

В.А. КОБЗЕВ, канд. техн. наук,
В.Н. СТОГНИЙ, ОАО «УкрНИИхиммаш», г. Харьков, Украина,
Г.В. РОЗОВ, А.И. ЛОТОРЕВ, Г.А. КАЧКИН, И.А. ГУКОВ,
А.В. СНЕЖКО, ЗАО «ЛИНИК», г. Лисичанск, Украина

АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ РЕАКТОРА С ВНУТРЕННЕЙ ПЛАКИРОВКОЙ

На прикладі проведення акустико-емісійного (АЕ) контролю реактора проаналізовано проблеми, пов'язані з ухваленням рішення спеціалізованими організаціями про стан металу посудини після тривалої експлуатації. Проілюстрована дієвість методу АЕ, стабільність і точність результатів контролю АЕ параметрів на прикладі кількох АЕ випробувань із застосуванням апаратури АЕ різних типів. Визначено недоліки діючих в Україні нормативних документів, пов'язаних з використанням методу АЕ.

На примере проведения акустико-эмиссионного (АЭ) контроля реактора проанализированы проблемы, связанные с принятием решения специализированными организациями о состоянии металла сосуда после длительной эксплуатации. Проиллюстрирована действенность метода АЭ, стабильность и точность результатов контроля АЭ параметров на примере нескольких АЭ испытаний с применением аппаратур АЭ разных типов. Определены недостатки действующих в Украине нормативных документов, связанных с использованием метода АЭ.

The example of acoustic emission (AE) monitoring of the reactor analyzed the problems associated with the decision by the specialized organizations of the state of the metal vessel after prolonged use. Illustrated the validity of the method of AE, stability and accuracy of testing results of AE parameters on the example of several of AE testing using instruments of different types of AE. Drawbacks of the current Ukrainian laws and documents relating to the use of the method of AE.

Для обеспечения бесперебойной и безаварийной работы технологического оборудования, отработавшего проектный ресурс, необходимо регулярно проводить работы по его диагностированию [1]. На нефтехимических предприятиях, как правило, эти работы проводятся в период остановки производства для осуществления планового ремонта. Сроки проведения ремонтных работ, составной частью которых являются работы по диагностированию, относительно небольшие, поэтому диагностирующие организации с целью обеспечения качества диагностического контроля должны использовать в своей работе различные взаимодополняющие друг друга методы обследования, стараясь получить результат о техническом состоянии всего ме-

талла сосуда или аппарата, испытывающих воздействие высоких механических напряжений при рабочих и испытательных нагрузках, на фоне воздействия на металл повышенной температуры, агрессивной среды.

Наиболее оптимально задача диагностирования оборудования решается на ЗАО «ЛИНИК», где цикл диагностирования практически для каждой единицы технологического оборудования заканчивается испытанием пробным давлением с контролем металла оборудования методом акустической эмиссии (АЭ). Использование метода АЭ на завершающей стадии диагностического обследования позволяет дополнительно провести 100 % контроль качества выполненного ремонта и качества предварительного диагностирования металла методами неразрушающего контроля.

При положительных результатах полного цикла диагностирования с применением акустической эмиссии в ходе испытания пробным давлением службы надзора за безопасной эксплуатацией оборудования получают взаимодополняющий набор аргументов о возможности безаварийной эксплуатации: после предварительного контроля стандартными методами неразрушающего контроля, после проведения контроля по результатам ремонта, после успешного проведения испытаний пробным давлением с АЭ контролем, когда в металле не обнаружены зоны повышенной акустической активности.

Если в результате испытания пробным давлением с АЭ контролем в металле обследуемого объекта будут обнаружены области повышенной акустической активности, то после определения координат этих областей в них производят дополнительное обследование методами неразрушающего контроля. При обнаружении дефектов производится дополнительный ремонт обследуемого объекта (сосуда, трубопровода и т.д.).

Если после дополнительного обследования металла в зонах повышенной акустической активности дефекты не обнаружены, то с целью определения причин повышения акустической активности проводится анализ побочных факторов (артефактов), сопутствующих испытанию.

В качестве побочных факторов может быть трение или удары о поверхность металла объекта элементов конструкции внутренних или внешних устройств, инициированные воздействием ветра, падающих капель воды, вибрацией объекта испытания или испытательной среды.

Повышение акустической активности может происходить вследствие возникновения в ходе испытания пробным давлением течей во фланцевых соединениях из-за некачественно произведенного уплотнения.

Обычно, такого рода артефакты АЭ выявляются визуально и, по возможности, устраняются перед испытанием или даже в ходе его проведения. При этом из общего времени испытания исключается та его часть, которая была затрачена на устранение причин возникновения АЭ в металле, не относящихся к разрушению.

Кроме визуального способа выявления артефактов в практике АЭ контроля нередко используются способы, учитывающие закономерности процесса разрушения металла и формирования при этом физических параметров сопутствующей АЭ. Обобщенно процессы устранения ложной составляющей АЭ на уровне физических параметров именуется как «фильтрация» и обычно проводятся после завершения испытания на стадии постобработки результатов АЭ контроля.

Фильтрация АЭ информации может быть проведена по любому из зарегистрированных в ходе испытания параметров. Необходимость фильтрации параметров АЭ определяется условиями проведения АЭ контроля, а также специфическими требованиями по ограничению величин некоторых параметров АЭ, накладываемых требованиями нормативных документов на АЭ контроль определенных объектов.

Такой вид фильтрации может быть использован в ходе АЭ контроля большого количества однотипных объектов, при испытании которых опытным путем были получены данные о необходимости формировать выводы АЭ контроля не по всей базе зарегистрированных параметров АЭ, а по той ее части, которая ограничивается определенными диапазонами.

В ходе практики периодического диагностирования разнотипных сосудов и аппаратов нами разработан алгоритм фильтрации по времени нарастания переднего фронта АЭ импульса и его длительности [2].

Такая фильтрация позволяет максимально учесть те сигналы АЭ, которые были сформированы в ходе разрушения металла или обозначили имеющиеся трещины, заполненные продуктами коррозии.

При проведении испытания трещины раскрываются с разрушением заполняющих их продуктов коррозии.

Наиболее характерным примером проведения АЭ контроля, по результатам которого нам пришлось в кратчайшие сроки принимать неординарные решения, не приведшие к срыву графика пуска оборудования после ремонта, было испытание реактора Р-201.

Реактор Р-201 был изготовлен на Кротовопольском машиностроительном заводе в г. Брно, ЧССР в 1983 г, а с 1986 г. пущен в эксплуатацию на Лисичанском нефтеперерабатывающем заводе.

Рабочая среда реактора – дизельное топливо с примесью водорода при рабочем давлении $46,2 \text{ кг/см}^2$ и рабочей температуре $450 \text{ }^\circ\text{C}$.

Испытание пробным давлением для таких рабочих условий должно проводиться при внутреннем давлении $59,8 \text{ кг/см}^2$.

Габаритные размеры реактора: высота корпуса сосуда 8100 мм (между сварными швами приварки днищ); внешний диаметр: 3600 мм; высота днищ 1102 мм.

Объем внутренней полости составлял $97,2 \text{ м}^3$. Материал стенки реактора сталь 15121.g (аналог стали 12ХМ) толщиной 92 мм с внутренней наплавкой полос из нержавеющей стали 23/ПЕ общей толщиной 4,5 мм (ширина полос 60 мм, толщина – 0,5 мм).

Таким образом, внутренняя плакировка реактора состояла из ~ 9 слоев наплавленного металла.

Для проведения оптимизации технологического процесса одной специализированной организацией был произведен перерасчет рабочих параметров и теоретически показано, что реактор сохранит работоспособность при рабочем давлении 55 кг/см^2 и рабочей температуре $500 \text{ }^\circ\text{C}$, при этом испытательное давление должно быть 110 кг/см^2 .

Эти параметры были приняты за основу при проведении гидроиспытания реактора с АЭ контролем.

АЭ контроль в ходе гидроиспытания проводился после завершения обследования реактора методами неразрушающего контроля, в результате которого дефекты в металле и плакирующем слое не были обнаружены.

В работе использовались 8 каналов модульной системы АЭ А-Line 32D производства ООО «ИНТЕРЮНИС».

Гидроиспытания проводились в соответствии с требованиями НПАОП 0.00-1.07-94 [3] и с учетом рекомендаций ДСТУ 4046 [1] и ДСТУ 4227 [4] по проведению АЭ контроля в ходе испытаний сосудов пробным давлением.

АЭ контроль предполагалось осуществить в пределах от 20 кг/см^2 до 110 кг/см^2 с остановками нагружения при теоретически рассчитанном рабочем давлении $P_1=55 \text{ кг/см}^2$ (10 мин) и максимальном давлении испытания $P_2=110 \text{ кг/см}^2$ (5 мин). Однако, при работе аппаратуры АЭ контроля в режиме прослушивания шума без подъема давления, шум достигал 60 дБ (в то

время, как на большинстве испытанных нами сосудов уровень шума системы сосуд-аппаратура АЭ не превышал 40 дБ).

Убедившись, что источником такого шума не являются возможные внешние шумы, наводимые на корпус реактора (механические, электромагнитные и т.д.), было принято решение продолжить испытания.

В результате последовательного подъема давления до 55 кг/см^2 , выдержки 11 мин, а затем подъема давления до 75 кг/см^2 было принято решение остановить испытание для выяснения причин полученной локационной АЭ картины.

К этому моменту было зарегистрировано 1652 АЭ импульса, представленная на рис. 1 их совокупность соответствовала 4 классу по амплитудному критерию.

В соответствии с АЭ локационной картиной большинство локаций были выстроены в горизонтальные линии, параллельные сварным швам приварки днищ к корпусу, что соответствовало направлению наплавки полос плакировки.

Кроме того, основная масса АЭ локаций располагалась выше опорного кольца реактора, которое, по-видимому, служило дополнительным усилением прочности этой части корпуса, снижая степень деформации металла, а значит и АЭ процессов.

Здесь следует учесть две важные детали.

Во-первых, на рис. 1 представлена АЭ информация предварительно подвергнутая фильтрации по схеме, приведенной в работе [2] (длительность АЭ импульсов не превышала 100 мкс, а время нарастания было не больше 20 мкс). Поэтому число зарегистрированных импульсов АЭ в исходном состоянии было значительно больше.

Во вторых, в соответствии с действующими в Украине нормативными документами на проведение АЭ контроля [1, 4] следует только считать АЭ импульсы, не обращая внимания на их амплитуду. Однако, величина амплитуды является основным физическим параметром, характеризующим любой колебательный процесс, в том числе и сигналы АЭ.

Поэтому амплитуда АЭ является определяющей во всех иностранных нормативных документах, например, в России [5, 6] или в первой фундаментальной работе [7] специалистов СССР в области стандартизации АЭ. В действительности амплитуда АЭ сигнала является основой наполнения его энергетической характеристики.

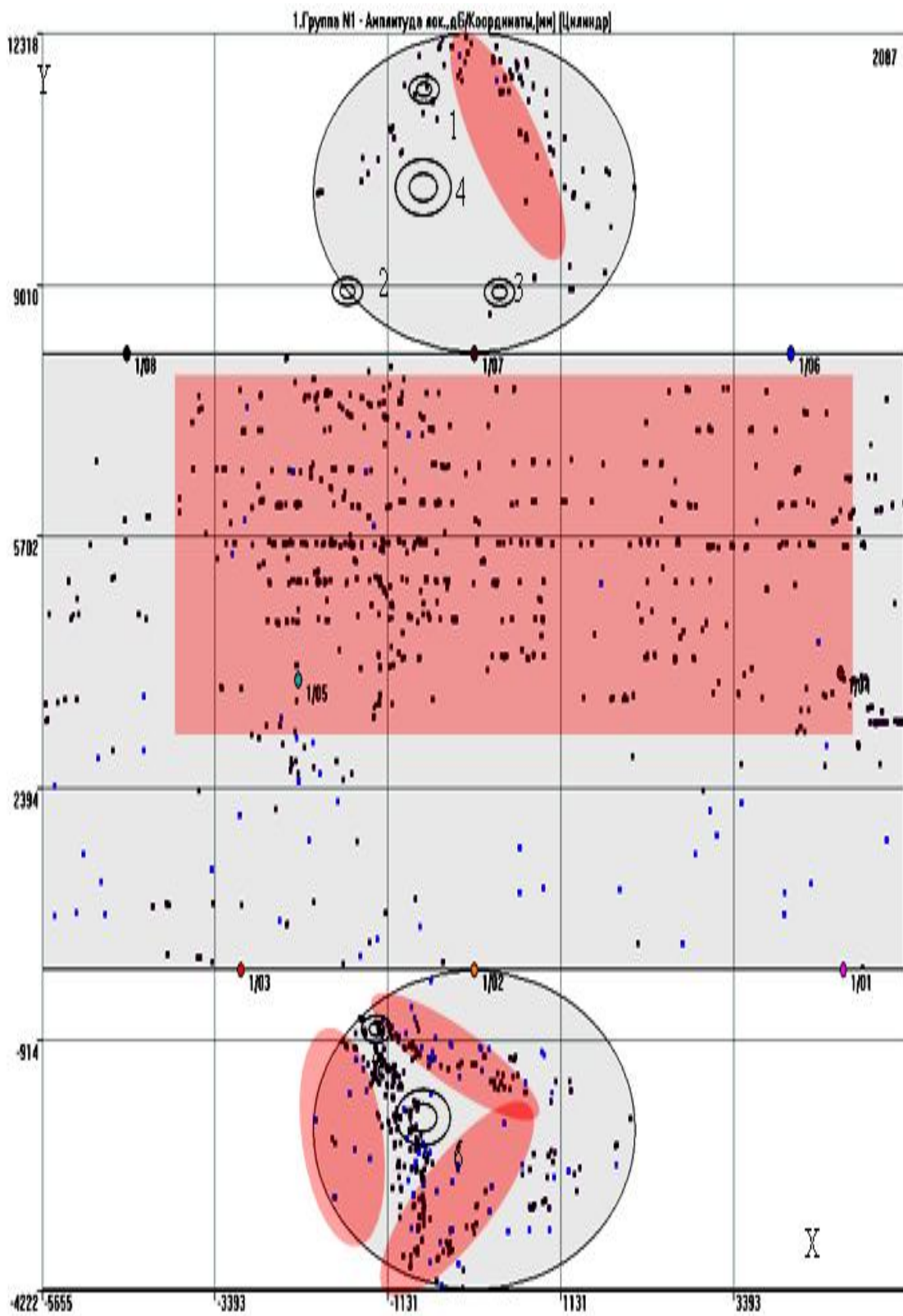


Рис. 1. Схема расстановки преобразователей и результат регистрации АЭ в ходе гидроиспытаний при изменении нагрузки от 20 до 55 кг/см² на развертке внешней поверхности корпуса реактора

Поэтому для любого испытываемого сосуда важнее учесть несколько АЭ сигналов с большой амплитудой, чем тысячи сигналов АЭ, амплитуда которых едва превышает уровень порога.

Учитывая такие погрешности в нормативных документах Украины на АЭ контроль, мы для проведения классификации сигналов АЭ по степени опасности разрушения сосуда воспользовались положениями, приведенными в российском стандарте [5].

Помимо амплитудного критерия, который в нашем случае соответствовал 4 классу, нами был использован локально-динамический критерий [5], результаты применения которого приведены на рис. 2.

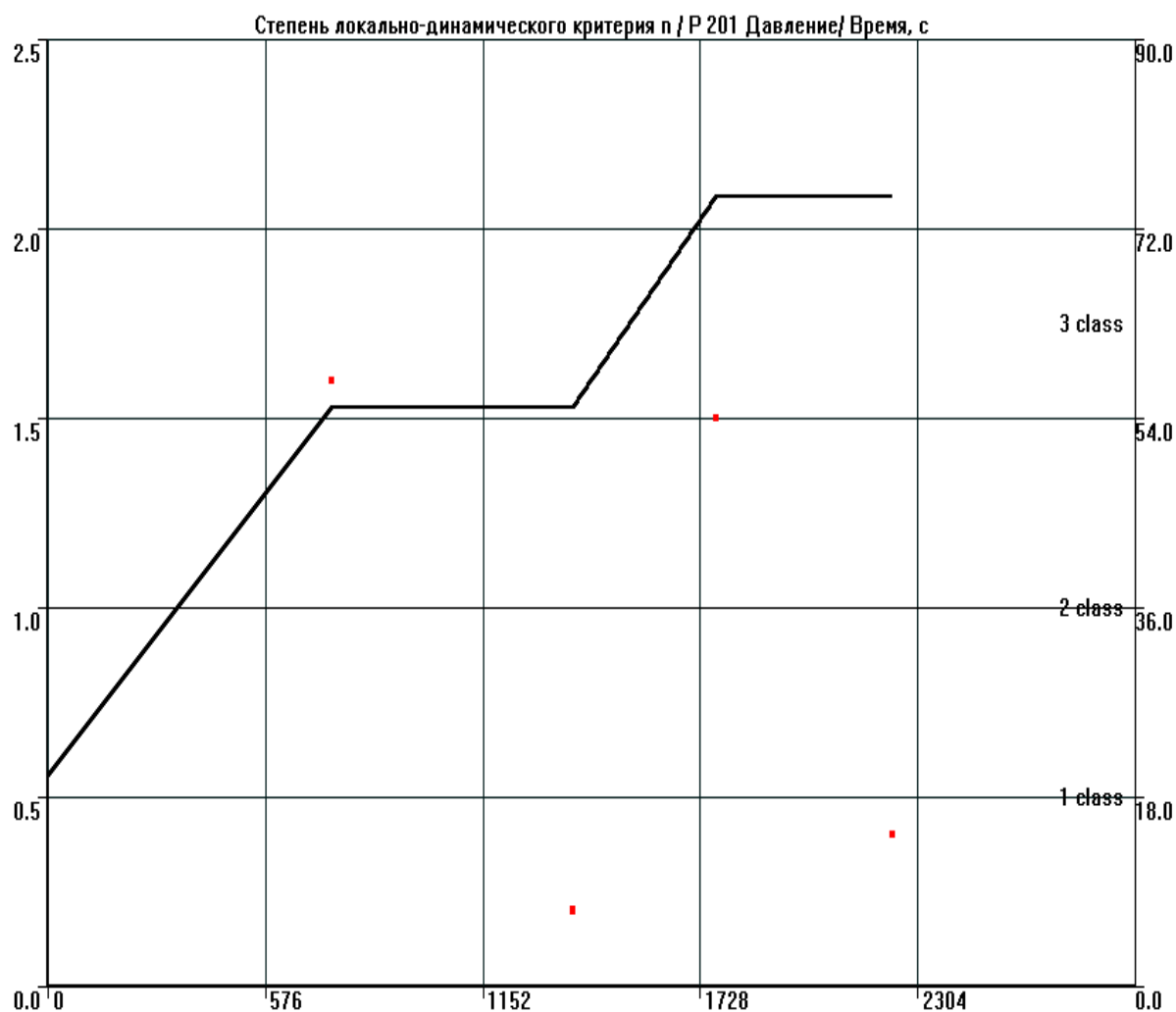


Рис. 2. Степень локально-динамического критерия n АЭ (точки) и характер изменения давления P (сплошная кривая) в ходе гидравлического испытания.

t – время испытания (сек) (при изменении нагрузки от 20 до 75 кг/см²).

Параметр n формируется на основе сопоставления индекса роста нагрузки (давления) и индексов роста со временем числа импульсов АЭ и их амплитуды.

При этом, если индекс нагрузки увеличивается, а индексы параметров АЭ уменьшаются, то это свидетельствует об отсутствии опасности разрушения.

Опасной является ситуация, когда по мере роста нагрузки растет и АЭ индекс и к завершению испытаний параметр $n > 1$, что соответствует 3 или даже 4 классу условной классификации по локально-динамическому критерию. В ходе гидроиспытания реактора Р-201 критерий n был меньше единицы.

После загрузки реактора катализатором было принято решение повторить испытание, но повести его как пневмоиспытания (азотом). А для уверенности в том, что система А-line (DDM) не «ошибается» параллельно с ней была подключена система АЭ ЭМА-2 совместного производства венгерского предприятия «Видеотон» и института Электросварки им Е.О. Патона НАН Украины.

Результаты испытания системой А-line (DDM) повторились, акустическая картина была такой же, как и при гидроиспытании, хотя уровень собственных шумов составлял 55 дБ. Такие же результаты были получены системой ЭМА-2, но точность локации этой системы была значительно хуже, чем системы А-line (DDM) (рис. 3).

На этот раз испытания были остановлены при 36 кг/см².

При этом амплитудный критерий соответствовал 2 классу, а локально-динамический – первому. Тем не менее было принято решение провести обследование мест наибольшей акустической активности методом ультразвуковой толщинометрии. В качестве толщинометра был использован прибор фирмы Krautkramer GmbH с разрешающей способностью 0,01 мм при измерении толщин до 100 мм. На локационной картине зафиксированных локационных импульсов АЭ (рис. 4) с целью проведения обследования методом ультразвуковой толщинометрии были выделены 4 участка (зоны А, Б, В и Г), проведено их увеличение с целью определения более четкой акустической структуры (рис. 5), определены их координаты и условные площади (рис. 5, таблица 1). Затем результаты определения координат выбранных зон были перенесены на внешнюю поверхность реактора и проведены необходимые измерения толщины стенки реактора.

Схема

установки датчиков и расположения участков повышенной АЭ, выявленных
акустико-эмиссионным методом контроля реактора Р-201,
установка ЛЧ24-2000 №2, цех №4.

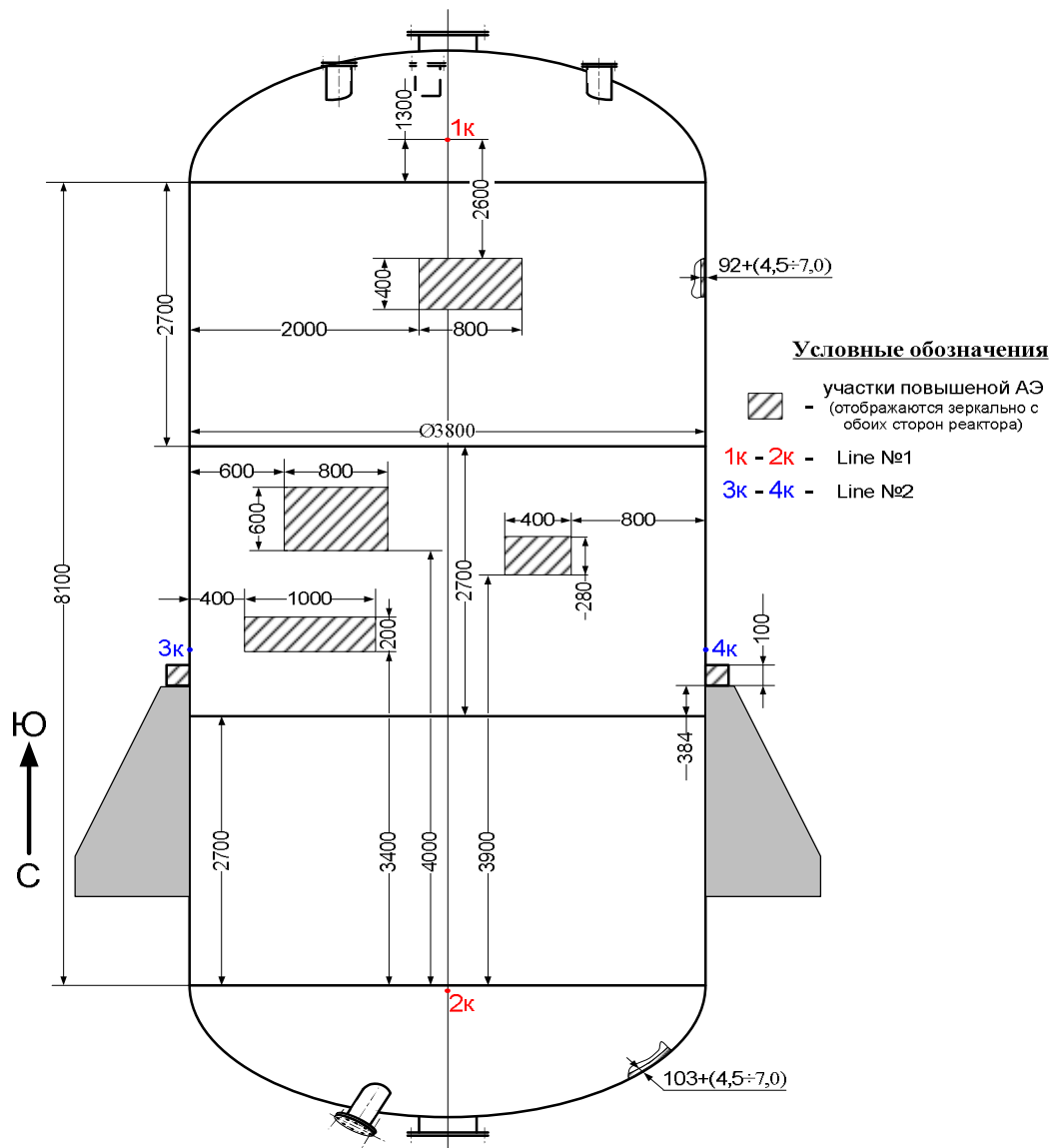


Рис. 3. Схема установки ПАЭ и результат АЭ обследования реактора
в ходе пневмоиспытаний аппаратурой ЕМА-2

В результате анализа полученных результатов показано, что во всех выбранных для обследования зонах повышенной акустической активности измеренное значение толщины стенки реактора на 1,0 – 1,7 мм меньше, чем толщина, измеренная в областях свободных от скоплений локационных импульсов, которая соответствовала номинальной толщине. Этот результат подтвердил наше первоначальное предположение о том, что в плакирующем

слое имеются расслоения, но вместе с тем дал основания утверждать, эти расслоения развились с внутренней стороны плакировки и затрагивают 1 – 3 слоя девятислойной рулонной плакировки. Обнаруженные дефекты плакировки не нарушают необходимую защиту от коррозии основного металла корпуса реактора, полностью обеспечивая его несущую способность при совместном воздействии на корпус рабочих температур и давления.

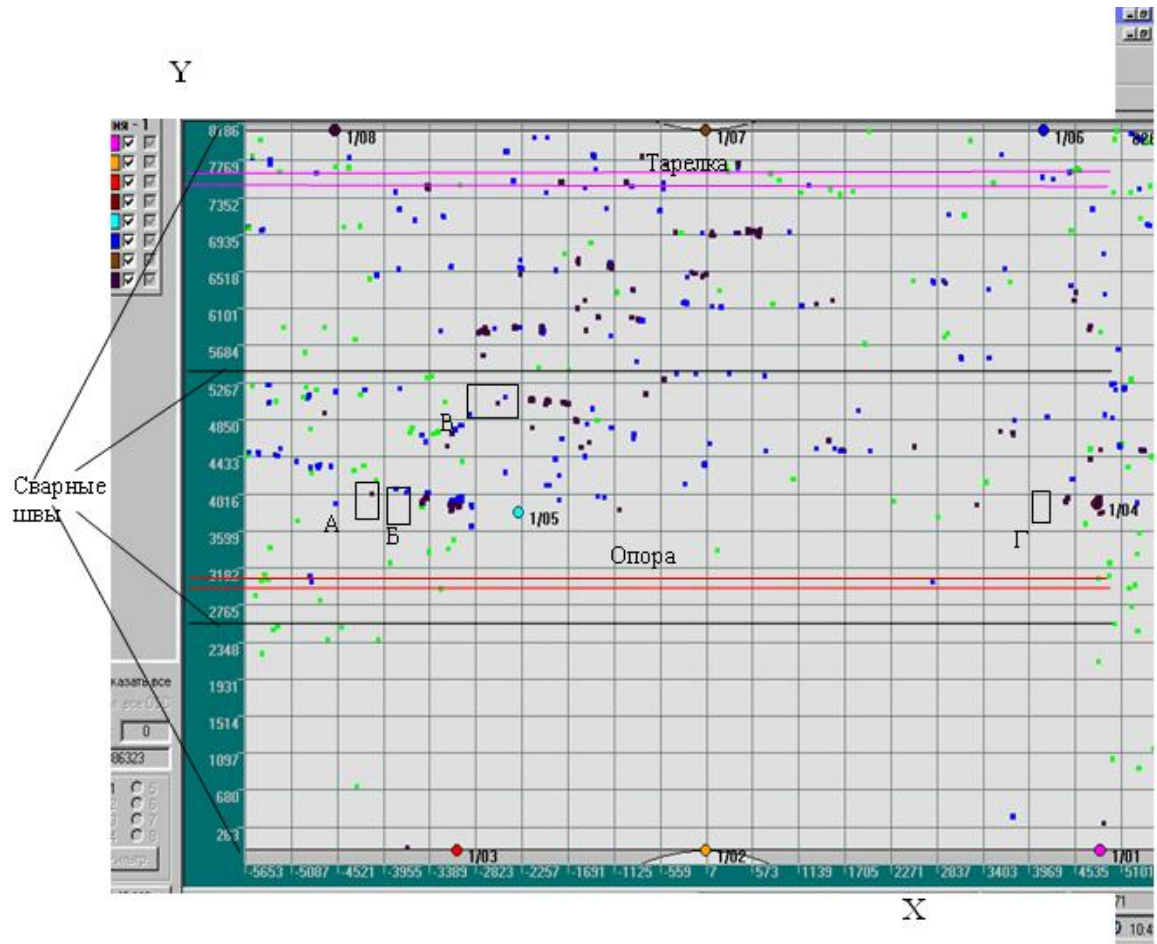


Рис. 4. Результат пневмоиспытания реактора Р-201 с использованием аппаратуры АЭ.А-Line DDM Буквами обозначены места наибольшей акустической активности

С целью определения более четкой акустической структуры мест наибольшей акустической активности было произведено их увеличение (рис. 5), определены их координаты и условные площади (рис. 5, таблица). Затем результаты определения координат выбранных зон были перенесены на внешнюю поверхность реактора и проведены необходимые измерения толщины стенки реактора. В ходе анализа полученных результатов показано, что во всех выбранных для обследования зонах повышенной акустической активно-

сти измеренное значение толщины стенки реактора на 1,0 – 1,7 мм меньше, чем толщина, измеренная в областях свободных от скоплений локационных импульсов, которая соответствовала номинальной толщине. Этот результат подтвердил наше первоначальное предположение о том, что в плакирующем слое имеются расслоения, но вместе с тем дал основания утверждать, эти расслоения развились с внутренней стороны плакировки и затрагивают 1 – 3 слоя девятислойной рулонной плакировки. Обнаруженные дефекты плакировки не нарушают необходимую защиту от коррозии основного металла корпуса реактора, полностью обеспечивая его несущую способность при совместном воздействии на корпус рабочих температур и давления.

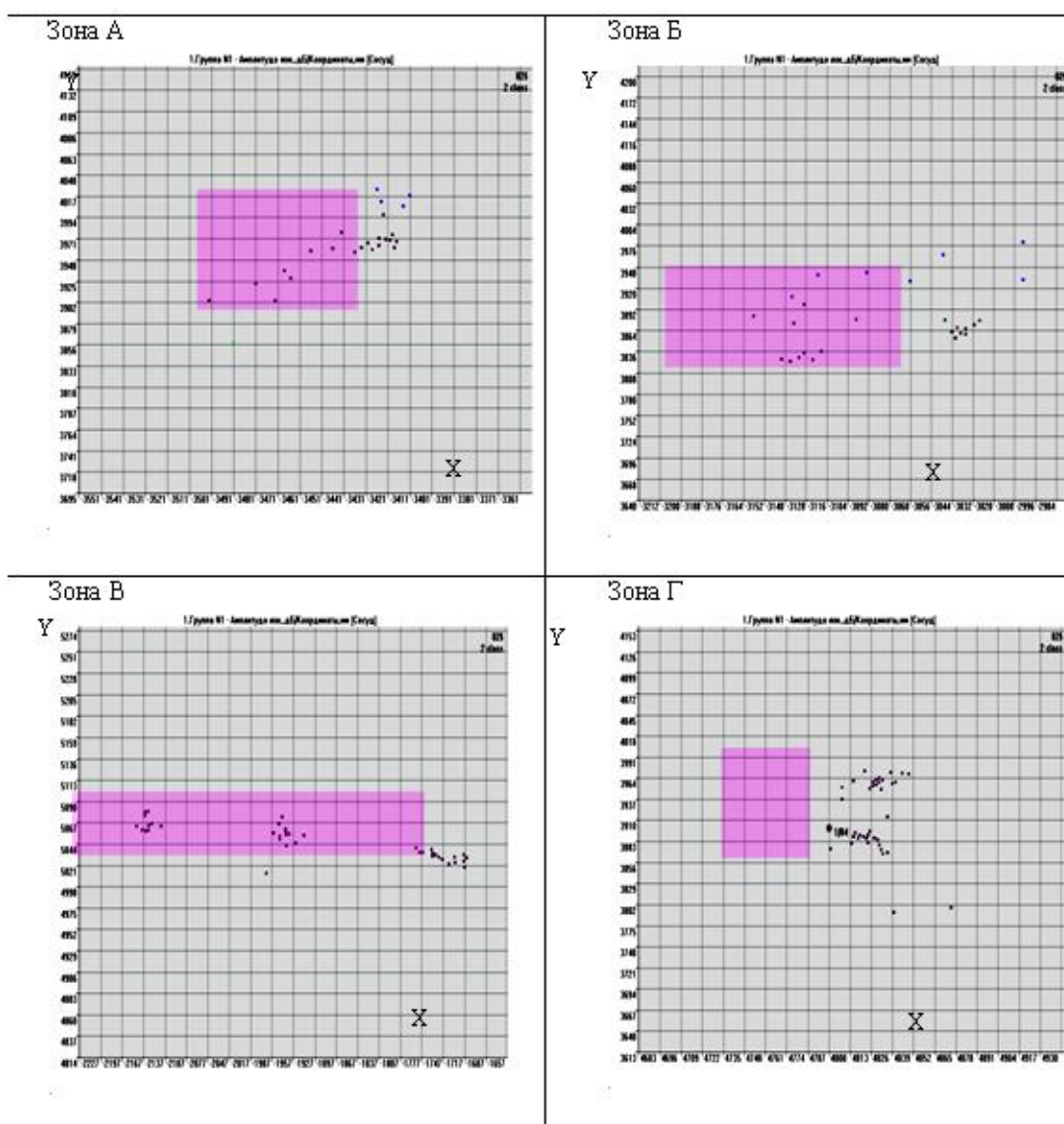


Рис. 5. Акустическая структура зон повышенной акустической активности (зоны А, Б, В и Г) в соответствии с рис. 4.

На рис. 1 скопления локационных импульсов обозначены розовым цветом. Ось X соответствует сварному шву приварки обечайки к нижнему днищу. Ось Y соответствует линии пересечения цилиндрической поверхности реактора и общей плоскости симметрии, проходящей через верхний и нижний отводы и штуцер № 1.

Таблица

Значения толщины стенки реактора в зонах высокой акустической активности и областях, близких к ним

Наименование зон высокой АЭ активности	А	Б	В	Г
Координаты зоны высокой активности	X {-3470; -3410}; Y{3900; 4030}	X {-3140; -3000}; Y{3810; 3950}	X {-2150; -1680}; Y{5020; 5080}	X {4800; 4850}; Y{3860; 3980}
Площадь зоны высокой активности	60x130 мм ²	140x140 мм ²	470x60 мм ²	50x120 мм ²
Толщина стенки в активной зоне, мм	102,0	102,0	100,7	101,4
Толщина стенки вне активной зоны, мм	103,1	103,0	102,4	102,5
Разность значений толщин, мм	1,1	1,0	1,7	1,1

Через два года реактор Р-201 снова был испытан пробным давлением в ходе пневмоиспытания с АЭ контролем.

От доказанной теоретической возможности эксплуатации реактора при более высокой температуре и давлении ввиду обнаруженных дефектов плакировки отказались. На этот раз давление было поднято до уровня, строго соответствующего паспортному испытательному давлению 59,8 кг/см². АЭ локационная картина повторилась. Амплитудный критерий соответствовал 4 классу, а локально-динамический – первому, локации выстроились в горизонтальные ряды. В качестве подтверждающей информации об отсутствии серьезной опасности для дальнейшей эксплуатации реактора был использован статистический критерий АЭ, связывающий относительную энтропию статистического распределения АЭ импульсов по амплитудам [5] (рис. 6).

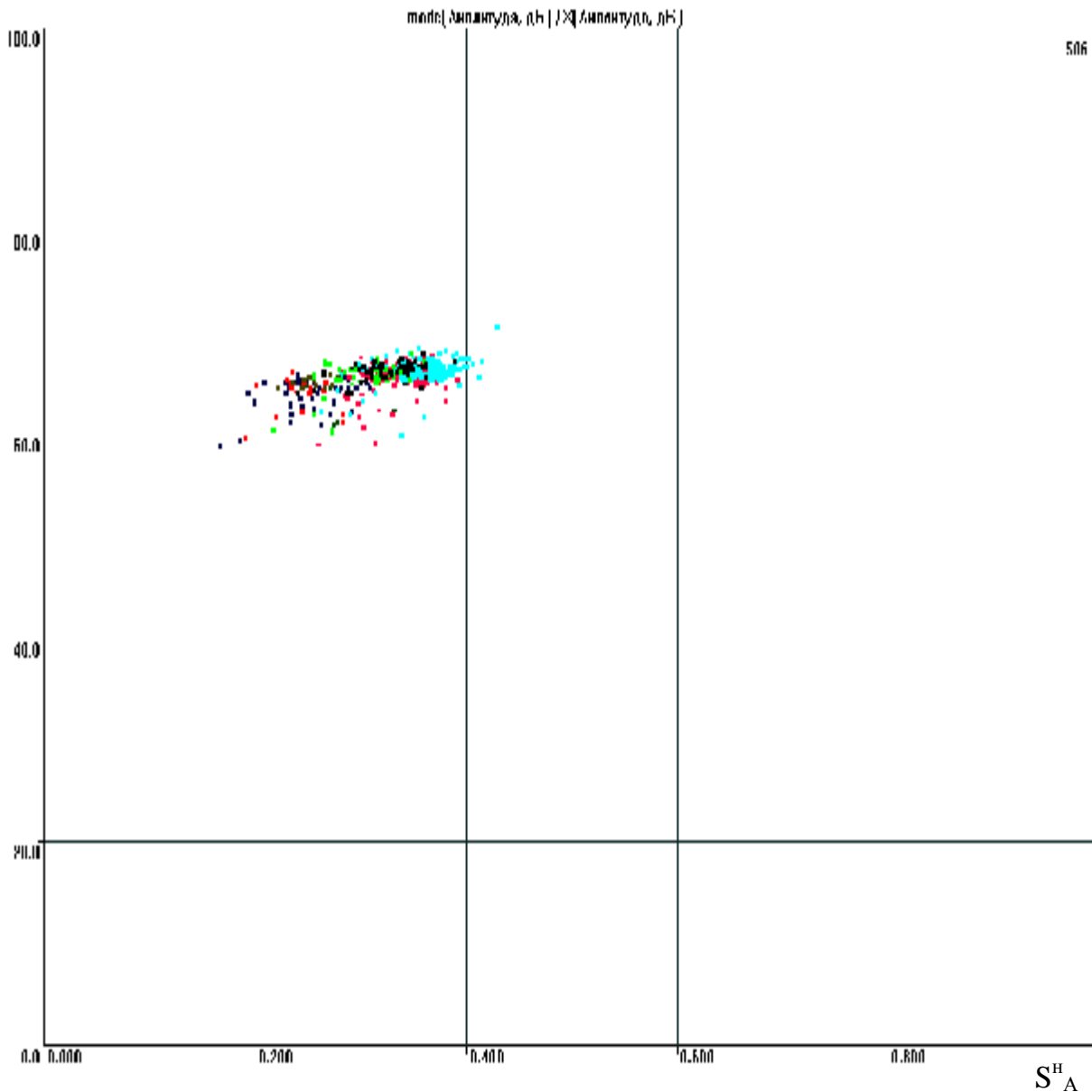


Рис. 6. Статистический критерий АЭ испытания, A_{mod} – наиболее вероятное значение амплитуды в выборке, S_A^H – относительная энтропия распределения амплитуд в выборке

В приведенной зависимости энтропия в ходе испытания находилась в интервале 0,2 – 0,4, что характеризует шумовое происхождение источников АЭ, которые, в то же время, обладали довольно высокой амплитудой.

Выводы. В результате проведения АЭ контроля в ходе испытаний пробным давлением реактора Р-201 сделаны следующие выводы:

- обнаружены множественные расслоения многослойного плакирующего покрытия, показано, что расслоения захватывают 1 – 3 слоя девятислойной

плакировки и поэтому их наличие не снижает антикоррозионной защиты основного металла конструкции реактора и не оказывает влияние на его несущую способность;

- многократные испытания реактора с использованием двух типов АЭ аппаратуры и получением идентичных результатов в обнаружении дефектов плакировки дают дополнительное обоснование действенности метода АЭ даже в том случае, когда с помощью методов неразрушающего контроля первоначально дефекты не были обнаружены;

- точность обнаружения зон повышенной акустической активности при высоте корпуса 8,1 м и длине развертки – 11,3 м была не хуже 10 – 20 мм, что подтверждено методом ультразвуковой толщинометрии;

- обнаруженные с помощью АЭ контроля дефекты плакировки стали основанием для недопущения реализации теоретического плана по увеличению рабочих температуры и давления, что, возможно, увеличит ресурс реактора при дальнейшей эксплуатации;

- показано, что нормативные документы, регламентирующие использование метода АЭ в Украине, имеют определенные недостатки, что вынуждает специалистов по АЭ контролю при формировании выводов использовать подходы, регламентированные нормативными документами других стран.

Список литературы: 1. Обладнання технологічне нафтопереробних, нафтохімічних та хімічних виробництв. Технічне діагностування. Загальні технічні вимоги; ДСТУ 4046-2001. – [Чинний від 27.07.2001]. – К.: Держстандарт України, 2001. – 24 с. 2. *Долинский В.М.* Эффективность использования метода акустической эмиссии для оценки технического состояния оборудования нефтехимического производства / *В.М. Долинский, В.А. Кобзев, Д.Г. Рязов, В.Н. Стогний* // *Техн. диагностика и неразруш. контроль.* – 2007. – № 4. – С. 32 – 36. 3. Правила будови і безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском; НПАОП 0.00-1.07-94. – [Затверджено 18.10.94]. – К.: – Держнаглядохоронпраці, 1998. – 373 с. 4. Настанови щодо проведення акустико-емісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки; ДСТУ 4227-2003. – 25 с. 5. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов; ПБ 03-593-03. – Серия 03. – Выпуск 38 / Колл. авт. – М.: Государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2003. – 56 с. 6. *Грешников В.А.* Акустическая эмиссия. Применение для испытания материалов и изделий / *В.А. Грешников, Ю.В. Дробот.* – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 272 с. 7. *Елизаров С.В.* Новинки программного обеспечения АЭ систем семейства А-Line / *С.В. Елизаров, А.В. Букатин, М.Ю. Ростовцев, Д.А. Терентьев* // *В мире НК.* – 2008. – № 3(41).

Поступила в редколлегию 25.03.10