



## ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СЛОЖНЫХ И МНОЖЕСТВЕННЫХ ЛОКАЦИОННЫХ АНТЕНН

С. А. НЕДОСЕКА, д-р техн. наук, М. А. ОВСИЕНКО, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

*Рассмотрены вопросы формирования событий АЭ и надежности локации при использовании сложных и множественных локационных антенн. Показано влияние избыточности данных на получение достоверной АЭ информации. Показана важность и возможности оптимизации алгоритмов обработки АЭ информации при больших потоках данных.*

*The paper deals with formation of AE events and reliability of their location using complex and multiple location arrays. Influence of redundant data on obtaining valid AE information is shown. Importance and possibility of optimizing the algorithms of AE data processing at large data flows are shown.*

Использование метода акустической эмиссии (АЭ) на разнообразных промышленных объектах, внедрение систем непрерывного АЭ мониторинга на различных, в первую очередь потенциально опасных, производствах ставит новые задачи перед разработчиками программного обеспечения для систем АЭ контроля [1]. В частности, контроль оборудования газонефтехимических производств, барабанов котлов, технологических трубопроводов сложных конфигураций требует повышения достоверности получения данных об истинных источниках АЭ и отбраковки случайных технологических шумов, формирующих ложные источники, особенно при необходимости использования произвольной расстановки датчиков АЭ на объектах. Внедрение многоканальных систем АЭ с независимой работой каналов позволило перейти к принципиально новому способу работы — контролю и оценке состояния нескольких независимых объектов одновременно. Для такой работы АЭ систем требуется формирование нескольких локационных антенн различного типа с разделением обработки информации, поступающей от каждой антенны (группы датчиков АЭ, относящихся к одному объекту контроля, поступающая информация с которых обрабатывается как единый блок данных).

Требуется решить ряд методических вопросов при обработке данных АЭ в упомянутых случаях, а именно:

- выбор в реальном времени из очень большого потока тех данных, которые относятся к развитию повреждений и разрушению материала;
- обеспечение достоверности определения координат источников АЭ уже после фильтрации первоначальной информации;
- кластеризация данных по выбранным признакам, а затем оценка опасности и прогноз разрушения для каждого кластера отдельно.

© С. А. Недосека, М. А. Овсиенко, 2012

Для систем АЭ с независимой работой каналов существуют некоторые особенности, требующие внимания и аккуратности при обработке поступающей первоначальной информации. В работе [2] была представлена общая схема обработки непрерывного АЭ сигнала (рис. 1). При пересечении установленного порога принимающая аппаратура фиксирует время начала срабатывания  $t$ . При завершении срабатывания датчика данные отправляются на обработку. Это произойдет по окончании времени  $W$ . При возникновении события АЭ, которое вызовет  $N$  срабатываний различных датчиков, каждое из них будет характеризоваться своим временем начала  $t_1, t_2, \dots, t_n$  и длительностью  $W_1, W_2, \dots, W_n$ .

Опыт показывает, что в зависимости от конфигурации объекта контроля, его акустических характеристик и ряда других факторов указанные длительности могут быть достаточно произвольными. Таким образом, при всегда упорядоченности последовательности начала срабатываний  $t_1 < t_2 < \dots < t_n$  во многих случаях будет нарушен порядок отправки данных срабатываний на обработку, поскольку условие  $W_1 < W_2 < \dots < W_n$  не соблюдается. Это может привести к неправильному объединению полученных срабатываний в общее

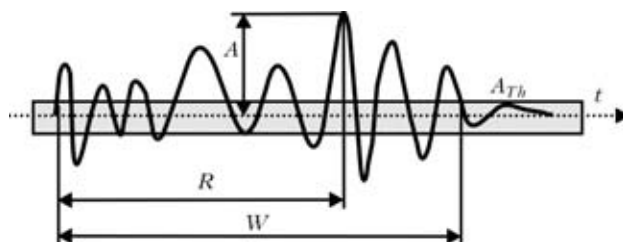


Рис. 1. Выделение единичного срабатывания датчика из непрерывного АЭ сигнала. Началом события считается превышение амплитудой сигнала порога дискриминации  $A_{Th}$ , завершением — снижение амплитуды до уровня ниже порога ( $A$  — максимальная амплитуда;  $W$  — полная длительность события;  $R$  — время нарастания сигнала до максимума; число осцилляций  $C$  соответствует числу выбросов сигнала над порогом)



событие АЭ, отбраковке корректных данных, ошибкам при проведении расчета координат источников событий.

Решением данной проблемы может быть установка определенного времени для накопления поступающих срабатываний, анализа их временной последовательности и, при необходимости, сортировка. Для этого создается временный массив поступающих данных, так называемый пул. Условиями очистки массива и передачи его данных на последующую обработку служат либо наполнение массива до указанного числа элементов, либо завершение установленного времени ожидания. Тем не менее, при множественной конфигурации локационных антенн либо при работе одной антенны с неравномерным расположением датчиков или большим их числом случайность временной последовательности срабатываний и необходимость ее упорядочивания приводят к некоторым особенностям, связанным с последующим программным повтором уже записанной информации. Особенность заключается в том, что первоначальный порядок поступления данных не может быть точно воспроизведен, если применен алгоритм сортировки. Это сказывается на общем числе сформированных событий АЭ и, соответственно, на результатах их кластеризации.

Таким образом, возникает выбор: получать в результате проведенных измерений гарантированно правильно сформированные события, но с различием картины в процессе измерений и после компьютерного повтора, или же обеспечивать полную тождественность данных при повторе, но с риском неправильного формирования отдельных событий. Представляется, что применительно к каждому конкретному объекту контроля должен быть индивидуальный подход в данном вопросе, а решение об использовании того или иного алгоритма следует основывать на предварительном АЭ обследовании объекта, проводимом до начала его испытаний.

Как уже отмечалось в работе [2], существует два основных подхода к формированию событий АЭ на основе пришедших на датчики и вызвавших их срабатывание сигналов:

– включение в событие всех срабатываний, зарегистрированных в установленный, достаточно малый промежуток времени;

– включение в событие фиксированного числа срабатываний на основании заранее заданного признака.

Были показаны преимущества и недостатки обоих подходов, но вопрос достаточности числа срабатываний, вошедших в событие, для надежной его локации не рассматривался. В простейших случаях теоретически достаточно срабатываний двух датчиков для линейной и трех для плоскостной локации, чтобы по разности времен прихода

определить координаты источника сигнала АЭ. На практике для надежной локации этого не всегда достаточно. В конструкциях и конструктивных элементах конечных размеров происходят изменения спектральных, амплитудных и частотных характеристик волн АЭ, их взаимодействие и переломление. Это сказывается на локальных скоростях волн на конкретных участках материала, регистрируемых временах прихода сигнала на датчики, расчете временных задержек и определении координат источника.

Проведенные исследования показали, что избыточность информации, вошедшей в сформированное событие АЭ, положительно влияет на определение координат источника. Если использовать в качестве фильтра минимальное число срабатываний, на основе которых формируются события АЭ, то установка некоторой избыточности данного параметра позволяет получать более достоверные координаты источника [3]. Для примера приведем результаты тестов, проведенных при помощи встроенного генератора сигналов системы ЕМА-3 (рис. 2). Излучателем служил один из установленных на металлическом листе датчиков АЭ (№ 12). При выбранном режиме плоскостной локации и признаке формирования события, равном минимум трем срабатываниям, периодически образовывались события АЭ, координаты которых не соответствовали местоположению датчика. Проведенный анализ показал, что все эти события были сформированы из трех срабатываний (причины, по которым не срабатывал четвертый датчик в антенне или его срабатывание не удовлетворяло установленным критериям фильтрации, могут быть самыми различными — от взаимного влияния волн вследствие переотражения или слабой амплитуды сигнала до плохого акустического контакта датчика с поверхностью изделия). Изменение критерия набора события — до четырех срабатываний — позволило получить картину, полностью соответствующую физическому эксперименту (рис. 2, з). Все зарегистрированные события АЭ имели координаты, соответствующие местоположению датчика-излучателя.

Для полноты эксперимента при локации использовали различные алгоритмы расчета координат событий АЭ, прежде всего так называемую простую формулу:

$$X = B/2 \pm C\Delta t_i/2; Y = B/2 \pm C \Delta t_j/2,$$

где  $C$  — скорость распространения звуковой волны в материале;  $\Delta t_{i,j}$  — разность времен прихода (РВП) волны на ближайшие к источнику пары датчиков, расстояние между которыми равно  $B$ .

В качестве второго расчетного алгоритма применяли «метод пересекающихся окружностей» (далее просто «метод окружностей»), приведенный, в частности, в работе [4]. На основании имеющихся

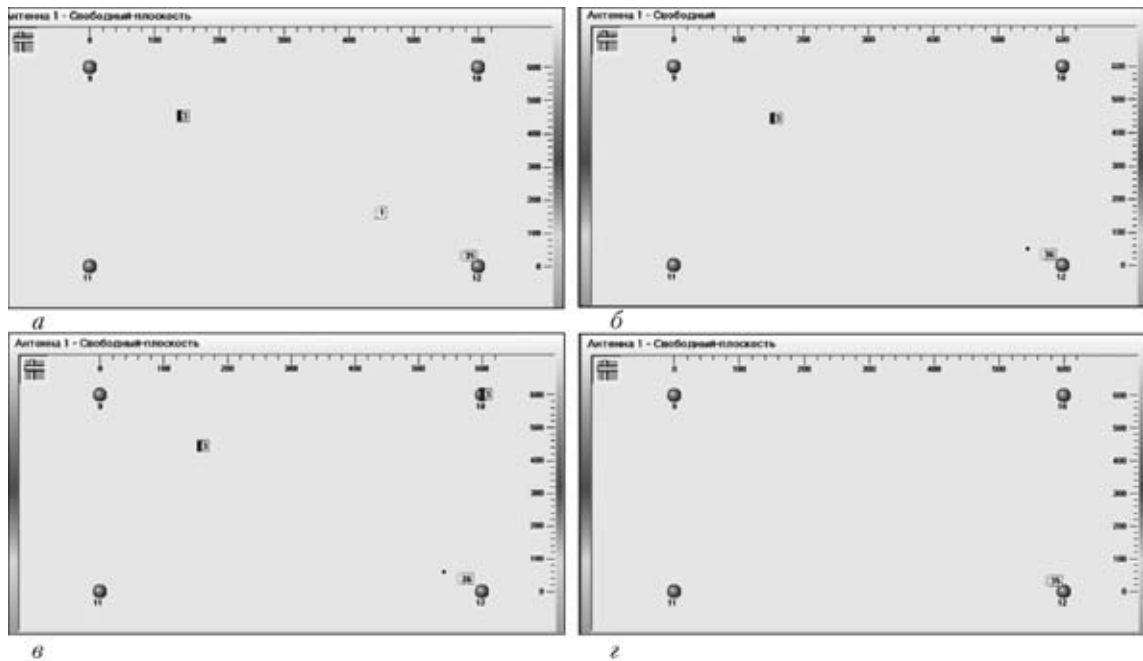


Рис. 2. Экран плоскостной локации системы ЕМА-3 при наборе событий из минимум трех (а–в) и четырех (з) срабатываний (а, з — «простая формула» определения координат; б — «метод окружностей»; в — «матричная локация»)

данных по временным задержкам прихода сигнала на разнесенные датчики строится набор пересекающихся окружностей, координаты источника определяют из системы общих уравнений.

Третий алгоритм представлял собой «матричную локацию», при которой координаты источника определяют по заранее теоретически рассчитанным временным задержкам, из которых составлена матрица. Правильными считаются тот набор задержек и соответствующие ему координаты источника, которые дают наименьшую невязку с данными, полученными при измерениях.

Как видим, во всех случаях, кроме последнего (рис. 2, з), формировались лишние события АЭ, не соответствующие реальному расположению источника. Отметим также, что при заданных значениях скорости звука «простая формула» дала наиболее точный расчет координат в условиях проводимого эксперимента.

Таким образом, помимо уточнения вопроса о принципах формирования событий АЭ было проведено сравнение двух принципиально разных способов определения координат источников АЭ по разности времен прихода сигнала на различные датчики. Первый основан на расчетных формулах, которые зависят от расположения датчиков и имеют высокое быстродействие, но разную точность расчета координат источников АЭ для разных участков объектов контроля. Второй базируется на предварительном расчете задержек в определенных точках объекта контроля и сравнении полученных при измерениях реальных задержек с заранее составленной матрицей. Точность его одинакова для всей поверхности объекта и зависит от шага, с которым задана матрица, а быст-

родействие обратно пропорционально количеству элементов матрицы. Весьма желательным представляется наличие в современных системах АЭ диагностики обоих методов расчета координат, которые можно использовать в зависимости от решаемой задачи.

Значительное число объектов АЭ контроля представляет собой протяженные конструкции или конструктивные элементы. К таким объектам относятся, в частности, балки, рельсы, трубы, арматура, крановые и фермовые конструкции. Первоочередной задачей при проведении контроля таких объектов является определение местоположения потенциально опасного сечения, в котором происходит процесс накопления повреждений и развитие разрушения [5].

Наиболее простой и однозначной, с точки зрения определения координат дефектов, на линейных объектах является схема, при которой датчики АЭ расположены на одинаковом расстоянии друг от друга. Такое расположение датчиков гарантирует, что при возникновении развивающегося дефекта первыми сработают два ближайших к нему датчика и расчет координаты источника может быть выполнен по приведенной выше формуле.

Формула может применяться и при неравномерном расположении  $N$  датчиков при соблюдении условия  $t_1 < t_i$  и  $t_2 < t_i$ , где  $i \neq 1, 2$  — индекс в наборе  $N$  времен прихода сигнала на датчики. Как только данное условие перестает выполняться, требуется использование специального алгоритма выбора данных для расчета координат, поскольку ближайшие к источнику датчики могут оказаться по одну и ту же сторону от него, и формула становится некорректной.

Неравномерное расположение датчиков на объектах контроля чаще всего диктуется конкретными производственными условиями — отсутствием доступа к отдельным участкам объекта контроля, наличием дополнительных элементов, требующих установки датчиков в непосредственной близости от них, сложной конфигурацией самого объекта (например, трубы со множественными гнибами, переходами сечения, наличием фланцевых соединений) и целым рядом других причин.

Пример расположения датчиков, при котором вначале срабатывают те из них, которые расположены по одну сторону от источника, приведен на рис. 1.

Схема размещения датчиков на рис. 3 такова, что при включении в событие фиксированного числа срабатываний, равного двум, в зависимости от расположения источника может возникнуть ошибка при определении координат по формуле, поскольку первыми сработают датчики с номерами 2 и 3, находящиеся по одну сторону от дефекта, и расчетная координата окажется между ними.

Следовательно, при неравномерном размещении датчиков на поверхности контролируемого изделия необходимо учитывать соотношение расстояний между датчиками, и событие АЭ должно состоять как минимум из трех срабатываний, причем обязательно расположенных по разные стороны от источника. Для этого необходимо применять специальный алгоритм, отслеживающий не только порядок расположения сработавших датчиков, но и расстояния между ними. Расчет координат затем можно выполнять по формуле, но по той паре срабатываний датчиков из минимум трех, которая соответствует физически правильному расположению дефекта, с учетом скорости распространения волны в материале и рассчитанных на этом основании значений макси-

мальных задержек для датчиков, расположенных по разные стороны от первого сработавшего.

Вопрос об избыточности данных для формирования события при линейной локации столь же актуален, сколь и при плоскостной. Помимо того, что для расчета координат в условиях неравномерного размещения датчиков требуется объединять в событие не менее трех срабатываний, важными критериями достоверности получаемой АЭ информации могут служить также число и порядок срабатывания всех датчиков локационной антенны. При наиболее жестком варианте условии формирования события АЭ является срабатывание всех без исключения датчиков в правильном порядке. Пропуск срабатывания одного из датчиков за установленный интервал времени или же нарушение последовательности прихода на датчик сигнала АЭ служит основанием для отбраковки такого события. Это гарантирует (рис. 4, б) отбраковку событий АЭ с неверно рассчитанной координатой (рис. 4, а, возле датчика № 5).

Причины упомянутых нарушений порядка срабатывания датчиков, как уже говорилось, могут быть самыми разными. Поэтому, проводя измерения на конкретном объекте, следует понимать, повлияет ли ужесточение критериев формирования событий на их конечное число таким образом, чтобы полученной информации было достаточно для оценки состояния объекта контроля. Например, при обследовании методом АЭ протяженных трубопроводов или других крупногабаритных объектов перед установкой критерия формирования события следует убедиться, что сигнал АЭ не затухает на больших расстояниях таким образом, что его получают только ближайšie к источнику датчики. Если же таковая ситуация обнаружена, следует понизить требования к форми-

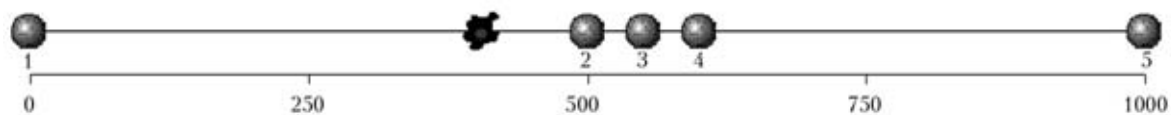


Рис. 3. Локационная антенна из пяти датчиков АЭ (при возникновении источника с координатой  $X = 400$  мм порядок срабатывания датчиков: 2, 3, 4, 1, 5)

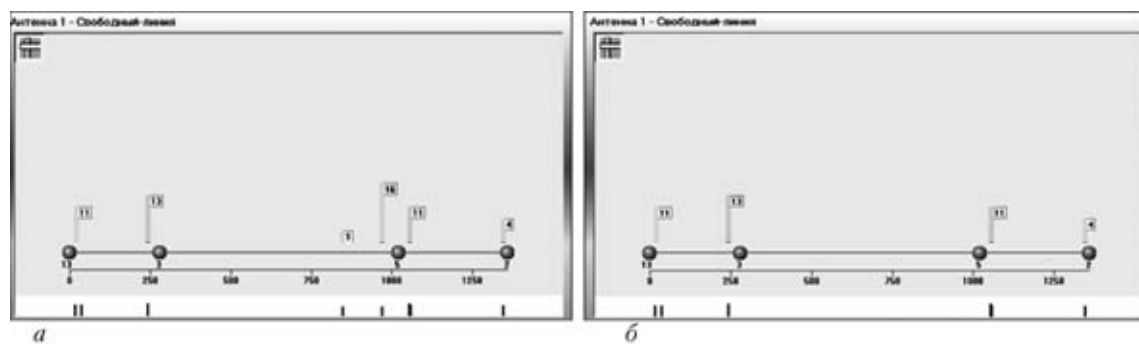


Рис. 4. Экран линейной локации системы ЕМА-3 при наборе событий из трех (а) и четырех (б) срабатываний (генератор сигналов АЭ устанавливали последовательно возле каждого датчика)



рованию событий, исходя из реальных условий проведения измерения.

Следует отметить, что в программном обеспечении систем ЕМА предусмотрена возможность проведения компьютерного повтора выполненных измерений с изменением настроек, в том числе критериев формирования событий (рис. 5) и способа расчета координат источников АЭ. Поэтому, в случае неоптимальной настройки системы перед началом измерения, ситуация может быть скорректирована при анализе полученной информации, за исключением невозможности восстановления предварительно отфильтрованных данных, которые при проведении измерения не сохраняются.

Использование множественных антенн АЭ с большим количеством каналов, одновременный анализ состояния нескольких объектов контроля предъявляют высокие требования к быстродействию используемых алгоритмов. Наиболее критичной частью по быстродействию является взаимодействие с жестким диском при записи больших объемов информации. Поэтому оптимизация программ с точки зрения выбора алгоритмов фильтрации, обработки поступающей информации и сохранения только тех данных, которые соответствуют реальным физическим процессам в материале, позволяет существенно повлиять на работоспособность АЭ систем, отсутствие задержек и зависаний при работе с большими потоками информации. В частности, применение научно обоснованной фильтрации на входе позволяет снизить число сохраняемых на диске данных срабатываний датчиков в десять и более раз.

Относительно спорным вопросом является расширение возможностей по тонкой настройке параметров АЭ измерений. Несмотря на риск, связанный с возможностью ошибок пользователей вследствие невнимательности или недостаточной квалификации (требования к персоналу изложены в документе [6]), следует признать наличие ре-

жима более углубленной настройки полезным. В частности, проведенный в данной работе анализ вариантов формирования событий АЭ и особенностей задания параметров и режимов, влияющих на точность расчета координат, стал возможен именно в связи с открытием в программном обеспечении систем ЕМА доступа к настройкам, которые ранее были жестко защищены в программе и не позволяли внесения изменений.

Реализованный расширенный вариант настройки системы АЭ контроля крайне полезен для углубленного изучения явления АЭ, разработке новых алгоритмов и программ обработки поступающей с объектов контроля соответствующей информации, а также при автоматизации процесса оценки технического состояния контролируемых объектов, что является одним из этапов реализации интеллектуальных систем контроля [7].

## Выводы

Программное задание минимального числа срабатываний датчиков АЭ при формировании событий позволяет регулировать достоверность и полноту получаемой информации.

Избыточность числа вошедших в событие АЭ срабатываний датчиков по сравнению с минимально необходимым повышает достоверность и точность определения координат источников сигналов АЭ.

Определение координат источников АЭ при линейной локации в условиях неравномерного расположения датчиков требует включения в событие АЭ минимум трех срабатываний и специального алгоритма выбора нужных для расчета задержек времен прихода. Данный алгоритм позволяет более гибко использовать линейные акустические антенны при проведении АЭ контроля сложных объектов.

Возможность программного регулирования критериев формирования событий АЭ позволяет повысить быстродействие программного обеспечения в условиях использования множественных локационных антенн.

Наличие в программном обеспечении расширенной настройки измерений и обработки данных позволяет более глубоко изучать явление АЭ, совершенствовать применяемые алгоритмы и методы оценки технического состояния сложных промышленных объектов.



Рис. 5. Экран мастера настроек системы ЕМА-3. Реализована возможность управления формированием событий (флажки для включения-выключения и поле ввода для установки минимального и максимального числа срабатываний)

1. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностика сварных конструкций. — Киев: Индпром, 2008. — 815 с.
2. Недосека С. А., Недосека А. Я., Овсиенко М. А. Влияние методов обработки акустико-эмиссионной информации на формирование АЭ событий и определение их координат // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2011. — № 2. — С. 7–17.
3. Недосека А. Я., Бойчук О. И., Овсиенко М. А. К вопросу об оценке погрешности определения источников акусти-

- ко-емиссионной информации на линейных объектах // Там же. — 1999. — № 1. — С. 68–70.
4. Грешиников В. А., Дробот Ю. Б. Акустическая эмиссия для испытаний материалов и изделий. — М.: Изд-во стандартов, 1976. — 273 с.
  5. Особенности распространения акустико-эмиссионных волн на поверхности трубно-оболочечных конструкций / А. Я. Недосека, М. А. Овсиенко, Л. Ф. Харченко, М. А. Яременко // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2005. — № 2. — С. 24–27.
  6. СТД 50.06–2006. Технічна діагностика. Вимоги до підготовки і атестації персоналу з акустико-емісійного контролю та діагностування промислових об'єктів / А. Я. Недосека, С. А. Недосека, А. А. Грузд та ін // Стандарт техн. комітету стандартизації України ТКУ 78 «ТДНК». — Київ, 2006. — 28 с.
  7. Опыт ИЭС им. Е. О. Патона в области акустико-эмиссионного контроля / Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, А. Я. Недосека и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2012. — № 1. — С. 7–22.

Поступила в редакцию  
13.04.2012



## Промислові виставки ПАТОН ЕКСПО 2012

**17-19 квітня 2012 р.** в виставковому центрі «КиївЕкспоПлаза» відбувся Міжнародний промисловий форум ПАТОН ЕКСПО 2012, який кожного року навесні проводить НТК «ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України». В рамках форуму працювали виставки «Зварювання. Споріднені технології», «Трубопровідний транспорт» та «Неруйнівний контроль».

У виставці «Неруйнівний контроль» прийняли участь компанії, що входять до Асоціації «ОКО» («Ультракон-Сервіс», «Промприлад», «УкрНДІНК»), ТОВ НТЦ «Промтехнології» («Новотест»), ТОВ «Шерл» («Олімпус»), ТОВ «Телеоптік», ТОВ «Колізей XXI», УО НКТД, компанії «Оніко», «Інтрон-СЕТ», «Ультракон», «ДП-Тест».

В рамках виставки «Неруйнівний контроль» відбувся семінар «Неруйнівний контроль в трубопровідному транспорті», організаторами якого є Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики, Дочірня компанія «Укртрансгаз» та НТК «ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України».

На семінарі, в якому прийняло участь біля 60 спеціалістів з різних наукових закладів України та фірм-розробників засобів НК, розглянуто актуальні питання неруйнівного контролю та діагностики технічного стану трубопровідних систем різного призначення:

- діагностування та моніторинг стрес-корозійних пошкоджень магістральних трубопроводів;
- контроль напружено-деформованого стану трубопровідних систем;
- діагностування технічного стану трубопровідних систем низькочастотними ультразвуковими хвилями без сканування поверхні труб;
- застосування рентгентелевізійного та тепловізійного методів контролю для оцінки технічного стану трубопровідних систем тощо.

В цілому семінар пройшов в діловій атмосфері, доповіді викликали багато питань та жваву дискусію. Учасники схвально відгукнулись щодо організації та проведення семінару. Матеріали семінару будуть опубліковані у збірці доповідей.

Спілкування фахівців з неруйнівного контролю на виставці та семінарі дасть змогу розширити ділові контакти, набути нових партнерів, домовитися про співробітництво на майбутнє.