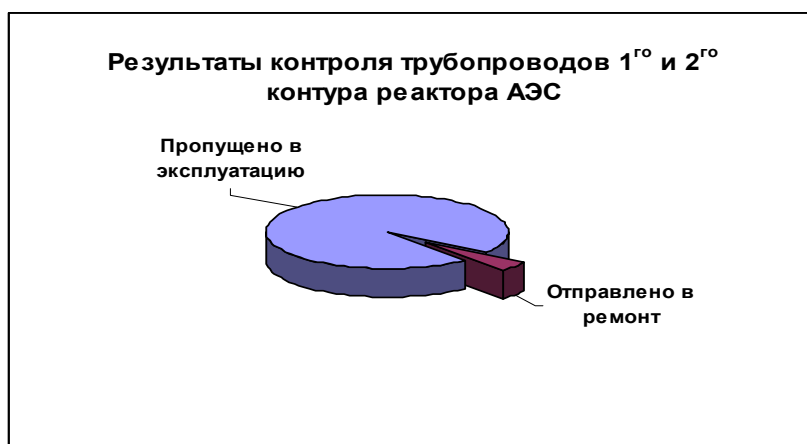


Рис. 13. Результаты контроля сварных швов трубопроводов различного диаметра на Ростовской АЭС.

Наиболее важным результатом работы можно считать сокращение объемов ремонта, при более высоком уровне надежности ультразвукового контроля. Ремонтные работы по результатам штатного УЗК потребовали бы около четырех месяцев, что привело бы к значительной задержке пуска блока.

Полученная в результате контроля полная информация об исходном состоянии сварных швов первого и второго контура реактора, хранится в виде файлов данных и изображений в архиве данных контроля. Зафиксированная картина исходного состояния позволяет следить за изменением состояния швов во время эксплуатации блока, акцентируя внимание на потенциально проблемных сварных соединениях. Полученная информация позволяет также оптимально планировать сроки и объемы эксплуатационного контроля. Начиная с 2002 г. НПЦ «Эхо+» использует системы серии Авгур для выполнения повторного экспертного контроля этих швов.

Применение приборов, реализующие диагностику структурно – механического состояния металла.

Твердомеры ТЭМП эксплуатируются на машиностроительных заводах, ремонтных предприятиях, КБ, АЭС - ОАО «Калужский турбинный завод» (турбины для подводных лодок), ГУП ПО «Севмашпредприятие» (изготовление АПЛ), ГМП «Звездочка» (ремонт АПЛ), ОКБ им. Африкантова, Армянской, Игналинской, Иранской (г. Бушер), Калининской, Кольской, Ровенской и Билибинской АЭС, Международный Центр по ядерной безопасности (при НИКИЭТ).

С помощью прибора ТЭМП-2 на Ново-Воронежской АЭС были выполнены работы по исследованию металла различных узлов оборудования пятого блока. Полученные результаты по диагностированию были учтены при оценке остаточного ресурса вышеуказанных узлов.

На ПО “Атоммаш” портативным твердомером ТЭМП были экспериментально исследованы анизотропия и неоднородность материала обечайки активной зоны штатного корпуса реактора из стали 15X2НМФАА. В результате было установлено фактическое распределение механических свойств материала по всему объему обечайки и определены зоны анизотропии и неоднородности крупногабаритной обечайки.

Трубопроводный транспорт.

Применение АЭ в нефтегазовом комплексе

Основными объектами использования метода АЭ являются магистральные трубопроводы, технологические трубопроводы, все виды резервуаров, сосуды, работающие под давлением. Наиболее широко он применяется при техническом диагностировании опасных производственных объектов, к которым относятся трубопроводы (ТП) различного назначения. Это связано с высокой производительностью метода, позволяющего за одно измерение одним прибором диагностировать участок протяженностью 1 – 2 км. На сегодняшний день выполнена диагностика более тысячи километров различных трубопроводов.

В отдельных случаях на трубопроводном транспорте целесообразен переход от периодического контроля к непрерывному контролю (мониторингу). Основными причинами перехода к мониторингу являются:

- Отсутствие доступа и затрудненный доступ. Примером таких конструкций служат трубопроводы, проложенные в труднодоступных или недоступных местах, например, непроходимые, незамерзающие болота или водные преграды большой протяженности
- Высокие скорости роста эксплуатационных дефектов и как следствие малая долговечность трубопроводов до их полного разрушения вынуждают эксплуатационников уменьшать интервалы между очередными инспекциями, что приводит к значительным материальным затратам за счет простоев оборудования и высокой суммарной стоимости работ по инспекции за время эксплуатации объекта.
- Последствия от разрушения трубопроводов могут приводить к большим материальными потерями и значительному риску для обслуживающего персонала.

На рис. 14 приведены схемы мониторинга трубопроводов с применением метода АЭ и прибора **A-Line32D** в условиях водной преграды, либо при пересечении автодороги.

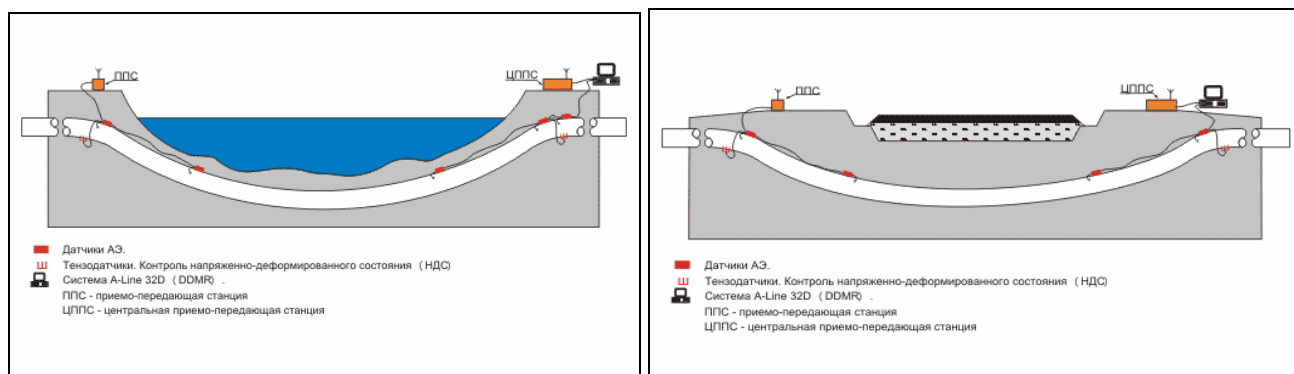


Рис. 14. Схемы применения систем комплексного диагностического мониторинга на водном переходе ТП и переходе через автодорогу.

Использование когерентных систем при контроле газопроводов

Автоматизированные ультразвуковые системы серии Авгур были использованы для контроля кольцевых сварных соединений на газопроводах ГПА, ГМК, ПУ, абсорберов и выходных коллекторов. Всего было проконтролировано 57 кольцевых сварных соединений (104 погонных метра). Все сварные соединения по результатам ручного штатного контроля имели недопустимые дефекты. По результатам контроля были определены типы и геометрические размеры несплошностей в сварных соединениях (рис. 15). На рис. 15 а приведено относительное количественное распределение типов несплошностей, обнаруженных в кольцевых сварных соединениях в результате комплексного контроля с применением систем серии Авгур. Видно, что 94% не-

сплошностей является непроварами корня и межваликовыми несплавлениями, 5% -включения, а 1% - трещины.

Данные АУЗК позволили сделать вывод о том, что большинство обнаруженных несплошностей появилось в сварных соединениях в процессе монтажа трубопровода. Однако эти несплошности являются концентраторами напряжений и могут развиваться в процессе эксплуатации.

На рис. 15 б приведено относительное количественное распределение размеров несплошностей классификация которых дана на рис. 15 а. Из этой диаграммы видно, что 54% обнаруженных несплошностей имеют длину более 20 мм, а высоту до 2 мм; 20% несплошностей имеют длину до 20 мм и высоту до 2 мм; 15% - несплошности с длиной более 20 мм и высотой более 2 мм; 11% - несплошности с длиной до 20 мм и высотой более 2 мм.

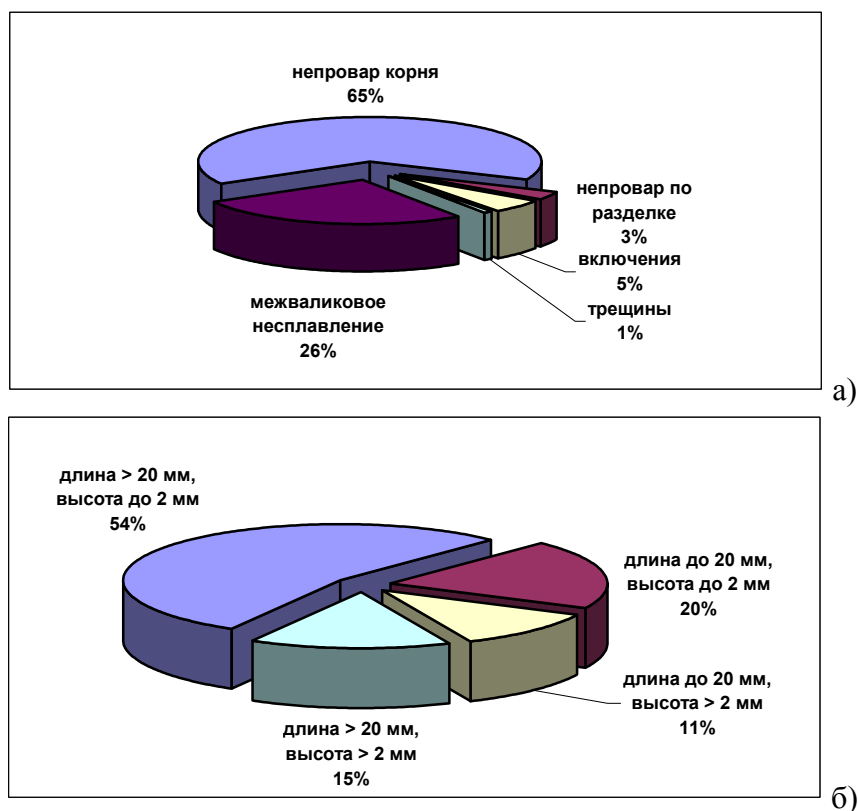


Рис. 15. Классификация по типам (а) и распределение по размерам (б) несплошностей обнаруженных при проведении контроля трубопроводов обвязки на газокompрессорных станциях Газпрома

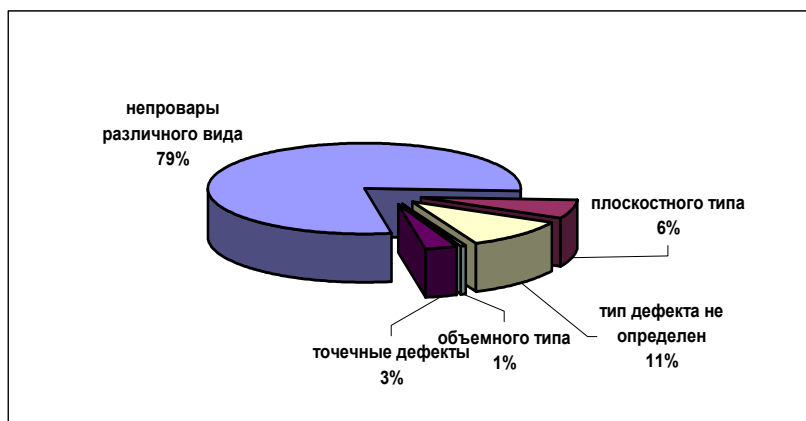
Сварные соединения, содержащие несплошности, были подвергнуты расчету на прочность. На основании сделанных прочностных расчетов даны рекомендации по дальнейшей эксплуатации проконтролированных сварных соединений.

Из 57 сварных швов, подлежащих немедленному ремонту на трех газокompрессорных станциях в 2003 г., по результатам ручного штатного контроля по методике оценке качества сварных соединений магистральных трубопроводов, был отремонтирован 1 шов, а остальные сварные швы подлежат периодическому АУЗК с различной периодичностью от полугода до 2 лет.

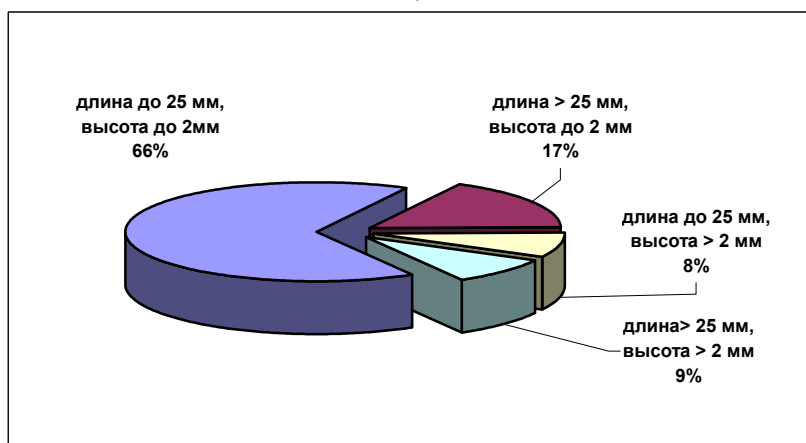
Контроль сварных соединений нефтепроводов с использованием систем серии Авгур

В 2002 г. были выполнены работы по контролю кольцевых сварных соединений трубопроводов ОАО «Транснефть» с применением комплексной технологии УЗК с использованием систем серии Авгур (рис. 16). Всего было проконтролировано свыше 220 кольцевых сварных соединений (около 600 погонных метров). В 38 сварных соединениях несплошностей не было зафиксировано. В остальных сварных соединениях (192 шва) были обнаружены несплошности. В результате этой работы также были определены типы и геометрические размеры несплошностей в проконтролированных сварных соединениях. Все сварные швы, содержащие дефекты, бы-

ли подвергнуты прочностным расчетам. Обобщенные результаты АУЗК системами серии Авгур сварных соединений нефтепровода приведены на рис. 4.6.



а)



б)

Рис. 16. Классификация по типам (а) и распределение по размерам (б) несплошностей, обнаруженных при проведении АУЗК в кольцевых сварных швах нефтепровода.

На рис. 16 а приведено относительное количественное распределение типов дефектов обнаруженных в кольцевых сварных швах нефтепровода, подвергнутых контролю с применением систем серии Авгур. Из этой диаграммы видно, что 79% обнаруженных дефектов является непроварами различного типа. 6% обнаруженных дефектов имеют плоскостной характер. 11% дефектов не имели однозначных признаков для отнесения их к какому-либо типу. В этом случае прочностной расчет проводился по наиболее консервативной оценке – предполагалось, что несплошности неустановленного типа имеют плоскостной характер (являются трещинами).

Полученные данные автоматизированного УЗК позволяют сделать вывод о том, что подавляющая часть обнаруженных дефектов (не менее 77%) появилась в сварных швах в процессе монтажа трубопровода. Однако в сварных швах также имеются опасные дефекты плоскостного типа, которые могут развиваться в процессе эксплуатации.

На рис. 16 б приведено относительное количественное распределение размеров дефектов, обнаруженных в кольцевых сварных швах того же нефтепровода. Видно, что большинство - 66% обнаруженных дефектов имеют незначительные размеры – длина не превышает 25 мм, а высота 2 мм. Также в сварных швах имеется значительное число - 17% протяженных дефектов (длина более 25 мм), высота которых не превышает 2 мм. 17% дефектов имеют высоту, превышающую 2 мм, из них являются протяженными всего 9% дефектов.

По результатам прочностных расчетов большинство сварных соединений с несплошностями (172 шва) было допущено в эксплуатацию без ограничений и их необходимо контролировать через 4 года; 16 сварных соединений допущено в эксплуатацию с ограничениями – их необходимо повторно проконтролировать через 1 год. После повторного контроля и расчёта на прочность будет установлен срок следующего контроля или выдано заключение о необходимости ре-

монта сварного шва. Один сварной шов содержал недопустимый дефект – трещину значительной длины и высоты и был отремонтирован.

Использование приборов экспресс – контроля твердости в трубопроводном транспорте

Для экспресс – контроля твердости материала трубопроводов и обечаек при их монтаже и в процессе эксплуатации использовались твердомеры серии ТЭМП.

Для оперативной оценки твердости материала труб магистральных нефте- и газопроводов, их сварных швов и, особенно, зон термического влияния был разработан специальный датчик, который стал широко использоваться при строительстве новых и технической диагностике эксплуатируемых трубопроводов.

На начало 2006 года свыше 30 предприятий нефтегазовой и теплоэнергетической отраслей успешно используют методику определения твердости, а также пределов прочности и текучести труб, реализованную на базе переносных электронных твердомеров ТЭМП.

Определение твердости, а также характеристик механических свойств наряду с определением типа, измерением координат и размеров присутствующих дефектов дает необходимые данные для выполнения расчетов остаточного ресурса газопроводов, а также выявления участки газопроводов с критическими значениями характеристик механических свойств материала.

Таким образом, в результате комплексного диагностического обследования объекта, включающего интегральные и локальные методы, ультразвуковую дефектometriю и диагностику механических свойств металлов мы получаем полную информацию об объекте. Эта информация является основой при выполнении прочностных расчетов, направленных на определение ресурса объекта. В частности комплексное диагностическое обследование трубопроводов первого контура реакторов типа РБМК и ВВЭР с прочностными расчетами и оценкой работоспособности выполняется уже свыше 8 лет.

5. Заключение

Разработанная комплексная технология неразрушающего контроля основного металла и сварных соединений трубопроводов включает в себя комплекс методов и средств, обеспечивающих осуществление контроля с использованием интегральных методов оценки состояния объекта (акустической эмиссии, волноводных методов); локальных методов (традиционной дефектоскопии и когерентных методов дефектometriи), позволяющих определить тип выявленных дефектов, измерить их координаты и размеры; экспресс – контроля твердости объекта, позволяющего оценить степень деградации свойств металла объекта. Описаны современные приборы, позволяющие реализовать на практике комплексную диагностику:

- по акустической эмиссии: системы модульного типа Лель/A-Line32D(DDM), обладающие повышенной помехозащищенностью и позволяющие передавать АЭ данные по радиоканалу без прокладки кабельных линий;
- по волноводным и локальным методам: автоматизированные системы Авгур 5.5 для диагностики магистральных и технологических нефте и газопроводов, обеспечивающие автоматическое выделение и образмеривание дефектов и протоколирование результатов контроля;
- по ультразвуковой дефектometriи: системы Авгур 4.2 и Авгур 5.2, предназначенные для автоматизированной диагностики сварных соединений трубопроводов и обеспечивающие трехстадийную диагностику промышленных объектов (поиск дефектов, измерение их реальных параметров, оценка остаточного ресурса);
- по электронно-динамическим методам: твердомеры серии ТЭМП с улучшенными точностными и эксплуатационными характеристиками, обеспечивающими экспресс – диагностирование объектов в условиях эксплуатации для оценки степени деградации механических свойств оценки остаточного ресурса.

В таблице 2 приведено сочетание различных методов и приборов, примененных (или рекомендованных к применению), составляющих комплексную технологию диагностики наиболее важных потенциально опасных объектов. Широкое применение методов и приборов позволяет

принимать обоснованные решения о дальнейшей эксплуатации, существенно повысить эксплуатационную надежность, свести к минимуму ущербы, связанные с авариями и катастрофами.

Таблица 2.

№ п/п	Метод/прибор (система) Объекты	АЭ Лель/A-Line32D (DDM)	Волноводные	Локальные	Когерентные Авгур 4.2, Авгур 5.2, Авгур 5.3	Твердомеры ТЭМП
			автоматические Авгур 5.5	автоматические Авгур 4.2, Авгур 5.2, Авгур 5.3		
1.	Нефтегазопроводы магистральные и технологические	+	+	+	+	+
2.	Сосуды, работающие под давлением для нефти и газа	+	⊕	⊕	+	+
3.	Колесные пары железнодорожные	-	-	+	+	+
4.	Рельсы железнодорожные	-	-	⊕	⊕	+
5.	Цистерны железнодорожные	+	-	⊕	⊕	+
6.	Сварные швы 1 и 2 контуров АЭС	-	-	+	+	+
7.	Сварные швы трубопроводов ТЭС	+	-	⊕	⊕	+
8.	Международные космические аппараты (Мир, МКС, модули Квант и др.)	+	-	-	-	+
9.	Международный проект «Исследовательский термоядерный реактор (ИТЕР)	-	-	+	+	⊕
10.	Емкости для хранения нефтепродуктов	+	⊕	⊕	⊕	+
11.	Общее количество выпущенных приборов, шт.	250	3	42	42	4800

Примечание: системы Авгур 4.2, 5.2, 5.3 имеют два режим работы - локальный поисковый и когерентный измерительный;

+ - примененные методы и приборы; ⊕ - рекомендуемые к применению методы и приборы; - не применяемые или не рекомендуемые к применению методы и приборы.