

## Лекция 20

### Пример организации и проведения диагностика конструкций и оборудования ОИАЭ

Проиллюстрируем реализацию основных положений программы акустико-эмиссионной диагностики на примере обследования нескольких сварных швов патрубков температурного контроля ТК верхнего блока реактора ВВЭР-440 и швов патрубка Ду-500 корпуса этого реактора с переходной втулкой главного циркуляционного трубопровода ГЦТ.

**Характеристика диагностируемых объектов. Главные циркуляционные трубопроводы Ду-500** с размером труб 560x33 мм изготовлены из сталей 08X18H12T — блоки и 08X18H10T — колена. Трубы поставлялись после термической обработки, включающей аустенизацию при температуре 1150 °С с охлаждением в воде и последующий отпуск при 850 °С в течение 2 часов. Сборка и сварка трубных блоков проводилась в соответствии с конструкторской документацией и техническими требованиями по сварке.

Сварные соединения главных циркуляционных трубопроводов Ду-500 относят к I категории. Сварные швы этой категории должны быть подвергнуты 100 %-му дефектоскопическому контролю в заводских условиях после изготовления отдельных элементов трубопроводов, а также на АЭС после монтажа их в единую сеть ГЦТ.

В период эксплуатации назначение объемов и периодичности инспекционных проверок качества соединений, а также применяемые средства дефектоскопии определяются проектной и технологической документацией.

Результаты комплексных материаловедческих исследований образцов-свидетелей показали, что при эксплуатации в течение  $10^5$  ч и старении при 450°С в течение 1500 ч, что соответствует дополнительной наработке  $2,5 \cdot 10^5$  ч, происходит изменение механических свойств металла сварных соединений — ударной и пластической вязкости разрушения, сопротивления малоциклового усталости, циклической трещиностойкости, стойкости против межкристаллитной коррозии. Наиболее опасным является охрупчивание металла шва, проявляющееся в снижении ударной вязкости.

Механические свойства при растяжении в меньшей степени, чем ударная вязкость и вязкость разрушения, отражают локальные изменения в металле сварки. Несмотря на существенное понижение пластических свойств металла шва, общий уровень пластичности остается достаточно высоким. Измерения локальной деформации в отдельных зернах показали неоднородность ее распределения, что связано с различным размером зерен. Внутри крупно-

го зерна локальная деформация составляла 8,5 %, а вблизи границ и в мелких зернах — 14 %. При этом возникают заметные локальные перенапряжения, что, в свою очередь, может привести к образованию и росту микротрещин. Для металла сварного шва установлено увеличение скорости роста усталостных трещин. Аналогичные данные получены и при малоцикловых испытаниях.

Микроструктура около шовной зоны характеризуется аустенитной неравновесной структурой с выделением преимущественно по границам зерен карбидов хрома. Внутри зерен наблюдается множество линий скольжения, следов значительной пластической деформации. Микроструктурный анализ, проведенный с целью обнаружить межкристаллитную коррозию, показал присутствие коррозионных трещин на расстоянии 0,3–1 мм вблизи линии сплавления в области сварного шва.

Данные материаловедческих испытаний указывают, что как в основном металле, так и в сварных швах по границам зерен возможно зарождение и развитие дефектов.

**Патрубки температурного контроля.** Патрубки ТК верхнего блока реактора, изготовленные из стали X18H22B2T2, служат для вывода жгутов проводки термоэлектрических преобразователей. Радиографический контроль показал, что в процессе изготовления в защитной рубашке в наплавленном металле шва образовались допустимые шлаковые включения. В сварном шве вставки также встречаются цепочки таких включений со стороны фланца в области верхней границы соединения. Трещины в сварных швах отсутствовали, поэтому конструкция была допущена к эксплуатации.

Для слежения за возможным развитием дефектов в течение всего срока эксплуатации раз в четыре года проводился визуальный, капиллярный и радиографический контроль этих соединений, предусмотренный программой технического обслуживания. Так как по результатам дефектоскопического контроля трещины обнаружены не были, срок эксплуатации конструкции каждый раз продлевали на очередной межинспекционный период.

Однако после выработки ресурса для обоснованного его продления, помимо прочностных расчетов конструкций с учетом изменения свойств металла, необходимо убедиться в отсутствии развивающихся дефектов в сварных швах и металле конструкций. Для этого проведена акустико-эмиссионная диагностика сварных швов патрубков ТК верхнего блока реактора и патрубка Ду-500 корпуса реактора и переходной втулки с ГЦТ.

**Схема расположения оборудования при диагностике сварных швов ГЦТ.** Для крепления датчиков АЭ на трубопроводе из аустенитной стали использовались резиновые бинты-жгуты, что значительно упростило процедуру фиксации датчиков. Такой способ за-

крепления возможен только при холодной опрессовке ГЦТ. В других случаях для обеспечения пожарной безопасности применяют специальные крепежные устройства.

Радиационная обстановка в зоне контроля требует, чтобы аппаратура была защищена от воздействия ионизирующего излучения, а ее конструктивное исполнение должно обеспечить возможность проведения дезактивации после окончания обследования.

Способы размещения датчиков на ГЦТ при линейной и плоскостной схемах локализации сигналов показаны на рис. 1 и 2. Компьютерные развертки участков контроля для этих схем представлены на рис. 3 и 4.

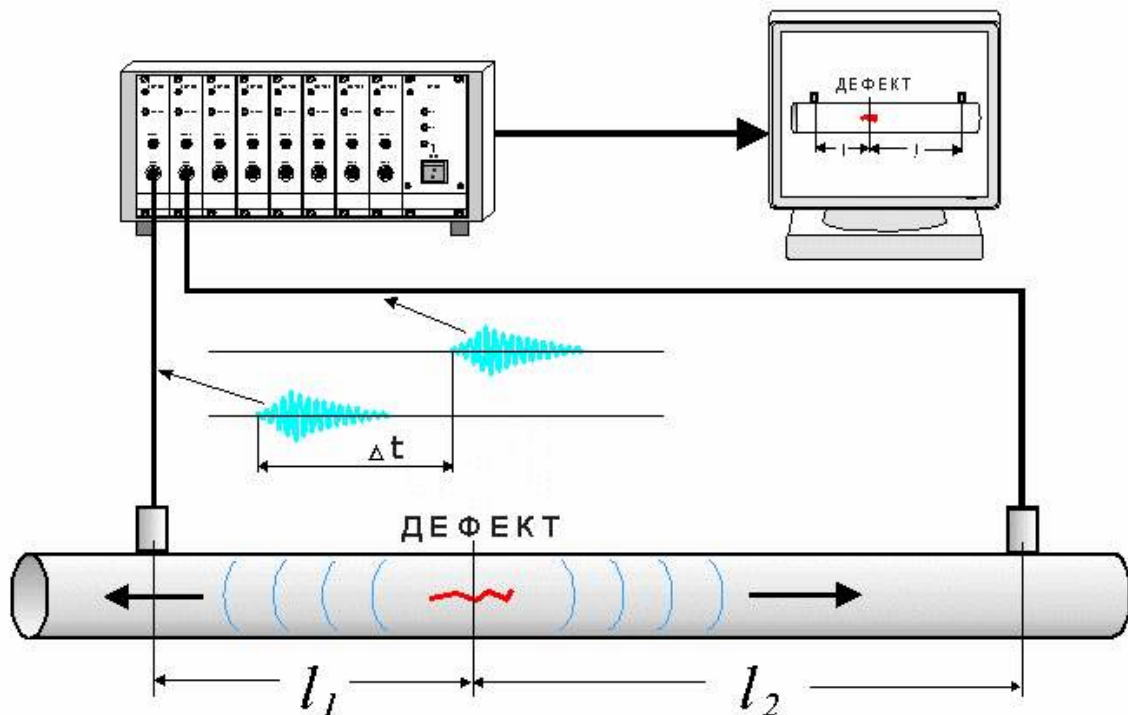


Рис. 1. Схема расположения группы датчиков для контроля, как сварного соединения, так и основного металла трубопровода, при реализации линейной схемы локализации сигналов АЭ

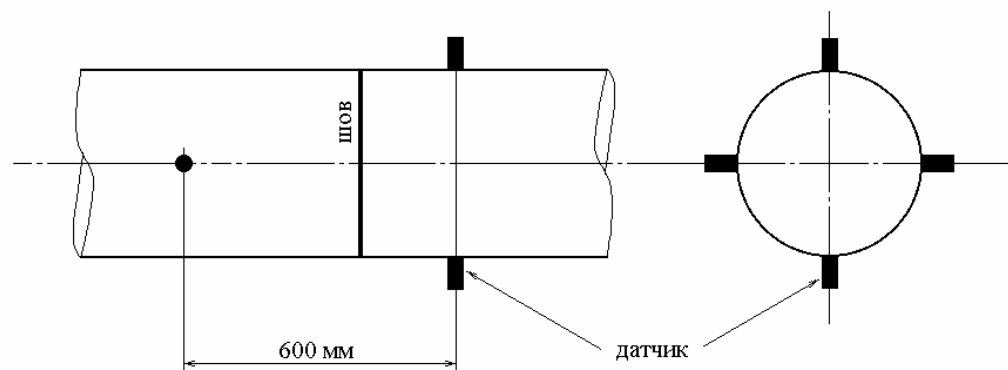


Рис. 2. Схема расстановки четырех датчиков для контроля сварного шва трубопровода Ду-500 АЭС с ВВЭР-440 при реализации плоскостной схемы локализации сигналов АЭ

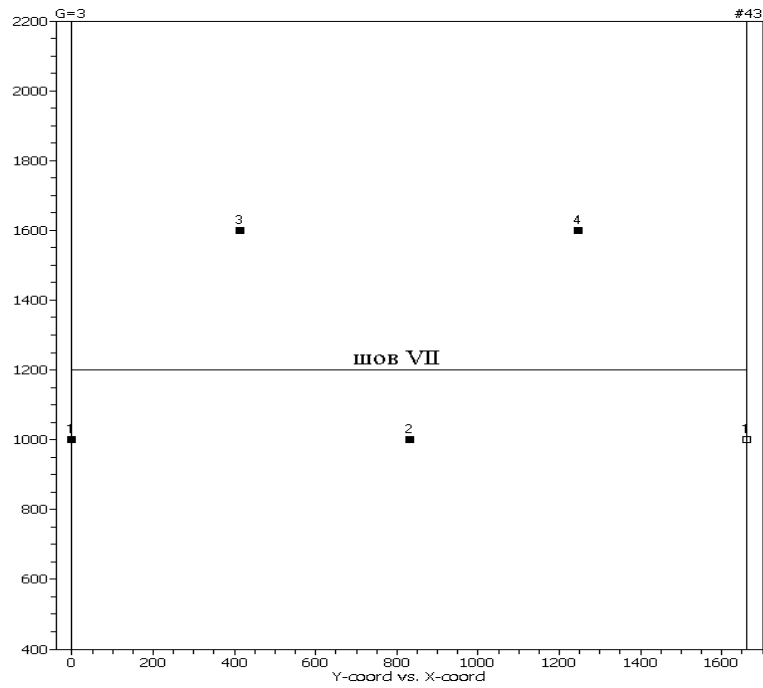


Рис. 3. Компьютерная развёртка сварного шва, на которой цифрами показано расположение датчиков, образующих плоскостную локационную группу

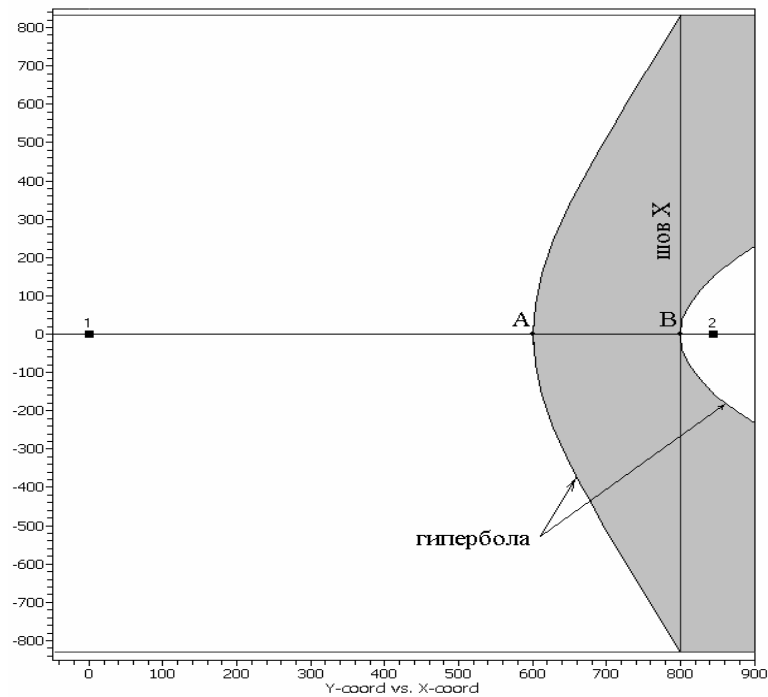
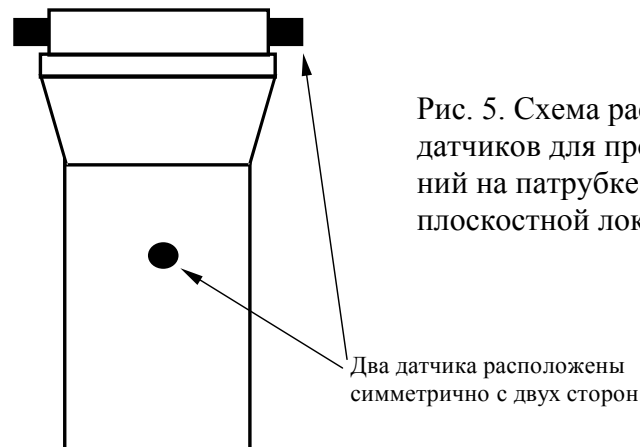


Рис. 4. Компьютерная развёртка сварного шва, на которой указано положение датчиков, образующих линейную локационную группу (серым цветом показана зона неопределенности, появляющаяся при использовании линейной локации)

**Схема расположения датчиков оборудования при диагностике сварных швов патрубков ГЦТ.** Поскольку объект контроля при гидравлических испытаниях разогревался до 200°С, использовались термостойкие преобразователи, способные выдерживать температуру до 250°С. Стабильность акустического контакта датчиков с контролируемым объектом обеспечивалась за счет применения высокотемпературной силиконовой смазки. С помощью жаропрочных электрических кабелей предусилители сигналов были вынесены из зоны высокой температуры на расстояние, где температура не превышала 70°С. Контрольноизмерительная аппаратура имела защиту от ионизирующего излучения, а ее конструктивное исполнение допускало возможность дезактивации после завершения измерений.

При определении координат источников АЭ-излучения использовалась плоскостная локационная схема (рис. 5). Расстояние между датчиками невелико — около десяти сантиметров, поэтому применение линейной и триангуляционной схем нецелесообразно. Они не позволяют добиться необходимой точности измерений координат источников акустического излучения и, как следствие, провести их достоверную классификацию.



Успех при определении местоположения источников АЭ-сигналов в значительной мере зависит от исключения ложных сигналов, появляющихся при многократных отражениях волн от границ контролируемого объекта и их трансформации, то есть преобразования одних типов волн в другие, например продольных волн в поперечные, релеевские или нормальные волны.

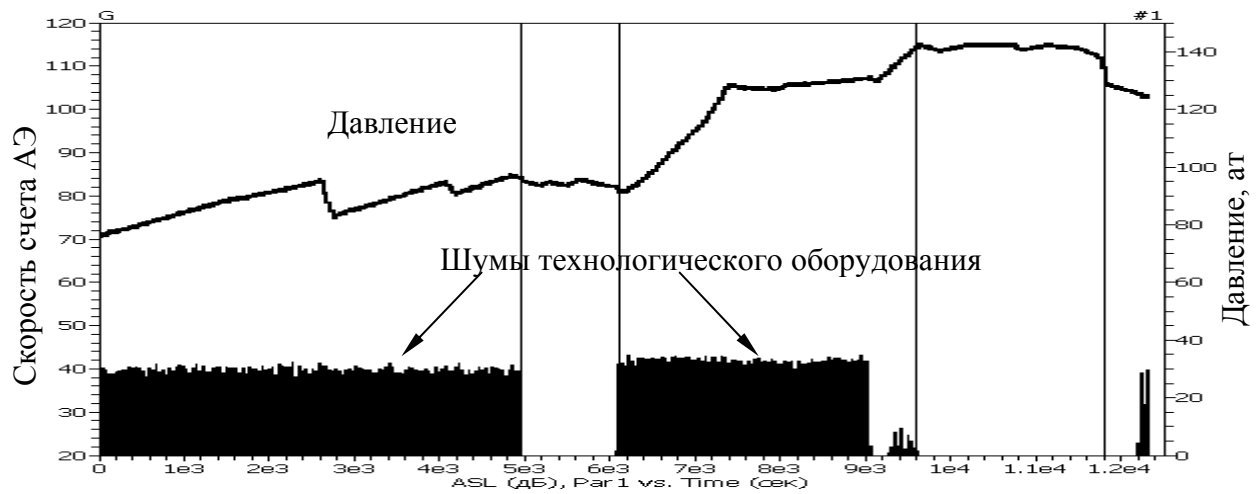
Ложные сигналы отсекались следующим образом. Патрубки ГЦТ имеют небольшие размеры, и датчики АЭ находятся на близком расстоянии друг от друга и зоны сварки (рис. 5). При таком расстоянии затухание и дисперсия скорости упругих волн практически не влияют на форму регистрируемых АЭ-сигналов, источники которых расположены в сварном соединении. Поэтому при определении координат источников в расчетной программе использовалось значение скорости «самой быстрой» продольной волны в материале патрубков

—  $5,5 \cdot 10^3$  м/с при температуре испытаний. Это позволило отстроиться от ложных сигналов, поступающих на датчики со значительной задержкой.

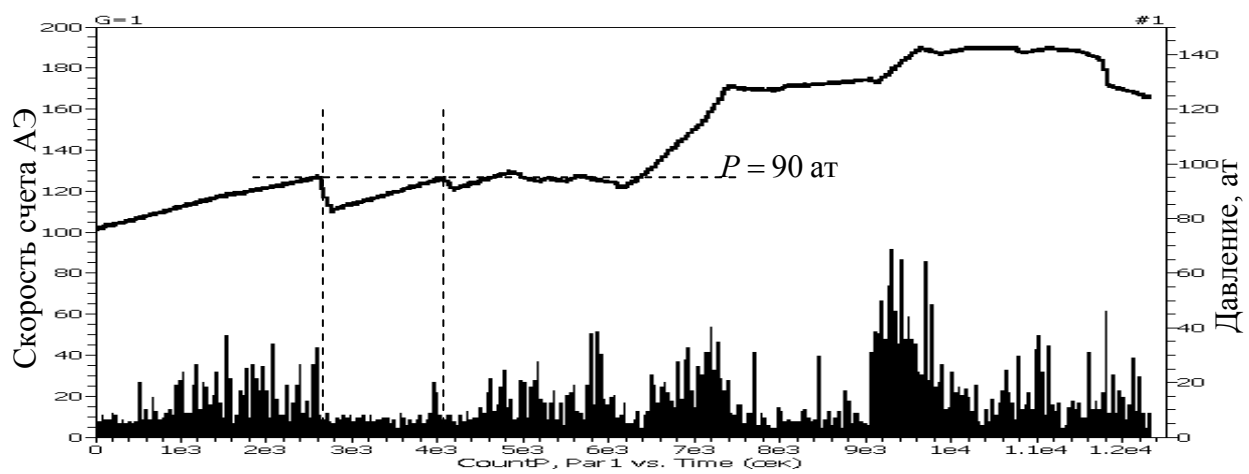
**Результаты АЭ-диагностики.** Акустико-эмиссионное обследование проводилось во время проверки оборудования первого контура реактора на плотность. Оборудование нагружалось внутренним давлением теплоносителя до максимального давления 140 ат. Данные регистрировались, как во время повышения давления, чтобы оперативно прекратить испытания, если обнаружатся катастрофически активные источники АЭ, так и при поддержании давления на уровнях 90 и 140 ат. Когда давление достигало этих значений, главный циркуляционный и дожимные насосы отключали. И уже при выключенных насосах, в отсутствие технологических шумов, проводили идентификацию источников АЭ и определяли их местоположение. На рис. 6 показаны уровень технологических шумов при повышении давления в ГЦТ Ду-500; скорость счета АЭ в течение всего времени испытаний; а также скорость счета АЭ, зарегистрированной во время остановки насосов, когда давление поддерживалось на заданных уровнях (соответствующие интервалы времени указаны сплошными вертикальными линиями). На основе анализа параметров последней рассчитывали координаты источников АЭ-излучения и оценивали их степень опасности.

Если проанализировать данные записи АЭ в течение всего времени испытаний (рис. 6б) можно обнаружить проявление эффекта Кайзера. Как видно из графика, давление в диагностируемом контуре из-за переключения насосов нагнетается неравномерно. Более того, в каких-то временных промежутках оно может даже уменьшаться, например, в течение временного интервала, отмеченного на рис. 6б штриховыми линиями.

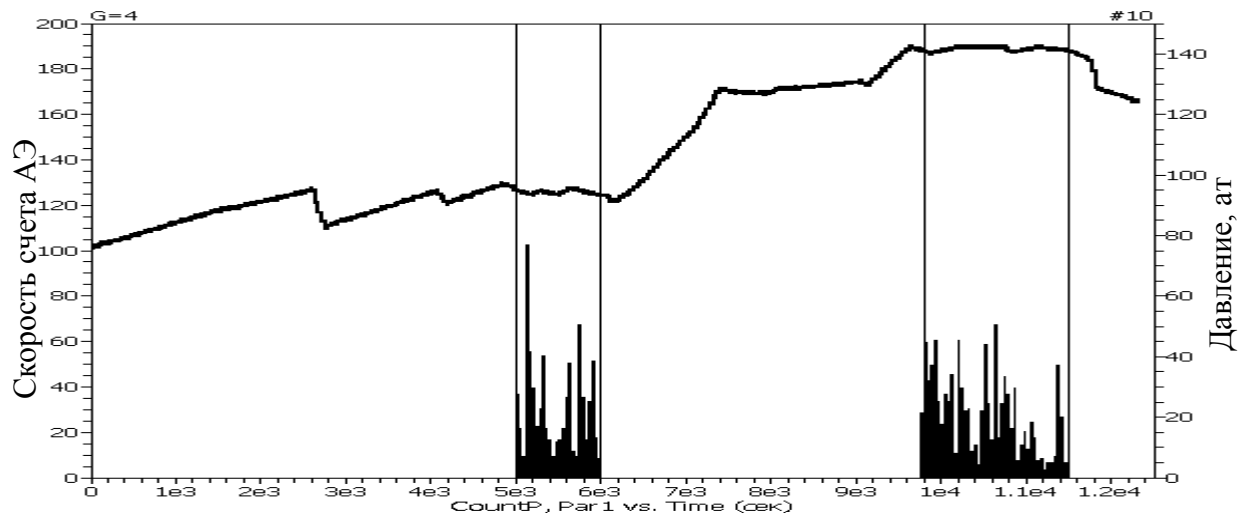
Из диаграммы видно, что уменьшение нагрузки влечет за собой резкое снижение интенсивности АЭ, уровень которой восстанавливается, как только давление в контуре превысит соответствующее значение, достигнутое перед его снижением.



*a*



*б*



*в*

Рис. 6. АЭ и технологические шумы при проверке оборудования первого контура на плотность: *a* — уровень технологических шумов при повышении давления в ГЦТ Ду-500; *б* — АЭ, зарегистрированная при повышении давления в ГЦТ Ду-500, уровень технологических шумов снижен аппаратурными и программными средствами; *в* — АЭ, зарегистрированная при выдержке давления на уровнях 90 и 140 ат при отключенных насосах

На рис. 7 приведена компьютерная развертка диагностируемого участка патрубка ГЦТ Ду-500, содержащего два сварных соединения. На схеме указано положение датчиков и местонахождение источников акустического излучения.

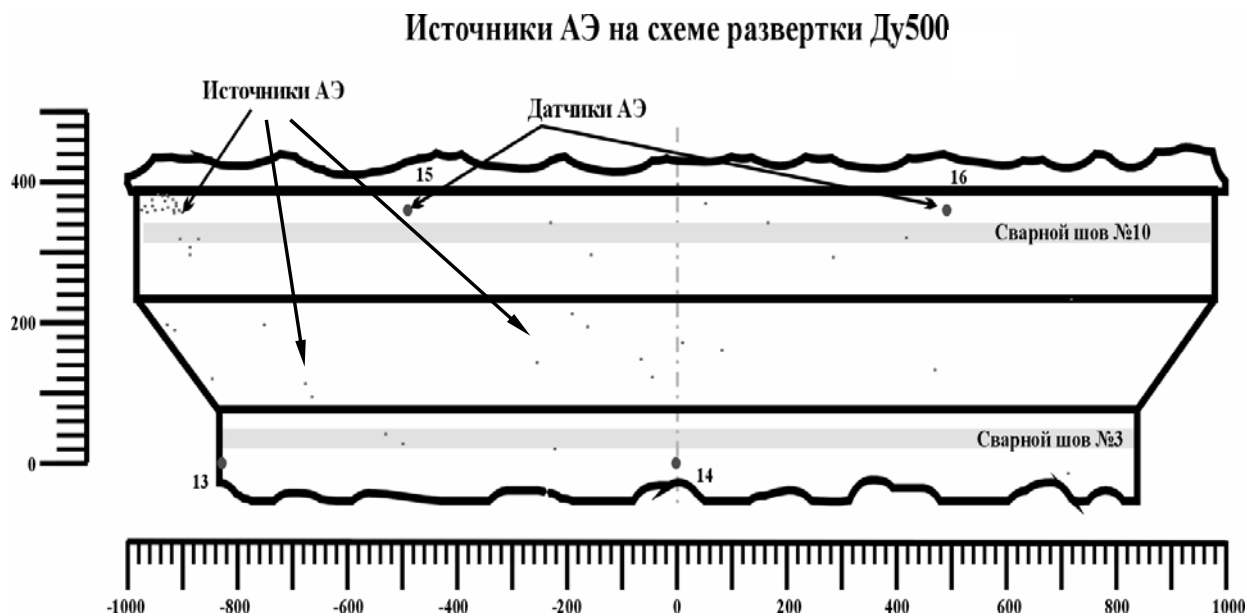


Рис. 7. Компьютерная развертка участка ГЦТ Ду-500 с двумя сварными швами № 3 и № 10 (кружки — датчики, точки — источники АЭ)

Всего при выдержке давления на уровнях 90 и 140 ат зарегистрировано 53 источника. Из них девять источников в сварном шве № 10 и околошовной зоне и три источника — в сварном шве № 3 и его околошовной зоне. Другие источники находятся вне зон сварных соединений. Обнаружен кластер из 20 источников акустических сигналов (см. верхнюю левую часть схемы на рис. 7).

Сравнение параметров АЭ-сигналов, зарегистрированных при выдержке давления на разных уровнях, показало, что развитие обнаруженных источников не происходит, а характеристики амплитудного распределения источников, согласно классификации, позволяют идентифицировать их как источники 1 класса.

На рис. 8 приведена компьютерная развертка патрубка ТК верхнего блока реактора. В верхней части рисунка приведена развертка сварного шва, разбитая на зоны, в которых отмечены шлаковые включения, обнаруженные при радиационном контроле.



### Источники АЭ на схеме развертки ТК №2

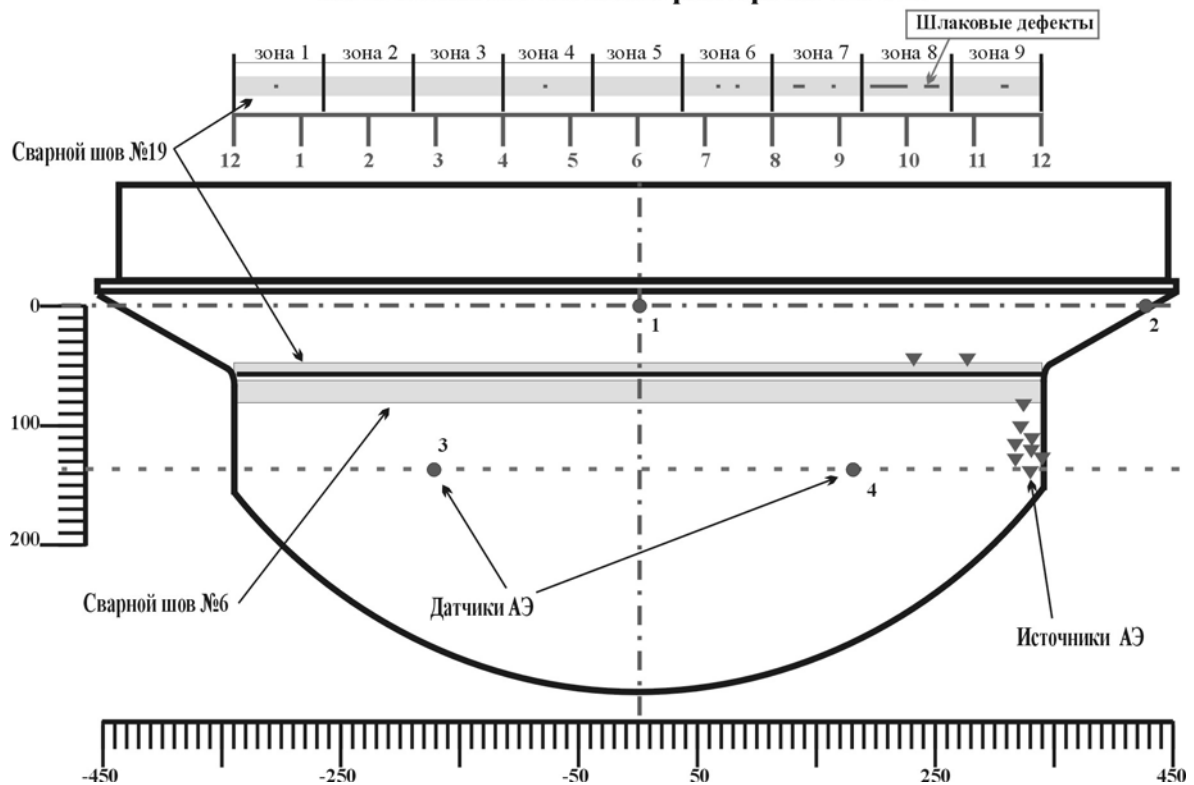


Рис. 7. Компьютерная развертка участка патрубка температурного контроля верхнего блока реактора (кружки — датчики, треугольники — источники АЭ)

При повышении нагрузки в сварном шве № 19 было зарегистрировано два источника АЭ-сигналов, излучающих небольшое количество (единицы) импульсов. Эти источники связаны со шлаковыми включениями в 8 зоне сварного шва (см. рис. 7). При выдержке давления на разных уровнях развития источников не наблюдалось.

Интенсивность всех источников была крайне незначительна, а параметры амплитудного распределения АЭ-сигналов позволили отнести обнаруженные источники к 1 классу.

Завершающим этапом измерений является повторная проверка АЭ-датчиков. Ее цель — убедиться, что во время диагностического обследования датчики не потеряли свою работоспособность и полученным данным можно доверять. Проверка проводилась путем сравнения частотных спектров, регистрируемых датчиками до начала проведения диагностики и по ее завершению. В качестве источников использованы широкополосные шумы технологического оборудования реактора. Для примера на рис. 9 приведены частотные спектры сигналов двух датчиков, установленных на патрубках ГЦТ Ду-500 и ТК № 2 верхнего блока реактора.

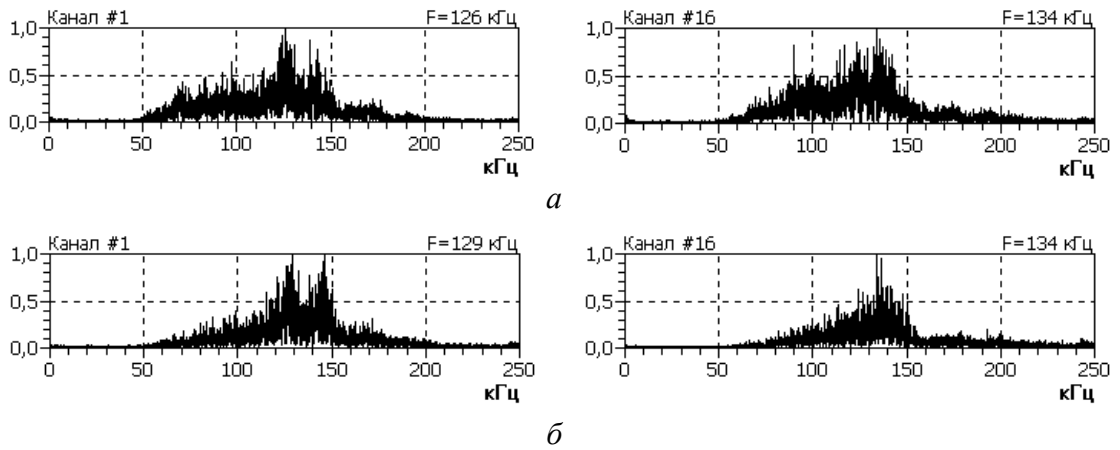


Рис. 9. Частотные спектры технологических шумов, регистрируемых датчиками, до (а) и после (б) проведения диагностических работ

Сравнение параметров спектральных плотностей сигналов датчиков, показал, что за время диагностического обследования они сохранили свою работоспособность. Небольшое различие в чувствительности на отдельных частотах, обусловлено снижением уровня шума из-за отключения нескольких насосов на этапе постдиагностических измерений.