

СОДЕРЖАНИЕ

[Для просмотра полного текста доклада достаточно
кликнуть мышью на название этого доклада в содержании.](#)

В. И. Иванов. Об истории развития метода акустико-эмиссионного контроля	1_1_2
Х. М. Ханухов. О создании центра мониторинга рисков и обеспечения защищенности стратегически важных объектов от тяжелых катастроф	1_2_1
В. И. Эльманович. Метод АЭ в системе инспекции на базе оценки риска	1_2_2
В. И. Иванов, И. Э. Власов. Основные проблемы акустико-эмиссионного контроля промышленных объектов	1_2_3
А. В. Жуков, А. Н. Кузьмин. К вопросу распространения акустических волн в нефтепроводах большого диаметра	1_2_4
В. В. Городович, А. Г. Комаров, В. Н. Толкачев. Регистрация дефектов III – IV класса в реальном времени: возможности метода, условия выявления, способствующие, мешающие и исключающие факторы	1_2_5
В. А. Гуменюк, Н. А. Казаков, В. А. Сульженко, А. В. Яковлев. Акустико-эмиссионный контроль процесса сварки объектов морской техники ..	1_2_6
В. Н. Костюков, А. П. Наumenко, С. Н. Бойченко. Исследование характеристик акустико-эмиссионных сигналов	1_2_7
А. А. Дубов, А. Л. Углов. Опыт стандартизации комитета ТК-132 в области технической диагностики, контроля напряжений и оценки ресурса	1_2_8
Т. А. Сурина, И. В. Эльманович. Инспекция на базе оценки риска технологического оборудования установки каталитического крекинга в условиях пятилетнего межремонтного пробега	2_1_1
А. И. Сагайдак. Практическое применение метода акустической эмиссии для оценки работы железобетонных конструкций крановой эстакады Саяно-Шушенской ГЭС	2_1_2
С. В. Каменский, Д. А. Зотов, К. Е. Нагинаев. Опыт применения метода акустической эмиссии при диагностировании технологического оборудования компрессорных станций ОАО «Газпром»	2_1_3
К. В. Владимиров, А. И. Гневко, С. В. Гразион, О. Е. Зубов, А. А. Сорокин, М. Б. Морозов. О выявляемости дефектов в металлоконструкциях с применением акустической эмиссии	2_1_5
В. А. Барат, А. Н. Кузьмин, М. Ю. Ростовцев. Современные методы фильтрации сигналов акустической эмиссии	2_1_6
А. И. Сагайдак. Акустическая эмиссия. Современное состояние стандартов и руководящих принципов. Сравнительная оценка и перспективы	2_2_1
Е. Ю. Нефедьев. АЭ мониторинг циклически нагруженных конструкций	2_2_4
В. А. Кобзев. Парадоксы при использовании АЭ-критериальной оценки технического состояния оборудования нефтехимических предприятий	2_2_5

А. А. Дубов, Ал. А. Дубов. Возможности метода магнитной памяти металла для мониторинга развития трещин	2_2_6
А. Г. Комаров. Программное обеспечение современных АЭ систем – возможности, регистрируемые параметры и совместная работа	2_2_7
М. Ю. Ростовцев, В. А. Барат, Д. А. Терентьев. Калибровка ПАЭ в программе «A-LINE 32D»	2_2_8
А. Н. Калиниченко, Б. М. Лапшин. Акустическая эмиссия при трении манжеты внутритруб- ного объекта о стенку трубопровода	3_1_1
К. А. Булыгин, Д. А. Терентьев. Автоматическое распознавание дисперсионных кривых на спектрограмме АЭ сигнала	3_1_3
Т. Э. Чепик, Г. П. Батов. Подготовка и аттестация специалистов НК по акустико-эмиссионному методу контроля	3_1_4
Б. М. Лапшин, А. Л. Овчинников, Д. А. Мозырин. Разработка и применение акустико-эмиссионной аппаратуры для обнаружения утечек на магистральных газо- и нефтепроводах	3_1_5

ОБ ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ МЕТОДА АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ

В. И. Иванов

ЗАО НТЦ «Промышленная Безопасность», г. Москва

Вашему вниманию представлен доклад, отражающий взгляд автора на мозаичную картину развития метода акустической эмиссии (АЭ) в России как на исторический процесс. По мнению автора метод АЭ является тонким и в то же время могучим инструментом исследования динамических процессов в твердом теле, жидкости и газе, а также наиболее мощным методом неразрушающего контроля и технического диагностирования (НК и ТД). Акустико-Эмиссионную Диагностику (АЭД) мы номинируем как метод определения технического состояния объекта с целью оценки его безопасности и прогнозирования ресурса.

Специальные исследования АЭ проводились потихоньку с начала XX в. Затем в развитии метода АЭ можно выделить несколько этапов, включая нулевой (природный, естественный), этап начального интереса к явлению, этап начальных, последовательных лабораторных исследований, этап начальных промышленных применений и более углубленных лабораторных исследований, этап широких промышленных применений, этап превращения метода в метод ТД и мониторинга.

Первый взрывной подъем интереса к методу АЭ в СССР произошел в конце 1960-х – начале 1970-х гг., когда пришло понимание того, что этот метод может стать мощным инструментом исследования деформации и контроля процессов образования и развития дефектов. Второй подъем произошел в середине 1990-х гг., когда большая когорта специалистов из НИИ вынуждена была пойти в промышленность для использования метода АЭ в практике промышленного НК. В докладе описано развитие метода и приведены организации и специалисты, участвовавшие в процессе развития метода АЭ в XX в.

АЭ как природное явление существовала еще до появления жизни на Земле. Первобытный человек, слыша треск ломающихся сучьев под крадущимся хищником, хруст снега, грохот лавины, ощущая землетрясение, должен был делать правильные выводы, чтобы выжить. Еще до появления термина «Акустическая эмиссия» данное явление использовалось человеком для ориентации в окружающем его мире. Это было жизненно важно. Таким образом, явление «Акустическая эмиссия» было известно человеку с древних времен.

Краткие сведения о работах в области АЭ приведены в книгах [1 – 4] и ряде других. Расширенный исторический очерк по использованию явления АЭ приведен в реферативном сборнике [4], где перечислены акустические явления, упомянутые и отмеченные в исторических памятниках, начиная с нескольких тысячелетий до новой эры.

Акустические эффекты, которые мы в настоящее время называем АЭ, естественно слышали древние гончары, когда в процессе изготовления трескались их изделия. Это было за 6 – 7 тысяч лет до рождения Христа. Наверное, слышали акустические сигналы мастера бронзового века, когда удалось получить олово, и оно издавало звуки при изгибе, как мы сейчас понимаем, в результате двойникования. Впоследствии возник даже специальный термин – «крик олова». Древнейшие куски олова найдены на острове Лесбос, и датируются они

до 2600 г. до н. э. Первое записанное на «бумажном носителе» наблюдение АЭ было сделано в VIII в. арабским алхимиком Джабиром ибн Хайяном, когда его удивили звуки при деформировании олова (Юпитера). Он также описал звуки, издаваемые железом (Марсом) при его отливке. Сейчас эти звуки соотносятся с мартенситными превращениями.

В XX в. начались первые научные исследования АЭ. В 1916 г. Г. Чохральский описал акустические явления в цинке и олове. А. М. Портевен и Ф. Ле Шателье (1924 г.) отмечали излучение звука на расстоянии нескольких метров, связанные с прерывистыми пластическими деформациями и формированием полос Людерса при деформировании образцов из алюминий-медных-марганцевых сплавов. Известные физики П. С. Эренфест и А. Ф. Йоффе (1924 г.), Р. Дж. Андерсон (1926 г.), М. В. Классен-Неклюдова (1929 г.), Э. Шеил (1929 г.), П. В. Бриджмэн (1937 г.) отмечали и исследовали звуковые эффекты при деформации каменной соли, в монокристаллах цинка, образцах дюралюминия за пределом текучести и перед разрушением, акустические эффекты в монокристаллах и поликристаллах латуни, поликристаллах алюминия, при образовании мартенсита в стали, при сжимающих нагрузках при скручивании многих металлов и неметаллов – титана, стронция и других. Ч. С. Баррет отмечал звуковые эффекты при трансформации лития в гранецентрированную кубическую решетку наподобие звуковых эффектов при двойниковании олова или магния и образовании мартенсита. Он заключил, что трансформация идет отрывистым сдвиговым движением в малых изолированных районах.

Следующий этап был связан с исследованием АЭ на образцах. Первые исследования проведены в Германии Ф. Форстером и Э. Шейлом в 1936 г. Они отмечали звуковые эффекты при образовании мартенсита в стали с 29 % никеля. В США У. П. Майсон, Х. Дж. Макс-кимин и В. Шокли исследовали звуковые эффекты при деформировании сжатием чистого олова. При деформировании алюминиевых кристаллов звуковых эффектов они не регистрировали. Третий эксперимент с применением приборов и образцов был проведен в Англии Д. Дж. Миллером в 1950 г. Он исследовал двойникование в монокристаллических проводах кадмия.

Звуковые эффекты отмечались А. Ф. Йоффе в экспериментах по деформации цинка и каменной соли. Систематическое исследование АЭ в горном деле началось вскоре после окончания Второй мировой войны М. С. Анцыферовым в институте горного дела им. А. А. Скочинского [5]. Работы проводились в звуковом диапазоне с использованием довольно несовершенной техники, соответствующей технике того времени. Однако результаты были весьма важными и могли обеспечить предупреждение одной из наиболее серьезных опасностей при проведении горных работ – внезапных горных ударов. Однако повсеместного внедрения результатов этих работ в то время не удалось достичь. До сих пор многие аварии на шахтах связаны с этими явлениями.

Большинство из перечисленных выше работ, за исключением работ М. С. Анцыферова, носило характер научных, лабораторных исследований, не связанных с практическим применением результатов. В них выявлялись акустические эффекты при деформировании и разрушении различного рода материалов. До второй мировой войны звуковые эффекты регистрировались, в основном, «невооруженным» ухом. Как правило, они носили характер регистрации своеобразного звукового явления при тех или иных ситуациях в тех или иных материалах. Настоящие лабораторные исследования с применением специальных образцов, приборов и организации экспериментов начались в 50-х годах XX века.

Систематические, целенаправленные работы по исследованию АЭ как объекта научного изучения впервые проводились И. Кайзером в Германии в начале 1950-х гг. Он испытывал образцы из обычных конструкционных материалов, нагружая их в испытательной машине, и искал связь АЭ с кривой нагружения. И. Кайзер регистрировал АЭ во всех испытанных им

материалах, включая олово, свинец, дюралюминий, медь, латунь, чугун, сталь конструкционная, сталь инструментальная и дерево. Именно им был открыт эффект прекращения регистрации эмиссии при повторном нагружении образца вплоть до достижения нагрузки предыдущего цикла. Природа данного эффекта была впоследствии объяснена, а эффект был назван его именем. И. Кайзером были также идентифицированы два вида АЭ – непрерывная и импульсная.

Работы по интенсивному исследованию АЭ продолжены в конце 1950-х, начале 1960-х гг в США Б.Х. Скофилдом, К.А. Тэтро, и другими исследователями. В 1961 г. А. Грин с коллегами при гидроиспытаниях корпусов ракет отмечали звуковые эффекты, на которые они обратили внимание и начали их регистрировать с использованием приборов. Анализ экспериментов выявил в корпусе развивающуюся трещину, которая затем привела к разрушению при нагрузке 56 % от величины испытательной нагрузки. Тот факт, что, регистрируя АЭ можно обнаружить развивающийся дефект, определить его координаты и предсказать возможное разрушение, немедленно возбудило взрывной интерес к этому явлению. Х. Данеган, работая в Ливерморской радиационной лаборатории, заинтересовался АЭ в 1962 г.

Научная и деловая активность Б. Х. Скофилда, К. А. Тэтро, Х. Данегана, А. Т. Грина и ряда других американских специалистов привела к ускоренному и широкому использованию метода АЭ для контроля промышленных объектов в США, начиная с середины 1960-х гг. Первая компания по производству аппаратуры АЭ и контролю производственных объектов была создана Х. Данеганом в 1969 г. Несколько позднее в развитии метода АЭ приняли участие А. Поллок, С. Вахавиолос и другие. Энергичные американские деловые ученые и инженеры, еще не выяснив природу АЭ, активно продвигали этот метод в промышленность.

Исследования АЭ в СССР были начаты в конце 1960-х – начале 1970-х гг. Первыми организациями были НПО Дальстандарт, НПО ЦНИИТМАШ, ПО Волна, ИМЕТ, НИИТМ, ИАЭ и ряд других. Первый Всесоюзный семинар «Неразрушающий контроль напряженно-деформированного состояния конструкционных материалов и изделий с использованием эмиссии волн напряжений» был организован под руководством В. А. Грешникова в ХФ ВНИИФТРИ в 1972 г. В семинаре приняло участие 82 докладчика (Приложение 1), зачитано 57 докладов. На рис. 1 представлены 4 участника семинара на теплоходе на реке Амур. Через месяц состоялся второй семинар в Москве.

Некоторое значение для развития метода АЭ в СССР играли международные связи ученых и организаций с зарубежными специалистами и фирмами. В частности, в мае 1975 г. в ЦНИИТМАШ (при поддержке Минэнерго – В. В. Черныха) был проведен семинар, с участием фирмы Данеган/Эндевко, на котором американские и английские специалисты ознакомили коллег со своими научными и техническими разработками (рис. 2)

Впоследствии в СССР приезжали известные специалисты Ю. Айсенблаттер (Германия), Р. Грин (США) и другие. Тесное сотрудничество установилось с Президентом Американского Общества НК (в 1990-х гг.) президентом фирмы РАС С. Вахавиолосом. Впоследствии была организована совместная фирма «Диапак». Многим специалистам в области АЭ было интересно было принять участие в семинарах, организованных в 1980-е гг. А. Я. Недосекой вначале в г. Киеве (ИЭС), затем и в Болгарии в 1988, 1989 гг.

Первая Всесоюзная АЭ конференция была проведена в 1984 г. в г. Ростов-на-Дону НИИМПМ, организовал А. С. Трипалин при поддержке акад. И. И. Воровича). На рис. 3 приведен эскиз значка конференции.

Вторая Всесоюзная конференция была проведена в 1986 г. (ВНИИНК, г. Кишинев, организатор В. Н. Соседов). Третья конференция прошла в 1992 г. (НИКИМТ, г. Обнинск, организаторы – Л. П. Волков, Н. Н. Колоколова). Четвертая конференция была проведена в 2008 г. в рамках НПС «РИСКОМ» (Липки, организатор – В. Г. Харебов).

Конференции, семинары (Приложение 2) и разработка НТД проводились под эгидой общественных организаций. Рабочая группа по АЭ при Госкомитете по науке и технике была создана в 1975 г. В. А. Грешниковым. После его отъезда в длительную командировку группу возглавил В. И. Иванов. Рабочая группа просуществовала до распада страны в 1991 г. С 1996 г. при Госгортехнадзоре России был создан «Экспертно-Консультативный Совет по проблемам применения метода акустической эмиссии для контроля объектов, подведомственных Госгортехнадзору России». Совет возглавили А. А. Шаталов и В. И. Иванов. Состав Совета приведен в Приложении 3.

Наибольший вклад в развитие метода АЭ в СССР и России и большой объем работ выполнили следующие организации и специалисты:

ХФ ВНИИФТРИ (ПО «Дальстандарт»), г. Хабаровск. В. А. Грешников, став директором Хабаровского Филиала ВНИИФТРИ (ХФ «ВНИИФТРИ») в 1968 г., развернул исследования АЭ широким фронтом. Были времена (1970-е – 1980-е гг.), когда в ХФ «ВНИИФТРИ» число сотрудников, занимающихся АЭ исследованиями и разработками, превышало 150 человек. Ведущие специалисты: Ю. Б. Дробот, Ю. И. Болотин, В. А. Константинов, А. М. Лазарев, Л. А. Маслов, Ю. И. Лыков, В. П. Ченцов, В. И. Панин, В. В. Лупанос, А. Н. Бондаренко, В. И. Бесхлебный, В. П. Троценко, И. В. Гулевский, В. Д. Рубинштейн, В. В. Нечаев, В. М. Белов, А. П. Дроздов, В. И. Полунин, С. И. Рыбка, В. А. Кротов, В. И. Архипов, Б. Я. Маслов и другие.

Основное направление было связано с исследованиями АЭ с целью разработки методов и средств НК производственных объектов. Большое внимание было уделено исследованиям связи АЭ и механических параметров и свойств конструкционных материалов. Были разработаны методики испытаний лабораторных образцов и создана специализированная испытательная техника, в частности «бесшумная» испытательная машина, в которой нагружение осуществлялось наливанием воды в бак, связанный рычагом с устройством нагружения образца. Создана специальная камера типа камеры Фарадея, защищенная от внешних электромагнитных помех замкнутой металлической сеткой.

Получен большой объем информации, позволивший, например, ввести понятие физического предела текучести материалов и определить факторы, влияющие на АЭ параметры материалов. Проводились исследования влияния технологических операций, в частности наклепа, на АЭ свойства. Большое внимание было посвящено исследованиям процессов сварки, усталости металлов, процессов роста трещин.

Особое направление было связано с отработкой методик измерения параметров АЭ и метрологического обеспечения. Разработаны методы и средства амплитудного анализа сигналов АЭ. Измерения смещений поверхности с целью метрологических измерений параметров АЭ, для чего была создана установка высшей точности с использованием лазерного интерферометра.

В НПО «ЦНИИТМАШ» начались работы в области АЭ контроля под руководством В. И. Иванова в 1970 г., когда возникла необходимость комплексного и системного подхода оценки безопасности производственных объектов. Метод АЭ в этом отношении давал больше возможностей, чем другие методы НК. Исследования АЭ проводили: В. Н. Куранов, С. П. Быков, А. Н. Рябов, К. К. Царев, А. А. Юдин, О. Р. Туйкин, В. А. Васильев, В. В. Фомин, В. С. Урусов, В. Д. Королев, М. Д. Байков, В. Н. Игнатов, С. А. Воронин, В. П. Пронин, Л. И. Доможиров и другие.

Проводились исследования во всех направлениях, которые обеспечивали использование АЭ метода как метода исследования свойств материалов, развития дефектов, контроля процессов сварки, исследований и разработки в области НК и ТД, создания соответствующих методических документов.

Основные результаты в области АЭ, полученные в НПО «ЦНИИТМАШ»:

- проведены исследования и разработана система классификация и показателей ПАЭ (рис. 4);
- выполнена теоретическая оценка предельной чувствительности АЭ приборов и ПАЭ (составляет $\approx 1 \text{ мм}^2$) в 1972 – 83 гг.;
- разработан локально-динамический критерий оценки источников АЭ – 1981 г. Предложено понятие катастрофически активного источника АЭ (рис. 5);
- разработана методика оценки предельного срока эксплуатации объектов по результатам АЭ контроля – 1982 г.;
- создана модель формирования единичного импульса АЭ – 1985 г. (опубликована в ДАН СССР в 1986 г.), предложено понятие «фрактон» – АЭ квант разрушения;
- создана модель роста усталостной трещины – 1980 – 85 гг. (опубликована в ДАН СССР в 1986 г.);
- введено понятие устойчивости параметров АЭ – 1985 г.;
- введено понятие и проведена оценка достоверности АЭ контроля – 1987 г.;
- создана четырехуровневая система классификации и оценки источников АЭ с введением критериев браковки – 1990 г.;
- создана методика численного анализа прохождения сигналов АЭ через преобразователь – 1990 г.;
- разработано большинство общегосударственных методических и нормативно-технических документов в области АЭ.

Перечисленные результаты были получены после испытаний нескольких сотен реальных объектов и моделей, доведенных до разрушения, и многих тысяч лабораторных образцов.

НПО «Волна» (ВНИИНК), г. Кишинев. На первом этапе при поддержке В. Н. Соседова проводились поисковые работы по исследованию параметров АЭ различных материалов и в различных условиях нагружения. Далее был разработан широкий спектр аппаратуры АЭ. Ряд разработок был доведен до серийного выпуска АЭ приборов и систем. ВНИИНК совместно с ИАЭ им. И. В. Курчатова была разработана многоканальная АЭ система модели АФ-33, которая использовалась на атомных электростанциях. В работах в разное время принимали участие И. И. Авербух, А. Ю. Детков, В. Е. Вайнберг, Л. М. Кушкулей, В. Н. Колмогоров, В. К. Анисимов, В. Б. Пастернак и другие.

В ИАЭ им. И.В.Курчатова работы в области АЭ начались в 1975 г. по инициативе К. Б. Вакара и при поддержке президента АН СССР, директора института, акад. А. П. Александрова. Были созданы вначале две лаборатории, которые возглавили К. Б. Вакар и Г. В. Яковлев. Первая из них занялась методическими исследованиями и разработкой математического обеспечения, вторая – разработкой аппаратуры. В дальнейшем этими лабораториями руководили В. В. Шемякин и С. А. Тарараксин. Кроме них в работах принимали участие Н. И. Овчинников, Д. П. Красильников, А. Л. Ниссельсон, В. И. Артюхов, В. И. Макаров, В. Н. Перевезенцев, В. Р. Ржевкин, В. И. Иванов, В. С. Евстропов, Т. Б. Петерсен и другие. Параллельно в том же институте работала группа специалистов-прочнистов под руководством А. А. Тутнова и И. А. Тутнова.

В результате выполненных работ были созданы первые отечественные многоканальные системы АЭ контроля объектов атомной энергетики, которые в дальнейшем выпускались ПО «Волна». В настоящее время созданы фирмы «Диатон» и «Диапак» с участием ряда сотрудников ИАЭ. Фирмы разрабатывают и применяют приборы АЭ для контроля производственных объектов.

НИИТМ, г. Москва. Работы в области АЭ начались в 1971 – 73 гг. по инициативе Е. Д. Мезинцева. Основной целью была разработка методов и средств АЭ контроля спец. из-

делий космической техники. В работах принимала участие группа сотрудников, среди которых В. И. Карпов, Н. В. Бобылев, К. В. Хилков и другие.

ИМЕТ им. А. А. Байкова проводил исследования источников АЭ при пластической деформации, изучения развития трещин, начиная с 1972 г. с участием О. И. Гусева, А. Г. Пенкина. Группа Л. И. Маслова организовала исследования АЭ и разработку аппаратуры применительно к контролю промышленных объектов, строительных конструкций, мостов. Ряд работ в области АЭ выполнено под руководством Л. Р. Ботвиной.

ИЭС им. Е. О. Патона, г. Киев. Работы начались 1975 – 76 гг. по инициативе и при поддержке академика Б. Е. Патона. Был создан отдел, руководимый А. Я. Недосекой, в котором проводились работы по исследованию АЭ и созданию многоканальной аппаратуры для контроля различных объектов. В работах в ИЭС принимали участие А. А. Грузд, Н. Т. Хромяк, Ю. В. Жбанов, Т. М. Швеи, И. В. Пархоменко, А. Р. Донин и другие.

РГУ, г. Ростов-на-Дону. В НИИ механики и прикладной математики РГУ при поддержке акад. И. И. Воровича в отделе А. С. Трипалина исследованиями АЭ и разработкой средств АЭ контроля активно занималась большая группа сотрудников, включая С. И. Буйло, С. Г. Хорошавину, В. М. Шихмана, А. И. Козинкину и других.

МИФИ, г. Москва. Работы, возглавляемые В. М. Барановым, затрагивали широкий круг проблем в области АЭ. Исследованы источники АЭ, связанные с пластической деформацией и ростом трещины. Подробно исследованы процессы излучения упругих колебаний в процессе коррозии. В работах принимали участие С. А. Сарычев, Е. М. Кудрявцев, К. И. Молодцов, В. М. Щавелин, Т. В. Губина и другие.

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Ленинград/Санкт-Петербург. В институте метод АЭ использовался как один из тонких инструментов исследования процессов, происходящих в твердых телах и влияющих на прочность объекта. Исследования физики разрушения материалов и АЭ проводили: В. С. Куксенко, А. М. Лексовский, В. А. Петров, В. Н. Савельев, С. А. Станчиц и другие. Систематические и целенаправленные исследования начались после 1975 г., в результате просьбы акад. А. П. Александрова подключиться к работам в рамках проблемы создания методов и средств АЭ контроля атомных энергетических объектов. В дальнейшем В. А. Петров совместно с Г. В. Петровым создали фирму «ОРК», а В. Н. Савельев – фирму «Прадиком». В ЗАО «КОНТЕС» под руководством В. Н. Бырина созданы АЭ течеискатели, используемые на кораблях ВМФ. В ЦКТИ им. Ползунова под руководством Е. Ю. Нефедьева систематически проводятся работы по исследованию АЭ при деформации и разрушении объектов энергетики.

ОКБ Машиностроения, Нижний Новгород. Проведен большой объем работ по применению метода АЭ для исследования прочности металлов и конструкций. Выполнены разработки акустической части проекта системы мониторинга изотермических хранилищ сжиженного газа в г. Дзержинске Нижегородской области. В работах принимали участие С. Н. Пичков, В. В. Данилин и другие. Аппаратную часть разработала фирма «Алькор» под руководством И. В. Разуваева. Система начала работать в режиме мониторинга с 1996 г. В Нижнем Новгороде работал Центр технической диагностики, в котором в области АЭ работали сотрудники А. М. Ширяев, А. В. Камышев, А. А. Миронов и др.

ОАО «Оргэнергонефть» (Самарский филиал). Здесь под руководством И. Э. Власова работы в области АЭ начались в 1985 г. Это были первые в стране профессиональные работы по производственному контролю промышленных объектов в нефтяной, газовой, нефтехимической, нефтеперерабатывающей промышленности и в энергетике. В работах принимали

участие Ю. И. Васильев, А. А. Сазонов, Г. В. Прияткин, С. А. Киселев, В. В. Кучеров и другие.

НПО «ВНИКТИ нефтехимоборудование», Волгоград. Начало работ в области АЭ – с 1978 г., когда в организации в лабораториях Ю. А. Нечаева и Б. П. Пилина были развернуты работы по АЭ контролю. Основное направление работ – применение метода АЭ для контроля производственных объектов. В работах участвовали З. И. Ролдугина, В. А. Семенцов, А. Г. Комаров, В. Н. Толкачев, В. И. Эльманович и другие.

АО «Криогенмаш», г. Балашиха, МО. Работы начались В. А. Миргазовым с 1986 г. и имели целью освоение метода АЭ для контроля объектов криогенной техники. Участвовали В. М. Муратов, В. В. Плотников, Н. Т. Бобель.

НИИИН, г. Томск. Основное направление работ, проводимых Б. М. Лапшиным с 1981 г., связано с разработкой методик и средств АЭ контроля течей в промышленном оборудовании и трубопроводах.

ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, Ленинград/Санкт-Петербург. Работы в области АЭ были начаты в 1979 г. (В. А. Гуменюк, А. В. Яковлев, В. А. Сульженко, В. А. Казаков, Н. А. Казаков, впоследствии Е. И. Несмашный). Основное направление – исследование процессов роста трещин при статических и при циклических испытаниях, диагностика объектов.

В ЦАГИ им. Н. Е. Жуковского, г. Жуковский, МО работы в области АЭ были начаты в середине 1970-х гг. (Ю. П. Бородин, И. В. Гулевский). Основные направления работ – использование метода АЭ для оценки прочности авиационных конструкций, анализ АЭ сигнала как импульсного случайного процесса.

Практическое использование метода АЭ при изготовлении подводных лодок осуществлялось на **«Северном машиностроительном предприятии»** (г. Северодвинск), начиная с 1980 г. по инициативе В. К. Шухостанова, затем В. В. Киреенко. Интересные результаты были получены при использовании метода АЭ в процессе сварки конструкций и контроле подъемных сооружений.

В НПО «Молния», г. Москва направленность проводимых по инициативе В. В. Коннова работ предполагала использование метода АЭ для оценки повреждаемости конструкций космических летательных аппаратов «Буран».

Исследования АЭ при высокотемпературной ползучести материалов паропроводов электростанций проводились в **ВТИ**, начиная с 1974 г. (В. А. Лукьяненко).

В Физико-механическом институте им. Г. В. Карпенко, г. Львов работы в области АЭ были связаны с теоретическими и экспериментальными исследованиями процессов разрушения, созданием моделей излучения сигнала образующимися и растущими трещинами. Работы в отделе А. Е. Андрейкива выполняли Н. В. Лысак, О. Н. Сергиенко, В. Р. Скальский и др.

На **«Южном машиностроительном предприятии»**, г. Днепропетровск метод АЭ использовался для исследования процессов разрушения алюминиевых сплавов и поиска дефектов в конструкциях космических аппаратов. В работах принимали участие В. Г. Тихий, Г. А. Бигус и др.

В Институте проблем прочности (ИПП, г. Киев) активно использовался метод АЭ для исследования процессов деформации и разрушения различных материалов начиная с 1971 г. (В. А. Стрижало, С. И. Лихацкий, Ю. В. Добровольский, В. А. Стрельченко, М. В. Калашник и др.).

Ижевский Государственный технический университет. Проводятся исследования излучения акустических волн растущими трещинами. Руководил работами Г. А. Буденков.

С распадом СССР произошли существенные изменения в распределении сил, работающих в области АЭ. Многие известные научные центры потеряли свой потенциал. Появи-

лись новые организации и фирмы, занимающиеся применением метода АЭ в промышленности. Большинство научных работников, чтобы получить стабильное финансирование, перешли на работу в промышленность, выполняя порой непосредственно работы по НК производственных объектов. Среди фирм, появившихся за последнее время, можно отметить следующие.

«ИНТЕРЮНИС», г. Москва. Разработка аппаратуры АЭ под руководством В. Г. Харебова началась в 1988 г. Созданы многофункциональные системы АЭ контроля, основная модель – «А-Line 32» с различными модификациями. Фирма занимает одно из ведущих мест в России по производству и продажам аппаратуры АЭ.

В **«ИркутскНиихиммаш»** С. П. Быков с участием А. В. Юшина продолжил работы в области АЭ, начатые в ЦНИИТМАШ.

В **Тольяттинском Гос. университете** Д. Л. Мерсон исследовал АЭ, возникающую на поверхности твердых тел.

Большой объем работ по исследованию АЭ и разработке аппаратуры АЭ был выполнен в **г. Новосибирске в ФГУ «СибНИА им. С. А. Чаплыгина»** и **«Сибирском государственном университете путей сообщения»** под общим руководством А. Н. Серьезнова. В этих работах принимали участие Л. Н. Степанова, В. В. Муравьев, К. Л. Комаров, А. Е. Кареев, С. И. Кабанов, Е. Ю. Лебедев, В. Л. Кожемякин, А. Л. Бобров, Е. В. Бояркин, М. В. Муравьев, С. А. Бехер, И. С. Рамазанов, Б. М. Харламов и др.

Метод АЭ продолжает с переменным успехом и поэтапно развиваться как в нашей стране, так и за рубежом. Свидетельством этого является увеличение специалистов по АЭ контролю. Кроме того, регулярно выходят книги по АЭ. Список основных книг приведен в Приложении 4. Работы по использованию метода АЭ для контроля промышленных объектов проводятся с использованием методических документов, список которых приведен в Приложении 5. Часть организаций, которые применяют метод АЭ, приведены в Приложении 6. В этих работах используется аппаратура, выпускавшаяся и выпускаемая фирмами, приведенными в Приложении 7.

Автор доклада просит извинения у тех специалистов и организаций, которые не были упомянуты в тексте из-за ограничений в пространстве текста, объемов памяти, энергии и времени (IVEM).

Литература

1. Грешников В. А., Дробот Ю. Б. Акустическая эмиссия. – М.: Изд-во стандартов, 1976, – 272 с.
2. Неразрушающий контроль. Россия. 1990 – 2000 гг./ Справочник // под ред. В. В. Ключева. – М.: Машиностроение, 2001. – 616 с.
3. Иванов В. И., Власов И. Э. Метод акустической эмиссии. Неразрушающий контроль / Справочник в 8 т. // Под общ. ред. В. В. Ключева. Т. 7. Кн. 1. – М.: Машиностроение. 2005. – 340 с.
4. Druillard T. F. Acoustic Emission. A Bibliography with Abstracts. IFI/Plenum. – New York: 1979. – 787 p.
5. Анцыферов М. С., Анцыферова Н. Г., Каган Я. Я. Сейсмоакустические исследования и проблемы прогноза динамических явлений. – М.: Наука, 1971. – 136 с.



Рис. 1. Участники первого российского семинара в г. Хабаровск (Дальний Восток, река Амур, 1972 г.); слева направо: В. И. Иванов, О. В. Гусев, Е. Г. Смирнов, М. А. Стрельчик



a



b

Рис. 2. Советско-американский семинар 1975 г.: *a* – перед семинаром в гостинице «Киевская», слева направо: А. Pollock, В. Иванов, М. Gross, Н. Dunegan, D. Harris, М. Kelly, А. Вopilкин; *b* – в зале заседаний

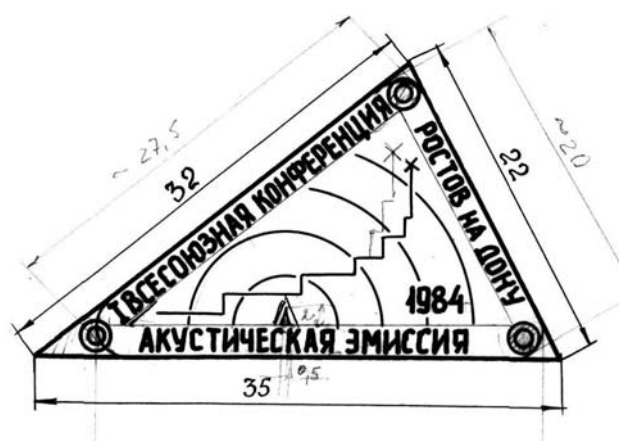


Рис. 3. Эскиз значка 1-ой конференции

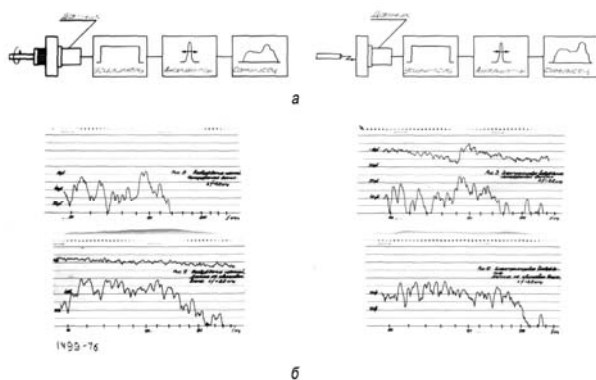


Рис. 4. Начало исследований ПАЭ: схема калибровки ПАЭ с использованием щеточного и электроискрового возбуждения и соответствующие амплитудно-частотные характеристики (1970 – 1974 гг.):
 а – разработка и исследование датчиков и блоков аппаратуры АЭ; б – частотные характеристики резонансного детектора АЭ:
 слева – механическое возбуждение,
 справа – электрическое возбуждение

Рис. 5. АЭ (запись на самописец V&K) при разрушении изгибного образца на разных стадиях; I – пассивный источник, II – активный источник, III – критически активный источник, IV – предкатастрофический источник.

Это первые качественные записи АЭ, 1971 г.

Приложение 1

Докладчики на первом Всесоюзном семинаре «Неразрушающий контроль напряженно-деформированного состояния конструкционных материалов и изделий с использованием эмиссии волн напряжений», 1972, г. Хабаровск. Первые в области АЭ в СССР

1. Авербух И. И.	22. Залесский В. В.	43. Максак В. И.	64. Рожков Е. В.
2. Архипов В. И.	23. Захаров Ю. А.	44. Маслов Л. А.	65. Рубинштейн В. Д.
3. Бакшаев Б. Г.	24. Зейтман Г. И.	45. Мелехин В. П.,	66. Рыбка С. И.
4. Баранов В. М.	25. Зотов, А. Д.	46. Милосердин Ю. В.	67. Рыжиков С. А.
5. Бегма О. Б.	26. Иванов В. И.	47. Милыптейн Л. И.	68. Самсонов В. А.
6. Белов В. М.	27. Иевлев И. Ю.	48. Минц Р. И.	69. Семенов В. Я.
7. Бесхлебный В. И.	28. Коваль И. Г.	49. Молодцов К. И.	70. Смоленская Н. Г.
8. Билибин В. В.	29. Колмогоров В. Н.	50. Мосесов М. Д.	71. Соседов В. Н.
9. Болотин Ю. И.	30. Комарова Г. П.	51. Надлер В. Б.	72. Темник Н. Л.
10. Бондаренко А. Н.	31. Константинов В. А.	52. Нечаев В. В.	73. Трипалин А. С.
11. Вайнберг В. Е.	32. Корнилова Г. А.	53. Никонов В. И.	74. Троценко В. П.
12. Войницкий А. Г.	33. Корсуненко А. А.	54. Новиков А. А.	75. Филиппова Н. Б.
13. Горловский В. А.	34. Кортон В. С.	55. Новиков Н. В.	76. Хрусталева А. Ф.
14. Градинар В. В.	35. Кротов В. А.	56. Однопозов Л. Ю.	77. Чегорнская О. Н.
15. Грешников В. А.	36. Кушкулей Л. М.	57. Панин В. И.	78. Ченцов В. П.
16. Гузь И. С.	37. Лазарев А. М.	58. Перебейнос Б. П.	79. Шишелов И. А.
17. Гулевский И. В.	38. Лихацкий С. И.	59. Полунин В. И.	80. Шушунов В. Н.
18. Гусаков А. А.	39. Лобастов Г. Я.	60. Полунина О. В.	81. Щербачева В. Н.
19. Дробот Ю. Б.	40. Лукьянов В. И.	61. Портной Н. Я.	82. Щукин Е. А.
20. Дроздов А. П.	41. Лупанос В. В.	62. Почтовик Г. Я.	
21. Зайцев Е. Л.	42. Лыков Ю. И.	63. Проскурин В. Ю.	

Приложение 2

Специализированные семинары и конференции по акустической эмиссии

1. Неразрушающий контроль напряженно-деформированного состояния конструкционных материалов и изделий с использованием эмиссии волн напряжений. Всесоюзный научно-технический семинар. г. Хабаровск. Сентябрь 1972 г.
2. Применение эмиссии волн напряжений для неразрушающего контроля качества материалов и изделий. Московский научно-технический семинар. г. Москва. Октябрь 1972 г.
3. Неразрушающий контроль напряженно-деформированного состояния конструкционных материалов и изделий с использованием эмиссии волн напряжений. Всесоюзный научно-технический семинар. г. Хабаровск. Октябрь 1975 г.
4. Акустическая эмиссия материалов и конструкций. (1-я Всесоюзная конференция). г. Ростов-на-Дону, 1984 г. Председатель оргкомитета акад. И. И. Ворович
5. II Всесоюзная конференция по акустической эмиссии. г. Кишинев. Ноябрь 1986 г. Председатель оргкомитета В. Н. Соседов
6. III Всесоюзная научно-производственная конференция по акустической эмиссии. Теория и практика. г. Обнинск. Сентябрь 1992 г. Председатель оргкомитета Л. П. Волков
7. IV Международная конференция «Акустическая эмиссия. Достижения в теории и практике». Москва – Липки, октябрь 2008 г. Председатель оргкомитета В. Г. Харебов

Приложение 3

Состав Экспертно-Консультативного Совета по проблемам применения метода акустической эмиссии для контроля объектов, подведомственных Ростехнадзору

- Шаталов А. А. (Председатель Совета) – начальник управления Ростехнадзора.
- Иванов В. И. (заместитель Председателя) – заместитель директора ОАО «Оргэнергонефть».
- Бигус Г. А. -профессор МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва.
- Быков С. П – зам. директора НПО «ИркутскНИИхиммаш», г. Иркутск.
- Власов И. Э. – генеральный директор ОАО «Оргэнергонефть».
- Гневко А. И. – начальник лаборатории, Академия Петра Великого, г. Москва.
- Колоколова Н. Н. – генеральный директор ИП «Ультратест», г. Обнинск.
- Миргазов В. А. – начальник лаборатории НПО «Криотехника», г. Балашиха.
- Лещенко В. В. – генеральный директор НТЦ «Нефтегаздиагностика», г. Москва.
- Пилин Б. П. – директор НУЦ при НПО «ВНИКТИ нефтехимоборудование», Волгоград.
- Платоненко В. Т. – директор АО «Химотест», г. Томск.
- Разуваев И. В. – директор НПП «Алькор», г. Дзержинск Нижегородской обл.
- Сергиев Б.П. – директор «ГИАП-ДИСТЦентр», г. Москва.
- Тарараксин С. А. – начальник отдела РНЦ «Курчатовский институт», г. Москва.
- Шемякин В. В. – генеральный директор ООО «Диаппак», г. Москва.
- Ханухов Х. М. – генеральный директор НПК «Изотермик», г. Москва.
- Харебов В. Г. – генеральный директор ООО «ИНТЕРЮНИС», г. Москва.

Приложение 4

Список книг по АЭ

1. Акустическая эмиссия гетерогенных материалов / Тематический сборник. – Л.: ФТИ им. А. Ф. Иоффе, 1986. – 176 с.
2. Артюхов В. И., Вакар К. Б., Овчинников Н. И. и др. Акустическая эмиссия и ее применение для неразрушающего контроля в ядерной энергетике / Под ред. К. Б. Вакара. – М.: Атомиздат, 1980. – 216 с.
3. Акустическая эмиссия материалов и конструкций / 1-я Всесоюзная конференция // Под. ред. И. И. Воровича, А. С. Трипалина, В. И. Иванова и др. Ч. 1. – Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского университета, 1989. – 192 с.
4. Акустическая эмиссия материалов и конструкций / 1-я Всесоюзная конференция // Под. ред. И. И. Воровича, А. С. Трипалина, В. И. Иванова и др. Ч. 2. – Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского университета, 1989. – 160 с.
5. Андрейкив А. Е., Лысак Н. В. Метод акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения. – Киев: Наукова Думка, 1989. – 176 с.
6. Баранов В. М., Губина Т. В. Применение акустической эмиссии для исследования и контроля коррозионных процессов. – М.: МИФИ, 1990. – 72 с.
7. Баранов В. М., Молодцов К. И. Акустикоэмиссионные приборы ядерной энергетики. – М.: Атомиздат, 1980. – 144 с.
8. Бачегов В. Н., Дробот Ю. Б., Лупанос В. В. Акустическое контактное течеискание. – Хабаровск: НТО Машиностроительной промышленности, 1987. – 77 с.
9. Буденков Г. А., Недзвецкая О. Н. Динамические задачи теории упругости в приложении к проблемам акустического контроля и диагностики. – М.: Физматлит, 2004. – 136 с.
10. Буйло С. И. Физико-механические и статистические аспекты повышения достоверности результатов акустико-эмиссионного контроля и диагностики. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2008. – 192 с.
11. Бунина Н. А. Исследование пластической деформации металлов методом акустической эмиссии. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1990. – 156 с.
12. Грешников В. А., Дробот Ю. Б. Акустическая эмиссия. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 272 с.

13. Гусев О. В. Акустическая эмиссия при деформировании монокристаллов тугоплавких металлов. – М.: Наука, 1982. – 108 с.
14. Дробот Ю. Б., Грешников В. А., Бачегов В. Н. Акустическое контактное течеискание. – М.: Машиностроение, 1989. – 120 с.
15. Дробот Ю. Б., Лазарев А. М. Неразрушающий контроль усталостных трещин акустико-эмиссионным методом. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 128 с.
16. Иванов В. И., Белов В. М. Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений. – М.: Машиностроение. 1981. – 184 с.
17. Иванов В. И., Власов И. Э. Метод акустической эмиссии. – В кн.: Неразрушающий контроль / Справочник в 8 т.// Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 7. Кн. 1. – М.: Машиностроение. 2005. – 340 с.
18. Кирякин А. В., Железная И. Л. Акустическая диагностика узлов и блоков РЭА. – М.: Радио и связь, 1984. – 192 с.
19. Андрейкив А. Е., Лысак Н. В. Метод акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения / Под ред. В. В. Панасюка. – Киев: Наукова Думка, 1989. – 176 с.
20. Неразрушающие методы контроля / Спецификатор различий в национальных стандартах разных стран // Под ред. В. Я. Кершенбаума. Т. 2 и 3. – М.: Центр Наука и Техника, 1994, 1995 гг.
21. Свириденко А. И., Мышкин Н. К., Калмыкова Т. Ф., Холодилов О. В. Акустические и электрические методы в триботехнике / Под ред. В. А. Белого. – Минск: Наука и техника, 1987. – 280 с.
22. Семашко Н. А., Шпорт В. И., Марьин Б. Н. и др. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении. – М.: Машиностроение, 2002. – 240 с.
23. Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Муравьев В. В. и др. Диагностика объектов транспорта методом акустической эмиссии. – М.: Машиностроение-Полет, 2004. – 368 с.
24. Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Кабанов С. И. и др. Акустико-эмиссионный контроль конструкций. – М.: Машиностроение, 2008. – 440 с.
25. Стрижало В. А., Добровольский Ю. В., Стрельченко В. А. и др. Прочность и акустическая эмиссия материалов и элементов конструкций / Под ред. Г. С. Писаренко. – Киев: Наукова Думка, 1990. – 232 с.
26. Трипалин А. С., Буйло С. И. Акустическая эмиссия / Физико-механические аспекты. – Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского университета, 1986. – 160 с.
27. Acoustic Emission Techniques and Applications / Ed. by J. C. Spanner. – Evanston (Illinois): Intex Publ. Co., 1974. – 274 p.
28. Acoustic Emission. ASTM Special Technical Publication 505. – Baltimore: ASTM, 1972. – 337 p.
29. Druillard T. F. Acoustic Emission. A Bibliography with Abstracts. IFI/Plenum. – New York, 1979. – 787 p.
30. Nondestructive Testing Handbook. Vol. 5. Acoustic Emission Testing. – ASME, 1987. – 603 p.
31. Skalskyi V. R., Koval P. M. Some methodological aspects of application of acoustic emission. – Lviv: Publ. House Spolom, 2007. – 336 p.
32. Williams R. V. Acoustic Emission. – Bristol: Adam Hilger Ltd., 1980. – 118 p.

Приложение 5

Нормативно-технические документы России в области акустико-эмиссионного НК и ТД

1. ГОСТ 25.002-80. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Акустическая Эмиссия. Термины, определения и обозначения. – М.: Изд-во стандартов, 1980.
2. МИ 207-80. Методика определения местоположения развивающихся дефектов акустико-эмиссионным методом. – Госстандарт. НПО «Дальстандарт», 1980.
3. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Акустическая эмиссия. Общие положения. РД 50-447-83. / Е. И. Тавер, О. В. Букатин, В. И. Иванов и др.
4. Методические рекомендации. Расчеты и испытания на прочность. Применение метода акустической эмиссии при определении характеристик вязкости разрушения. МР 240-87. / Е. Г. Смирнов, Е. И. Тавер, В. И. Иванов и др. – М.: ВНИИНМАШ, 1987.
5. ГОСТ 27655-88. Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения. – М.: Изд-во стандартов, 1988.

6. Государственная поверочная схема для средств измерений амплитуды ультразвукового смещения, колебательной скорости частиц поверхности твердого тела и коэффициентов электроакустического преобразования в диапазоне частот 0,001 – 50 МГц. /МИ 2039-89. – М.: Госстандарт, 1990.
7. Требования к аппаратуре акустической эмиссии, используемой для контроля опасных производственных объектов. РД 03-299-99. – М.: Госгортехнадзор России. 1999.
8. Требования к преобразователям акустической эмиссии, применяемым для контроля опасных производственных объектов. РД 03-300-99. – М.: Госгортехнадзор России, 1999.
9. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. ПБ 03-593-03 (РД-03-131-97 – М.: Госгортехнадзор России, 1997).
10. ГОСТ Р 52727-2007. Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования. – М.: Изд-во стандартов, 2007.
11. Методика акустико-эмиссионного контроля подземных резервуаров установок сжиженного газа. /Стандарт НПС «РИСКОМ». – М.: 2006.
12. Резервуары вертикальные стальные сварные для нефти и нефтепродуктов. Техническое диагностирование и анализ безопасности. / Методические указания. Сер. 03. / Колл. авторов. Ростехэкспертиза; НПС «РИСКОМ»; НПК «Изотермик». – М.: 2009. – 288 с.

Приложение 6

Список российских организаций работающих в области АЭ в период 1990 – 2000 гг.

1. Российский Научный Центр «Курчатовский институт», г. Москва
2. ВНИКТИ нефтехимоборудование, Волгоград
3. Криогенмаш, г. Балашиха
4. ИРКУТСКИЙ Химмаш, г. Иркутск
5. НПП «Алькор», г. Дзержинск
6. Нижегородский центр технической диагностики, Нижний Новгород
7. «ВНИИФТРИ», г. Хабаровск
8. Опытное конструкторское бюро машиностроения, Нижний Новгород
9. ВНИИнефтемаш, г. Москва,
10. Центр технической диагностики «Транснефть», г. Луховицы, МО
11. НИИ механики и прикладной математики, г. Ростов-на-Дону
12. ТЦТД «Химотест», г. Томск
13. МГТУ им.Н. Э. Баумана, г. Москва
14. НПФ «Технологическая аппаратура», Санкт-Петербург
15. НИИТМ, г. Москва
16. ЦНИИПСК, г. Москва
17. Московский межотраслевой консультативно-диагностический центр «АЭ-диагностика», г. Москва
18. ПО «Севмашпредприятие», г. Северодвинск
19. ВНИИГАЗ, пос. Развилка, МО
20. МИФИ, Москва
21. «Ультратест», г. Обнинск
22. ЦНИИ материалов, Санкт-Петербург
23. Ижевский физико-технический институт, г. Ижевск
24. ЗАО «Элтест», г. Москва
25. ЦНИИТяжмаш, Екатеринбург
26. ЦНИИ «Прометей», Санкт-Петербург
27. Физико-технический институт им.А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург
28. ГП «Оренбурггазпром», г. Оренбург
29. ПО «Ижорский завод», г. Колпино Ленинградской обл.
30. Военно-морская Академия им. Н. Г. Кузнецова, Санкт-Петербург

31. Оренбургский Политехнический институт, Оренбург
32. ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, Санкт-Петербург
33. ПО «Башнефть», г. Уфа
34. ПО «Варьеганнефтегаз», г. Радужный Тюменской обл.
35. ПО «Мегионнефтегаз», г. Мегион Тюменской обл.
36. ПО «Ярославнефтеоргсинтез», г. Ярославль
37. ЦАГИ, г. Жуковский МО
38. РФЯЦ-ВНИИ экспериментальной физики, г. Саров Нижегородской обл.
39. НПО ЦКТИ, Санкт-Петербург
40. ТОО «Центр ДиС», г. Казань
41. НПО «ЗНОК и ППД», г. Бугульма
42. ЗАО «ИНЖСЕРВИС»
43. «Севергазпром», г. Ухта
44. МП «Динамика», г. Тобольск Тюменской обл.
45. Восточный филиал ОАО ВНИИСТ, г. Уфа
46. ПТП «УГЭР», Екатеринбург
47. Центр «Техническая диагностика» Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Уфа
48. ОАО «Роснефть-Краснодарнефтегаз», г. Краснодар
49. НПО «Техкранэнерго», г. Владимир
50. НПП «СибЭра», г. Красноярск,
51. НПО «ЦНИИТМАШ», г. Москва
52. ООО «ИНТЕРЮНИС», г. Москва
53. ВТИ, г. Москва
54. «Диатон», г. Москва
55. НИИМ и ПМ, г. Ростов-на-Дону
56. «АЭ системы», г. Самара

Приложение 7

Фирмы, выпускающие аппаратуру акустической эмиссии и продающие ее в России

1. ООО «ИНТЕРЮНИС», г. Москва
2. ИАЭ, «Диатон», г. Москва
3. РАС (США),
4. ЗАО «Элтест», г. Москва
5. ФГУП «Научно-исследовательский машиностроительный институт» (НИМИ), г. Москва
6. ООО «Прадиком», Санкт Петербург
7. ЗАО «Контес», Санкт Петербург
8. ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, Санкт Петербург
9. «Алькор», г. Дзержинск
10. НПО «ВНИИФТРИ» (Хабаровск),
11. НИИИН, г. Томск,
12. НИИМ и ПМ, г. Ростов-на-Дону
13. «Электроточприбор», г. Кишинев
14. ИЭС им. Е. О. Патона, г. Киев
15. Vallen-System GmbH (Германия)
16. НПФ «Технологическая аппаратура», Санкт-Петербург

О СОЗДАНИИ ЦЕНТРА МОНИТОРИНГА РИСКОВ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ СТРАТЕГИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ОТ ТЯЖЕЛЫХ КАТАСТРОФ

Х. М. Ханухов

ООО «НПК Изотермик», г. Москва

В современном отечественном производстве интенсификация технологических процессов, крайняя изношенностью основных фондов (75 – 85 %), необходимость обеспечения непрерывной работы снижают уровень промышленной безопасности отечественного производства и повышают риск аварий и катастроф, а в случае стратегически важных объектов последствия последних могут быть не поправимы.

Так, например, на предприятиях нефтяной, химической и газовой промышленности аварии вызывают загазованность, разлив нефтепродуктов, агрессивных жидкостей и сильнодействующих ядовитых веществ. За последние 30 лет количество аварий увеличилось в 2,5 раза. При этом количество жертв увеличилось в 6 раз, а экономический ущерб – в 11 раз. Такие предприятия наносят колоссальный ущерб окружающей среде.

Причиной техногенных аварий могут стать стихийные бедствия, дефекты, допущенные при проектировании или монтаже, нарушение технологического процесса и человеческий фактор.

Тем не менее, предотвращение подобных техногенных аварий и катастроф не только возможно, но и на несколько порядков менее затратно, чем ликвидация их последствий, не говоря уже о невозвратных человеческих потерях.

Для контроля технического состояния опасных производственных объектов (ОПО), поднадзорных Ростехнадзору, в настоящее время применяется, в основном, система периодического технического освидетельствования. Однако периодический контроль (проводимый с интервалом от 1 до 10 лет) не может в полной мере гарантировать безотказную и безаварийную работу ОПО. С другой стороны, бесконечное продление ресурса морально и физически стареющего оборудования фактически консервирует наше технологическое отставание и не стимулирует модернизацию промышленности.

В настоящее время НПС «РИСКОМ» предложена концепция обеспечения защищенности стратегически важных объектов от тяжелых катастроф на базе нового подхода к идеологии рисков.

В основе этой идеологии, предложенной Н. А. Махутовым, лежит необходимость разработки и создания трехмерной модели рисков, влияющих на обеспечение защищенности стратегических объектов, а именно: выявить, количественно оценить и рассмотреть эти риски одновременно с трех точек зрения: технологической составляющей, социальной и природных воздействий.

В России функционирует более 20 центров **экологического мониторинга**, которые занимаются разработкой и сопровождением систем оперативного контроля, что позволяет повысить эффективность планирования и своевременно проводить мероприятия по ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

Однако системы экологического мониторинга не предназначены для слежения за состоянием технических устройств (ТУ) и для предотвращения аварийных ситуаций, вызванных неисправностью оборудования.

В этом случае необходимо применять системы **мониторинга технического состояния** ОПО, которые предназначены для постоянного получения в режиме реального времени информации о техническом состоянии зданий и сооружений (ЗиС), технологического оборудования, обработки этой информации, и могут служить основой для выработки рекомендаций по принятию мер, направленных на предотвращение аварийных ситуаций.

В настоящее время мировой и отечественный уровень научно-технической готовности (приборное, аппаратурное, программное обеспечение, в том числе управление рисками в режиме реального времени) для решения этой проблемы достаточен. Отсутствует только единая техническая и организационная политика в этой области.

Для обеспечения единой технической политики государства и повышения ее эффективности по проблемам безопасной эксплуатации ОПО и управления рисками в режиме реального времени и обеспечения защищенности стратегически важных объектов от тяжелых катастроф назрела необходимость в создании Федерального Центра мониторинга рисков и обеспечения защищенности стратегически важных объектов (СВО) от тяжелых катастроф.

Основными функциями этого Центра должны стать:

- разработка идеологии защищенности стратегически важных объектов от тяжелых катастроф;
- создание и ведение баз данных (электронная паспортизация) СВО с выявлением существующих приемлемых рисков;
- разработка критериев оценки защищенности СВО по степени риска;
- разработка нормативно-технических, методических, правовых, и законодательных предложений по количественному категорированию безопасности СВО;
- координация работ по проектированию и оснащению СВО системами комплексного мониторинга рисков и защищенности от тяжелых катастроф;
- разработка предложений по этапам, срокам и объемам вложений разработанных мероприятий по обеспечению защищенности СВО для передачи в Государственные органы Исполнительной власти.

Центр мониторинга должен тесно сотрудничать с Центром кризисных ситуаций МЧС России, а также в соответствии с ГОСТ Р 22.1.12-2005 будет участвовать в разработке структурированной системы мониторинга инженерных систем (СМИС) в части строительных конструкций (СМИК).

Практические аспекты системы комплексного мониторинга технического состояния (КМТС) заключаются в:

- осуществлении автоматического контроля технического состояния ТУ и ЗиС на стадии эксплуатации объекта с возможностью передачи данных в режиме реального времени ответственному должностному лицу предприятия и в единую дежурную диспетчерскую службу (ЕДДС) муниципальных образований.

При этом информация о техническом состоянии ОПО должна отражать сведения об изменениях технологических режимов в сторону приближения их к критическим параметрам, при достижении которых резко возрастает риск возникновения аварийных ситуаций. А перечень критических параметров предполагается определять на основе ана-

лиза аварий на ОПО, требований правил промышленной безопасности и регламентов с дальнейшим согласованием в надзорных органах.

- передаче информации о возникновении критических параметров автоматически по трем каналам: 1) ответственному должностному лицу предприятия; 2) в единую дежурную диспетчерскую службу (ЕДДС); 3) в межрегиональный филиал Центра мониторинга технического состояния, для её обработки и передачи в органы Ростехнадзора. Этим обеспечивается объективность и независимость (исключается «человеческий фактор») информирования органов Ростехнадзора от эксплуатирующих организаций.

На основании полученной информации принимается решение о проведении внеочередного обследования или дальнейшей эксплуатации объекта.

Исходя из сказанного, организационная структура Центра мониторинга предполагает наличие центрального отделения (в Москве) и филиалов в федеральных округах.

Прежде всего, требуется отработать механизм функционирования Центра мониторинга, а затем приступить к реализации проблемы **управления рисками**, в первую очередь – на критически и стратегически важных объектах.

К **критически важным объектам (КВО)** относятся промышленные объекты, имеющие уникальное значение в промышленности страны и оказывающие непосредственное влияние на региональном уровне – крупные заводы, НПЗ, химпроизводства, трубопроводы большого диаметра, трубопроводы высокого давления, крупнотоннажные резервуары и склады для нефти, нефтепродуктов и сжиженных газов, аварии на которых могут привести к значительным поражениям территории, нарушить производственный цикл стратегически важных объектов.

К **стратегически важным объектам (СВО)** относятся промышленные объекты, влияющие непосредственно на состояние экономики Российской Федерации в целом, а также на межрегиональном уровне – атомные электростанции, объекты, имеющие атомные энергоустановки, каскады гидросооружений и т. п., аварии на которых могут привести к необратимым последствиям межрегионального, федерального и планетарного масштаба.

Внедрение систем КМТС будет способствовать повышению безопасности, энергоэффективности и конкурентоспособности отечественного производства, оптимизации межремонтных сроков эксплуатации оборудования, стимулированию его обновления, ускорению технического перевооружения и модернизации ОПО.

Таким образом, Центр мониторинга решает сразу две задачи:

1. Помогает государству в обеспечении безопасности ОПО;
2. Способствует повышению эффективности и конкурентоспособности самого производства.

Создание Центра мониторинга это, прежде всего, задача государственного уровня. Естественным помощником государственных структур может выступить обязательное страхование опасных производственных объектов.

Схема взаимодействия субъектов в обеспечении промышленной безопасности представлена на рис. 1. Государство разрабатывает и принимает в ранге законов, обязательных к исполнению, систему общих правил и требований (технических регламентов); устанавливает систему и порядок наказаний за их нарушение; принимает участие при расследовании аварий и катастроф, оценке ущерба, взыскании штрафов и компенсаций, а выполнение правил и требований безопасности регулируется механизмом страхования ОПО. Таким образом, в этой модели есть два главных независимых от государства субъекта – собственник ОПО и страховая компания. Последняя берет на себя бремя рисков аварий и несет финансовую ответственность за них. В этой связи страховая компания, чтобы иметь свою прибыль, заинтересована в поддержании промышленной безопасности застрахованного объекта на должном

уровне и ведет за этим контроль, в том числе силами привлекаемых экспертов, которых она выбирает на свое усмотрение. Возможность коррупции при таком раскладе снижена до минимума. Риск эксплуатации опасного объекта берет на себя независимое от государства юридическое лицо, которое через свою прибыль напрямую заинтересовано в обеспечении промышленной безопасности, имеет финансовую состоятельность для компенсации возможных ущербов от аварий и несет от последних существенные убытки. Свои возможности и влияние на собственника или эксплуатирующую организацию страховая компания оговаривает в страховом договоре. Там же отражается совокупность требований и правил, которые эксплуатирующая организация приняла на себя добровольно для максимального снижения рисков. Обычно это какие-то общеизвестные добровольные стандарты, коды (своды правил) и другие документы, которые, в дополнение к законодательным актам (техническим регламентам), детально расписывают все аспекты обеспечения безопасности. Страховая компания, которая платит за аварии, сама решает как контролировать соблюдение всех этих правил на объекте и кому это поручить. Наиболее существенным моментом является то, что страховщик сам и оплачивает контроль. Это значит, что действуя в интересах собственной прибыли, он будет стремиться к развитию и внедрению систем мониторинга ОПО.

Организация и функционирование Центра мониторинга рисков и обеспечения защищенности стратегически важных объектов – сложная, многоуровневая задача, решение которой под силу только профессиональной специализированной организации. Научно-промышленный союз «РИСКОМ», имеющий необходимый научно-производственный потенциал, готов включиться в процесс разработки идеологии, концепции и механизма оценки рисков для обеспечения защищенности стратегически важных объектов, возглавив «Центр мониторинга рисков».

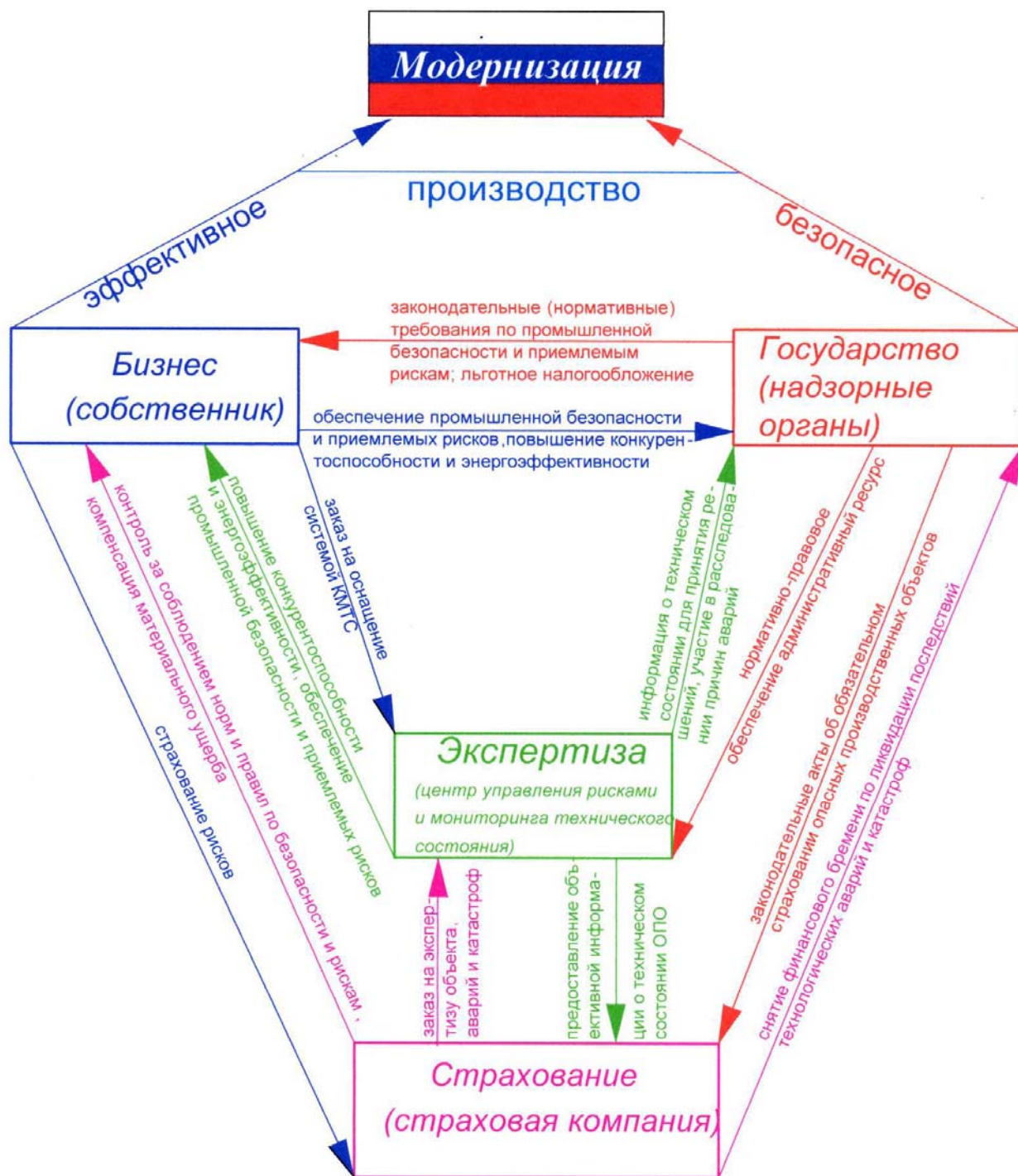


Рис. 1. Схема взаимодействия субъектов в обеспечении промышленной безопасности

МЕТОД АЭ В СИСТЕМЕ ИНСПЕКЦИИ НА БАЗЕ ОЦЕНКИ РИСКА

В. И. Эльманович

Представительство ООО «ИНТЕРЮНИС», Волгоград

В настоящее время актуальной задачей на предприятиях нефтепереработки и нефтехимии является обеспечение бесперебойной, безопасной, безаварийной работы оборудования технологических установок в условиях увеличенных межремонтных пробегов.

Адекватным научно-техническим и нормативно-правовым обоснованием увеличения межремонтных пробегов является внедрение на предприятиях Системы Инспекции на базе оценки риска – ИБОР (Risk Based Inspection – RBI).

Система RBI разработана Американским нефтяным институтом (API) и представлена нормативно-методическими документами [1 – 5]. Эти документы предназначены для работы в едином комплексе и представляют технологии технической диагностики и мониторинга XXI века, объединяющие неразрушающий контроль (НК), оценку прочности и безопасности (риска) эксплуатации технологического оборудования с учетом воздействующих на него механизмов повреждения.

Современные технологии анализа риска рассматривают риск как возможность реализации случайных событий с негативными (нежелательными) последствиями. Как количественная мера риск есть функция двух переменных – частоты и последствий негативного события:

$$R = f(F, C), \quad (1)$$

где F – частота негативного события;

C – последствия негативного события.

В частном случае, когда следствие конкретно и измеряется по типу «Да/Нет», «Происходит/Не происходит» (например, жизнь/смерть), тогда риск становится функцией одной переменной, а именно – частоты (F) негативного события:

$$R = f(F). \quad (2)$$

Формула (1) имеет не практическое, а методологическое значение, т. к. для сложных производственно-технологических систем (ПТС) вид этой функции не может быть определен с достаточной достоверностью, а различные умозрительные постулаты по этому поводу могут привести к катастрофическим последствиям. Поэтому количественная оценка риска может быть выполнена только для ПТС, удовлетворяющих дополнительным требованиям:

- ПТС спроектированы в соответствии с признанными и проверенными практикой нормами и правилами;
- технические устройства ПТС изготовлены и смонтированы по аттестованным технологиям;

- приемосдаточные испытания и пуско-наладочные работы выполнены в полном объеме;
- технологический процесс проводит обученный и аттестованный персонал в соответствии с утвержденным регламентом;
- техническое обслуживание и ремонт технических устройств проводится в соответствии с требованиями НТД;
- на предприятии функционируют службы охраны труда и производственного контроля.

В этом случае мы имеем высоконадежную ПТС, и вероятность негативного события (аварии) очень мала $\ll 1$, а последствия негативных событий очень велики, и формулу (1) можно представить в линеаризованном виде:

$$R = F \times C \quad (3)$$

В данном докладе представлен инструмент оптимизации объема, методов и периодичности инспекций, позволяющий на базе оценки риска эксплуатации каждой единицы оборудования и оценки эффективности применяемых ранее методик определения технического состояния оборудования разработать комплекс мероприятий по техническому освидетельствованию, ремонту и диагностике.

На рис. 1 проиллюстрирована Базовая концепция снижения рисков на опасном производственном объекте за счет оптимизации процесса технического освидетельствования (ТО), ремонта и технической диагностики (ТД). Кривая 1 показывает традиционный подход к техническому освидетельствованию и ревизии оборудования [6 – 9]. Кривая 2 показывает возможность снижения риска на ОПО за счет оптимизации инспекционной активности. Конечно, одними инспекционными мерами снизить риск до нуля не удастся. Имеется остаточный риск (ошибки персонала, террористические акты, стихийные бедствия и т. п.). Интересный результат показывает кривая 3. Избыточная инспекционная активность может и наносить вред. Например, в производстве винилхлорида растрескивание аустенитной нержавеющей стали происходит в процессе пропарки перед внутренним осмотром оборудования. Следовательно, ресурс оборудования определяется не временем его эксплуатации, а количеством пропарок, т. е. внутренних осмотров.

На рис. 2 показана стратегия менеджмента рисков при проведении ИБОР. Главная идея – сфокусировать внимание на позициях с повышенным риском и исключить ненужные расходы по техническому освидетельствованию и техническому диагностированию оборудования, не представляющего реальной опасности. Согласно ПБ 03-576 каждому сосуду необходимо 1 раз в 4 года проводить внутренний осмотр, каждые 8 лет – гидроиспытания, а зачем? В США, Канаде и Евросоюзе, отказались от плановых гидроиспытаний. Гидроиспытания там проводят только после выполнения ремонтных работ с применением сварки или применяют в качестве компенсирующего мероприятия, как это описано в API 579-1/ASME FFS Fitness-For-Service.

Таким образом, система ИБОР является разновидностью известной задачи Системного анализа – задачи оптимального распределения ограниченных ресурсов.

Итоговым документом ИБОР является Комплекс мероприятий по техническому освидетельствованию, ремонту и диагностике (КМТОРД), содержащий объем, методы и периодичность работ по определению технического состояния каждой единицы оцененного оборудования и позволяющий снизить риск до приемлемого уровня.

При проведении ИБОР определяют оптимальную комбинацию объема, методов и периодичности проведения НК. Проводят анализ эффективности использования каждого из методов НК применительно к оборудованию с определенным типом доминирующего механизма повреждения. Анализируют стоимость использования каждого из методов НК и разрабатывают процедуру назначения оптимальной их комбинации.

Данный доклад посвящен возможности и перспективам использования метода АЭ в системе ИБОР. Вообще говоря, когда мы используем термин «метод АЭ» речь, как правило, идет об одном из методов НК. Посмотрим на проблему шире. Акустическая эмиссия как физическое явление связано с излучением упругих волн исследуемым объектом при нелинейных трансформациях его структуры. Возможны самые разнообразные практические приложения этого физического явления, однако в области обеспечения промышленной безопасности наиболее важными являются приложения, приведенные на рис. 3.

Приложение 1. Применение АЭ при НК объектов

Это наиболее проработанная область. Метод АЭ органично вписывается в существующую Систему НК, разработана нормативно-правовая база по применению метода АЭ, подготовке и аттестации специалистов, серийно выпускается АЭ аппаратура.

Приложение 2. Применение АЭ при проведении оценок пригодности к эксплуатации оборудования

Казалось бы Приложение 2 по смыслу тождественно Приложению 1, однако, это не так. Термин «оценка пригодности к эксплуатации» (ОПЭ) является калькой английского термина «Fitness-For-Service Assessment» (API 579), а это уже – сопромат в широком смысле этого слова, т. е. оценка прочности объектов, имеющих дефекты и повреждения. Система ОПЭ это не «годен/негоден» Системы НК, а определение допускаемых режимов эксплуатации (давление, температура, загруженность) оборудования с дефектами и повреждениями или эксплуатирующегося в условиях, не предусмотренных проектировщиком.

Приложение 3. Применение АЭ при комплексном диагностическом мониторинге (КДМ) отдельных единиц оборудования или установок (технологических блоков) в целом

Регистрация, локализация и оценка опасности источников повышенной АЭ активности является важнейшей составной частью существующих систем КДМ (хотя КДМ не ограничиваются сбором и оценкой АЭ информации). Приложение 3 является логичным развитием Приложения 1 и, как всякая высокая технология (High Technology), в своем развитии опережает существующую нормативно-правовую базу.

Приложение 4. Применение АЭ в Системе Инспекции на базе оценки риска (ИБОР)

Это принципиально новое приложение АЭ. Интуитивно ясно, что при положительных результатах АЭ контроля какого-либо оборудования риск его эксплуатации ниже, чем без проведения АЭ контроля. Вопрос в том, насколько *количественно* снижается этот риск. А если результаты АЭ контроля «не совсем положительные» (выявлены источники повышенной АЭ активности)? Здесь мы вступаем в совершенно другой понятийный (и нормативно-правовой) круг – Системы анализа безопасности и оценки риска [10 – 12]. В этом кругу говорят не о допустимых дефектах или допускаемых давлениях, а об анализе сценариев развития негативных событий, декларировании промышленной безопасности, приемлемом и неприемлемом риске и, в конце концов, о страховых взносах, которые должен платить владелец/пользователь опасного производственного объекта.

Разработка Системы ИБОР проводится поэтапно:

На 1-м этапе проводится экспресс-анализ состояния оборудования объекта ИБОР (технологического блока, установки или предприятия в целом). Все технологическое оборудование разделяется на 3 группы.

Группа 1. Оборудование, подлежащее замене. Для этого оборудования внесение в КМТОРД специальных мероприятий нецелесообразно.

Группа 2. Беспроblemное оборудование. Для этого оборудования специальные мероприятия в КМТОРД не требуются.

Группа 3. Проблемное оборудование¹. Для этого оборудования необходимо проведение ОПЭ с разработкой компенсирующих мероприятий и мониторинга.

На 2-м этапе выполняют пошаговую процедуру оценки пригодности к эксплуатации проблемного оборудования:

Шаг 1. Определение типа дефекта и причин его возникновения.

Шаг 2. Выбор Процедуры оценки пригодности к эксплуатации.

Шаг 3. Сбор исходных данных, необходимых для проведения оценки.

Шаг 4. Процедуры оценки пригодности к эксплуатации и критерии пригодности.

Шаг 5. Оценка остаточного ресурса.

Шаг 6. Компенсирующие мероприятия.

Шаг 7. Мониторинг в процессе эксплуатации.

Шаг 8. Документирование.

На 3-м этапе выполняют пошаговую процедуру Системы ИБОР:

Шаг 1. Ранжирование оборудования по степени важности.

Шаг 2. Идентификация опасностей (угроз).

Шаг 3. Анализ уязвимости (уровней защиты).

Шаг 4. Оценка риска возможной аварии.

Шаг 5. Контроль технического состояния оборудования и ранжирование оборудования по состоянию.

Шаг 6. Разработка мероприятий по снижению риска (risk mitigation) до приемлемого уровня. Перерасчет рисков и переранжирование оборудования.

Шаг 7. Обработка и анализ результатов ИБОР, разработка КМТОРД.

Шаг 8. Документирование.

В наших базах данных накоплен положительный опыт эффективного применения АЭ в Системах ИБОР и ОПЭ. Практика подтверждает необходимость гибкого сочетания различных схем применения АЭ в Системах ИБОР и ОПЭ:

- АЭ контроль при гидро- (пневмоиспытаниях);
- АЭ контроль в процессе эксплуатации (на рабочем режиме), когда технологический процесс позволяет изменить давление на 5 ÷ 10 % от рабочего;
- периодический АЭ мониторинг на рабочем режиме, когда технологический процесс не позволяет изменять давление;
- АЭ контроль при пуске (остановке) установки;
- постоянный АЭ мониторинг (комплексный диагностический мониторинг).

¹ Оборудование с дефектами, повреждениями или эксплуатирующееся в условиях, не предусмотренных проектировщиком.

Ниже приведен ряд приемов эффективного использования АЭ в Системах ИБОР и ОПЭ.

Пример 1. Американская фирма (предприятие на территории Евросоюза), для которой мы выполнили диагностирование, столкнулась с очень неприятной проблемой: сосуды и аппараты оказались массово поражены специфическим видом коррозии – низкотемпературной водородной (сероводородной) коррозией – НТВ(С)К.

На рис. 4 показаны четыре одинаковых буллита, изготовленных на одном заводе и эксплуатирующихся в идентичных условиях, приводящих к поражению сероводородной коррозией. Различия в их судьбе только в технологиях оценки пригодности к эксплуатации.

Особенности НТВ(С)К

НТВ(С)К является результатом совместного воздействия двух коррозионных факторов: **наличия влаги и свободного сероводорода.**

Сероводород, растворяясь в присутствующей в технологических средах жидкой влаге (для газообразных сред – в пленке влаги, адсорбированной внутренней поверхностью аппарата), образует слабую сероводородную кислоту, в которой углеродистые стали заметно корродируют, как и в любой другой кислой среде, с образованием атомарного водорода по реакции:



В результате этого происходит развитие **общей коррозии и коррозионных язв** различной локализации.

Образовавшийся в этой реакции атомарный водород в обычных случаях должен был бы беспрепятственно рекомбинировать в молекулы по реакции:



и удаляться с поверхности металла в виде пузырьков газа. В присутствии сероводорода, сульфидов и некоторых других веществ, являющихся т. н. рекомбинационными ядами, скорость реакции (5) сильно затормаживается, вследствие чего концентрация атомарного водорода на поверхности корродирующего металла возрастает многократно, так что значительная его часть начинает внедряться в металл. В результате этого в реальных условиях через стенку корпуса аппарата устанавливается постоянный поток атомарного водорода, величина которого примерно пропорциональна скорости его образования на корродирующей поверхности металла вследствие коррозионного процесса, т. е. пропорциональна величине скорости коррозии самого металла. Большая часть этого потока водорода проходит на внешнюю поверхность аппарата и покидает металл, но какая-то часть общего его количества задерживается в микроскопических дефектах металла: в микропорах, микротрещинах, неметаллических включениях, где атомарный водород рекомбинирует в молекулы, вследствие чего теряет способность к диффузии в металле и окончательно фиксируется в определенном дефекте. Постепенное накопление водорода в таких зонах приводит к созданию в них очень высокого давления, которому рано или поздно металл не может противостоять. Тогда создаваемые этим давлением механические напряжения в металле реализуются в виде **коррозионного растрескивания или расслоения металла.**

Таким образом, разрушение сосудов под действием НТВ(С)К проходит на фоне небольшой общей коррозии и развивается по трем механизмам:

- язвенный коррозионный износ и питтинговая коррозия металла;

- коррозионное растрескивание под напряжением;
- расслоение и вздутие металла.

Для сосуда, пораженного НТВ(С)К, возможно 2 варианта развития событий.

Вариант 1. Процесс НТВ(С)К продолжается, т. е. по-прежнему со стороны среды действуют факторы, наводораживающие металл.

Вариант 2. Процесс НТВ(С)К остановлен, т. е. внедрены мероприятия, исключающие дальнейшее наводораживание металла (ингибирование сероводородной коррозии, снижение концентрации сероводорода в среде до необходимого минимума и т.п.).

В варианте 1 процесс разрушения (развития трещин) имеет химико-механическую природу и описывается кинетическими диаграммами разрушения. В соответствии с методологией Fitness-For-Service [3] в варианте 1 всегда применяют оценочный уровень 3.

В варианте 2 сосуда из металла, пораженного НТВ(С)К, теряют свою ремонтпригодность, т. е. не могут быть отремонтированы с применением известных технологий ремонта (механической выборки, сварки, наплавки с последующей термообработкой и т.п.). В варианте 2 необходимо либо выбраковывать сосуда и заменить их на новые (что связано со значительными затратами), либо обосновать возможность, условия и сроки эксплуатации сосудов с имеющимися дефектами. В соответствии с [3] в варианте 2 возможно применение оценочных уровней 1 и 2.

Возможности, условия и сроки дальнейшей эксплуатации (остаточный ресурс) сосудов, пораженных НТВ(С)К, определяли с применением метода АЭ.

Метод АЭ обеспечил выявление развивающихся дефектов посредством регистрации и анализа акустических волн, возникающих в процессе пластической деформации и роста трещин в контролируемых объектах. Эти свойства метода АЭ дают возможность формировать адекватную систему классификации дефектов и критерии оценки технического состояния сосудов, пораженных НТВ(С)К.

В качестве дополнительных методов контроля сосудов с дефектами этого типа является визуально-измерительный контроль (ВИК), ультразвуковая толщинометрия (УЗТ), ультразвуковая дефектоскопия (УЗД), замер твердости металла и сварных соединений.

В разработанной нами технологии АЭ контроля сбор и анализ данных АЭ проводится с использованием расчетной модели деформирования и разрушения корпусов аппаратов, подверженных НТВ(С)К. В отличие от коррозионного растрескивания под напряжением, при котором процесс разрушения имеет химико-механическую природу и описывается кинетическими диаграммами разрушения, металл, пораженный НТВ(С)К, является объектом классической механики разрушения и допускает решение задач в квазистатической постановке. При НТВ(С)К деформирование и разрушение конструкции происходит путем двух взаимодополняющих процессов:

- а) раскрытие расслоя с образованием вздутий;
- б) продвижение расслоя.

Методами механики деформируемого твердого тела получена зависимость давления в полости расслоя $P_{\text{пол}}$ от величины среднего диаметра вздутия D и глубины залегания расслоя h :

$$P_{\text{пол}} = 3,23\sigma_T(h/D)^2. \quad (6)$$

Для встречающихся на практике диаметров вздутий 50 ÷ 100 мм внутрисполостное давление достигает значительных величин.

Решение для продвижения расслоя в линейной механике разрушения имеет вид:

$$P_{\text{пол}} = 12,5K_{Ic} / D^{1/2}. \quad (7)$$

Одновременное действие механизмов, описываемых формулами (6) и (7), представлено на рис. 5. Кривая 1 описывает вздутие расслоя, расположенного на глубине 5 мм, а кривая 2 – вздутие расслоя, расположенного на глубине 10 мм. Продвижение расслоя по механизму растрескивания описывается кривой 3*. Видно, что процесс сероводородного расслоения, зарождаясь на микроуровне, идет вначале путем распространения расслоя и увеличения его площади (диаметра). Затем, когда диаметр расслоя достигает критической величины, равной

$$D_{\text{кр}} \approx 0,405h^3(\sigma_T/K_{Ic})h^{1/2}, \quad (8)$$

начинает образовываться вздутие. Упрочнение металла во вздутии приводит к активизации продвижения расслоя по механизму хрупкого разрушения. В итоге разрушение конструкции происходит либо путем выхода расслоя на поверхность, либо путем исчерпания пластичности металла «перемычки» в месте максимального вздутия.

Наличие внутреннего давления в сосуде, подверженном НТВ(С)К, приводит к изменению напряженно-деформированного состояния (НДС) металла корпуса и вносит свой вклад в нагруженность расслоя. Таким образом, технология АЭ диагностирования сосудов, подверженных НТВ(С)К, должна обязательно учитывать основную особенность НДС таких конструкции – рост нагруженности расслоя при сбросе давления. Практика показывает, что игнорирование закономерностей НДС расслоенного металла, формальное выполнение требований [8] к программе нагружения сосудов при АЭ контроле приводит к пропускам дефектов и может иметь серьезные последствия для взрыво-пожароопасных объектов.

На рис. 6 (нижний график) показаны характерные данные АЭ, собранные при пневмоиспытании водородных буллитов. Повышенная активность и интенсивность АЭ на сбросе давления по сравнению с подъемом позволяют идентифицировать начальную стадию (до образования расслоений и вздутий) поражения сосуда сероводородной коррозией.

В соответствии с [5] после постановки диагноза (определения доминирующего механизма повреждения) и выполнения прогноза (оценки остаточного ресурса) сосудам назначены следующие **компенсирующие мероприятия и мониторинг**:

Компенсирующие мероприятия:

1. Произвести изменения в технологическом процессе, исключая попадание сероводорода в водородные буллиты.
2. Снизить разрешенное давление в буллитах с 6,0 до 4,0 МПа.

Мониторинг:

1. Наружный осмотр и ультразвуковую толщинометрию сосудов выполнять не реже 1 раза в год.
2. Внутренний осмотр сосудов выполнять не реже 1 раза в 2 года.
3. Акустико-эмиссионный контроль сосудов для слежения за возможным развитием расслоений выполнять не реже 1 раза в 2 года.

* Кривая 3 построена на основании стандартных характеристик механических свойств металлического проката σ_T и σ_B . В действительности кривая 3 располагается значительно ниже из-за эффекта Z-прочности.

Пример 2. Обеспечение безопасной эксплуатации магистрального трубопровода с множественными дефектами.

При проведении внутритрубой диагностики магистрального нефтепродуктопровода было выявлено 1863 дефекта, из них подлежащих ремонту (ДПР) – 1221 дефект, остальные – дефекты первоочередного ремонта (ПОР), подлежащих ремонту в течение текущего года (рис. 7). Возможности ремонтных служб компании владельца-пользователя трубопровода – ремонт до 100 дефектов в год.

Была составлена Программа ИБОР, включающая проведение оценок Fitness-For-Service (FFS) с использованием метода АЭ, разработку компенсирующих мероприятий и мониторинга. Блок-схема проведения оценок приведена на рис. 8. По результатам выполненных расчетных оценок (рис. 9) для разрешенного давления 4,2 МПа около 80 дефектов не удовлетворяли условию прочности FFS (Remaining Strength Factor – RSF < 0,9) и были отремонтированы. Проведено ранжирование оставшихся дефектов по опасности. При необходимости повышения разрешенного давления до 5,2 МПа необходимо выполнить перерасчет и повторную оценку допустимости дефектов с использованием метода АЭ. Блок-схема такой оценки приведена на рис. 10. При проведении такой оценки был проведен выборочный АЭ контроль зон, приведенных на рис. 11, испытание образцов металла трубопровода на усталость. Итоговые результаты проведения оценок Fitness-For-Service магистрального трубопровода с дефектами ПОР и ДПР приведены на рис. 12. Был разработан и согласован в органах Госнадзора КМТОРД, обеспечивший бесперебойную, безопасную, безаварийную эксплуатацию трубопровода в период до следующей аттестации (2010 г.).

Пример 3. Обеспечение безопасной эксплуатации реакторов каталитического риформинга с множественным коррозионным растрескиванием.

При проведении АЭ контроля в процессе пневмоиспытаний реактора установки каталитического риформинга были локализованы источники повышенной АЭ активности (II и III класс по ПБ 03-593). При внутреннем осмотре в зоне источника АЭ III класса обнаружена трещина в зоне термического влияния кольцевого сварного шва приварки фланца верхнего штуцера реактора (рис. 13). В зоне источников II класса выявлены множественные микротрещины (рис. 14). В соответствии с требованиями Системы ИБОР был разработан и согласован в органах Госнадзора КМТОРД, обеспечивший бесперебойную, безопасную, безаварийную эксплуатацию реактора в период до его замены (2012 г.).

Приведенные примеры относятся к Компаниям Евросоюза. Документы API-579, 580, 581 не могут быть непосредственно использованы на российских предприятиях (другая нормативная база при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования, различие в юридической базе России, США и Евросоюза). Согласно правилам Евросоюза (ЕС): 96/82/ЕС Seveso II Directive, PED 23/97 Pressure Equipment Directive, Pressure Systems Safety Regulations (PSSR) владелец-пользователь опасного производственного объекта может самостоятельно выбирать Систему технического обслуживания, ремонта и диагностики:

- предписанную (Statutory) с прописанными сроками инспекций и межремонтных пробегов (аналог российской системы ППР);
- Систему RBI со сроками инспекций и межремонтных пробегов, определяемыми на основе оценки риска разрушения (выхода из строя) по отдельным единицам оборудования или технологическим установкам в целом (российского аналога, согласованного с Ростехнадзором, нет).

Вместе с тем, последовательное, адекватное применение метода АЭ органично вписывает Систему ИБОР в действующую Систему экспертизы промышленной безопасности и в Российском нормативно-правовом поле дает возможность поддержания на приемлемом уровне риска эксплуатации технологического оборудования.

Литература

1. API 580 Risk Based Inspection-2000. Recommended Practice.
2. API 581 Risk Based Inspection-2008. Base Resource Document.
3. API 579-1/ASME FFS-1 Fitness-For-Service-2007. USA Standard.
4. API 579-2/ASME FFS-2 Example Problem Manual-2009.
5. API RP 571 Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry-2003. Recommended Practice.
6. ПБ 03-576-03 Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением.
7. ПБ 03-585-03 Правила устройства и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов.
8. ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов.
9. РД-03-421-01. Методические указания по проведению диагностирования технического состояния и определению остаточного срока службы сосудов и аппаратов.
10. РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов.
11. РД 03-496-02 Методические рекомендации по оценке ущерба от аварий на опасных производственных объектах.
12. РД 03-357-00. Методические рекомендации по составлению декларации промышленной безопасности опасного производственного объекта.

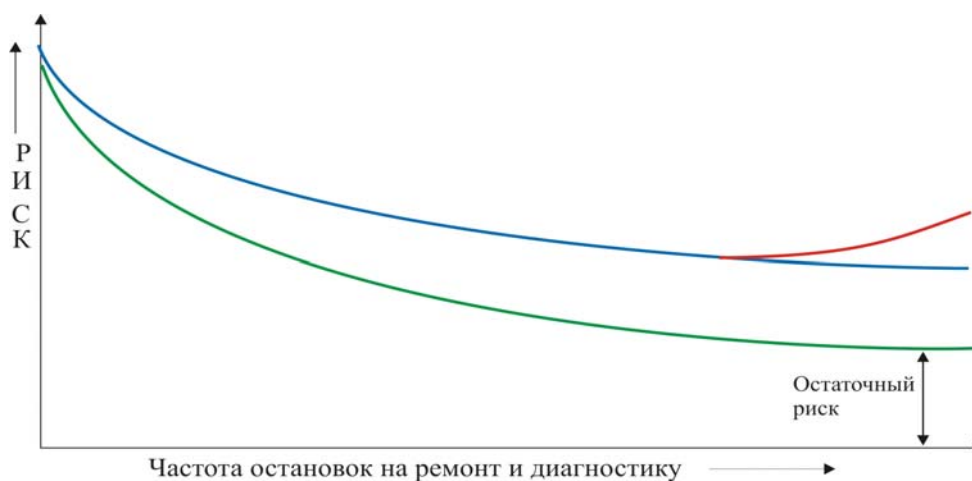


Рис. 1. Базовая концепция снижения риска эксплуатации опасного производственного объекта (ОПО) за счет оптимизации процесса технического освидетельствования, ремонта и диагностики: — — кривая риска с использованием типовых программ ремонта и диагностики; — — кривая риска с использованием оптимизации процессов технического инспектирования на основе ИБОР; — — кривая риска, возрастающего от избыточной инспекционной активности

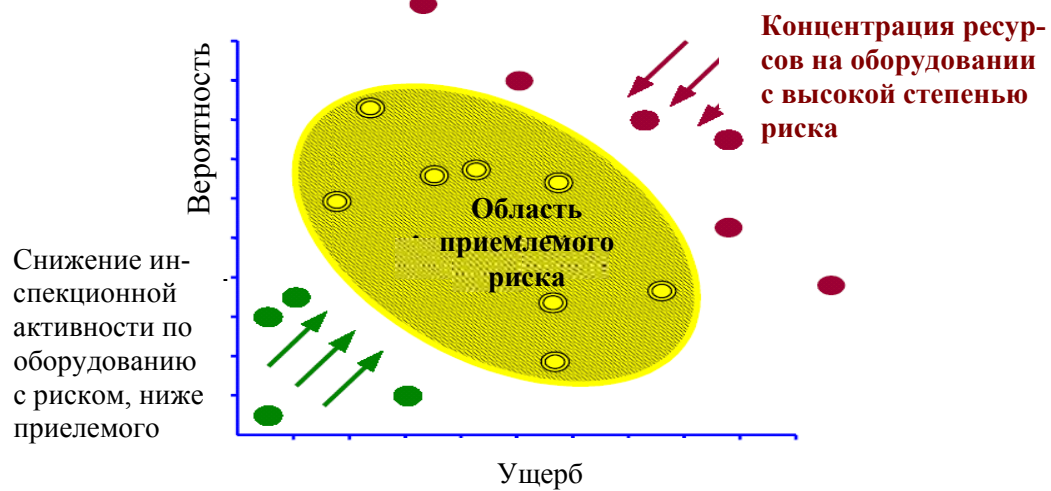


Рис. 2. Управление риском эксплуатации (ОПО) за счет перераспределения ресурсов на технические устройства повышенного риска



Рис. 3. Приложения метода АЭ в области обеспечения промышленной безопасности опасных производственных объектов

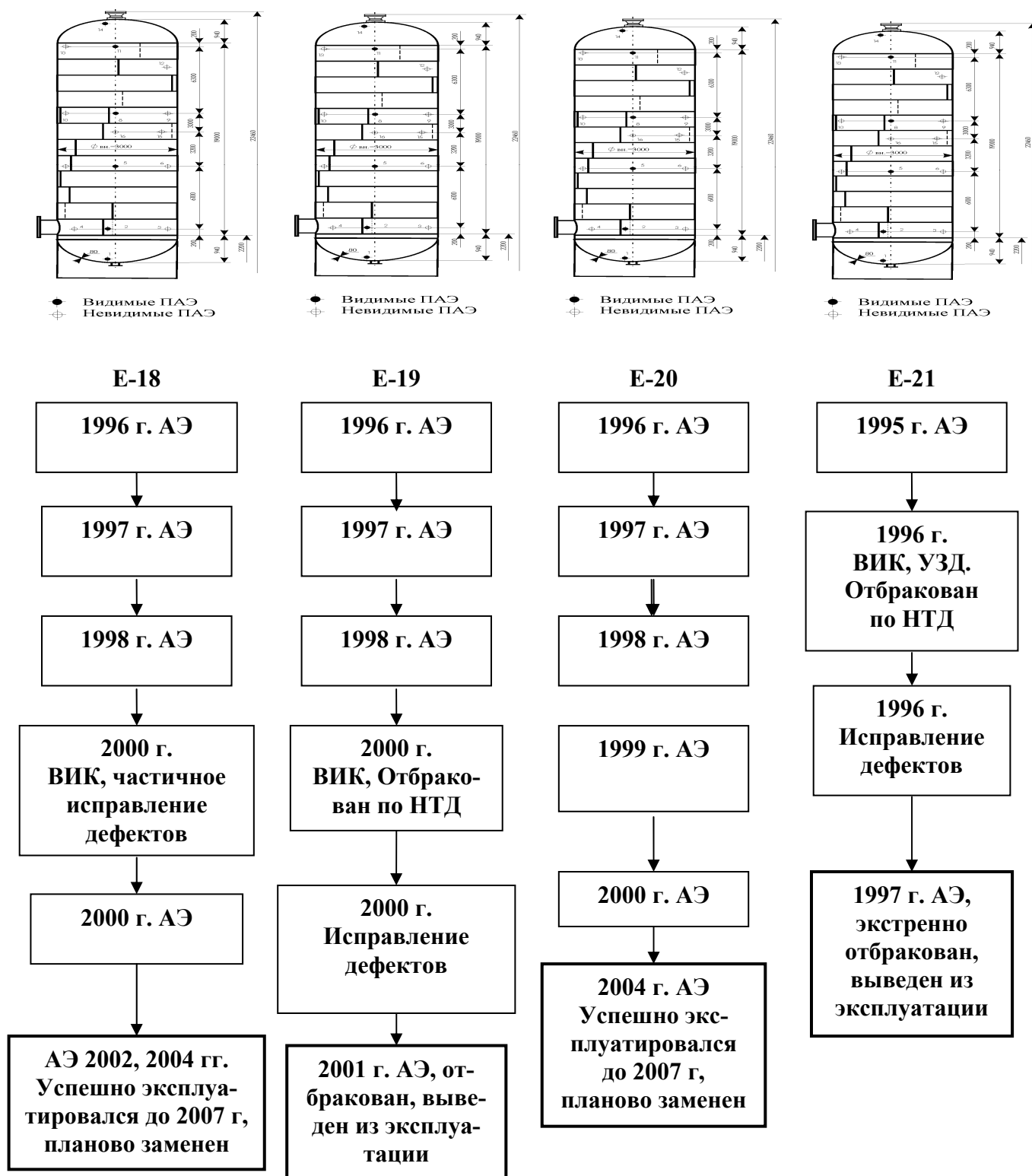


Рис. 4. ОПЭ с применением АЭ буллитов, пораженных НТВ(С)К

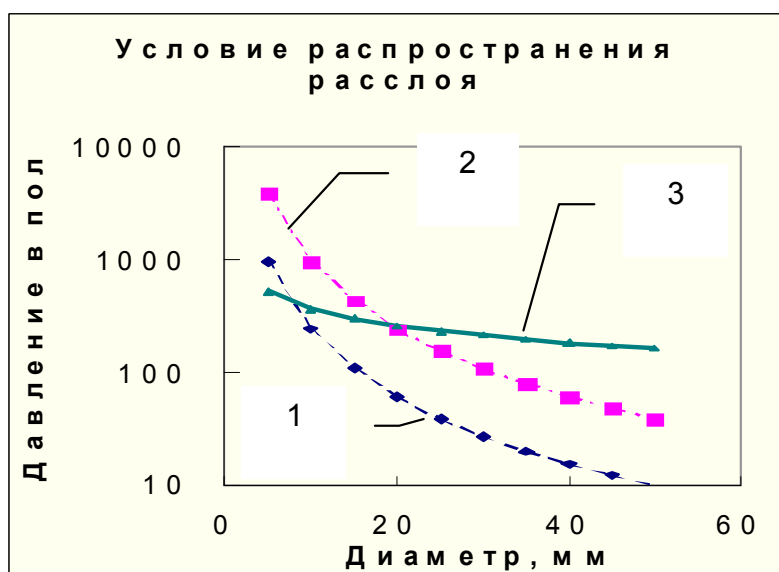


Рис. 5. Механика развития расслоений и вздутий в сосудах, пораженных НТВ(С)К

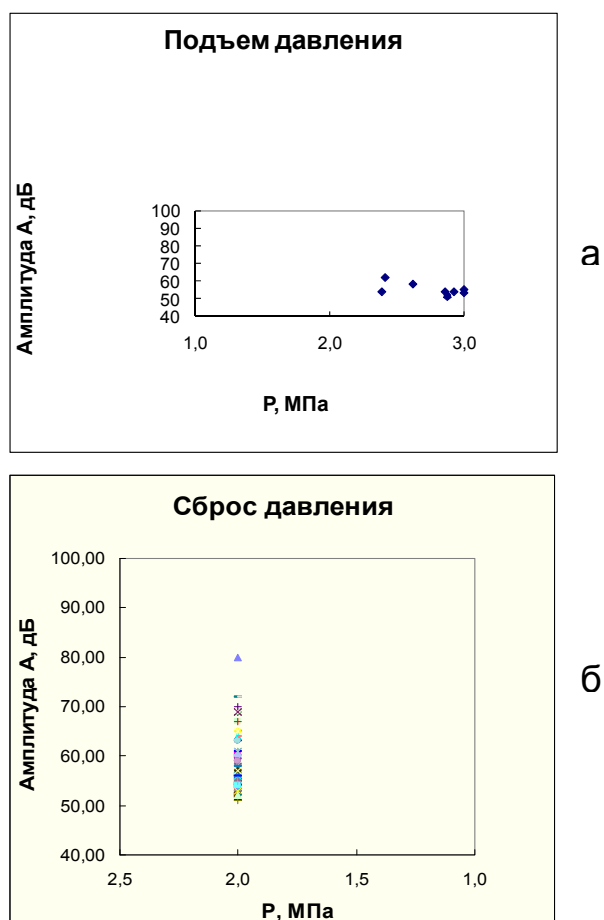


Рис. 6. АЭ активность при пневмоиспытании буллитов, пораженных НТВ(С)К

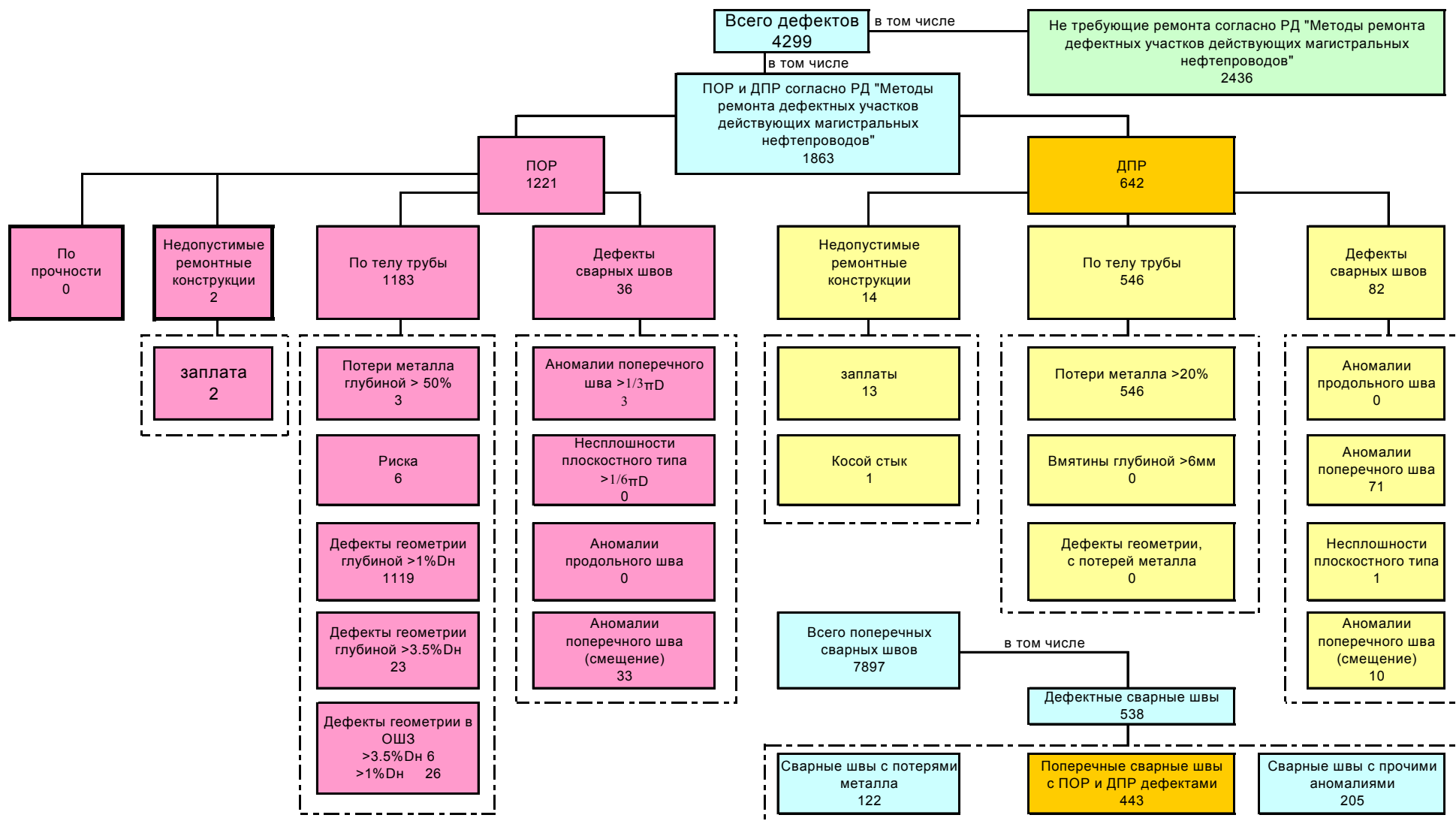


Рис. 7. Дефекты, выявленные по результатам внутритрубного диагностирования магистрального нефтепродуктопровода

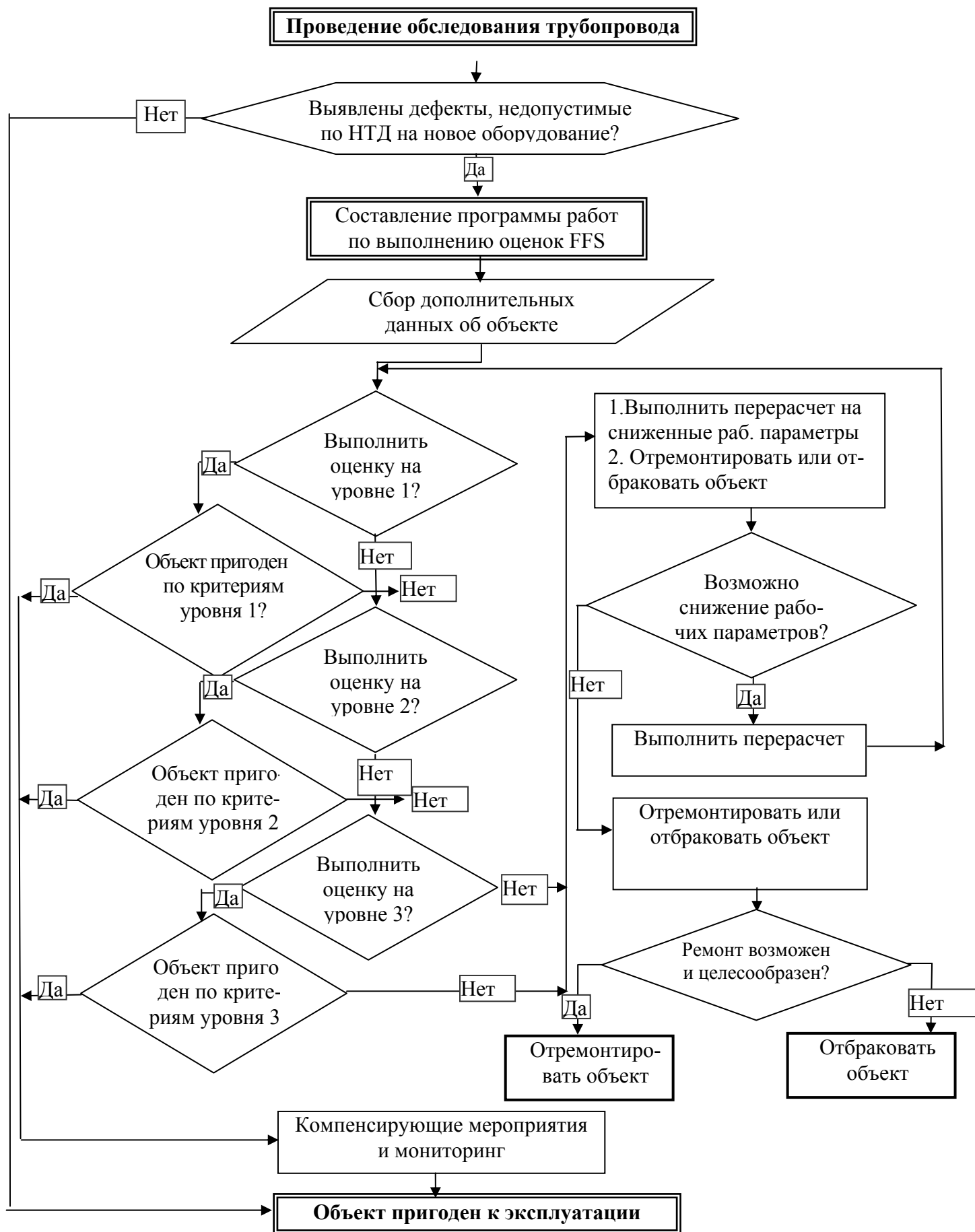


Рис. 8. Блок-схема процедуры оценки прочности и ресурса трубопровода с дефектами

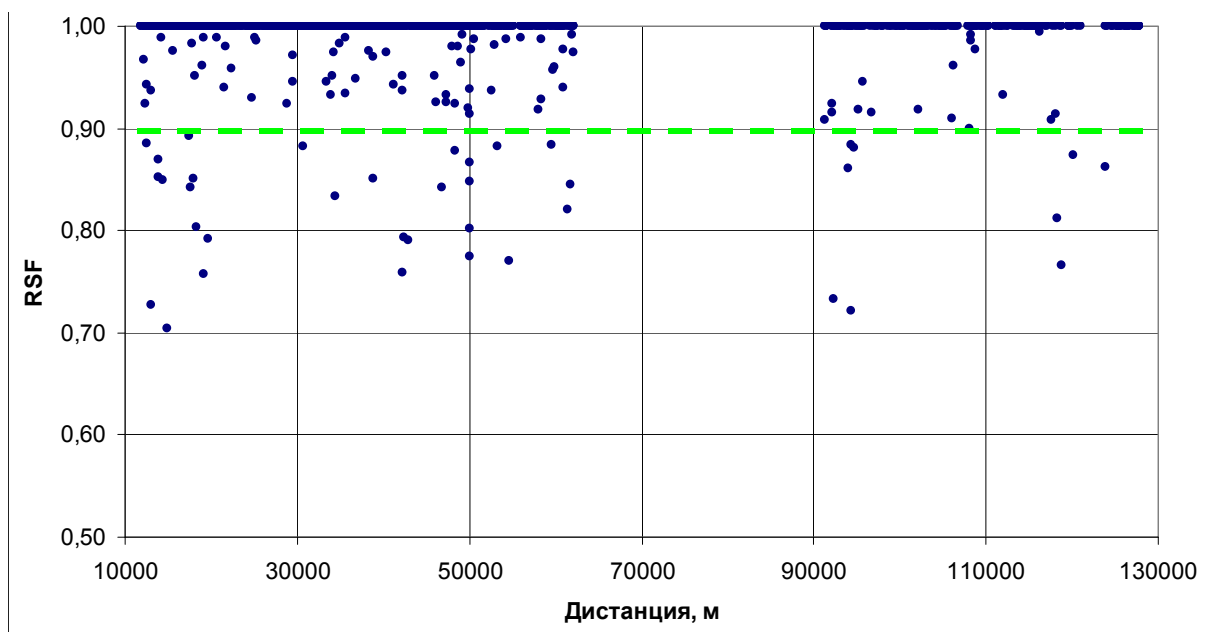


Рис. 9. Remaining Strength Factor нефтепродуктопровода Полоцк – Вентспилс от 158 до 208 км и от 238 до 274 км для разрешенного давления 4,2 МПа

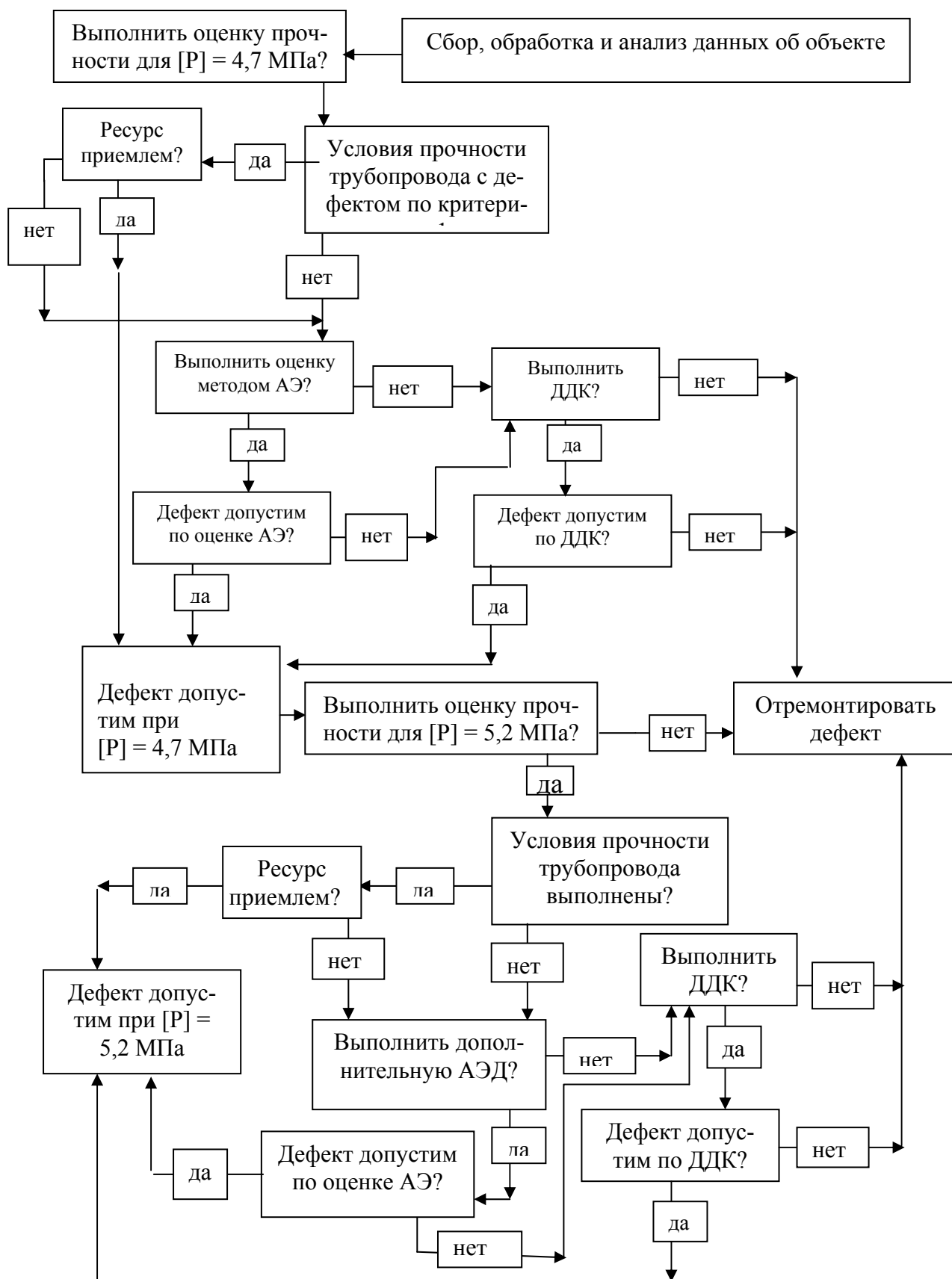


Рис. 10. Блок-схема процедуры оценки с применением метода АЭ магистрального нефтепродуктопровода с дефектами ПОР и ДПР

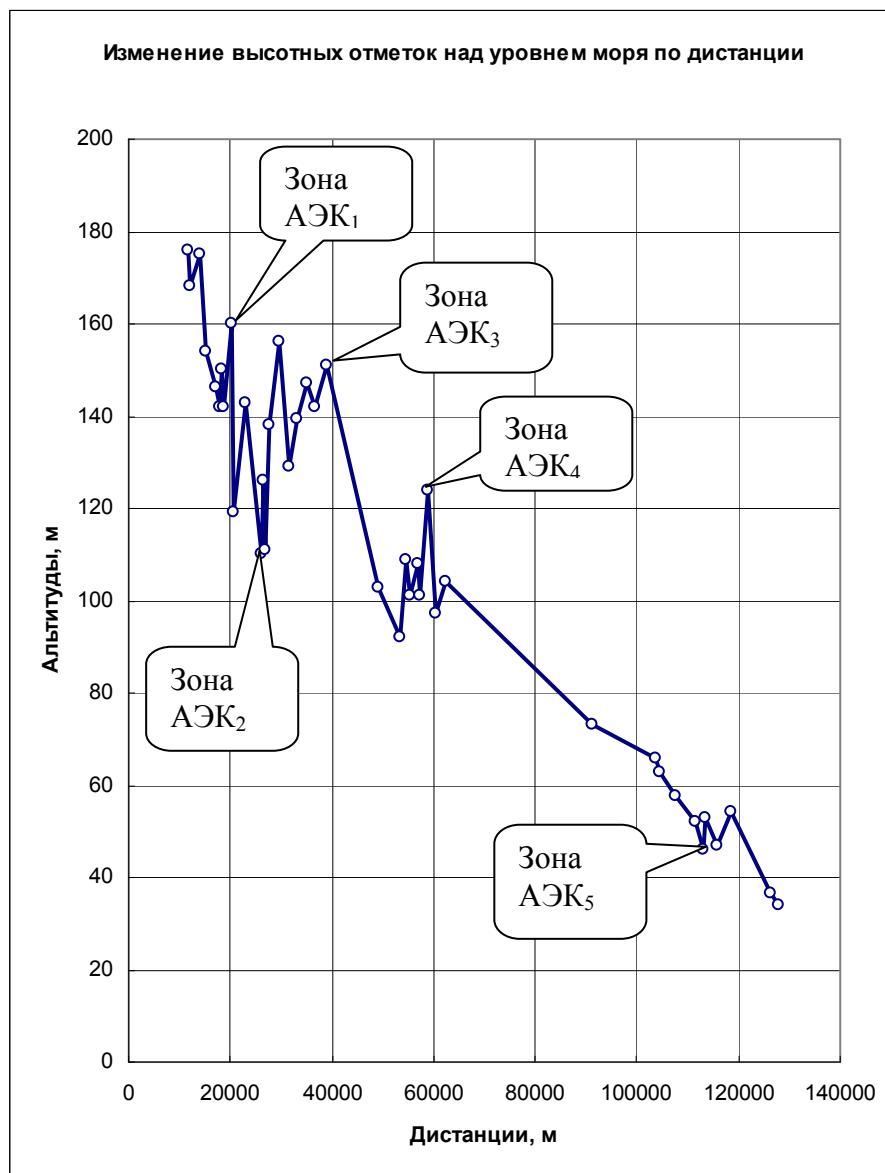


Рис. 11. Зоны выборочного АЭ контроля по 3-му оценочному уровню Fitness-For-Service

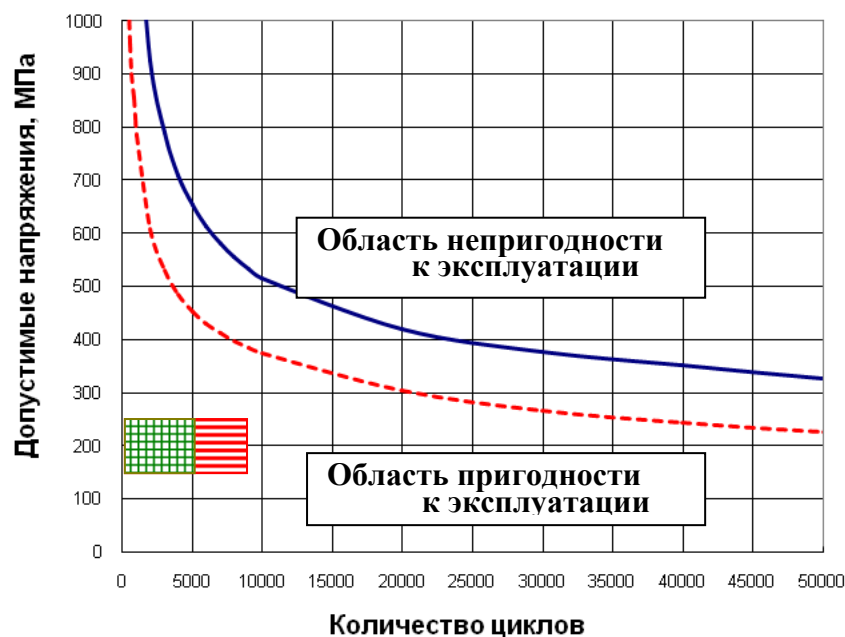


Рис. 12. Итоговые результаты проведения оценок Fitness-For-Service магистрального трубопровода с множественными дефектами (допустимые кривые циклического деформирования):

-  — расчетная наработка трубопровода в циклах на июнь 2009 г. (300 циклов в год согласно РД 153-39.4Р-119-03);
-  — фактическая наработка трубопровода в циклах на июнь 2009 г. (не более 135 циклов в год согласно анализу диспетчерских данных по цикличности нагружения нефтепродуктопровода);
- по данным механических испытаний материала;
- по НТД на сталь 17ГС

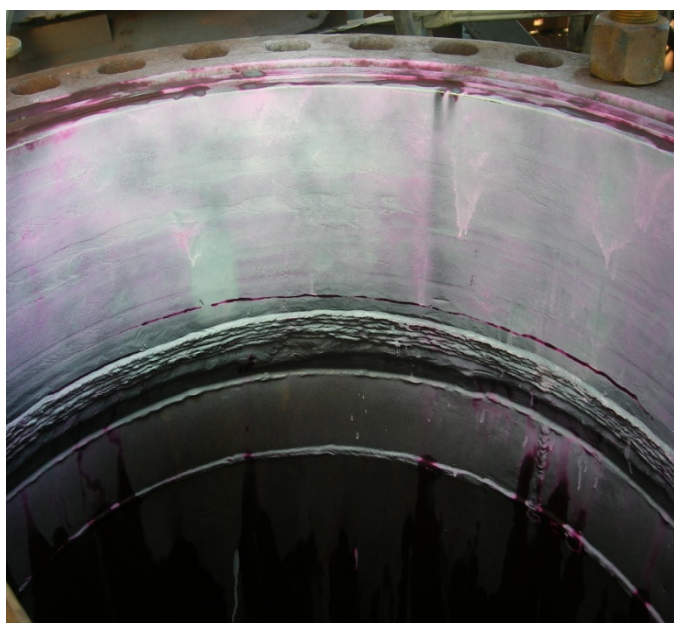


Рис. 13. Трещина в зоне кольцевого шва приварки фланца верхнего штуцера реактора риформинга (источник АЭ III класса)

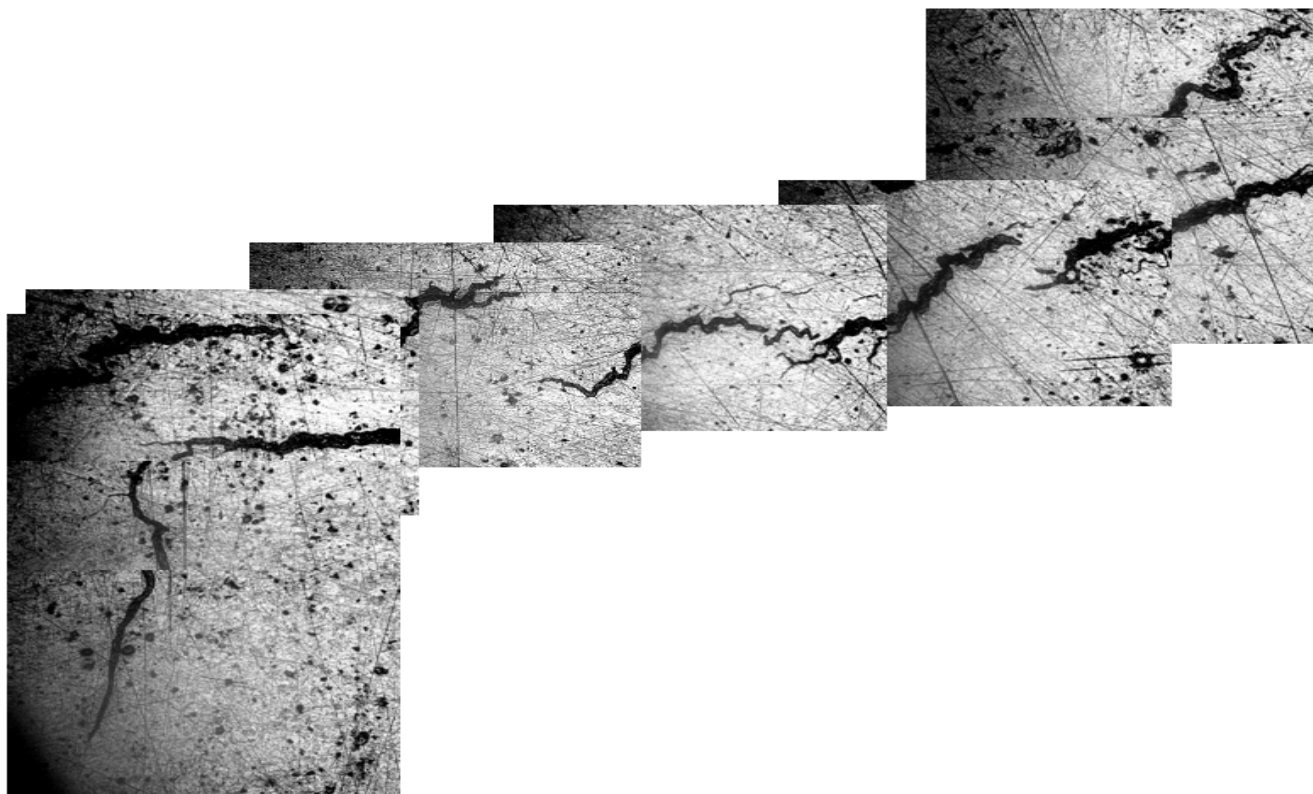


Рис. 14. Микротрещины на основном металле корпуса реактора риформинга (источники АЭ II класса)

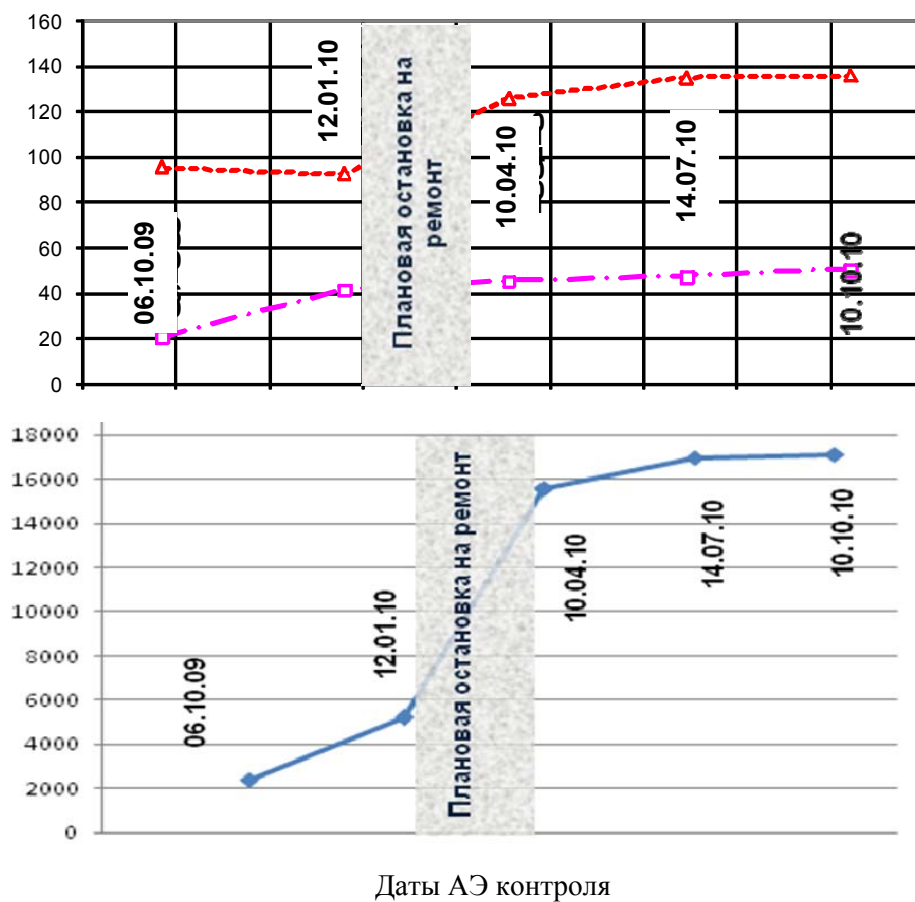


Рис. 15. Изменение максимальных АЭ активности (□) и энергии (Δ) и числа локализованных АЭ импульсов (внизу) в реакторе каталитического риформинга при периодическом АЭ мониторинге

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

В. И. Иванов, И. Э. Власов*

ЗАО НТЦ «Промышленная Безопасность», г. Москва,

*ОАО «Оргэнергонефть», г. Самара

Метод акустической эмиссии (АЭ), который в промышленности применяется уже более 30 лет, оказался весьма полезным как метод неразрушающего контроля (НК). В настоящее время он стал рутинным методом НК, который достаточно широко используется в промышленности. Однако потенциальные возможности метода АЭ позволяют отнести его к методам технического диагностирования в современном понимании этого термина, т.е. «определение технического состояния объекта с целью определения его безопасности (через оценку риска) и прогнозирования ресурса».

Интуитивное представление о полезности метода АЭ способствовало быстрому и широкому использованию его в промышленности. Метод АЭ, по-видимому, потенциально наиболее мощный метод технического диагностирования. Его главным достоинством является способность непосредственно оценивать степень опасности. Однако в настоящее время его возможности используются не более чем на 10 – 15 %.

При использовании метода АЭ в случае регистрации источника АЭ, как правило, требуется применение других (традиционных) методов НК, которые имеют нормы браковки. Поэтому метод АЭ в ряде случаев считается как бы несколько ущербным. Результаты метода еще не в полной мере и не всегда используются для окончательной оценки дефектности объекта контроля. В настоящее время метод АЭ развивается в большей степени вширь, а не вглубь. Поэтому необходимо проанализировать его возможности, ограничения и проблемы. В докладе сформулированы проблемы в области промышленного применения метода АЭ и проведено ранжирование задач, которые требуют своего решения.

Известно, что в большинстве случаев аварии технических устройств происходят в результате роста дефектов (как правило, трещин) до критической величины и последующего разрушения. Объекты могут находиться в следующих состояниях:

1. Не иметь дефектов, которые могут привести к разрушению при рабочей нагрузке и при работе до окончания ресурса. Эти объекты могут содержать неоднородности материала, зоны, содержащие конструктивные особенности – концентраторы напряжений (перенапряженные места). А также содержать микро- и мезоскопические дефекты. Подобные дефекты могут существовать в объекте всю его жизнь и не привести к разрушению. Это обычное состояние каждого объекта в работе и является наиболее вероятным состоянием, которое рассчитывают проектанты.

2. Объекты, содержащие мезодефекты, которые со временем развиваются и могут достичь критических размеров в течение срока службы. В этих случаях объекты достигают предельного состояния.

3. Объект содержит макроскопический дефект, который может привести к разрушению при нагружении испытательной нагрузкой.

4. Объект, содержит макродефект, который уже при рабочей нагрузке может привести к разрушению.

Традиционные методы НК, как правило, не могут обнаружить дефекты класса 1 и не всегда обнаруживают дефекты класса 2. Основной задачей, стоящей перед методом АЭ, является выявление дефектов всех 4-х классов и оценивание степени их опасности для объекта. Необходимо провести детальный анализ задач и классификацию их по актуальности для оптимального плана дальнейшего развития метода АЭ. Для рассмотрения конкретных задач в методе АЭ воспользуемся картинкой, представленной на рис. 1 [1].

Перечисленные выше задачи решены в том объеме, который позволяет в настоящее время использовать метод АЭ с большой пользой для контроля промышленных объектов и исследования процессов деформации и разрушения. Однако имеется большой простор для дальнейшего развития. В табл. 1 представлена экспертная оценка «Степени решения проблемы» и «Актуальности проблемы». Под актуальностью понимается интуитивная оценка критичности параметра по отношению к выполнению основной задачи метода – определению степени безопасности объекта. Безопасность можно определять в первую очередь вероятностью разрушения объекта. При оценке безопасности знание свойств АЭ канала менее значимо, чем знание связи параметров сигнала АЭ с состоянием объекта. Это связано с тем, что, по нашему мнению, деградирующее влияние канала на параметры сигнала АЭ меньше влияет на оценку ситуации, чем отсутствие знания связи параметров сигнала с состоянием объекта.

Если бы разрушение и сопровождающая его АЭ являлись процессами, описываемыми динамическими уравнениями типа волнового, то проблема решалась бы относительно простыми методами – решением соответствующих уравнений. Однако как разрушение, так и сопровождающая его АЭ являются стохастическими процессами, которые характеризуются параметрами статистических распределений. Поэтому характеристики и параметры результатов АЭ диагностики должны оцениваться как параметры случайного процесса. К таким параметрам можно отнести все параметры АЭ процесса и отображаемые процессы разрушения: разрушающей нагрузки; временем до разрушения; числом циклов до разрушения и т. д.

Проблемы метода АЭ можно подразделить на 4 уровня (по степени важности для промышленного применения):

1. Фундаментальные проблемы (строки 4, 7, 9 табл. 1);
2. Принципиальные проблемы (строки 1, 6);
3. Актуальные проблемы (строки 2, 3);
4. Текущие, технические проблемы (строки 5, 8).

В зависимости от потенциала исследователя и его цели может быть произведен выбор предмета исследований из указанных проблем. Начнем краткий обзор проблем.

Источники АЭ (Проблема 1)

Если рассматривать фундаментальную физику работы источника АЭ, то она весьма сложна. Сложность процессов зависит от необходимого уровня рассмотрения. Представляется, что для практики промышленного применения АЭ модели могут быть упрощены, и сигнал АЭ вблизи источника (трещины) может быть представлен в виде ступенчатой функции (рис. 2a1), параметры которой содержат основные параметры скачка трещины – величину скачка Δa .

АЭ канал (Проблема 2)

Возникает вопрос: какая информация сохраняется в сигнале 3 относительно сигнала 1 (рис. 3с). А она есть. По большей части она сохраняется в энергии и в амплитуде [2]. Кроме

того, в сигнале 3 имеется информация о канале распространения сигнала и о месторасположении источника АЭ. Масштабы по временной оси $t_{1,2}$ (для сигналов 1, 2) и t_3 (для сигнала 3) различаются в $10 \div 100$ раз. Что сгубил канал и какую информацию можно вытянуть (извлечь) из такой сложной формы (сигнала 3)? Для опытного и знающего специалиста даже в сигнале 3 содержится весьма много информации.

Вычисления акустических сигналов высокого уровня, выполненные под руководством У. Н. Рао и представленные в нескольких статьях, например в [3], показали, что «довольно простые» по форме сигналы вблизи источника превращаются в стохастические сигналы абсолютно неопределенной формы вдали от источника – на расстоянии $(10 \div 20) d$ (d – толщина стенки объекта).

Вряд ли целесообразно проводить точные расчеты прохождения сигнала через АЭ канал. По-видимому, необходим анализ деградации параметров путем экспериментальных статистических оценок. От простой регистрации сигнала АЭ до оценки срока жизни объекта (а значит возможного момента аварии) большая дистанция. Без решения этой задачи методу АЭ трудно бороться с другими методами НК за «место под солнцем».

Преобразователь АЭ. Оборудование АЭ (Проблемы 3, 4)

Требования к преобразователям АЭ сконцентрированы, в основном, в двух областях: 1) коэффициент преобразования и 2) амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик. Коэффициент преобразования зависит от используемого пьезоматериала преобразователя, а частотная характеристика – от конструкции. Поскольку фазочастотную характеристику в твердом тел практически невозможно измерить, рекомендуется использовать импульсную характеристику, которая измеряется достаточно просто.

Эксперты в области АЭ, работающие в начале XXI столетия, знают, что прогресс в области цифровой техники достиг трансцендентальных высот. Дальнейшее искусство создания оборудования зависит только от грамотности технических заданий. Т.о., проблем аппаратуры АЭ (5) практически не существует. Вопросы техники решены повсеместным использованием цифровых процессоров. Однако существуют задачи, решения которых требуют определенных затрат времени и использования интеллекта. Одной из таких интересных (однако, не вполне принципиальных) задач является выявление сигналов АЭ на уровне или ниже уровня тепловых шумов и помех.

Проблема помех и шумов. (Проблема 5, 6)

Самые большие ограничения в методе АЭ связаны с его маленькой шумовой устойчивостью. Это вызвано тем, что сигнал АЭ – вероятностный импульсный процесс, чьи параметры являются принципиально неизвестными для нас. Поэтому затруднительно использовать в полной мере достижения теории радиолокации и гидроакустики при рассмотрении отношения сигнал/шум. В основном, мы можем работать более или менее уверенно при отношении сигнал/шум не меньше чем 6 – 12 дБ (по амплитуде). Поэтому проблема проста (и в то же самое время сложна) – необходимо глубоко изучать сигналы АЭ [2]. И только после этого возможно будет постепенно выйти на достойный уровень. Если оборудование вследствие развития процессоров и цифровых схем не представляет критических проблем, то методические подходы, связанные с выделением сигналов из шума, остаются, в основном, на уровне «каменного века». Принципиальные вопросы приема и обработки сигналов решены фундаментально в 1940-х – 50-х гг. Хотя некоторые разделы развиваются, и их следует использовать в практике разработки аппаратуры АЭ.

Методики АЭ. Оценка источников АЭ, безопасности и прогноза (Проблемы 7, 8, 9)

Построение методик АЭ зависит от свойств и конструкции конкретного контролируемого объекта.

Методики должны содержать два основных раздела: 1) технологические приемы проведения контроля и 2) оценка результатов контроля. Суждение о наличии и степени опасности дефекта формируется при анализе параметров АЭ. Сигналы АЭ несут информацию об источниках, и она отображает процессы деформации и разрушения. Классы информативных параметров сигналов АЭ представлены в табл. 2.

Суммарно-темпоральные показатели несут информацию преимущественно о развитии процесса разрушения, *амплитудно-энергетические показатели* несут информацию преимущественно о параметрах единичных скачков трещин.

Суммарно-темпоральные параметры используются часто в процессе гидро-пневмо испытаний. На первом этапе нагружения (этап 1 на рис. 3) регистрируется, как правило, большое число АЭ сигналов. Это связано с пластической деформацией «свежего» материала в местах концентрации напряжений. При этом могут образовываться также микротрещины, не оказывающие существенного влияния на статическую прочность объекта. Вероятность разрушения на этапе 1 $P = 10^{-5} \dots 10^{-6}$ для объектов высокой надежности. Соответственно, для данного этапа при обнаружении источников АЭ возможна «перебраковка». Однако в случае присутствия в объекте дефекта критического размера он будет обнаружен с вероятностью не менее 0,8 – 0,9 [2]. При обнаружении резкого возрастания суммарной эмиссии имеет место непосредственный переход этапа 1 (соответствует критически активному источнику АЭ) в этап 5 (соответствует катастрофически активному источнику АЭ) на рис. 3г. Зависимость $N(I)$ обладает предсказательной силой. На этапах 1 – 4 достоверность предсказания меньше, чем на этапе 5 (табл. 3).

На этапах 3, 4 сигналы АЭ связаны с образованием и развитием макродефектов. На этих этапах возможна как перебраковка (ситуация, приведенная на рис. 3б), так и недобраковка (ситуация, приведенная на рис. 3в). Вероятность разрушения объекта на этапах 2, 3, 4 может лежать в диапазоне $10^{-2} \dots 10^{-5}$. Из рис. 3 видно, что метод АЭ имеет определенные потенциальные возможности прогноза разрушения. В настоящее время данный потенциал максимально реализован пока на этапе 5 работы объекта.

Критериями оценки наступления указанных этапов может служить, например, значение показателя степени n зависимости:

$$N = aI^n, \quad (1)$$

которую можно назвать формулой Данегана [2, 4]. В качестве параметра нагружения I может быть нагрузка, давление, коэффициент интенсивности напряжений и т. д. С использованием этой формулы была составлена классификация источников АЭ, которая имеет вид [2]:

- | | | |
|-----|-----------------|---|
| I | – $n < 1$ | – пассивный источник АЭ; |
| II | – $n \approx 1$ | – активный источник АЭ; |
| III | – $1 < n < 6$ | – критически активный источник АЭ; |
| IV | – $n > 6$ | – катастрофически активный источник АЭ. |

Можно ли на этапах 1 – 4 (где α – критически активный источник, β – пассивный источник) предсказать момент разрушения $\times$ (= конец жизни объекта). В лабораторных условиях возможно. Для испытаний производственных объектов – вряд ли, по крайней мере, сегодня. Это можно с той или иной вероятностью (риском) сделать при наступлении этапа 5. Важная задача – правильно идентифицировать его наступление.

Амплитудно-энергетические показатели могут быть использованы независимо от темпоральных или совместно с ними. В качестве примера на рис. 4 приведено распределение амплитуд импульсов АЭ для образца стали 25Х2НМФА, доведенного до разрушения. Область 1 (20 ÷ 50 дБ) связана с пластической деформацией и образованием микротрещин. Область 2 амплитуд (50 ÷ 100 дБ) связана с образованием макротрещины и развитием магистральной трещины.

Амплитудно-энергетические показатели предпочтительнее использовать при контроле объектов из относительно высокопрочных или хрупких материалов. Для контроля более вязких материалов предпочтительнее использовать темпоральные параметры и их сочетания. Но тогда важно иметь привязку к этапу жизни объекта (рис. 3).

Т.о., метод АЭ как метод технического диагностирования обладает безусловной возможностью определения технического состояния объекта, позволяет адекватно оценить степень безопасности объекта, оценить реальную опасность дефекта. При использовании метода АЭ термины «перебраковка» и «недобраковка» обретают реальную основу. Безусловным является надежное выявление критически и катастрофически активных источников, которые информируют об ускоренном развитии магистральной трещины и приближении ее размеров к критическому для данной конструкции размеру.

Предсказание наступления событий, вероятность которых весьма мала, представляет собой сложную задачу. Отсутствует теория наступления редких событий. Однако использование метода АЭ по схеме мониторинга позволяет определить реальное состояние объекта в реальном времени.

Заключение

Для дальнейшего развития метода АЭ как метода ТД необходимо направить усилия на решение следующих глубоких и принципиальных проблем:

- адекватная оценка источника АЭ по параметрам сигналов;
- идентификация сигналов АЭ, совершенствование старых и разработка новых методов выделения сигналов АЭ из шумов с тем, чтобы появилась возможность выделять сигнал АЭ, когда уровень шумов превышает уровень АЭ;
- оценка показателей АЭ метода:
 - вероятности обнаружения дефекта
 - рабочей характеристики приема сигналов АЭ (РХПСАЭ)
 - оценка рисков по параметрам АЭ
 - прогнозирование жизненных этапов объекта

В дальнейшем необходимо более подробно рассмотреть важнейшие показатели метода АЭ. К ним можно дополнительно к указанным выше отнести: достоверность, чувствительность, идентификационные возможности, калибровочные характеристики. Оценить возможности и разработать предложения по использованию распознавания образов, применение нейронных цепей и др. Уточнить требования к методикам АЭ, системам браковки, установить готовность использования метода АЭ к оценке пригодности к эксплуатации объекта.

Огромный потенциал метода АЭ должен быть реализован и в области мониторинга.

Литература

1. Ivanov V. I. Acoustic emission: Some problems, tasks and solutions. – NDT International. V. 17. No. 6. P. 23–328.
2. Иванов В. И., Власов И. Э. Метод акустической эмиссии. Неразрушающий контроль / Справочник в 8 т. // Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 7. Кн. 1. – М.: Машиностроение. 2005. – 340 с.
3. Ceranoglu A. N., Pao Y. H., Propagation of Elastic Pulses and Acoustic Emission in a Plate. – Trans. ASME: J. Appl. Mech. 1981. V. 48. No. 1. P. 125–147.
4. Dunegan H. L., Green A. T. Factors Affecting Acoustic Emission Response From Materials. In Acoustic Emission. – ASTM, STP 505, 1972, p. 100–113.

Табл. 1. Цифры, приведенные в таблице, являются экспертными оценками

№	Проблема	Актуальность проблемы (диапазон: 0,0 – 1,0)	Степень решения проблемы, %
1	Источник АЭ (модели)	0,2 ÷ 0,4	70 ÷ 80
2	Распространение АЭ сигнала (канал)	0,4 ÷ 0,6	60 ÷ 80
3	Преобразователи АЭ	0,4 ÷ 0,6	80 ÷ 90
4	Проблема помех и шумов	0,8 ÷ 1,0	50 ÷ 70
5	АЭ аппаратура	0,3 ÷ 0,5	90 ÷ 97
6	Обработка АЭ сигналов	0,8 ÷ 1,0	10 ÷ 30
7	Оценка АЭ источников (безопасность)	0,8 ÷ 1,0	10 ÷ 30
8	Методики АЭ контроля	0,3 ÷ 0,5	90 ÷ 97
9	Прогнозирование состояния объекта	0,8 ÷ 1,0	0 ÷ 10

Табл. 2. Классы информативных параметров сигналов АЭ

Параметры сигналов АЭ, используемые для оценки результатов		
Время-зависимые, суммарные	Амплитудно-энергетические	Комплексные
$N, \dot{N}, N_{\Sigma}, \dot{N}_{\Sigma}, \dots$	A, E	$KП=F(A, E, N, \dot{N}, N_{\Sigma}, \dot{N}_{\Sigma})$

Табл. 3

Этап жизни	Вероятность разрушения, P
1	$10^{-4} \div 10^{-5}$
2	$10^{-3} \div 10^{-4}$
3	$10^{-2} \div 10^{-3}$
4	$10^{-1} \div 10^{-2}$
5	$1 \div 10^{-1}$

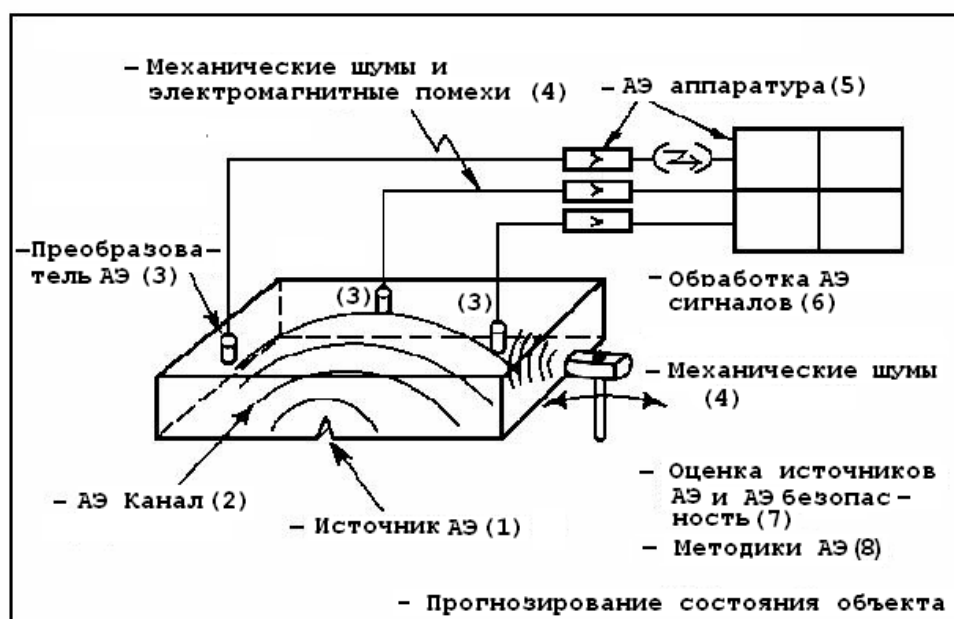


Рис. 1. Проблемы метода АЭ: 1 – источник АЭ (модели); 2 – распространение АЭ сигнала по акустическому каналу; 3 – преобразователи АИ; 4 – механические шумы и электромагнитные помехи; 5 – АЭ аппаратура; 6 – обработка АЭ сигналов; 7 – оценка источников АЭ и АЭ безопасность; 8 – методики АЭ контроля; 9 – прогнозирование состояния объекта

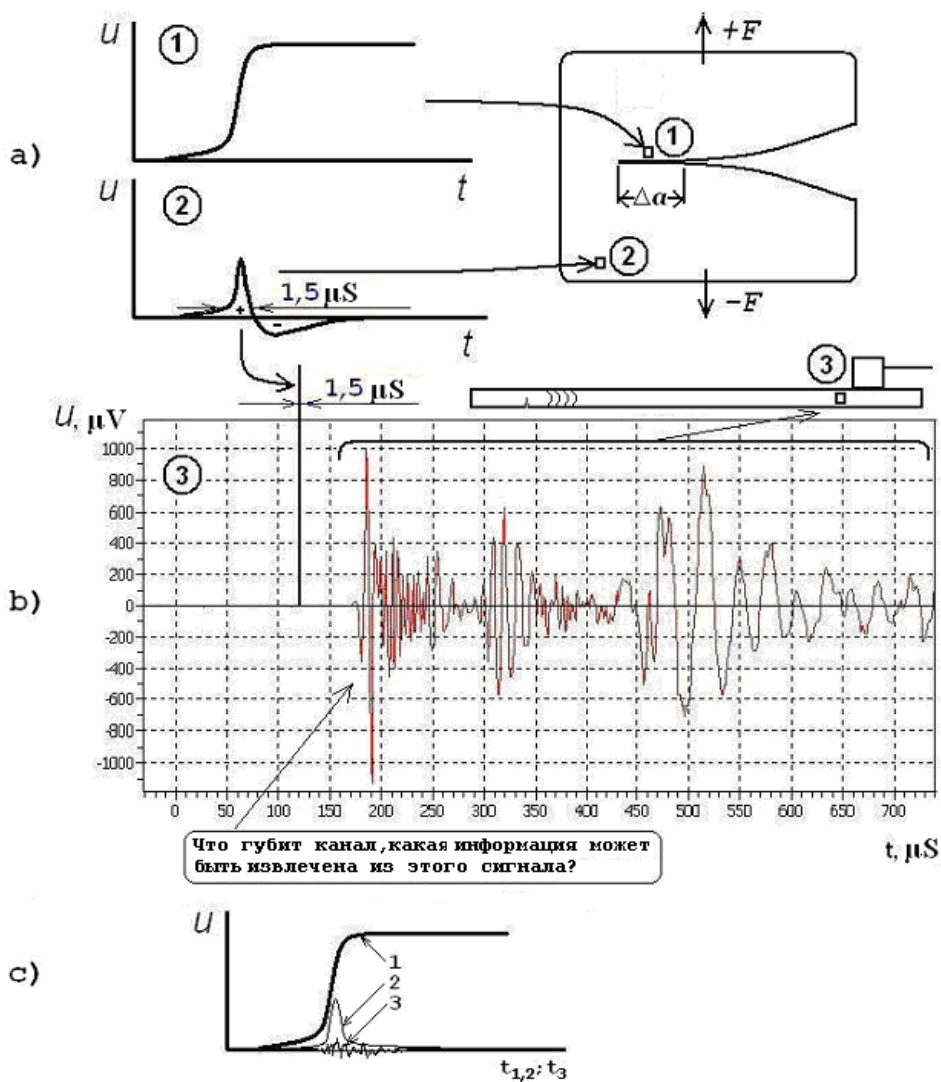


Рис. 2. Сигналы АЭ от единичного скачка трещины на разных расстояниях от источника:
a-1 – акустический сигнал в непосредственной близости от источника АЭ;
a-2 – не очень далеко от источника АЭ;
b – электрический сигнал на выходе ПАЭ, *c* – условное совмещение акустических и электрических сигналов

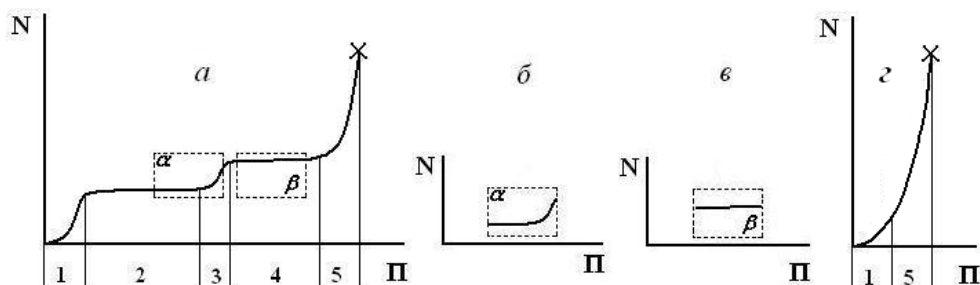


Рис. 3. Обобщенная зависимость N (суммарной АЭ) от параметра нагружения Π : 1...5 – этапы жизни объекта; *a* – полный цикл жизни объекта, *б* – этап α , *в* – этап β , *г* – объект с критическим дефектом (этап 1→5)

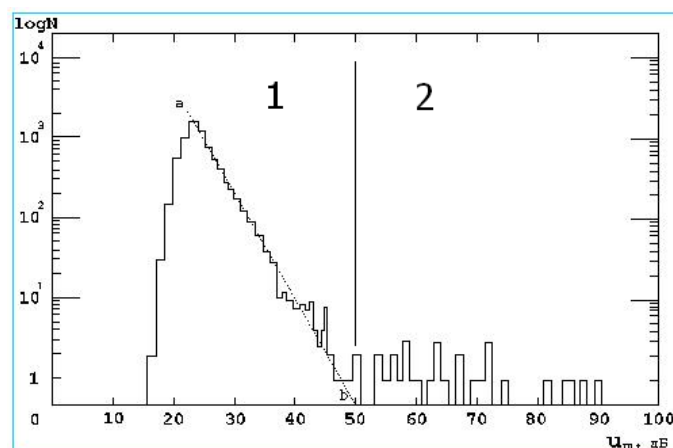


Рис. 4. Амплитудное распределение импульсов АЭ

К ВОПРОСУ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В НЕФТЕПРОВОДАХ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

А. В. Жуков, А. Н. Кузьмин

Филиал «Интерюнис-Урал», Екатеринбург

В настоящее время спектр опасных производственных объектов, где современные регламенты устанавливают необходимость проведения акустико-эмиссионного контроля, постоянно расширяется. В этих условиях задача совершенствования нормативно технической базы по акустико-эмиссионному методу контроля является особенно актуальной. Существующих общих положений [1 – 4] для решения этой задачи явно недостаточно. Обстоятельства вынуждают экспертные организации и разработчиков оборудования проводить научные исследования и изыскания с целью создания конкретных методических положений для объектов, где акустико-эмиссионный контроль не имеет альтернативы. В частности, речь идет о подземных участках на линейной части магистральных нефтепроводов (МН), где по тем или иным причинам применение других методов контроля не представляется возможным. Работа посвящена исследованию особенностей распространения упругих волн акустического излучения в магистральных нефтепроводах. В общем случае задачу можно расширить до любых технологических трубопроводов большого диаметра, транспортирующих жидкую среду (нефть, бензин, сжиженный газ и пр.). К особенностям таких магистральных систем можно отнести следующие факторы: высокий уровень статических и динамических эксплуатационных нагрузок, нестационарность движения среды по трубопроводу, инертность изменения давления при проведении АЭ контроля вследствие большой протяженности, наличие изоляции и заглубление в грунт. Все перечисленные факторы создают существенные трудности при проведении АЭ контроля на реальном объекте и требуют дополнительного изучения. Перечислим лишь основные недостатки существующих методик:

1. Предлагаемый «График нагружения» согласно [1] невыполним, поскольку трубопровод диагностируется непосредственно в режиме эксплуатации, не является замкнутой системой.
2. Не регламентировано измерение давления в трубопроводе непосредственно на участке контроля. Контроль давления при нагружении производится вдали от участка на замерном узле МН и, зачастую, не соответствует реальной нагрузке на диагностируемом участке.
3. Данные с диспетчерского пункта, расположенного за многие десятки километров от диагностируемого участка, не обеспечивают необходимой точности измерения параметров нагружения.
4. Стандартные общепринятые критерии оценки степени опасности источников АЭ [1] для магистральных нефтепроводов ограничено применимы и подлежат серьезной доработке.
5. Требования к АЭ аппаратуре существенно устарели и не отвечают возможностям современного оборудования.

6. Порядок проведения настройки параметров измерения АЭ содержит ошибочные рекомендации, вследствие чего измерение скорости и затухания упругих волн в трубопроводе не позволяет для ЛЧ МН получить истинные значения.

Часть этих вопросов уже рассматривалось в статье [5]. В частности, проанализирован характер изменения давления на линейной части магистральных трубопроводов. Показано, что на текущих эксплуатационных условиях транспорта продукта существует принципиальная возможность проводить периодический АЭ контроль МН без принудительного изменения давления. Рассмотрена природа колебаний нагрузки вблизи уровня рабочего давления на экспериментальном участке МН. Показано, что возникающие в результате нестационарного движения потока жидкости в трубопроводе колебания давления обеспечивают необходимый уровень нагружения трубопровода и достаточны для проведения АЭ контроля в режиме мониторинга. Необходимым условием проведения контроля на текущих эксплуатационных параметрах МН является применение тензометрических измерений непосредственно в месте проведения контроля. В результате устанавливается взаимосвязь регистрируемых параметров АЭ с градиентом давления на участке АЭД. Сделан вывод, что для осуществления корректных измерений параметров АЭ в режиме мониторинга и создания подходящих условий необходимо регламентировать, при каких начальных параметрах эксплуатации трубопровода (расход, давление, температура) возможно проведение АЭ контроля.

Исходя из сформулированных недостатков действующих методик АЭД применительно к магистральным нефтепроводам, корректной является оценка скорости эффективных действующих волновых мод, распространяющихся в трубопроводе. Традиционно при составлении локационной схемы и измерении скорости принято считать, что акустико-эмиссионный сигнал распространяется по материалу трубопровода, при этом, как правило, используется одна из составляющих мод волн Лэмба. Таким образом, значение скорости задается в интервале от 3100 до 5200 м/с. Известно [6], что в трубопроводах с жидкой средой в число эффективных мод входят как волны, распространяющиеся по металлу, так и волны, распространяющиеся в жидкой среде. При этом волны в жидкости более эффективно передают информацию о дефекте на дальних расстояниях от источника. В связи с этим можно утверждать, что указанного выше диапазона скоростей упругих волн при диагностике МН явно недостаточно. Для правильной интерпретации полученных АЭ данных необходимо определять скорости распространения различных типов волн. Остановимся на данном вопросе несколько подробнее. В качестве образца для исследования был взят протяженный участок действующего магистрального нефтепровода диаметром 1220 мм, толщиной стенки 12 мм, сталь 09Г2С.

На рис. 1 показана осциллограмма единичного импульса АЭ, излученного на нефтепроводе стандартным имитатором на расстоянии 5 м от приемного преобразователя. Видно, что результирующий волновой пакет формируют различные составляющие упругих волн, причем более поздние моды зачастую в несколько раз по мощности превосходят начальные составляющие.

Для формирующего волнового пакета сигналов АЭ, показанного на рис. 1, представлена зависимость амплитуд отдельных сигналов от времени их прихода и от скорости распространения (верхняя шкала) (рис. 2). Видно, что наибольшей энергией пакета обладают составляющие, лежащие в интервале скоростей от 400 до 1000 м/с. Как показали дисперсионные кривые волн, рассчитанные в пакете программного обеспечения A-Line 32D, по времени прихода первой преобразователя достигает характерная мода S_0 волны Лэмба со скоростью 5150 м/с. Однако максимальную амплитуду при этом имеет сигнал со скоростью распро-

странения около 800 м/с. Этот экспериментальный факт дает основание полагать, что данный сигнал не обладает меньшим затуханием и будет распространяться на большее расстояние по сравнению с другими составляющими волнового пакета. Для более детального изучения «медленной» составляющей на участке нефтепровода длиной 10 м были последовательно установлены преобразователи АЭ с интервалом 1 м. Имитатор сигнала АЭ был расположен вблизи первого в цепочке преобразователей.

Результирующая диаграмма, иллюстрирующая распределение скоростей волнового пакета в зависимости от расстояния от источника до приемника, показана на рис. 3. Синим цветом на диаграмме обозначены сигналы с максимальной амплитудой в пакете. Видно, что на первых двух метрах преобладает мода S_0 , далее с увеличением расстояния скорость максимальной амплитуды снижается и колеблется в пределах 600 – 800 м/с. Колебание скорости распространения данной составляющей можно пояснить геометрической моделью траектории распространения волны, схематично показанной на рис. 4.

В соответствии с рис. 4 было сделано предположение, что акустическая упругая волна от источника, преломляясь на внутренней границе раздела сред металл-жидкость, разделяется на две составляющие по металлу и по жидкости. В точках отражения часть энергии волны по жидкости отражается, а часть переходит в металл, где возникает переотраженная волна Лэмба, которую и фиксирует преобразователь АЭ. Данная волна распространяется комбинировано так, что часть пути проходит по жидкости, часть по металлу. Таким образом, можно, в частности, пояснить экспериментальный факт, что амплитуда сигнала АЭ с удалением от источника на магистральном нефтепроводе затухает не линейно, а по сложной колебательной траектории. Пример такой траектории показан на кривой (рис. 5), полученной экспериментальным путем на объекте.

Из всего сказанного следует, что для трубопроводов с жидкой средой в условиях дальней волновой зоны, т. е. на больших расстояниях между преобразователями АЭ и источником, скорости волн существенно отличаются от традиционно измеряемых значений в ближней волновой зоне и лежат в диапазоне от 400 до 1000 м/с, что необходимо учитывать при проведении измерений скорости распространения упругих волн на объекте. Есть основание полагать, что данный факт позволит существенно повысить точность определения местоположения опасного источника АЭ, и в конечном итоге повысит безопасность эксплуатации объекта.

Литература

1. РД 16.01-60.30.00-КТН-068-1-05. Правила технической диагностики нефтепроводов при приемке после строительства и в процессе эксплуатации.
2. РД-23.040.00-КТН-387-07. Методика диагностики технологических нефтепроводов НПС (взамен РД 16.01-60.30.00-КТН-085-1-05. Методика диагностики и аттестации технологических нефтепроводов НПС).
3. РД Методика оценки технического состояния трубопроводов, построенных с применением подкладных колец (взамен РД 16.01-60.30.00-КТН-096-1-05. Методика оценки технического состояния трубопроводов, построенных с применением подкладных колец).
4. ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов.
5. Харебов В. Г., Жуков А. В., Кузьмин А. Н. Совершенствование методики диагностики трубопроводов с применением метода акустической эмиссии. – В мире НК. 2009. № 4(46). С. 5–9.
6. Дробот Ю. Б., Грешников В. А., Бачегов В. Н. Акустическое контактное течеискание. – М.: Машиностроение, 1989. – 120 с.

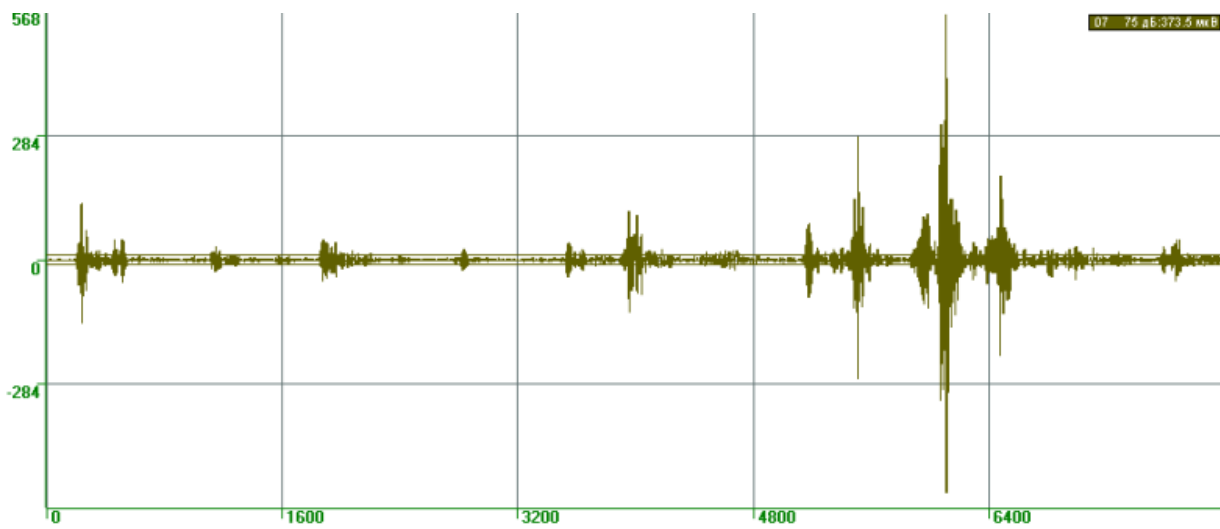


Рис. 1. Осциллограмма единичного сигнала от имитатора сигнала АЭ, полученная на расстоянии 5 м от источника

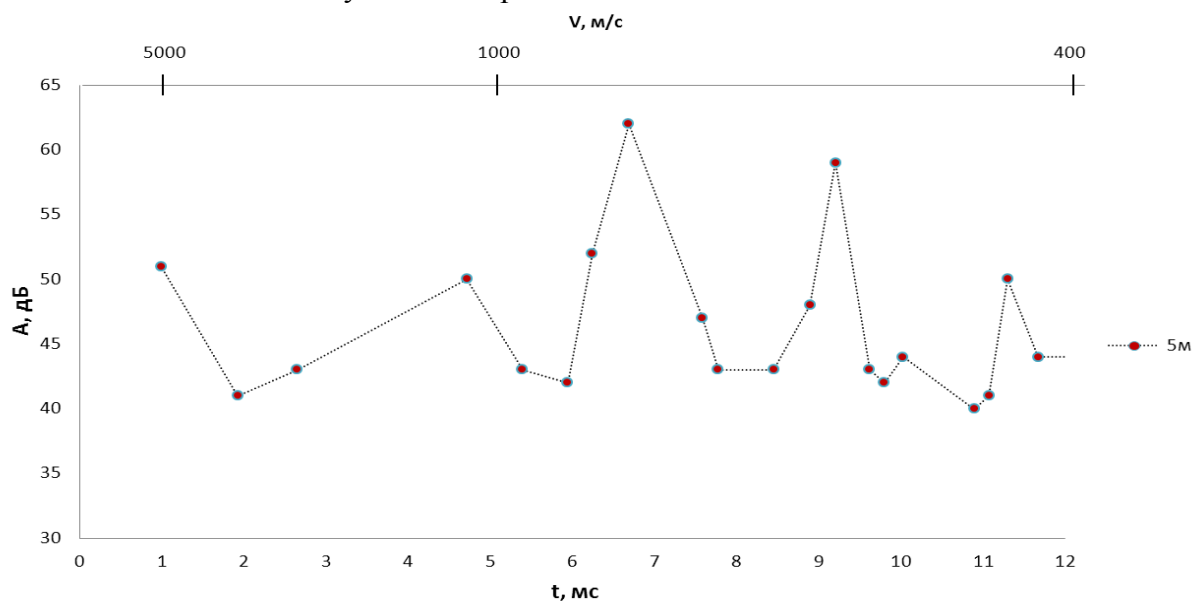


Рис. 2. Зависимость амплитуды сигналов АЭ от времени прихода и от скорости

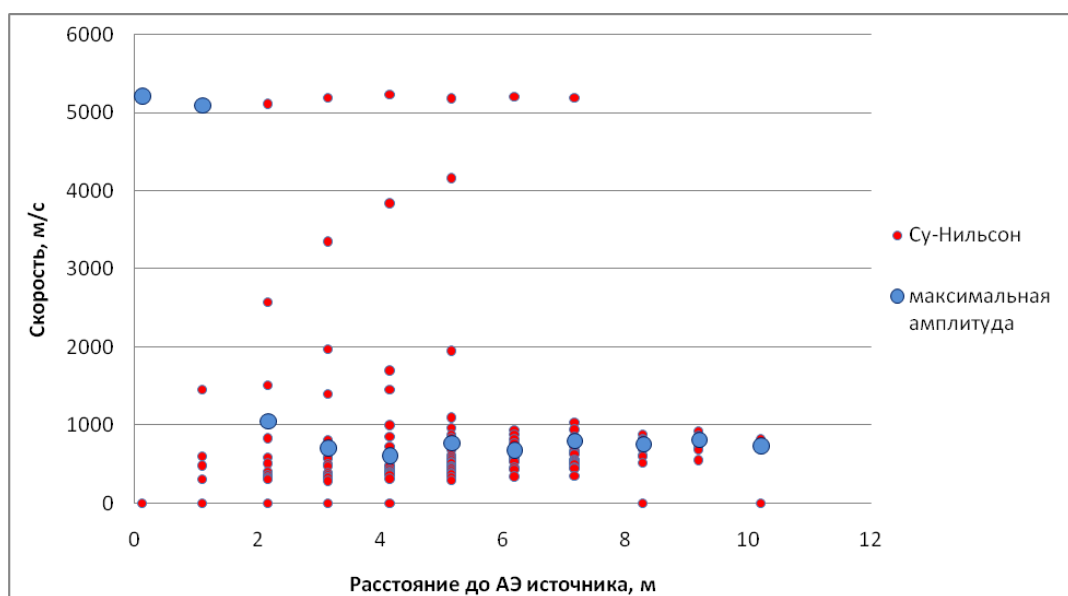


Рис. 3. Распределение скоростей волнового пакета от расстояния

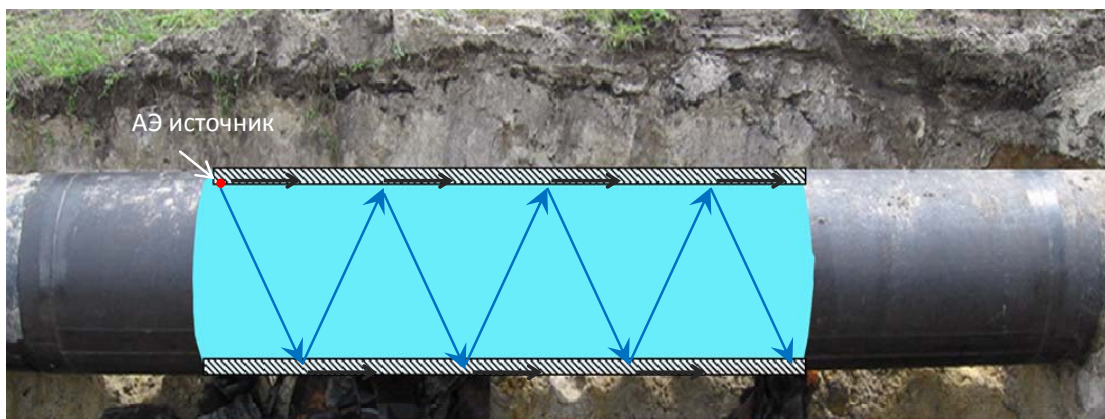


Рис. 4. Модель распространения волны в среде

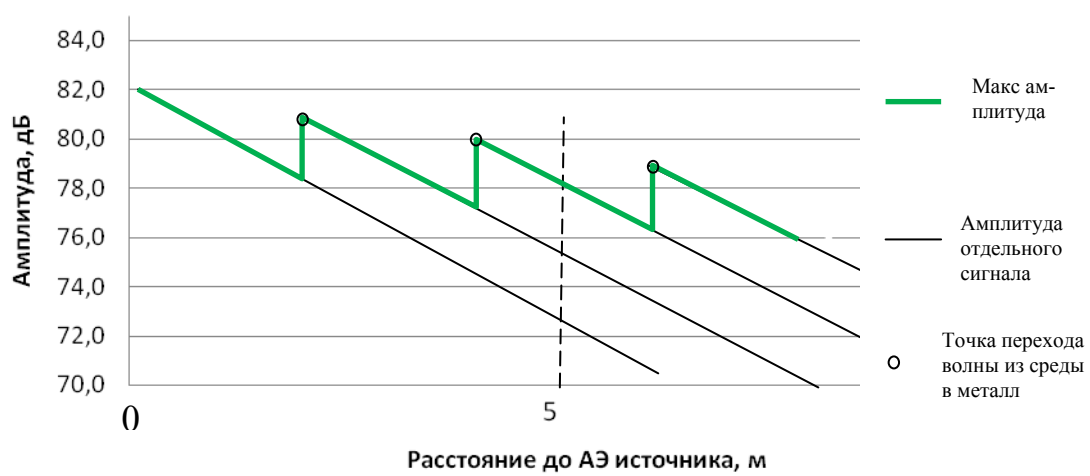


Рис. 5. Распределение амплитуды волнового пакета в зависимости от расстояния до источника

РЕГИСТРАЦИЯ ДЕФЕКТОВ III – IV КЛАССА В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ: ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА, УСЛОВИЯ ВЫЯВЛЕНИЯ, СПОСОБСТВУЮЩИЕ, МЕШАЮЩИЕ И ИСКЛЮЧАЮЩИЕ ФАКТОРЫ

В. В. Городович, А. Г. Комаров, В. Н. Толкачев

ОАО «ВНИКТИнефтехимоборудование», Волгоград

Для обеспечения безопасности обслуживающего персонала предприятий существующие законы и НД устанавливают ряд обязательных требований, которым должны удовлетворять конструкции технических устройств (ТУ). Технический надзор за ТУ осуществляется службами предприятия по нормам и положениям правил. Например, для сосудов давления эти требования изложены в ПБ 03-576-03 (Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением). В соответствии с положениями ПБ 03-576-03 все сосуды, работающие под давлением, подвергаются периодическому гидравлическому испытанию, которое имеет своей целью проверку прочности и плотности основного металла, сварных и разъемных соединений и, в сочетании с другими методами контроля, позволяет определить состояние сосуда в целом. Иногда при техническом освидетельствовании или диагностировании возникают ситуации, когда отсутствует возможность проведения гидравлического испытания, например:

- если в какой-либо части ТУ под действием веса воды возникает большое напряжение в металлоконструкциях;
- если невозможно впоследствии удалить из ТУ воду;
- если используется внутреннее торкретирование ТУ бетоном и т. д.

В этих случаях допускается замена гидравлического испытания пневматическим (сжатым воздухом, инертным газом). Такое испытание проводится с соблюдением определенных мер предосторожности и в сопровождении АЭ контроля, что объясняется значительно большей опасностью такого испытания в сравнении с гидравлическим.

Таким образом, одной из задач практического АЭК, закрепленной к тому же действующей НД (ПБ 03-576-03 и др.), является сопровождение пневматических (ПИ) и гидравлических (ГИ) испытаний объектов для обеспечения безопасности их проведения. Аналогичные задачи возникают при техническом диагностировании (ТД) в соответствии с положениями раздела 3.10 РД 03-421-01.

Непосредственной целью АЭК в обоих случаях является выявление критически и катастрофически активных АЭ источников (III и IV классов согласно ПБ 03-593-03) и принятие обоснованного решения по продолжению испытания или его остановке и прекращению. Такие источники (источники реального времени – ИРВ) должны быть обнаружены непосредственно при испытании. Однако, поскольку АЭ есть стохастический процесс, сигналы АЭ являются шумоподобными, а реальный АЭ контроль сопровождается помехами и шумами разного рода, то для своевременной и достоверной регистрации ИРВ необходимо соблюдать определенный набор требований к программе нагружения, квалификации операторов, АЭ аппаратуре, программному обеспечению, критериям и системам оценки состояния объекта.

Испытательное давление при АЭК

ПИ, проводимое после изготовления сосуда или при его техническом освидетельствовании, заменяющее гидравлическое испытание (ГИ) и сопровождаемое АЭ методом НК, проводится в соответствии с положениями раздела 4.6 ПБ 03-576-03. При этом пробное давление составляет $1,25 \cdot P_{\text{РАСЧ(РАЗР)}} \cdot [\sigma]_{20} / [\sigma]_t$.

Если ПИ или ГИ проводится в рамках ТД, проводимого в соответствии с положениями раздела 3.10 РД 03-421-01, то АЭ контроль осуществляется в соответствии с положениями ПБ 03-593-03 (РД 03-131-97) и испытательное давление составляет от $(1,05 \div 1,1) \cdot P_{\text{РАБ}}$ до $1,25 \cdot P_{\text{РАСЧ(РАЗР)}} \cdot [\sigma]_{20} / [\sigma]_t$. Гидравлическое (пневматическое) испытание при условии выполнения АЭК допускается не проводить.

В соответствии с информацией, приведенной в разделе «Консультации» журнала «Безопасность труда в промышленности» № 6 за 2006 г., при применении АЭК в случае очередного технического освидетельствования или при экспертизе промышленной безопасности испытательное давления должно быть не менее $(1,05 \div 1,1) \cdot P_{\text{РАБ}} \cdot [\sigma]_{20} / [\sigma]_t$.

Таким образом, применение АЭК при проведении ГИ или ПИ позволяет снизить максимальное испытательное давление по крайней мере на 20 %, что положительно сказывается на безопасности проведения испытания, однако заставляет обращать дополнительное внимание на выявление дефектов как в реальном времени, так и при пост-обработке.

Особенности проведения пневматических испытаний

Пневматическое испытание (ПИ) по сравнению с гидравлическим испытанием (ГИ) помимо повышенной опасности имеет некоторые особенности, влияющие на достоверность АЭК:

- точность локализации источников выше, чем при ГИ (т. к. сигнал идет по одной среде – по стенке ТУ);
- возможность использования меньшего количества ПАЭ для выполнения точной локализации источников (т. к. меньше затухание);
- т. к. ПИ проводится в течение намного большего времени, чем ГИ, то за счет поступления в объект намного большего объема рабочей среды повышается потенциальная помеховосприимчивость АЭК.

Следует также отметить следующее:

- в случае возникновения нештатных ситуаций невозможно быстро сбросить давление;
- при ПИ объект находится под давлением выше расчетного намного большее время, чем при ГИ, что не лучшим образом сказывается на прочностных свойствах материала сосуда;
- поскольку при замене ГИ на ПИ невозможно оценить традиционные параметры успешного проведения ГИ (отсутствие течей, трещин, слезок, потения в сварных соединениях и на основном металле, течей в разъемных соединениях), падение давления плохо выявляется по показаниям манометра, объем сварных и разъемных соединений подлежащих обмыливанию велик, и т. к. эти соединения зачастую недоступны, необходимо обеспечить выявление подобных дефектов средствами АЭК, что сводится к анализу параметров RMS, ASL и использованию технологий локализации источников непрерывной АЭ.

Сложность выявления ИРВ

Задача надежного выявления ИРВ имеет три составляющие: получение достоверных данных в процессе проведения АЭК, оценку опасности выявленных ИРВ, мероприятия по результатам выявления ИРВ.

Достоверность данных АЭК тесно связана с основной проблемой метода – выделением полезных сигналов (сигналов от структурных дефектов) из потока помехообразной инфор-

мации, регистрируемой АЭ системой. ПИ (как, впрочем, и ГИ) сосуда сопровождаются, как правило, непрерывными и импульсными помехами, уровень которых может быть значителен как по пиковым значениям, так и по частоте регистрации.

Помехи, регистрируемые во время АЭК, имеют, как правило, следующее происхождение:

1. Течи и пропуски разного рода;
2. Помехи, связанные с процессом нагружения (свистки, перетекание рабочей среды из одного объема в другой), помехи от просачивания газа через катализатор;
3. Помехи от работающих механизмов и машин, от вибрации различного происхождения;
4. Помехи электрического типа (EMI и RFI – электромагнитные или радиопомехи, в т. ч. синфазного характера);
5. Помехи от воздействия окружающей среды (дождь, снег, ветер, температура окружающей среды);
6. Помехи от трения при изменении линейных размеров нагружаемого сосуда (изменение диаметра сосуда при нагружении может составлять от десятых долей до нескольких миллиметров);
7. Помехи механической природы от взаимных перемещений различных внутренних и внешних устройств, связанных с объектом (лестницы, площадки обслуживания, трубопроводы, внутренняя и наружная теплоизоляция, леса и т. п.);
8. Помехи от растрескивания защитного покрытия (краски) и продуктов коррозии.

Помехи оказывают влияние на достоверность регистрируемых данных, заставляя повышать порог в случае непрерывных и маскируя источники АЭ высокими амплитудами импульсных помех.

При этом, хотя иногда помехи могут быть исключены в РВ или при пост-обработке (как правило, непрерывные), в ряде случаев помехи не могут быть однозначно определены и исключены. Поэтому лучший вариант – исключить или снизить уровень помех при регистрации, а не разбираться с ними при пост-обработке.

Применение общепринятых количественных критериев (например, MONPAC или локально-динамического критерия) для оценки опасности регистрируемых ИРВ может быть затруднено: даже невысокий уровень помех, регистрируемый при ПИ/ГИ, как правило, приводит к «зашкаливанию» критериальных параметров. Оператору приходится руководствоваться, в основном, положениями ASTM E 569 (оценка концентрации лоцированных сигналов, активности и интенсивности источников АЭ).

Возможные мероприятия по результатам выявления ИРВ должны быть предусмотрены до начала проведения АЭК, отвечать требованиям техники безопасности и должны предприниматься незамедлительно. Мероприятия должны предусматривать немедленное прекращение нагружения и снижение давления по команде оператора. Мероприятия включают внешний осмотр объекта, визуальный контроль, применение иных разрешенных и доступных видов НК, промежуточный анализ данных, проведение повторного АЭК.

Обеспечение достоверного выявления ИРВ

Для обеспечения достоверного выявления ИРВ необходимо обеспечить выполнение при подготовке и проведении АЭК определенных условий, требований и мероприятий.

Требования к выбору АЭ аппаратуры:

1. Аппаратура должна иметь низкий уровень шумов и высокую помехозащищенность для реализации чего должен использоваться весь возможный спектр мероприятий (применение малошумящих схем, фильтрация, качественные кабели и разъемы, экранирование, развязка от цепей питания и корпуса, согласование линий передач, применение дифференциальных схем).

2. Аппаратура должна обеспечивать высокую скорость регистрации и отображения данных, включать аппаратно/программные алгоритмы защиты от переполнения.
3. Программно/аппаратное обеспечение АЭ системы должно обеспечивать регистрацию АЭ данных с высокой скоростью и без потерь, выполнение локализации источников АЭ и оценку выполнения заданных критериев в реальном времени.

Планирование и подготовка или «культура» выполнения АЭК:

1. Определение технологических параметров и особенностей конструкции объекта, определение вероятных типов, механизмов и зон повреждения объекта, определение зон с максимальными уровнями напряженно-деформированного состояния (НДС) объекта;
2. Подготовка перед испытанием подробного эскиза объекта включая местоположение штуцеров, подводящих трубопроводов, внутренних устройств, площадок, лестниц и прочих особенностей конструкции, которые могут стать во время АЭК потенциальными источниками помех;
3. Определение затухания материала объекта;
4. Применение для АЭК достаточного (с учетом затухания) количества ПАЭ, размещенных в соответствии с заданной локационной схемой, обеспечивающей регистрацию и локализацию сигналов от зон с вероятными дефектами;
5. Выполнение калибровки всех ПАЭ в соответствии со стандартными процедурами;
6. Проведение испытания в соответствии с согласованной программой нагружения, определяющей начальное и максимальное давление, уровни выдержек давления, допустимый диапазон скорости нагружения, повторное нагружение;
7. Использование для нагружения специализированного оборудования, например, гидравлического опрессовщика с регулируемой производительностью (например, REMS EPush – 6 МПа, 7 л/мин);
8. Проведение нагружения объекта со скоростью, не превышающей скорости, определенной действующей НД;
9. Проведение АЭК только при благоприятных погодных условиях – отсутствие осадков любого вида, сильного ветра;
10. Обязательное использование для контроля нагрузки датчика давления с непосредственным подключением к АЭ системе;
11. Перед и во время АЭК должны быть предприняты все меры по снижению и исключению помех;
12. АЭК должен выполняться не менее чем двумя аттестованными специалистами по АЭ методу контроля.

Снижение уровня помех для их исключения или достижения минимального уровня – важнейшее условие повышения достоверности данных АЭК. Мероприятия и методы по исключению или снижению уровня помех можно разделить на несколько групп:

Мероприятия в области организации АЭК:

1. АЭ система должна быть правильно подключена и заземлена;
2. Сигнальные кабели и кабели ПАЭ–предусилитель (в случае использования несо вмещенных ПАЭ) должны находиться в исправном состоянии, не иметь перегибов, разрывов сигнальных и экранирующих жил, изоляция не должна иметь повреждений, разъемы не должны быть в окисленном состоянии;
3. Оборудование для нагружения и объект контроля должны быть механически «развязаны»;
4. Система нагружения при необходимости должна предусматривать гидро/пневмо аккумулятор для компенсации помех от работы насоса/компрессора;
5. Подвод давления должен осуществляться трубопроводом или гибким шлангом высокого давления достаточного диаметра (желательно не менее Ду80) и желательно в один из штатных трубопроводов большого диаметра;

6. Наличие пропусков в разъемных соединениях оборудования недопустимо, т. к. даже незначительные пропуски являются мешающим фактором, исключающим возможность контроля близлежащих участков;
7. Перемещение персонала и транспорта по зоне АЭК должно быть исключено, зона контроля должна быть огорожена;
8. Сварочные и монтажные работы на самом объекте контроля и вблизи него, механические воздействия на контролируемый объект и прилегающие к нему механические конструкции (ремонтные работы, перемещения грузов, хождение людей и т. п.), работа подъемно-транспортных механизмов в зоне АЭК должны быть исключены;
9. При наличии атмосферных помех (дождь, гроза, снег, град, ветер) АЭК должен быть либо остановлен, либо объект должен быть надежно укрыт и исключена возможность попадания осадков на объект. В ряде случаев может потребоваться перенос испытания на другое время, с более подходящими погодными условиями;
10. Все незакрепленные детали на объекте и в непосредственной близости от него должны быть надежно закреплены;
11. Поверхность объекта АЭК должна быть очищена от продуктов коррозии и шелушащейся краски;
12. Все поверхности, между которыми в процессе нагружения может возникнуть трение, должны быть изолированы друг от друга с помощью резиновых прокладок;
13. Испытание не должно проводиться во время интенсивной работы персонала, механизмов и транспорта, электрических и радиоустройств;
14. Испытание желательно проводить тогда, когда интенсивность передвижения персонала и транспорта минимальна (вечером, ночью, в выходные дни);
15. При проведении АЭК необходимо использовать датчик давления, желательно датчики скорости ветра и перемещения;
16. Для идентификации непрерывных помех желательно использовать осциллограф или возможности АЭ системы по регистрации формы волны;
17. Во время АЭК должен вестись Рабочий Протокол АЭ контроля, в котором подробно регистрируется весь ход АЭК.

Мероприятия, касающиеся диапазона регистрируемых сигналов:

1. Порог при испытании должен быть достаточно высокий, чтобы исключить помехи, но достаточно низкий для того, чтобы обеспечить необходимую чувствительность АЭК;
2. Использование ПАЭ оптимального частотного диапазона.

Методы, основанные на определении местоположения источника помех:

1. Установка блокирующих или совмещенных ПАЭ в зонах известных источников помех и обычными ПАЭ;
2. Если для объекта определена зона интереса, то при помощи блокирующих или совмещенных ПАЭ можно ограничить регистрируемую информацию только этой зоной;
3. Исключение источника помех по локационной информации;
4. Использование кластеризации для анализа результатов локализации источников АЭ;
5. Анализ разницы времени прихода (РВП) АЭ сигналов, регистрируемых несколькими каналами, для исключения синфазных помех (т. е. импульсов, регистрируемых с нулевой РВП разными АЭ каналами).

Методы, основанные на анализе параметров АЭ сигналов и нагружения:

1. Предварительная фильтрация данных (не рекомендуется);
2. Исключение из регистрации/анализа некоторых периодов испытания с высоким уровнем помех (не рекомендуется);

3. Если АЭ система допускает возможность проведения неdestructивной или графической фильтрации в реальном времени, то такая фильтрация может проводиться для исключения сигналов, имеющих определенные параметры или сочетание параметров (так, например, в результате течей регистрируются импульсы с высокой длительностью и низкой амплитудой) и, таким образом, снижения влияния помех на регистрируемые данные.

В качестве максимально допустимого уровня помех при АЭК допустимо принять уровень помех, определенный в разделе 5.4 ПБ 03-593-03 или в технологии MONPAC.

Критерии, используемые для выявления ИРВ

Сложность оценки АЭ данных в реальном времени состоит в том, что известные критерии (например, локально-динамический), технологии АЭК и соответствующие системы оценки (например, MONPAC) ориентированы, в основном, на анализ результатов АЭК. Подобные критерии и системы критериев весьма чувствительны к помехам, неизбежно регистрируемым в ходе практического АЭК и просто «зашкаливают» при их регистрации. Поэтому на практике в РВ более применимы критерии стандарта ASTM E 569, согласно положений которого опасность источника оценивается по степени его активности (характер накопления событий или их количества выбросов с ростом нагрузки) и интенсивности (среднее значения амплитуды или энергии или количества выбросов на событие), а также рассматривается его лоцируемость и степень концентрации лоцированных событий.

С учетом опыта практического АЭК можно несколько расширить перечень критериев наличия источников АЭ классов III и IV, которые могут быть применены в реальном времени (оценка производится по первым импульсам регистрируемых событий):

- экспоненциальное нарастание по мере увеличения нагрузки суммарного количества импульсов или количества выбросов – активность АЭ;
- нарастание средней амплитуды, энергии или количества выбросов регистрируемых импульсов с ростом нагрузки – интенсивность АЭ;
- наличие источников с высокой концентрацией лоцированных событий АЭ;
- наличие повышенной АЭ активности на выдержках давления;
- регистрация событий с высокой амплитудой, энергией;
- нелинейный характер амплитудного распределения АЭ импульсов;
- наличие повышенной АЭ активности при повторном нагружении.

В случае выявления в ходе испытания нарушения одного из этих критериев необходимо:

- зарегистрировать и следить за развитием ситуации в процессе выполнения АЭК;
- предпринять меры по подготовке возможного сброса нагрузки.

В случае выявления в ходе испытания нарушения двух и более критериев нагружение должно быть остановлено. В этом случае объект контроля должен быть разгружен (либо полностью, либо частично – до величины, при которой класс источника АЭ снизится до уровня II или III класса) и испытание либо прекращено, либо выяснен источник АЭ и проведена оценка безопасности продолжения испытания.

Аппаратное и программное обеспечение

При выявлении ИРВ невозможно переоценить значение программно-аппаратного комплекса регистрации АЭ данных. АЭ система должна обеспечивать локализацию источников АЭ в реальном времени, предоставлять полную информацию о локализованных событиях, выполнять предварительную оценку зарегистрированных данных.

Примером правильно, на наш взгляд, организованной системы регистрации/анализа АЭ данных является АЭ система AMSY-5 компании Vallen Systeme (Германия). Особенностью этой системы является то, что программа регистрации (Vallen Acquisition32, рис. 1)

программно отделена от программы анализа (VisualAE). При этом регистрируемые данные без задержек отображаются программой анализа. Такой подход позволяет полностью изменять логику представления и анализа регистрируемых данных без перерывов в процессе регистрации. При этом при изменении представления уже зарегистрированные данные отображаются с учетом произведенных изменений.

В отличие от большинства АЭ систем/ПО, концепция анализа АЭ данных в VisualAE подразумевает неdestructивную работу с данными: к неизменяемому исходному файлу (или в случае анализа в РВ – файлу, в который осуществляется регистрация данных) подключаются так называемые процессоры обработки – процессоры фильтрации, локализации, кластеризации, полигонов, классификации, предупреждений, математический и программный процессоры), и/или визуальные элементы – диаграммы, таблицы, TR-диаграммы. Совокупность этих элементов составляет Структуру Обработки Данных – древовидную форму, определяющую связи между регистрируемыми данными, процессорами и визуальными элементами. Визуальное представление Структуры – набор вкладок, на которых отображаются диаграммы, таблицы, результаты обработки данных процессорами.

Каждый процессор получает исходные данные (или данные другого процессора), выполняет над ними определенные действия и передает на выход как исходные данные, так и данные обработки (или вновь сформированные параметры – события, координаты, кластеры, полигоны и т. п.). Процессор может быть подключен как к исходным данным испытания, так и к другому процессору, формируя, таким образом, «дерево» обработки данных. Визуальные элементы являются конечными элементами этой структуры. Они могут отображать как исходные данные, так и параметры, получаемые в результате обработки данных процессорами. Визуальные элементы, имеющие источником один процессор и находящиеся на одной странице, связаны между собой – выделение мышью точки на диаграмме, на локационной схеме, на строке в таблице вызывают переход или выделение соответствующего импульса на всех визуальных элементах страницы. Изменение параметров какого-либо процессора (например, фильтрации) вызовет соответствующие изменения во всех нижерасположенных процессорах и визуальных элементах.

Такая организация ПО позволяет до испытания определить критерии интереса оператора – изменение активности и интенсивности сигналов АЭ, концентрации лоцированных источников, события высокой амплитуды, события на выдержках, способы выделения интересующих данных (кластеризация, фильтрация, ручное выделение), сформировать соответствующие ветки Структуры обработки и во время контроля подключать их к интересующим оператором зонам/каналам/этапам испытания с минимальными задержками.

Пример подобной структуры приведен на рис. 2, а пример организации представления данных для оперативного исследования состояния зоны интереса – на рис. 3. Здесь оценивается состояние зоны одного из кластеров с высокой концентрацией лоцированных источников. Анализируются события, зарегистрированные в данном кластере – их параметры, время и период испытания, когда они были зарегистрированы.

Примеры выявленных в РВ дефектов

Пример 1. Теплообменник пропиленового холодильного цикла установки производства этилена (рис. 4) испытывался во время планового пневмоиспытания в составе 28 сосудов и аппаратов. Испытательное давление составляло 2,5 МПа. Во время повторного нагружения аппарата было отмечено резкое нарастание активности примерно на 1,8 МПа, большое количество импульсов на выдержках, импульсы высокого счета и энергии (рис. 5). После испытания данные были оперативно проанализированы и на основе данных локации под дополнительный НК была предоставлена зона штуцера в нижней части теплообменника. В около-

шовной зоне сварного шва приварки штуцера Ду150 на глубине ≈ 5 мм была выявлена трещина протяженностью 20 мм и глубиной до 2 мм. Дефект был выбран и отремонтирован. Повторная дефектоскопия дефектов не выявила.

Пример 2. Пневматическое испытание с АЭК ректификационной колонны ($P_{РАБ} = 0,8$ МПа, $T_{РАБ} = 200$ °С, материал корпуса – Х18Н10Т, $P_{ИСП} = 1,06$ МПа). Испытание проводилось специалистами отдела акустико-эмиссионного контроля ОАО «Салаватнефтеоргсинтез».

На выдержках 0,68 МПа и более на ПАЭ 31 регистрировалось более 5 имп./выдержку. Локализованные события регистрировались в зоне штуцера Ду500 при наборе давления от 0,2 до 0,4 МПа и более. Начиная с выдержки 0,68 МПа, локализуемые события регистрировались и на выдержках давления. Рост активности АЭ отмечен на подъеме давления от 0,8 до 0,88 МПа и сильный рост активности – при изменении давления от 0,88 до 1,06 МПа (рис. 6).

В сварном шве приварки фланца к патрубку штуцера Ду500 (зона ПАЭ 31) в результате проведения капиллярной дефектоскопии была выявлена трещина длиной 50 мм.

Пример 3. Пневматическое испытание с АЭК горизонтальной емкости ($P_{РАБ} = 0,6$ МПа, $T_{РАБ} = 30$ °С, материал корпуса – 16ГС+12Х18Н10Т, $P_{ИСП} = 1,25$ МПа). Испытание проводилось специалистами отдела акустико-эмиссионного контроля ОАО «Салаватнефтеоргсинтез».

На выдержках 0,6 МПа и более на ПАЭ 1 регистрировалось большое количество импульсов. Локализованные события регистрировались в ПАЭ 1 при наборе давления от 0,3 МПа и более, в том числе и на выдержках давления. Максимальный рост активности АЭ отмечен на подъеме давления от 0,3 до 0,54 МПа (в начале испытания) (рис. 7).

В сварном шве днища емкости выявлен дефект условной протяженностью 45 мм, на глубине $h = 14$ мм, условной высотой $h_{УСЛ} = 6$ мм.

Пример 4. Пример неправильно проведенного испытания: при испытании до разрушения контейнера для транспортировки хлора нагружение проводилось гидромонитором с высокой скоростью. Вследствие этого определить развитие дефекта в месте имевшего места разрыва контейнера по данным АЭК практически невозможно даже при пост-обработке.

В табл. 1 приведены параметры первых импульсов событий, зарегистрированных в зонах выявленных дефектов.

Выявление течей в процессе АЭК

Одним из основных инструментов РВ для определения наличия сквозных дефектов или пропусков является механизм определения среднеквадратичного значения уровня шума (RMS), который позволяет оценить значение уровня сигналов «под порогом». Процедура работы с этим инструментом следующая:

- после установки преобразователей и их калибровки до начала нагружения производится измерение RMS на всех каналах (эти уровни являются базовыми);
- во время нагружения производится постоянный контроль RMS и в расчет принимаются значения шума в моменты времени, когда отсутствует сильная активность, т. е. когда нет пересечений порога;
- во время выдержек, когда «молчит» нагружающее оборудование, можно легко идентифицировать начало утечки по подросшему на соответствующем канале уровню RMS;
- Координаты утечки могут быть определены зонально по возрастанию и разнице RMS на соседних каналах.

В настоящее время широко используется инструмент, аналогичный RMS – ASL (средний уровень сигнала) – он также позволяет оценить уровень сигналов «под порогом».

Пример: на теплообменнике теплообменного блока установки риформинга была обнаружена сквозная трещина в укрепляющем кольце патрубка штуцера. Утечка шла через свар-

ной шов сварки патрубка штуцера в корпус теплообменника. Испытания были остановлены при достижении 15 % от пробного давления.

Выводы

Таким образом, выявление ИРВ требует, на наш взгляд, тщательной подготовки и проведения испытания. При неправильной подготовке испытания, при проведении испытания в неподходящее время, в неподходящих погодных условиях выявление ИРВ может оказаться затруднительным или даже невозможным.

Главное требование при подготовке и проведении испытания – правильная подготовка испытания и минимизация уровня регистрируемых помех. При гидравлическом испытании один из главных факторов достоверной регистрации ИРВ – подходящая скорость нагружения объекта АЭК.

При оперативном анализе регистрируемой информации следует использовать адекватный набор критериев качественной оценки АЭ активности.

Анализ испытаний с выявленными и подтвержденными дефектами показывает, что наиболее ранним свидетельством наличия ИРВ является регистрация локализуемых событий и повышенная активность на выдержках давления. Рост активности и интенсивности событий регистрируется на более высоких уровнях нагрузки. События высокой амплитуды далеко не всегда сопровождают развитие дефекта.

Табл. 1. Параметры первых импульсов типичных событий от дефектов

Тип объекта	АЭ система	Вид дефекта	Расстояние до ПАЭ, мм	Кол-во локализованных событий	A	D	RT	N	E
Теплообменник	Spartan-32 + Монрас	Трещина в патрубке штуцера длина 15 мм, глубина 2 мм	1700	90	65	2300	250	140	950
Колонна	DiSP	Трещина длиной 50 мм в сварном шве приварки фланца к патрубку штуцера.	1500	1500	65	2000	300	200	60
Емкость	DiSP	Дефект условной протяженностью 45 мм, на глубине $h = 14$ мм, условной высотой $h_{\text{усл}} = 6$ мм	1000	500	<85	15000	130	1000	400

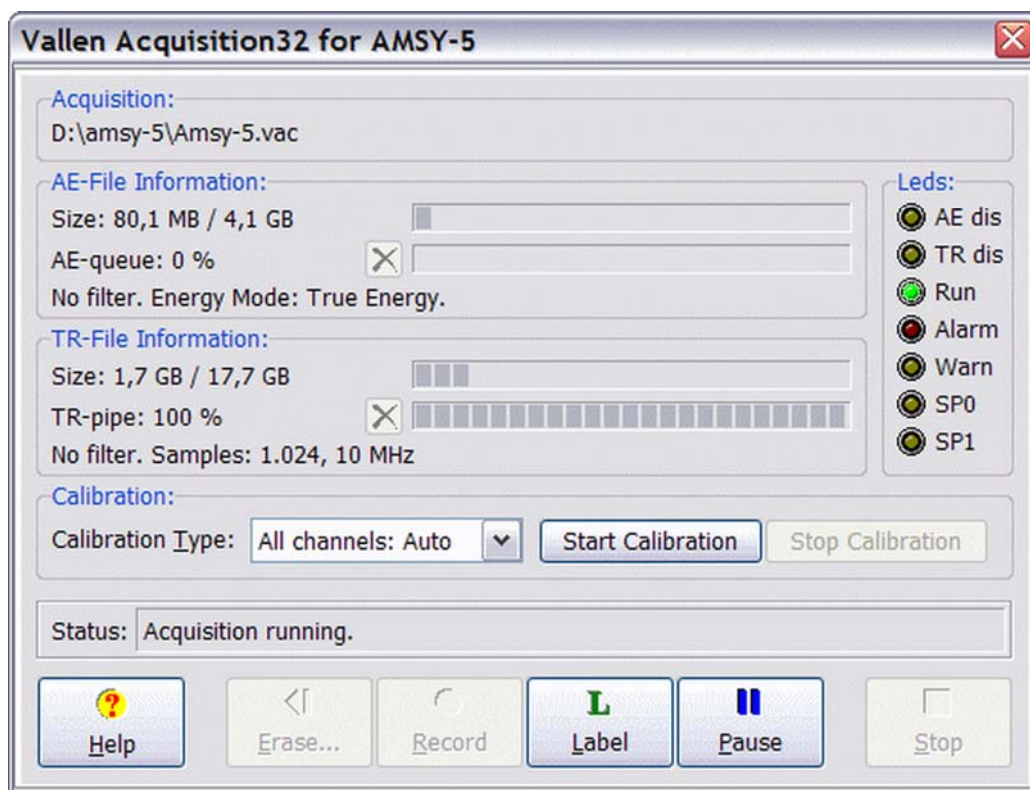


Рис. 1. Окно управления регистрацией данных

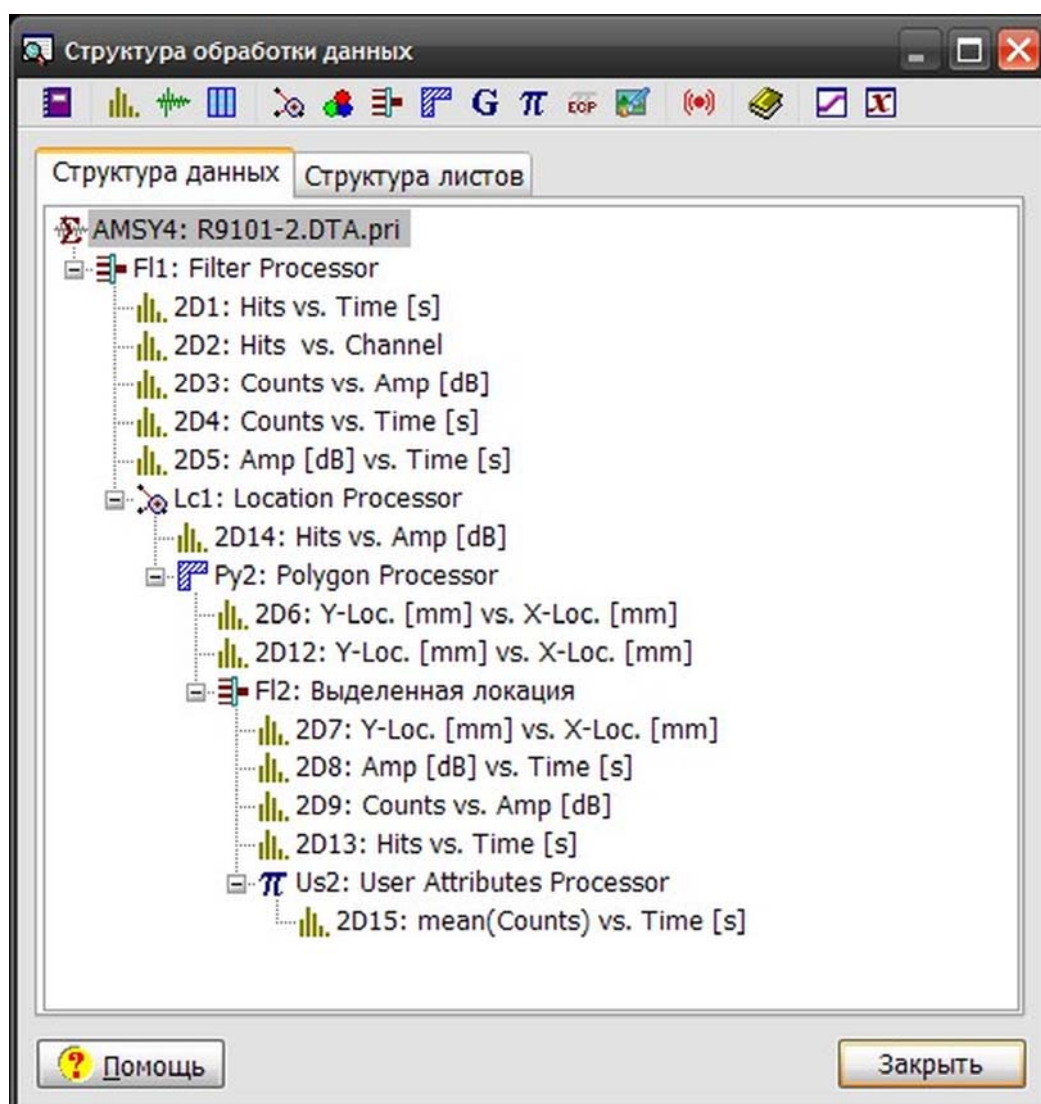


Рис. 2. Структура обработки данных для оперативного исследования зоны интереса

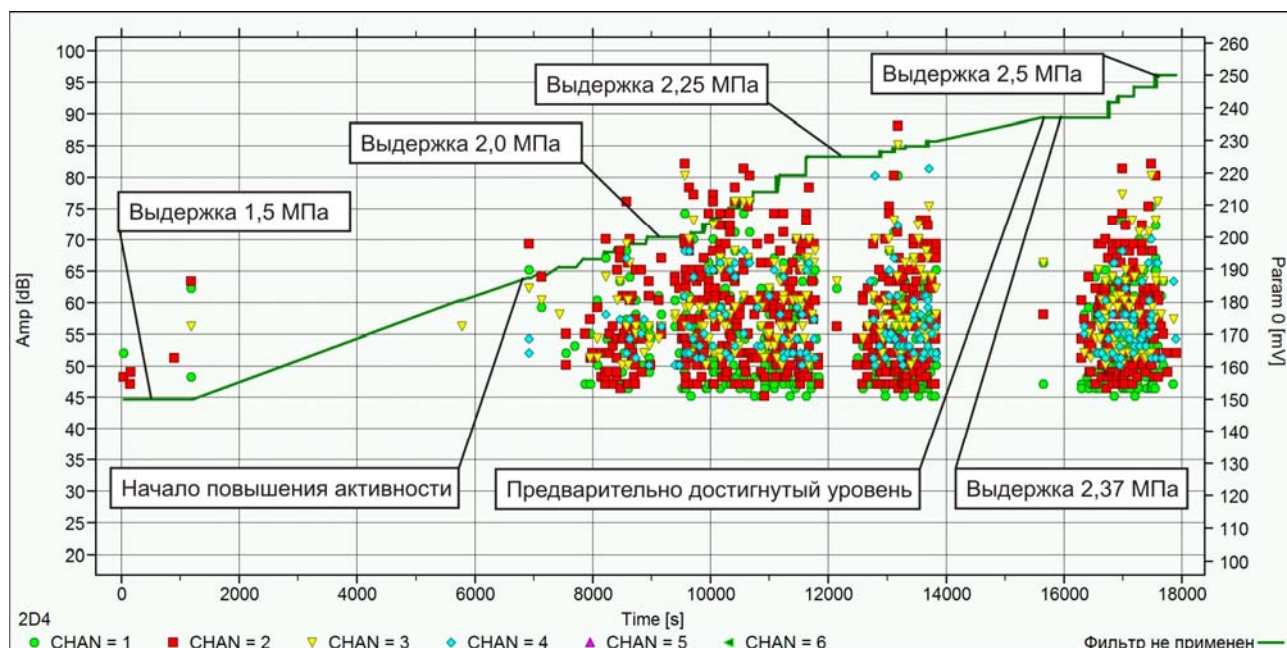


Рис. 5. Характер накопления данных для повторного нагружения объекта с дефектом

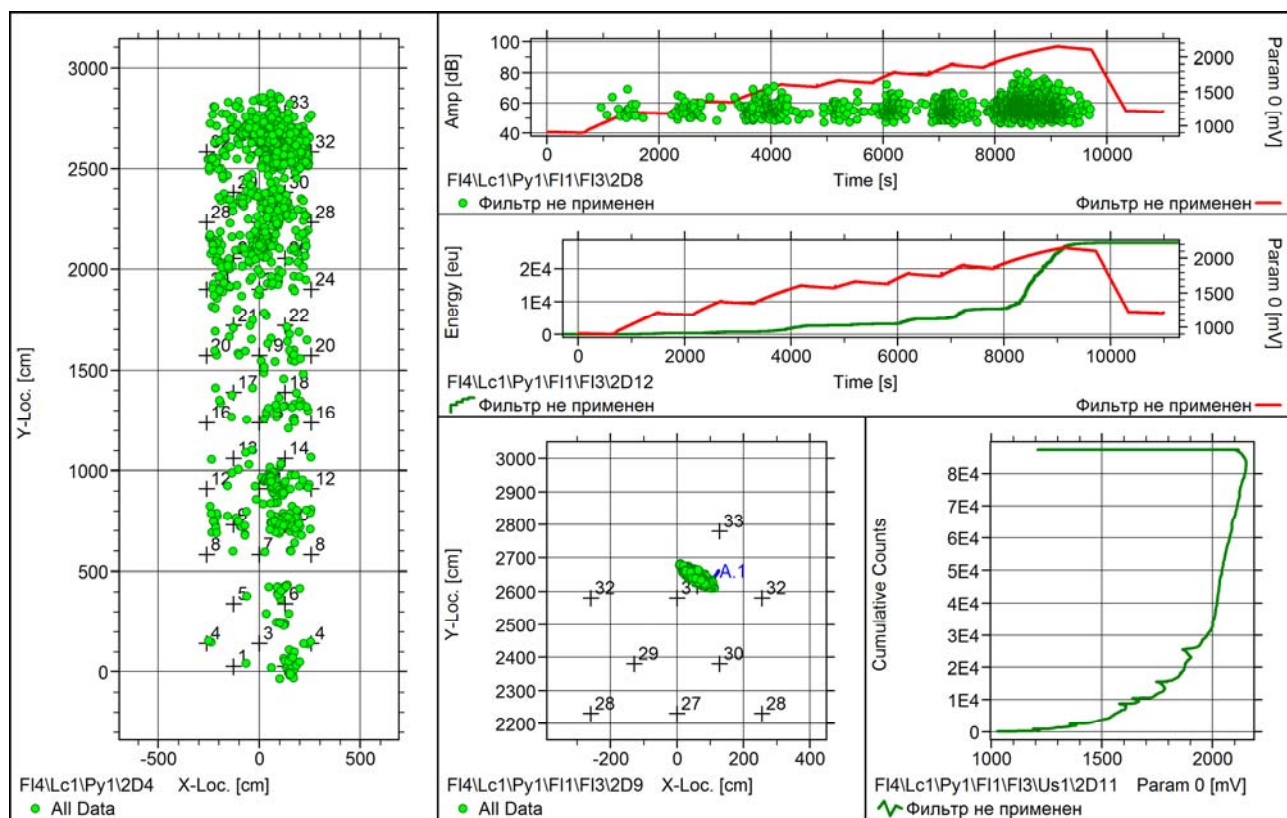


Рис. 6. Испытание ректификационной колонны. Дефект в зоне ПАЭ 31

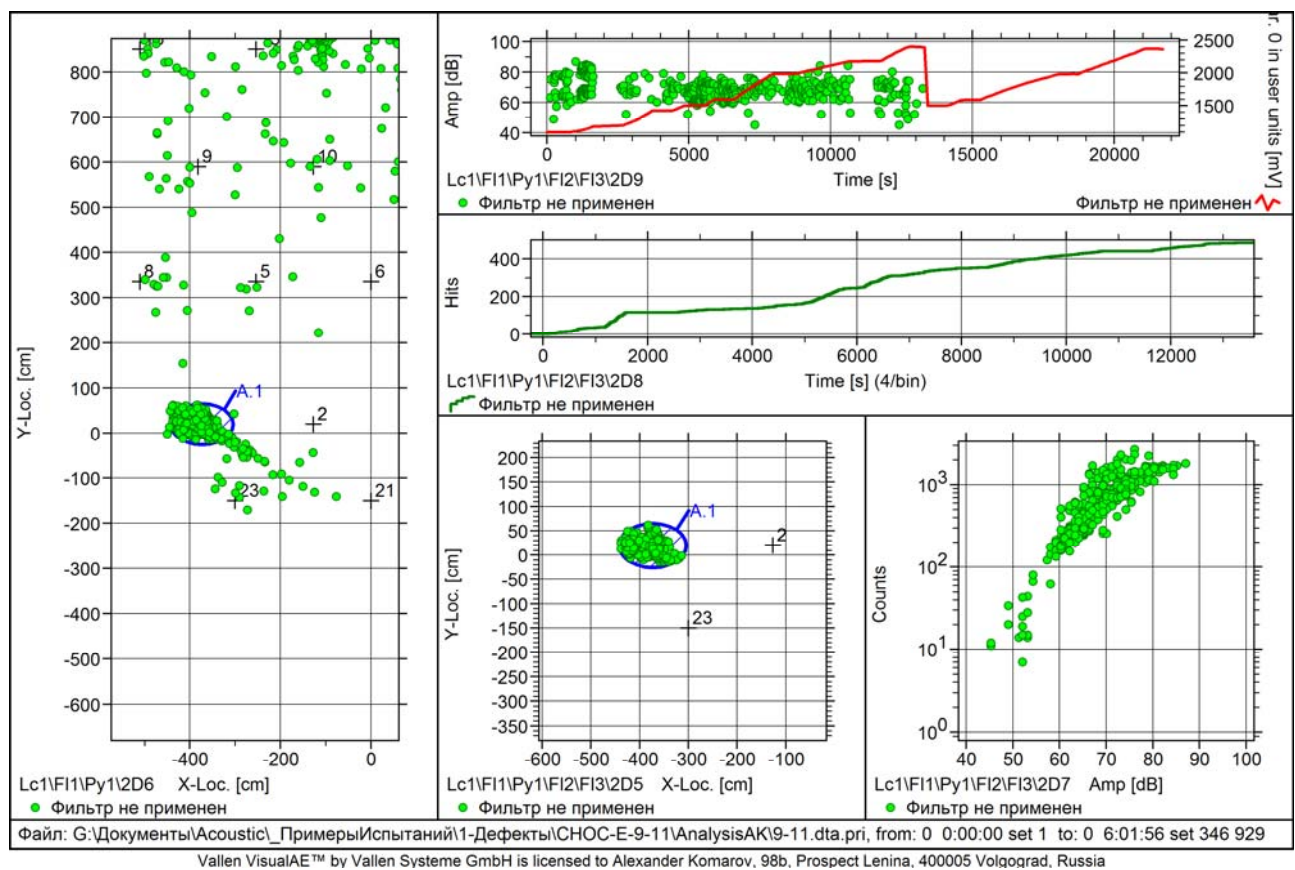


Рис. 7. Испытание горизонтальной емкости. Дефект в зоне ПАЭ 1

АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА СВАРКИ ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ

В. А. Гуменюк, Н. А. Казаков, В. А. Сульженко, А. В. Яковлев

ФГУП «ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова», Санкт-Петербург

В настоящее время оценка качества выполнения сварных швов как на судостроительных заводах, так и в других отраслях промышленности проводится, в основном, с использованием таких традиционных методов НК, как рентгеновский (РГК), ультразвуковой (УЗК) и капиллярный. При выполнении многопроходных швов в конструкциях большой толщины эти методы применяются, как правило, либо по мере заполнения разделки сварного шва (РГК), либо после окончательного заполнения разделки (РГК и УЗК). Как следствие, неоперативное выявление недопустимых дефектов приводит, во-первых, к повышению трудоемкости и сложности выполнения последующей локальной заварки глубокой выборки. Во-вторых, что наиболее важно, последующая заварка глубокой выборки приводит в некоторых материалах к разупрочнению участка сварного шва из-за внесения дополнительной термической энергии и, соответственно, к снижению прочностных характеристик сварного соединения.

Казалось бы, решение этих проблем возможно путем применения метода АЭ, который может выполняться одновременно с процессом сварки. Однако до настоящего времени, по нашему мнению, метод АЭ широкого распространения в технологии сварки не получил. Одна из причин этого заключается в том, что для его успешного применения требуется решение комплекса сложных методологических задач.

Основная проблема состоит в том, что процесс сварки неизбежно сопровождается высокой интенсивностью и большими объемами регистрируемой информации. Большую часть регистрируемой информации представляют разнообразные помехи, обусловленные действиями сварщиков при очистке шва от окисления или корки флюса, перемещением различных сварочных приспособлений по поверхности объекта контроля в процессе работы, включением и выключением сварочной дуги, обдувом шва струей инертного газа, растрескиванием корки флюса при остывании и др. Поэтому первоочередной задачей при проведении АЭ-контроля является фильтрация регистрируемой информации от сигналов помех. Необходимость решения этой задачи непосредственно в ходе сварки предъявляет очень высокие требования как к быстродействию аппаратуры АЭ, так и к ее программно-алгоритмическому обеспечению.

Не менее важной задачей при контроле качества выполнения сварки является обработка и критериальный анализ отфильтрованной информации с целью определения опасности, т. е. допустимости или недопустимости выявленного дефекта и принятия решения о необходимости его выборки. Для этого нужно иметь объективную систему классификации зарегистрированных источников АЭ.

Особые трудности связаны с обеспечением точности локации выявляемых дефектов. В основном данная ситуация обусловлена явлением разномодовости акустических волн. Источники АЭ генерируют импульсы, состоящие из различных типов волн, которые имеют

разные коэффициенты затухания и дисперсию скорости при их распространении. Кроме того, происходит отражение и трансформация волн на краях разделки, а также наложение сигналов из-за высокой интенсивности их следования.

В ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова проводятся всесторонние экспериментальные исследования, а также практические работы по совершенствованию методологии АЭ-контроля качества сварного шва в процессе сварки. В институте была разработана и изготовлена АЭ-система КАЭМС, имеющая сетевую многопроцессорную архитектуру. АЭ-система состоит из модулей сбора и анализа, снабженных процессорами Intel, которые связаны сетевой магистралью ETHERNET и работают под управлением сетевой многозадачной операционной системы реального времени QNX (LINUX). Именно такая архитектура позволяет программы сбора, предварительной обработки, фильтрации и критериального анализа акустической информации выполнять параллельно и тем самым обеспечить режим экспресс-анализа информации в реальном времени, что является необходимым условием для АЭ-контроля процесса сварки.

Не менее важно, что в основу идеологии АЭ-системы КАЭМС заложена регистрация волновой формы широкополосного акустического импульса с последующим вычислением его спектрального состава. Совокупность этих параметров наиболее адекватно отражает физическую природу механизмов генерирования сигналов. Использование параметров волновой формы и частотного спектра позволяет уже на ранних стадиях сбора и анализа данных классифицировать регистрируемые сигналы и выполнять фильтрацию сигналов очевидных помех. На основе трех параметров (амплитуда, параметр волновой формы и параметр спектра) нами был предложен комплексный критериальный параметр опасности сигналов «Danger». С использованием математического аппарата нечеткой логики разработана новая система классификации регистрируемых сигналов по степени их опасности, одобренная секцией АЭ «Совета экспертов системы неразрушающего контроля Госгортехнадзора РФ» для включения в очередную редакцию ПБ 03-593-03 (Протокол Совета №3/2003 от 30.07.03). Применение параметра «Danger» позволяет проводить оперативную оценку степени опасности выявленных источников АЭ (рис. 1).

Как показали результаты проведенных практических работ, возможность фильтрации и критериального анализа регистрируемых сигналов по их волновым и частотным характеристикам в реальном времени позволяет эффективно контролировать сварочные процессы. Один из примеров успешного применения оперативного АЭ-контроля – оценка качества выполнения сварных швов при изготовлении сферического корпуса глубоководного аппарата (ГА) из титанового сплава на ОАО «Балтийский завод». Сварка корпуса ГА выполнялась неплавящимся вольфрамовым электродом в среде защитного газа – аргона. Каждая из полу-сфер корпуса формировалась из шести лепестков, которые представляли собой штамповки толщиной более 110 мм. Глубина щелевой разделки сварного шва с наружной стороны корпуса ГА превышала 70 мм при ширине разделки 20 мм. Сварка в столь глубокую разделку вызывала трудности даже для опытных сварщиков, особенно при выполнении корневых проходов, что приводило в отдельных случаях к образованию в процессе заполнения разделки недопустимых дефектов.

Проведенная работа показала высокую эффективность метода АЭ в выявлении трещин и трещиноподобных дефектов непосредственно в процессе выполнения сварочных проходов. Это дало возможность своевременно проводить выборки выявленных дефектов, что обеспечило снижение общей трудоемкости и предотвратило разупрочнение сварного соединения в этих местах. В качестве примера на рис. 2 представлен один из случаев выявления дефекта типа «трещина» на данном объекте контроля. Важно подчеркнуть, что часть выявленных АЭ-методом трещин была пропущена при выполнении рентгеновского контроля, который,

как известно, неэффективен при выявлении плоскостных дефектов типа трещин, расположенных нормально к поверхности контроля.

Другим видом недопустимых дефектов, характерных для сварных швов титановых сплавов, являются объемные окисления, которые образуются при выполнении сварки с пониженной защитой. Опасность этих дефектов заключается в том, что они являются источниками образования начальных микротрещин уже на стадии остывания сварочной ванны. Причем объемные окисления практически не выявляются традиционными методами дефектоскопии (УЗК и РГК). Работы, проведенные ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова совместно с ЦНИИ КМ «Прометей», убедительно показали эффективность метода АЭ при выявлении недопустимых объемных окислений в сварных швах титановых сплавов уже на стадии сварки.

Опыт использования метода АЭ в процессе сварки показал, что он также является очень эффективным средством при оценке качества удаления недопустимых дефектов. По существующей технологии сварки после выборки дефекта должен быть проведен капиллярный контроль с целью подтверждения его полного удаления. Однако проведение капиллярного контроля требует достаточно большого времени само по себе плюс дополнительное время, необходимое для остывания сварного шва. Применение метода АЭ позволяет данную операцию проводить без остановки сварочного процесса. Для этого достаточно в сопровождении АЭ-контроля просто проплавить без присадки место выборки дефекта и по характеру зарегистрированной информации убедиться в полном удалении дефекта.

По результатам приведенных работ для судостроительной отрасли был разработан руководящий документ по АЭ-контролю сварных соединений из титановых сплавов при аргонодуговой сварке.

Более трудную методическую задачу для метода АЭ представляет контроль процесса сварки, сопровождающегося растрескиванием корки флюса при остывании сварочной ванны, особенность которого заключается в том, что растрескивание флюса излучает сигналы, идентичные сигналам от трещины в металле как по волновой форме, так и по спектру. Кроме того, процесс ручной многопроходной сварки элементов крупногабаритных корпусных конструкций морской техники отличается повышенной шумностью, так как АЭ-контроль в отдельных случаях приходится осуществлять при одновременной работе на одном протяженном (свыше 30 м) кольцевом шве до 16 сварщиков. При этом процессы зажигания дуги, зачистки шва от флюса металлической щеткой или зубилом и прочие действия каждого сварщика являются абсолютно стохастическими. В подобных неблагоприятных условиях достоверная сортировка регистрируемой информации на сигналы АЭ-природы и сигналы помех приобретает особое значение.

Результаты работ по оценке качества выполнения сварных швов на заказах, выполненных на ОАО «Амурский судостроительный завод» и в Северодвинском центре судостроения «Звездочка», показали, что многопараметрическая фильтрация регистрируемой информации и локация источника, продолжающего генерировать АЭ-сигналы под действием термических сварочных напряжений и после прекращения растрескивания корки флюса по мере остывания сварочной ванны, позволяет уверенно выявлять опасные трещины непосредственно в процессе сварки (рис. 3). Таким образом, предложенные алгоритмы анализа регистрируемой информации АЭ, позволяющие выявлять трещины в металле шва на фоне растрескивания корки флюса, создают предпосылки для успешного применения метода АЭ для контроля процесса сварки даже в подобных условиях.

Теперь следует остановиться на проблеме, с которой пришлось столкнуться при оценке качества выполненного сварного соединения. Дело в том, что упомянутые опасные дефекты типа «трещина» и «объемные окисления» являются безусловно недопустимыми и требуют однозначного удаления. Однако существуют виды сварочных дефектов, которые могут быть

как недопустимыми, так и допустимыми. Это, в частности, относится к дефектам типа «включение», «пора» и «окисление».

В настоящее время браковочные критерии допустимости дефектов типа «включение» и «пора» основываются на их классификации по размерам в соответствии с нормами традиционных методов НК. Однако метод АЭ создает предпосылки к разработке критериев по разбраковке подобных дефектов не по их размерам, а по степени опасности. Эта возможность основывается на том, что метод АЭ учитывает не только размер дефекта, но и его форму как показатель остроты концентратора (рис. 4). Поэтому метод АЭ, в отличие от рентгеновского и ультразвукового методов контроля, преимущественно не допустит дефект меньшего размера, но остроугольной формы, и в то же время допустит округлый дефект большего размера, представляющий собой более «мягкий» концентратор. Нам кажется, что такой подход к оценке опасности дефекта является более объективным по сравнению с классификацией дефектов по их размерам.

Достаточно распространенным сварочным дефектом является также дефект типа «окисление». Дело в том, что даже незначительные нарушения защиты из-за возможных на сварочном участке сквозняков, перегрева объекта контроля и пр. вызывают окисление поверхности шва синего цвета побежалости, которое считается самым «мягким». Однако по существующей технологии сварки при подобном нарушении защиты охрупченный участок шва должен быть обязательно удален зачисткой. В то же время «мягкое» окисление, как показывает практика, может быть переварено при последующих проходах, что свидетельствует о возможности считать его допустимым дефектом. Опыт работы показал, что оперативный АЭ-контроль, проводимый в процессе сварки, может дать дополнительную информацию о месте и степени окисления поверхности шва, а также о необходимости и тщательности зачистки или выборки окисленной поверхности, что, в итоге, позволит снизить трудоемкость и время выполнения сварного соединения.

Таким образом, одной из основных проблем при оценке качества выполненной сварки является отсутствие согласованных браковочных критериев выявляемых сварочных дефектов методом АЭ и традиционными методами НК, что приводит к некоторому противоречию в оценках допустимости рассматриваемых дефектов.

Теперь следует остановиться на общей методической проблеме, характерной для любого вида сварки и связанной с точностью локации источников сигналов.

Отличительными особенностями импульсов, регистрируемых в процессе сварки, являются амплитудная нерегулярность их волновых форм (особенно на дальнем по отношению к источнику сигнала преобразователе), а также отсутствие в них волновой составляющей с амплитудой, существенно превышающей остальные (рис. 5). Это приводит к тому, что волновая форма импульсов, как правило, имеет «растянутый» передний фронт, в котором присутствуют несколько составляющих с сопоставимыми пиковыми амплитудами. «Растягивание» переднего фронта у импульсов происходит по нескольким причинам, основная из которых объясняется сложным процессом интерференции исходного сигнала, поступающего на преобразователи антенны из разделки сварного шва или даже с обратной (донной) стороны объекта контроля (ПАЭ устанавливаются, как правило, на одной из его поверхностей).

При использовании способа вычисления координат источников АЭ по разности времени прихода (РВП) сигналов АЭ на пространственно разнесенные ПАЭ основной вклад в погрешность определения координат вносит точность измерения времени прихода сигнала на ПАЭ антенны. Фактически это означает, что координата источника сигнала будет истинной, если время прихода сигнала на оба преобразователя линейной антенны будет зарегистрировано по одной и той же составляющей сложного волнового пакета. Для волновых форм импульсов, представленных выше, использование традиционных алгоритмов

измерения времени прихода сигнала по моменту пересечения сигналом порога амплитудной дискриминации (алгоритм «Threshold») или по моменту регистрации его максимальной амплитуды (алгоритм «Peak») может привести к погрешности в вычислении РВП и, в конце концов, к неточному определению координаты сформированного события.

Погрешность при вычислении координат по алгоритму «Threshold» определяется соотношением амплитуды зарегистрированного сигнала и величины установленного порога дискриминации. Поэтому в процессе АЭ-контроля, когда регистрируются сигналы в широком динамическом диапазоне амплитуд, величина разброса при измерении времени прихода сигналов по пересечению жестко фиксированного порога амплитудной дискриминации может достигать больших значений. Кроме того, на точность работы этого алгоритма при небольшом удалении ПАЭ антенны от контролируемых сварных швов большое влияние оказывает разномодовость волновых пакетов, т. е. возможность приема преобразователями различных типов волн.

Искажения волновой формы исходных сигналов АЭ, приводящие к появлению в волновой форме нескольких пиков с сопоставимыми амплитудами, не позволяют эффективно использовать для измерения времени прихода сигналов АЭ и алгоритм «Peak», так как время прихода исходного сигнала по этому алгоритму в каналах антенны может быть определено по различным волновым составляющим, что приведет к вычислению временной задержки с большой погрешностью.

Для повышения точности измерения времени прихода сигналов при АЭ-контроле процесса сварки нами разработан комбинированный алгоритм, основанный на измерении момента пересечения порога дискриминации, величина которого устанавливается в зависимости от пиковой амплитуды сигнала в каждом канале антенны (так называемый алгоритм с «плавающим» порогом дискриминации в каждом канале). Как правило, применяются алгоритмы «Thres03», «Thres05» и «Thres07», в которых время прихода сигнала на каждый из преобразователей антенны определяется по моменту пересечения передним фронтом сигнала уровня «0,3», «0,5» или «0,7», соответственно, от величины пиковой амплитуды сигнала в каждом приемном канале АЭ-системы.

Результаты проведенных работ показали, что предлагаемые алгоритмы являются менее уязвимыми в смысле точности локации сигналов АЭ в процессе сварки, для которого характерны широкий динамический диапазон амплитуд, разномодовость волновых пакетов и искажения волновой формы исходных сигналов АЭ. В частности, координата события АЭ, сформированного импульсами в каналах № 5 и № 4 (рис. 5) и вычисленная с использованием традиционных алгоритмов измерения времени прихода, оказалась более чем на 100 мм в стороне от истинного положения трещины. В то же время координата этого события, вычисленная по алгоритму «Thres07», практически совпала с местом расположения дефекта.

Особого внимания заслуживает задача выполнения АЭ-контроля сварных швов в составе судовых трубопроводных систем из нержавеющей стали, которая проводилась на ОАО «Адмиралтейские верфи». Это объясняется, во-первых, очень высокой плотностью размещения контролируемых сварных швов и, соответственно, преобразователей АЭ. Во-вторых, кроме линейных участков трубопроводов, соединенных между собой монтажными сварными швами, в состав каждой из трубопроводных систем входят различные конструктивные элементы (тройники, крестовины, коллекторные сборки), которые ввариваются в систему трубопроводов непосредственно на борту судна и не проходят стендовых гидравлических испытаний.

Данные особенности объекта контроля вынуждают очень тщательно относиться к вопросу расстановки ПАЭ, особенно в районах коллекторных сборок (рис. 6). В противном случае при высокой плотности размещения контролируемых сварных швов и, соответствен-

но, ПАЭ в этих местах могут сформироваться ложные локационные серии, что, в конечном итоге, приведет к недостоверной оценке качества сварных швов.

Кроме того, при АЭ-контроле судовых трубопроводов очень большое значение имеет также вопрос точной локации сигналов АЭ. Это обусловлено несколькими факторами. Во-первых, при небольшой толщине стенки трубопровода имеются условия для существования многочисленных составляющих волн Лэмба с различными скоростями распространения. Кроме того, в исходном волновом пакете АЭ-источника появляются многочисленные лучевые составляющие, приходящие к ПАЭ по различным кратчайшим путям (винтовым линиям) после обегания стенки трубопровода относительно небольшого диаметра («спиральные» составляющие). Интерференцией упомянутых волновых составляющих объясняется изрезанность волновых форм регистрируемых сигналов и наличие в них большого количества составляющих с примерно одинаковыми амплитудами.

В подобных условиях важное значение приобретает выбор оптимального алгоритма измерения времени прихода исходного сигнала на ПАЭ. Анализ результатов локации событий АЭ для судовых трубопроводов показал, что и в данном случае наиболее достоверным алгоритмом является алгоритм с «плавающим» порогом дискриминации в каждом канале. Использование этого алгоритма дает возможность при вычислении задержек сигнала, во-первых, избавиться от погрешностей, обусловленных «растягиванием» переднего фронта регистрируемых сигналов, а, во-вторых, уменьшить влияние низкоамплитудных составляющих волнового пакета (так называемых «предвестников»), фиксируемых ПАЭ, расположенными в непосредственной близости от контролируемых сварных швов.

Подводя итоги, следует сказать следующее. По нашему мнению, внедрение метода АЭ в технологию сварочного процесса является остро необходимым, особенно при изготовлении ответственных конструкций из толстостенных материалов. При этом нужно подчеркнуть, что максимальная эффективность контроля качества сварных швов может быть реализована только при комплексном использовании метода АЭ и традиционных методов НК с такими их бесспорными преимуществами, как возможность измерять геометрические параметры дефектов, глубину залегания, ориентацию по толщине материала. При этом в задачу метода АЭ входит выявление и определение координат опасного источника АЭ, а в задачу традиционных методов – последующий адресный контроль с окончательной идентификацией типа дефекта и измерениями его параметров. Подобный комплексный контроль не только позволяет снизить общую трудоемкость контроля, но и повысить его надежность и достоверность.

В заключение следует отметить, что использование метода АЭ для оценки качества сварных швов в процессе их изготовления, конечно, является достаточно сложной проблемой в методическом плане, что и обуславливает его недостаточно широкое, по нашему мнению, использование. В связи с этим ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, имея достаточный практический опыт АЭ-контроля процесса сварки, в настоящее время ставит задачу создания специализированной аппаратуры и методик контроля, адаптированных к технологии и условиям заводских лабораторий НК. Отличительной особенностью таких систем является диалоговый принцип общения пользователя при подготовке аппаратуры к конкретному объекту контроля, что облегчит их использование заводскими специалистами после соответствующей подготовки.

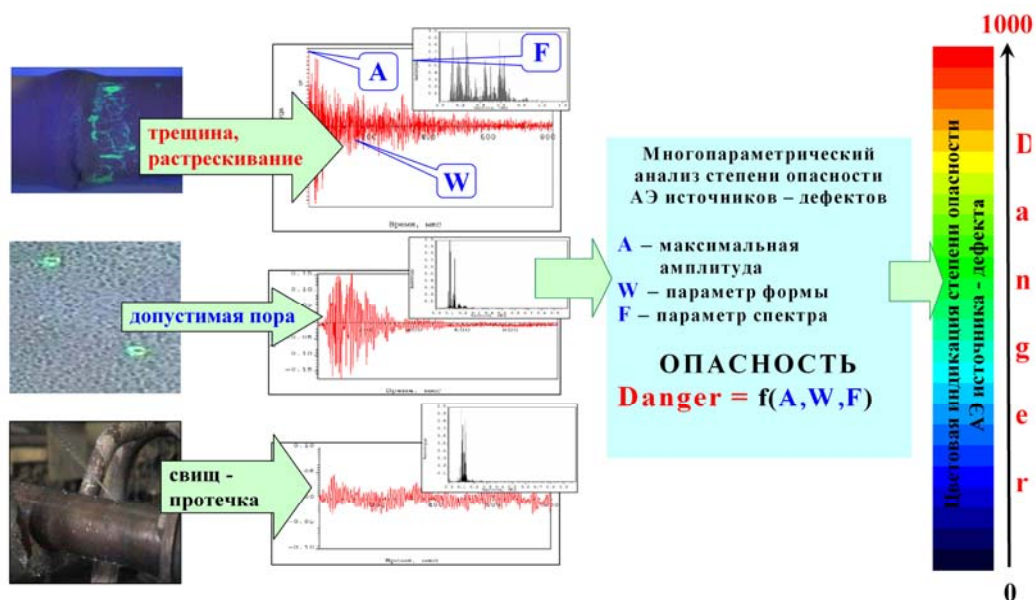


Рис. 1. Структурная схема регистрации, многопараметрического анализа и оценки степени опасности дефектов, выявляемых АЭ-системой КАЭМС

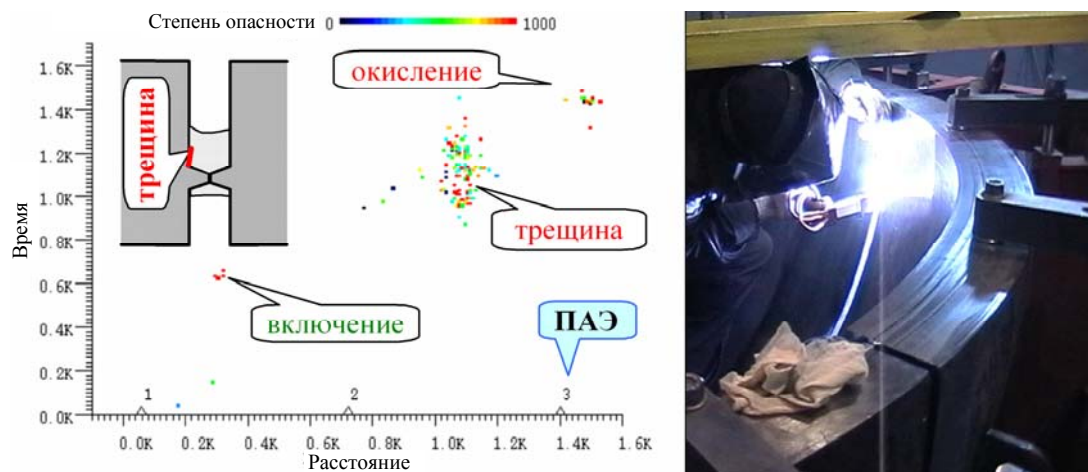


Рис. 2. Диаграмма локации источников АЭ – дефектов сварного шва, зарегистрированных при АЭ-контроле процесса сварки лепестков корпуса ГА

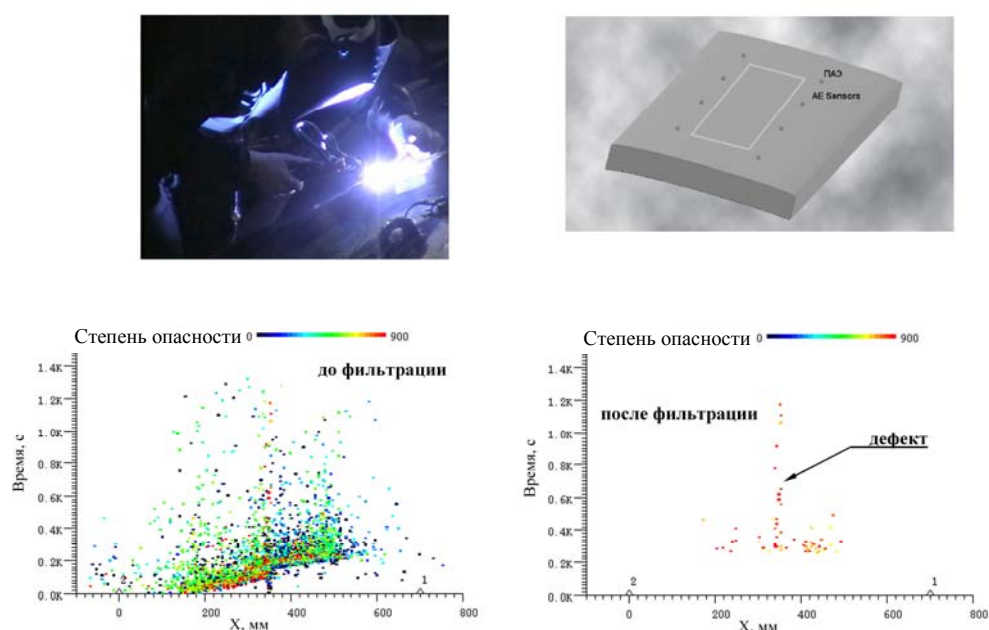
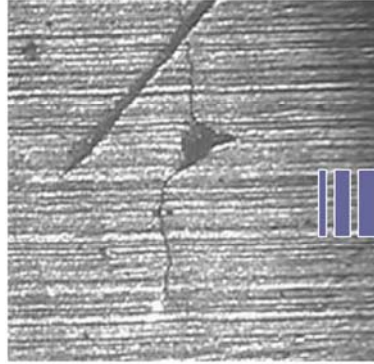


Рис. 3. Диаграмма локации сигналов, зарегистрированных при АЭ-контроле процесса сварки под флюсом до и после фильтрации сигналов помех

остроугольная пора



округлая пора

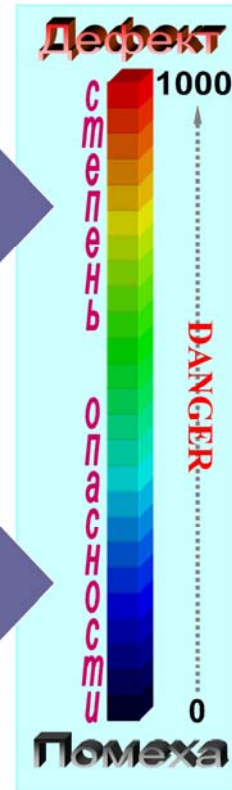
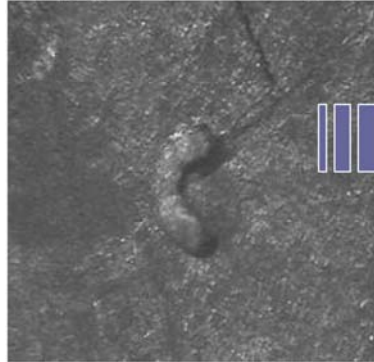


Рис. 4. Пример классификации дефекта типа «пора» по АЭ-критерию

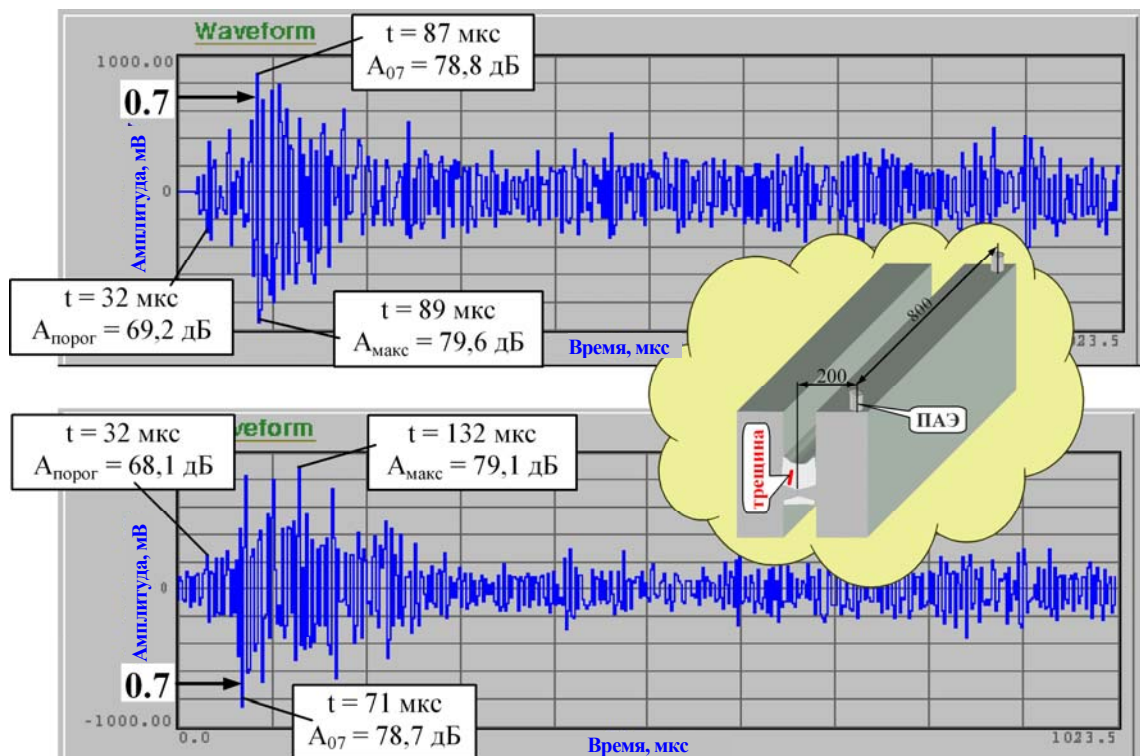


Рис. 5. Волновые формы импульсов, зарегистрированных ПАЭ №5 (а) и №4 (б) от одного из сигналов из района расположения дефекта типа «трещина»

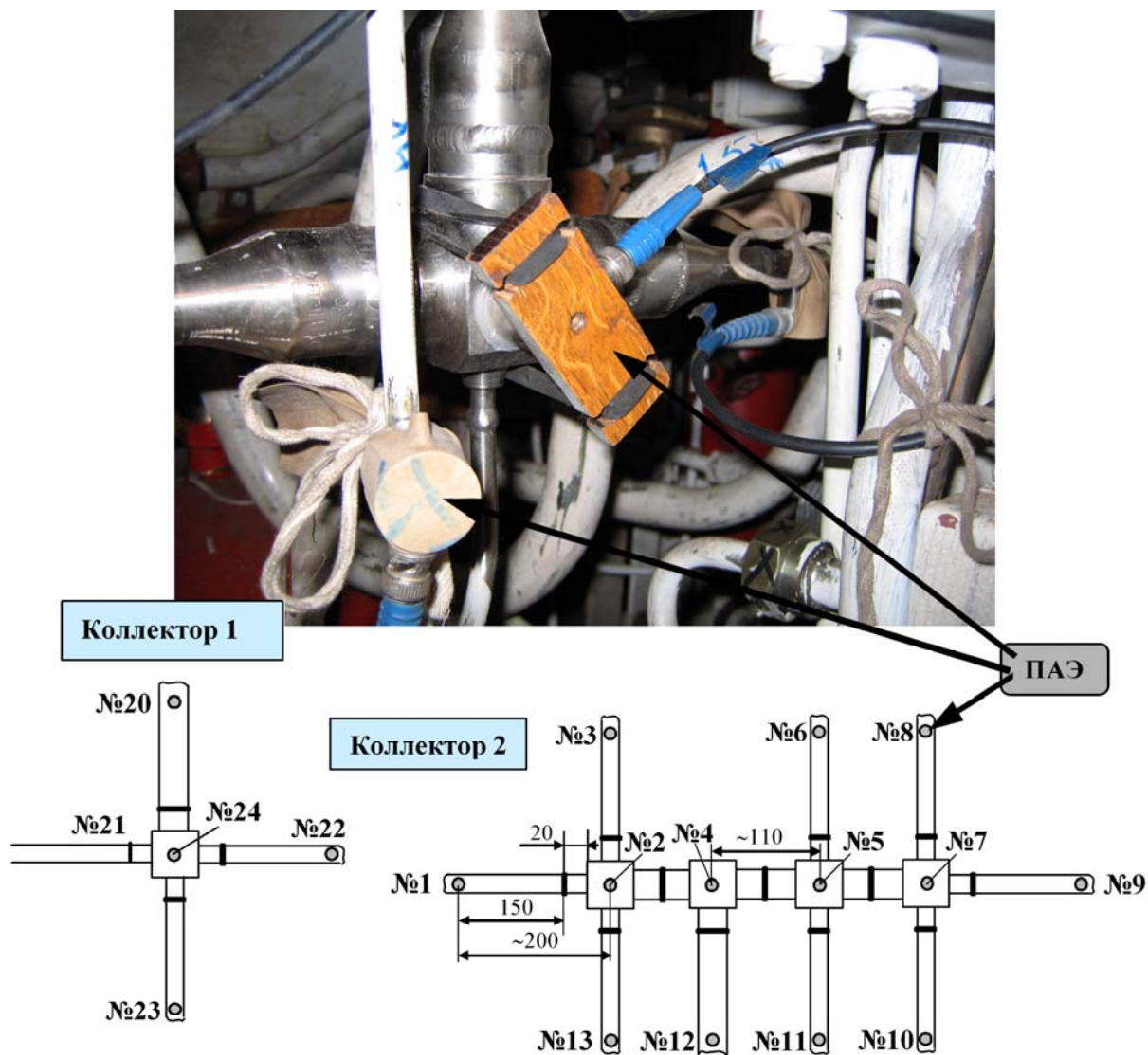


Рис. 6. Примеры схем расстановки ПАЭ при АЭ-контроле монтажных сварных швов судовых трубопроводных систем

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ СИГНАЛОВ

В. Н. Костюков, А. П. Наumenко, С. Н. Бойченко

ООО НПЦ «Динамика», г. Омск

Системы мониторинга технического состояния в реальном времени объектов по параметрам акустико-эмиссионных сигналов (АЭ) требуют применения гибких алгоритмов выбора параметров выделения АЭ импульсов. Поэтому исследование характеристик АЭ сигналов, генерируемых объектами в условиях, приближенных к реальным механизмам разрушения, является актуальной задачей.

Исходными для анализа характеристик сигналов послужили данные, полученные с помощью переносной АЭ системы контроля при проведении гидроиспытаний газового баллона БГА 190 специалистами НТК «Криогенная техника» (г. Омск) совместно с группой АЭ контроля НПЦ «Динамика». В процессе контроля фиксировались параметры АЭ импульсов и сигналы. Схема установки датчиков приведена на рис. 1.

Характеристики объекта контроля (баллон газовый БГА 190):

1. Рабочее давление 16 кг/см²;
2. Испытательное давление 25 кг/см²;
3. Емкость 0,2 м³;
4. Длина цилиндрической части обечайки 730 мм;
5. Диаметр 500 мм;
6. Материал обечайки и днища 09Г2С;
7. Толщина обечайки и днища 5 мм;
8. Затухание по результатам калибровки 8 дБ/м.

При анализе АЭ сигналов приняты следующие обозначения: T – время, с; Ch – канал; A – амплитуда сигнала, дБ; D – длительность сигнала, мкс; E – энергетический параметр, мВ·мс; C – число превышений порогового уровня или счет; R – время регистрации максимальной амплитуды сигнала относительно момента начала сигнала; ASL – среднее значение суперпозиции сигнала и шума, усреднение осуществляется за интервал времени в 2 с; F – частота, кГц; Sum – суммарное число превышений порога по всем каналам с момента начала испытания.

По результатам визуального и измерительного контроля перед испытаниями был обнаружен подрез в центре продольного шва обечайки баллона глубиной 2 мм и длиной 8 мм. Также по результатам рентгеновского контроля было обнаружено скопление пор в месте соединения продольного шва обечайки и кольцевого шва приварки днища длиной 25 мм, максимальный диаметр пор составляет 4 мм. Оба этих дефекта являются недопустимыми для данного объекта контроля (ОК).

После нагружения удлинение продольного шва обечайки составило 15 % от первоначальной длины, а удлинение по периметру центральной части обечайки – около 25 % от первоначальной длины.

Процесс нагружения

Процесс нагружения проходил в четыре этапа. На рис. 2 приведены графики накопления АЭ импульсов по каждому каналу системы. Карта локации приведена на рис. 3.

1 этап

На первом этапе происходил набор давления до 50 кг/см^2 в течение 460 с, затем постоянное давление поддерживалось в течение 600 с. Набор давления характеризуется сигналами, имеющими малые амплитуды, длительности и энергию, которые связаны с шумом при заполнении сосуда, треском деревянного основания под сосудом. Сигнал, характеризующий разрушение основного металла, отражает отрыв одного угла металлической пластины, которая содержит данные о сосуда (амплитуды по всем датчикам больше 85 дБ, длительность предельная, энергия минимум на два порядка превышает среднее значение остальных сигналов, частота практически по всем каналам – 100 кГц). Пластина приварена по углам точечной сваркой. Полка характеризуется полным отсутствием значимых АЭ сигналов и наличием небольших сигналов с частотой 8 – 20 кГц. Предположительное происхождение – треск деревянного ложа под сосудом, который в этот момент воспринимался на слух.

2 этап

Происходит набор давления до 60 кг/см^2 в течение 216 с, который характеризуется вначале (в течение 60 с) резким увеличением активности АЭ, частично связанным с шумом при заполнении. Локация в этот момент фиксирует импульсы от пластины, от подреза, от горловины бака и от врезки, через которую ведется заполнение. Большое количество сигналов с амплитудами больше 70 дБ, семизначными значениями энергии и частотой $50 \pm 10 \text{ кГц}$. Далее в течение 140 с АЭ активность уменьшается, и на 200 с (1256 с на рис. 2) – мощный сигнал от второго угла пластины. Во время набора давления зарегистрировано большое количество АЭ импульсов с амплитудами около 60 дБ.

3 этап

Набор давления 70 кг/см^2 в течение 279 с, в течение которого фиксировались незначительные импульсы. На 57 с (1338 с на рис. 2) зафиксирован мощный импульс в результате отрыва второго угла пластины.

4 этап

Набор давления до 78 кг/см^2 в течение 135 с, при этом резко возрастает АЭ активность. В течение 90 сек наблюдалось относительное затишье, затем последовала серия мощных импульсов, и на 132с (1692 с на рис. 2) в течение секунды произошло разрушение сварного шва врезки горловины в месте максимальной деформации (как выяснилось впоследствии, шов выполнен с конструктивным непроваром с внутренней стороны сосуда). Процесс резкого увеличения общего числа импульсов начался, примерно, за 40 – 50 с до отрыва. Таким образом, можно отметить, что практически весь процесс критического роста дефекта занял не более 1 мин. Затем произошло уменьшение давления вследствие выпуска воды через разрушенный шов. Локационная картина четвертого этапа нагружения представлена на рис. 3.

На локационной картине четвертого этапа нагружения надежно определяется источник вблизи горловины бака. Данные представлены без фильтрации, с этим связаны многочисленные источники от отраженных волн, распространившихся по воде. Несколько сигналов при-

надлежат дефектному месту соединения продольного шва обечайки и кольцевого шва приварки днища.

Статистические характеристики параметров АЭ сигналов

Первый этап

Для оценки отличий между значениями параметров АЭ сигналов разных этапов нагружения для каждого этапа определены среднестатистические значения параметров, построены гистограммы распределения амплитуды, энергетического параметра и длительности АЭ сигналов.

С целью нахождения взаимосвязи между значениями параметров АЭ сигналов определены коэффициенты корреляции между ними. Значения коэффициента корреляции между параметрами АЭ сигнала для первого этапа нагружения ОК приведены в табл. 1 для выборки из 31 сигнала. Видно, что наиболее хорошо между собой коррелируют такие параметры, как счет и частота – коэффициент корреляции равен 0,99; энергия и частота, энергия и счет – коэффициент корреляции равен 0,97.

Статистические характеристики АЭ сигналов для данного этапа нагружения ОК приведены в табл. 2.

Гистограмма распределения амплитуды АЭ сигналов для первого этапа нагружения (рис. 4) показывает, что максимум амплитудного распределения приходится на 71 дБ, а диапазон амплитуд первого этапа лежит в пределах от 65 до 90 дБ.

Из гистограмм распределения энергетических параметров и длительности (рис. 5 и 6), которые хорошо коррелируют с амплитудой АЭ сигналов, видно, что наибольшее количество сигналов на первом этапе приходится на значение энергетического параметра 25 мВ·мс. Диапазон изменения энергетических параметров находится в пределах от 25 до 400 мВ·мс. Наибольшее количество АЭ сигналов на первом этапе имеют длительность около 66 мс. Диапазон изменения длительности АЭ сигналов лежит в пределах от 27 до 66 мс.

Второй этап

Величины коэффициентов корреляции параметров АЭ сигналов для второго этапа нагружения ОК (табл. 3) для выборки из 55 сигналов показывают, что наиболее хорошо между собой коррелируют такие параметры, как счет и частота – коэффициент корреляции равен 0,97; энергия и счет, а также длительность и счет – коэффициент корреляции равен 0,96.

Путем анализа статистических характеристик параметров АЭ сигналов для второго этапа нагружения ОК (табл. 4) выявлено, что средние значения параметров на втором этапе заметно уменьшились по сравнению со средними значениями на первом этапе.

Из гистограммы распределения амплитуд для второго этапа нагружения ОК (рис. 7) следует, что максимум амплитуд сигналов АЭ на втором этапе, аналогично первому этапу, составляет 71 дБ. Диапазон амплитуд почти не изменился – от 62 до 87 дБ. Сравнивая гистограммы распределения энергетических параметров и длительностей АЭ сигналов для первого (рис. 5, 6) и второго этапа (рис. 8, 9), можно отметить, что картина распределения энергии и длительности для первого и второго этапов почти не изменилась.

Третий этап

Третий этап нагружения очень короткий и отличается малым количеством АЭ сигналов по сравнению с другими этапами. Из анализа значений коэффициента корреляции параметров АЭ сигналов (табл. 5), полученных по выборке из 17 сигналов, видно, что наиболее хо-

рошо между собой коррелируют такие параметры, как энергия и частота, энергия и счет – коэффициент корреляции равен 0,97.

Анализ статистических характеристик параметров АЭ сигналов третьего этапа нагружения ОК (табл. 6) показывает, что средние значения параметров на третьем этапе значительно изменились по сравнению со средними значениями на первом и втором этапах.

Анализируя гистограммы распределения амплитуд (рис. 10 – 12), энергетических параметров (рис. 11) и длительностей (рис. 12) АЭ сигналов третьего этапа нагружения ОК, можно отметить, что для третьего этапа характерны: очень узкий диапазон амплитуд (от 88 до 90 дБ) с наибольшим значением сигналов с амплитудой 89 дБ; небольшой диапазон изменения энергетических параметров сигналов ($325 \div 425$) мВ·мс; длительности сигналов составляют около 66 мс. Из сравнения гистограмм распределений для первых трех этапов видно, что третий этап нагружения ОК сильно отличается от первых по диапазону значений, по распределению и по расположению максимума.

Четвертый этап

Четвертый этап нагружения ОК характеризуется тем, что количество АЭ сигналов здесь значительно больше, чем на других этапах.

Из статистических характеристик параметров АЭ сигналов (табл. 7) видно, что наибольший коэффициент корреляции между счетом и частотой – 0,97. Коэффициент корреляции между амплитудой и частотой и длительностью и счетом составляет 0,81.

Анализ гистограммы распределения амплитуд АЭ сигналов (рис. 13) показывает, что гистограмма распределения амплитуды четвертого этапа нагружения ОК отличается самым большим диапазоном значений, а максимум распределения приходится на 69 дБ. Картина распределения длительности (рис. 15) почти такая же, как на третьем этапе с максимумом на 66 мс. Максимум распределения энергетических параметров (рис. 14) находится в начале диапазона и составляет 250 мВ·мс.

Пост-моделирование процесса нагружения

С помощью графической инструментальной среды программирования Agilent VEE проведено моделирование генерирования АЭ сигналов в процессе разрушения баллона. Полученный поток АЭ сигналов поступал на входы системы КОМПАКС-АЭ. В задачу моделирования входило исследование адекватности реагирования системы мониторинга на изменение амплитуды АЭ сигналов и автоматического изменения порогов дискриминации импульсов, а также проверка алгоритмов локации АЭ источников. Конечный результат представлен в виде карты локации, отображаемой на экране «Монитор» системы (рис. 16).

В результате моделирования выявлено, что импульсы с длительностью, близкой к 60 мс, практически отсутствовали на первых трех этапах, а на четвертом этапе нагружения появились лишь в момент возникновения утечки. Таким образом, автоматическое изменение порога дискриминации импульсов позволило существенно повысить достоверность выявления АЭ источников. Изменилось и распределение накопленного количества импульсов на карте локации – количество импульсов в зоне появления трещины выросло в несколько раз.

Выводы по результатам анализа

1. Коэффициенты корреляции параметров АЭ сигналов изменяются (табл. 9) в зависимости от этапа нагружения. Для всех этапов из всех параметров АЭ сигналов наиболее хорошо между собой коррелируют счет и частота – коэффициент корреляции по этапам меняется от 0,97 до 1.

2. Определены диапазоны амплитуд, энергетических параметров и длительностей, соответствующие стадиям разрушения ОК (табл. 10) и максимумы распределения значений параметров сигналов (табл. 11).

3. Из табл. 10 видно, что для четвертого этапа, когда происходит разрушение баллона, характерны в основном самые значительные диапазоны значений параметров АЭ сигналов. Амплитудные распределения значений этих параметров АЭ сигналов для первого и второго этапов отличаются незначительно.

4. Сигналы от дефекта, приведшего к разрушению, обнаружены за $20 - 25 \text{ кг/см}^2$ до момента разрушения. Следует принять во внимание «неправильный» график нагружения (слишком быстрый набор давления вследствие неисправной нагружающей аппаратуры). Сам процесс разрушения с момента четкой фиксации его аппаратурой длился 40 с. Постоянный сигнал в течение 1 с фиксируется лишь в момент разрушения, а перед этим зафиксирована серия сигналов с различной периодичностью (от 15 – 30 с в начале, до 2 – 5 с ближе к разрушению) и длительностью 60 – 80 мс.

5. Из анализа статистических характеристик параметров АЭ сигналов видно, что наиболее информативным параметром при определении процесса разрушения сосуда высокого давления является зависимость накопленного числа импульсов АЭ от нагрузки. Характерным является экспоненциальный характер графика накопленного числа импульсов. Именно четвертый этап нагружения (происходит разрушение баллона) отличается от других этапов наличием очень большого количества АЭ сигналов от дефекта со значительными величинами всех параметров. При критическом росте трещины возникают потоки АЭ импульсов, которые накладываются друг на друга, что приводит к выделению импульсов большой длительности. Поэтому для выделения таких потоков необходимо использовать автоматический алгоритм изменения порога дискриминации импульсов.

Табл. 1. Коэффициент корреляции параметров АЭ сигналов I этапа нагружения ОК

	A , дБ	D , мкс	E , мВ·мс	C	R	ASL	F , кГц
A , дБ	1						
D , мкс	0,80	1					
E , мВ·мс	0,92	0,85	1				
C	0,91	0,94	0,97	1			
R	0,79	0,75	0,88	0,86	1		
ASL	0,51	0,73	0,50	0,65	0,42	1	
F , кГц	0,92	0,92	0,97	0,99	0,86	0,65	1

Табл. 2. Статистические характеристики АЭ сигналов I этапа нагружения ОК

	A, дБ	D, мкс	E, мВ·мс	C	R	ASL	F, кГц
Среднее значение	75	49180	103	3088	2687	16,3	57,5
Стандартная ошибка	1,59	2006	29,1	375	785	1,3	4,66
Медиана	71,5	46394	9,03	2007	658	20,9	45,2
Мода	89,5	65024	–	–	28	8,9	–
Стандартное отклонение	8,86	11172	162	2090	4370,994	7,29	26
Дисперсия выборки	78	$1,25 \cdot 10^8$	$2,62 \cdot 10^{10}$	$4,3 \cdot 10^6$	$1,9 \cdot 10^7$	53,2	675
Эксцесс	–1,12	–1,04	–0,6123	–0,88	3,5	–2,0	–0,88
Асимметричность	0,69	0,25	1,18	0,94	2,0	–0,03	0,93
Интервал	25	37580	390	5723	17378	17,9	69,3
Минимум	64,5	27444	5,34	888	28	7,58	32,3
Максимум	89,5	65024	396	6611	17406	25,4	101,6

Табл. 3. Коэффициент корреляции параметров АЭ сигналов II этапа нагружения ОК

	A, дБ	D, мкс	E, мВ·мс	C	R	ASL	F, кГц
A, дБ	1						
D, мкс	0,76	1					
E, мВ·мс	0,74	0,87	1				
C	0,77	0,96	0,96	1			
R	–0,14	0,09	0,16	0,12	1		
ASL	0,48	0,63	0,78	0,74	0,13	1	
F, кГц	0,74	0,89	0,92	0,97	0,12	0,69	1

Табл. 4. Статистические характеристики параметров АЭ сигналов II этапа нагружения ОК

	A, дБ	D, мкс	E, мВ·мс	C	R	ASL	F, кГц
Среднее значение	72,65	42805	14,13	2429	658	21,4	52,8
Стандартная ошибка	0,67	1632	1,77	195	75,9	1,02	2,15
Медиана	72	40962	9,10	2061	558	21,8	52,18
Мода	70,5	65024	–	5350	162	17,1	82,27
Стандартное отклонение	5,00	12104	13,16	1445	562,9	7,59	16
Дисперсия выборки	25,02	$1,4 \cdot 10^8$	$1,73 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^6$	316919	57,6	256
Эксцесс	0,23	–0,60	2,19	0,56	2,23	–0,11	0,06
Асимметричность	0,43	0,73	1,91	1,25	1,48	0,47	0,89
Интервал	25	39312	45,8	4986	2442	27,7	59
Минимум	62	25712	4,70	863	28	8,9	30,5
Максимум	87	65024	50,5	5849	2470	37	89,9

Табл. 5. Коэффициент корреляции параметров АЭ сигналов III этапа нагружения ОК

	A , дБ	D , мкс	E , мВ·мс	C	R	ASL	F , кГц
A , дБ	1						
D , мкс	–	1					
E , мВ·мс	0,36	–	1				
C	0,45	–	0,97	1			
R	0,29	–	0,61	0,74	1		
ASL	–0,26	–	–0,4,	–0,46	–0,54	1	
F , кГц	0,45	–	0,97	1	0,74	–0,46	1

Табл. 6. Статистические характеристики параметров АЭ сигналов III этапа нагружения ОК

	A , дБ	D , мкс	E , мВ·мс	C	R	ASL	F , кГц
Среднее значение	88,7	65024	361	6917	10710	9,42	106,3
Стандартная ошибка	0,14	0	11,1	76	2750	0,23	1,16
Медиана	89	65024	367	6957	10296	8,9	106,9
Мода	89	65024	–	–	–	8,9	–
Стандартное отклонение	0,39	0	29	201	7277	0,62	3,09
Дисперсия выборки	0,15	0	8,62·108	40486	5,2·107	0,38	9,6
Экссесс	0,27	–	3,57	4,06	–0,84	–2,8	4,06
Асимметричность	–1,11	–	–1,57	–1,72	0,34	0,37	–1,72
Интервал	1	0	94,1	642	20210	1,16	9,87
Минимум	88	65024	302	6499	910	8,9	99,9
Максимум	89	65024	396	7141	21120	10	109

Табл. 7. Коэффициент корреляции параметров АЭ сигналов IV этапа нагружения ОК

	A , дБ	D , мкс	E , мВ·мс	C	R	ASL	F , кГц
A , дБ	1						
D , мкс	0,44	1					
E , мВ·мс	0,65	0,3	1				
C	0,76	0,81	0,64	1			
R	0,16	0,36	0,46	0,4	1		
ASL	0,32	0,52	0,52	0,61	0,72	1	
F , кГц	0,81	0,68	0,69	0,97	0,37	0,58	1

Табл. 8. Статистические характеристики параметров АЭ сигналов IV этапа нагружения ОК

	A , дБ	D , мкс	E , мВ·мс	C	R	ASL	F , кГц
Среднее значение	75	57221	53,9	4042	10784	36,62	66,86
Стандартная ошибка	0,59	857	69,1	155	1420	1,22	2,05
Медиана	74	65024	19,8	4176	818	33,53	64,98
Мода	72	65024	–	2388	232	32,6	80,0
Стандартное отклонение	7,95	11563	93,2	2094	19157	16,55	27,7
Дисперсия выборки	63,2	1,3E+08	8,68E+9	4386062	3,6E+08	273,9	766
Эксцесс	–1,01	–0,16	6,58	–1,3557	1,34	–0,75	–1,27
Асимметричность	0,088	–1,11	2,71	0,06	1,69	0,31	0,28
Интервал	30	43068	482	7021	63024	67,6	94,1
Минимум	60	21956	3,92	669	10	7,58	30,15
Максимум	90	65024	486	7690	63034	75,18	124,2

Табл. 9. Коэффициенты корреляции параметров АЭ сигналов

Параметры АЭ сигналов	Коэффициент корреляции			
	1 этап	2 этап	3 этап	4 этап
C и F	0,99	0,97	1	0,97
E и F	0,97	0,92	0,97	0,69
E и C	0,97	0,96	0,97	0,64
E и A	0,92	0,74	0,36	0,65
A и F	0,92	0,74	0,45	0,81
D и C	0,94	0,96	–	0,81
D и F	0,92	0,89	–	0,68
E и D	0,85	0,87	–	0,3
A и D	0,80	0,76	–	0,44
A и E	0,92	0,74	0,36	0,65
A и C	0,91	0,77	0,45	0,76

Табл. 10. Диапазоны значений параметров АЭ сигналов

Этапы нагружения ОК	Диапазон амплитуд, дБ	Диапазон энергетических параметров, мВ·мс.	Диапазон длительностей, мс
1 этап	65...90	25...400	27...66
2 этап	62...87	25...75	27...66
3 этап	88...90	325...425	66
4 этап	60...90	25...500	32...66

Табл. 11. Максимумы распределения значений параметров АЭ сигналов

Этапы нагружения ОК	Максимум амплитуд, дБ	Максимум энергетических параметров, мВ·мс.	Максимум длительностей, мс
1 этап	71	25	66
2 этап	71	25	66
3 этап	89	375	66
4 этап	75	25	66

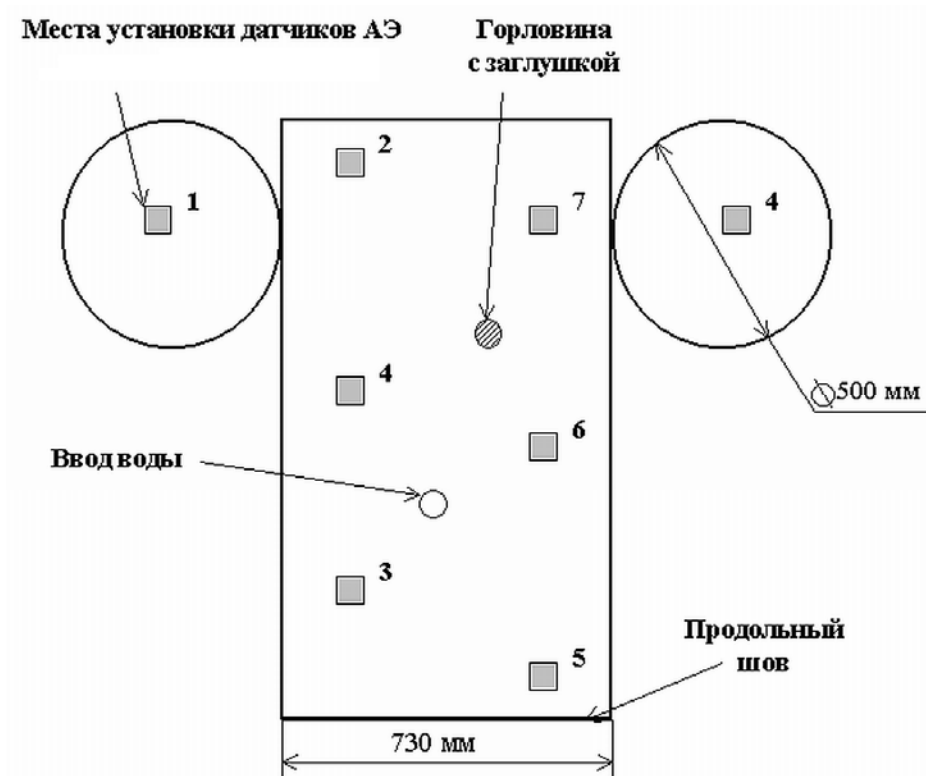


Рис. 1. Схема установки датчиков на баллоне

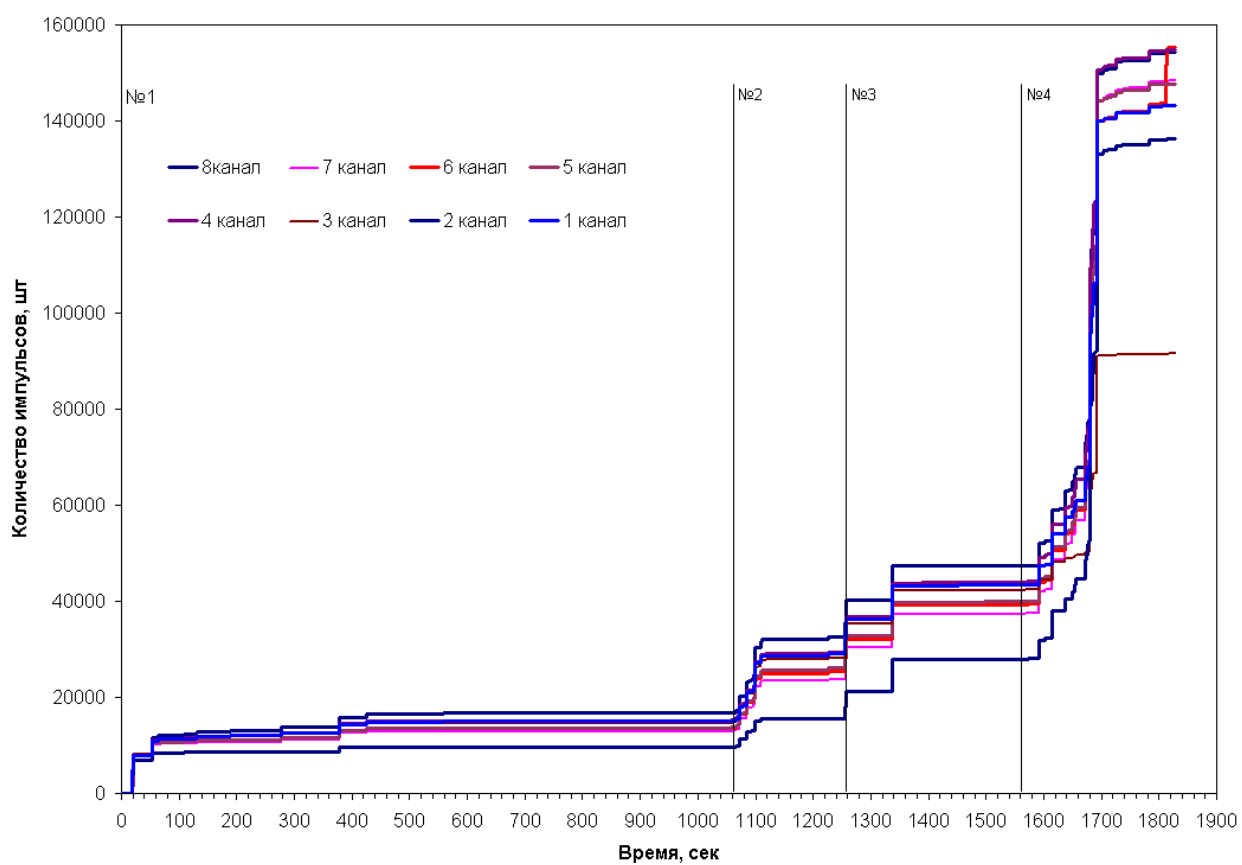


Рис. 2. Суммарное количество импульсов по каналам

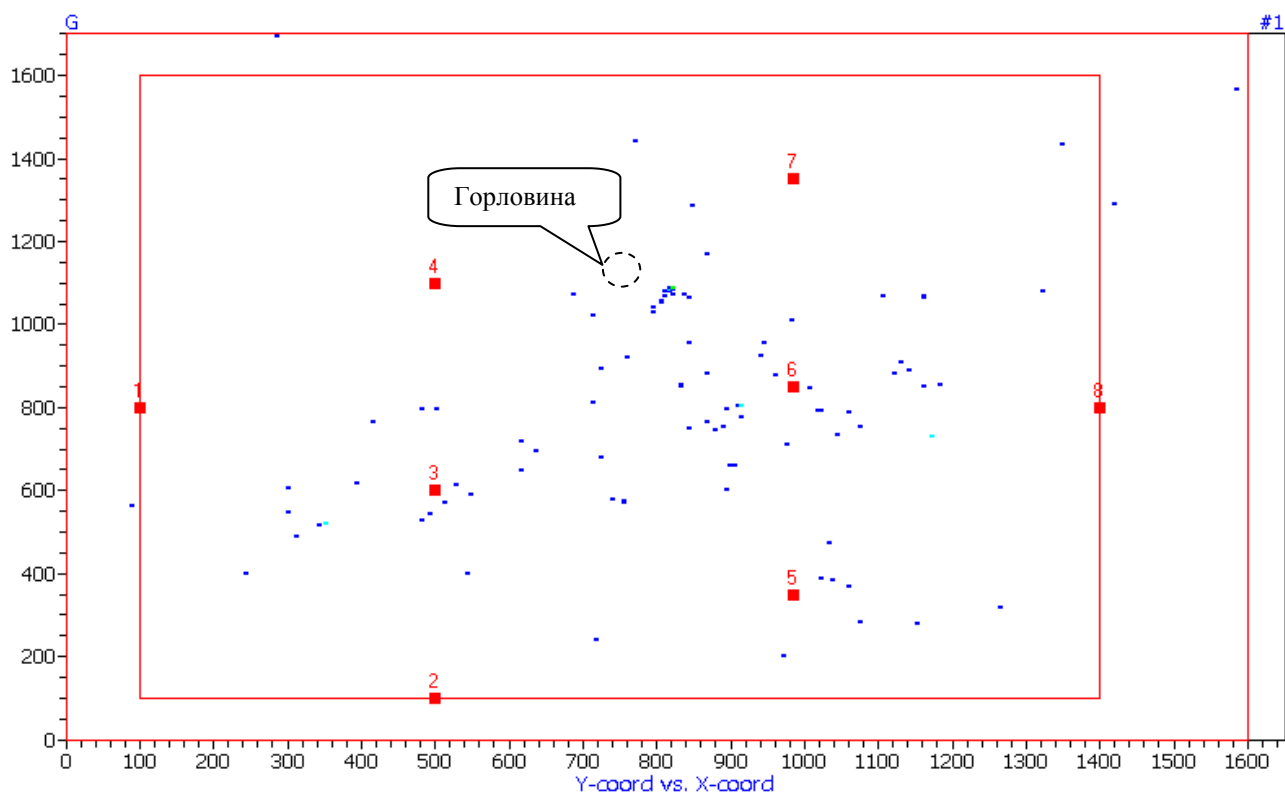


Рис.3. Карта локации четвертого этапа нагружения

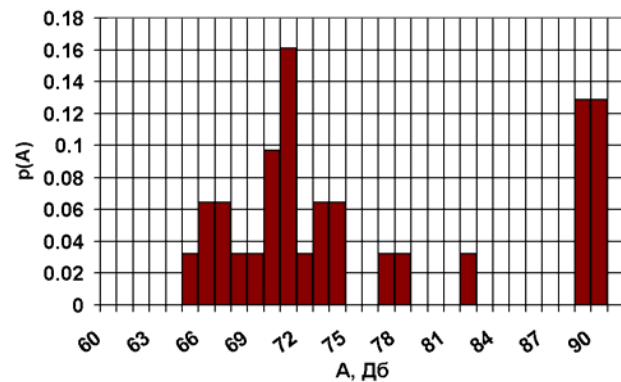


Рис. 4. Распределение амплитуд АЭ сигналов



Рис. 5. Распределение энергетических параметров АЭ сигналов

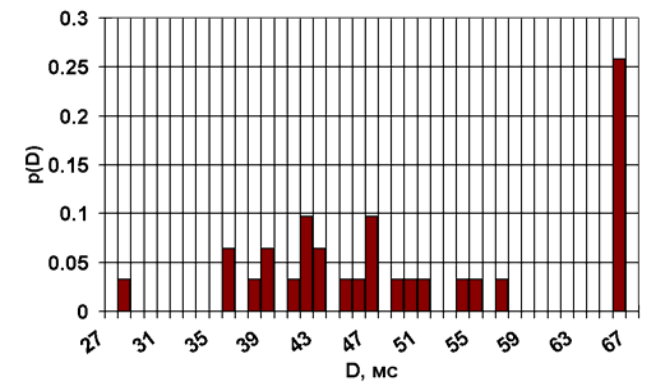


Рис. 6. Распределение длительностей сигналов

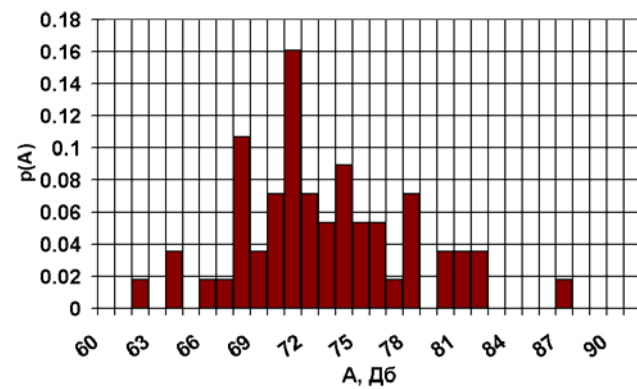


Рис. 7. Распределение амплитуд сигналов



Рис. 8. Распределение энергетических параметров АЭ сигналов

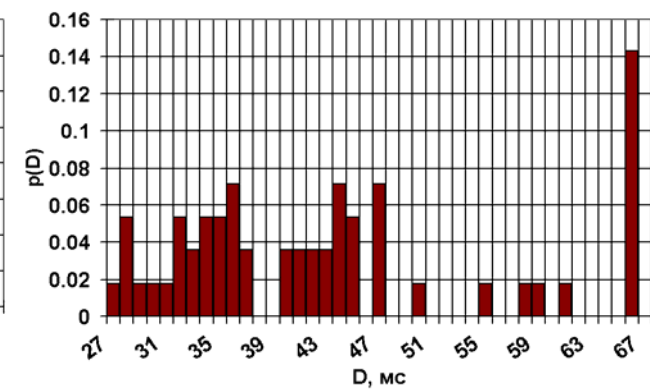


Рис. 9. Распределение длительностей сигналов

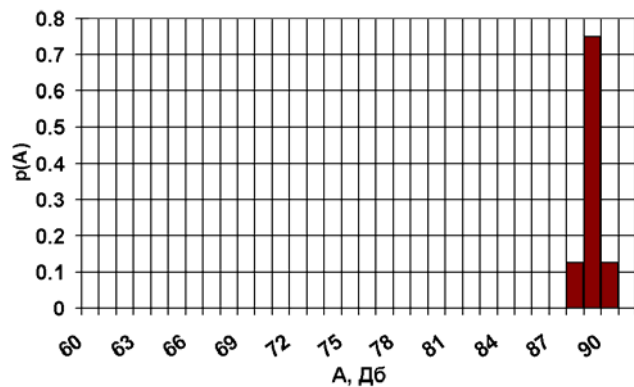


Рис. 10. Распределение амплитуд сигналов



Рис. 11. Распределение энергетических параметров АЭ сигналов

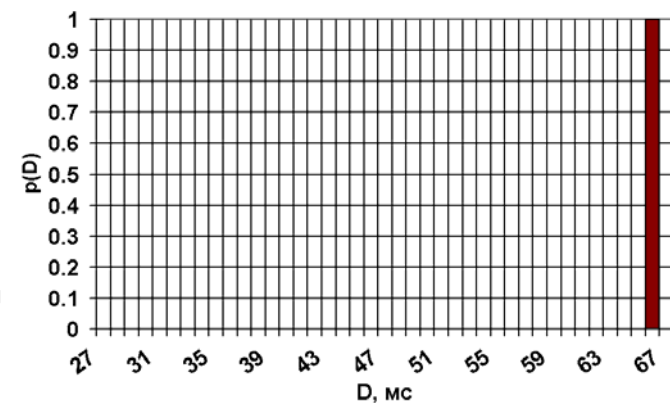


Рис. 12. Распределение длительностей сигналов

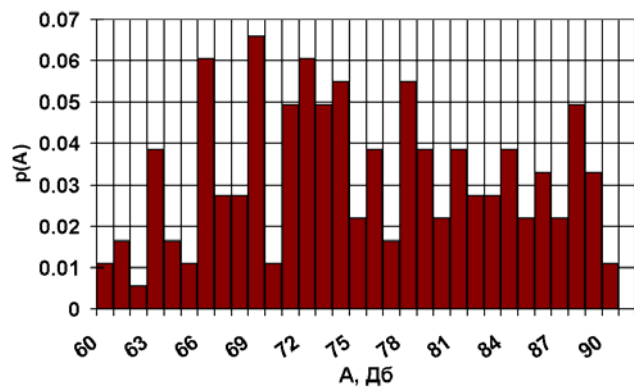


Рис. 13. Распределение амплитуд сигналов



Рис. 14. Распределение энергетических параметров АЭ сигналов

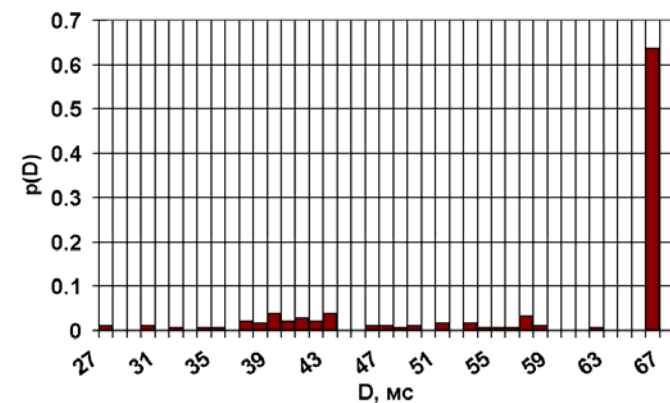


Рис. 15. Распределение длительностей сигналов

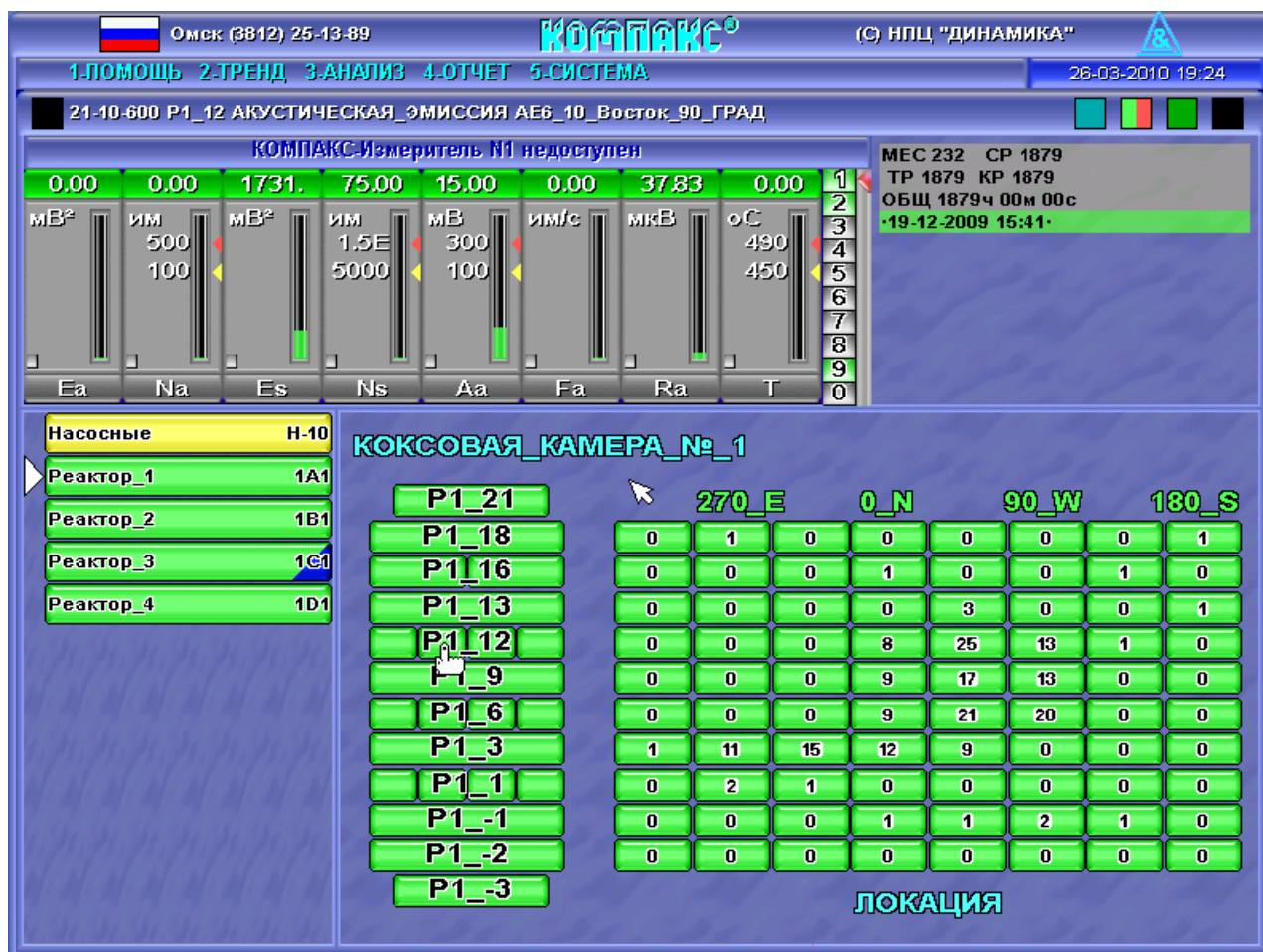


Рис. 16. Карта локации системы КОМПАКС

ОПЫТ СТАНДАРТИЗАЦИИ КОМИТЕТА ТК-132 В ОБЛАСТИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ, КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ И ОЦЕНКИ РЕСУРСА

А. А. Дубов, А. Л. Углов*,

ООО «Энергодиагностика», г. Москва;

*ТК-132 Ростехрегулирования, Нижний Новгород

Проблемой контроля напряжений и деформаций в работающих конструкциях с целью оценки их состояния в настоящее время занимаются все ведущие диагностические центры мира. Однако известно, что эффективность методов контроля напряжений остается низкой при их использовании на практике. Особое значение приобретает повышение эффективности контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) технических объектов при оценке их ресурса.

В настоящее время накопился большой арсенал методов и средств неразрушающего контроля остаточных напряжений (ОН) в изделиях машиностроения и НДС промышленных объектов в условиях эксплуатации. Большинство методов контроля механических напряжений основано на тарировке образцов при их растяжении. При этом не учитываются масштабный фактор и цикличность нагрузки, формирующие фактические напряжения (рабочие и остаточные) на реальном оборудовании.

Среди основных технических проблем контроля НДС следует отметить:

- отсутствие метрологической базы для сертификации и поверки средств измерений характеристик НДС изделий (до сих пор в России и других странах нет единых эталонов, образцов и методик);
- отсутствие стандартов, излагающих общие требования к методам и средствам НК напряжений и деформаций в реальных конструкциях.

Впервые такой стандарт подготовлен в России специалистами ООО «Энергодиагностика» совместно с ТК-132 Ростехрегулирования и опубликован в 2005 г. Стандарт имеет номер ГОСТ Р 52330-2005 и называется «Контроль неразрушающий. Контроль напряженно-деформированного состояния объектов промышленности и транспорта. Общие требования».

Известно, что основными источниками повреждений оборудования и конструкций являются зоны концентрации напряжений (ЗКН), обусловленные технологическими дефектами изготовления, рабочими нагрузками или их сочетаниями. Наличие ЗКН как на новых изделиях, так и на изделиях, бывших в эксплуатации, значительно снижает их ресурс. Поэтому контроль напряженно-деформированного состояния изделий и определение ЗКН с использованием средств неразрушающего контроля представляется в ГОСТ Р 52330-2005 наиболее важной задачей при контроле НДС.

В развитии этой темы, специалистами ООО «Энергодиагностика» совместно с ТК-132 разработан национальный стандарт «Оценка ресурса потенциально опасных объектов на основе экспресс-методов. Общие требования». В 2008 г. этот стандарт официально опубликован под номером ГОСТ Р 53006-2008.

К экспресс-методам отнесены пассивные методы НК, использующие внутреннюю энергию металла конструкций:

- метод акустической эмиссии (АЭ);
- метод магнитной памяти металла (МПМ);
- тепловой контроль.

Эти методы получили в настоящее время наибольшее распространение на практике для ранней диагностики повреждений оборудования и конструкций.

В данном стандарте более конкретно определены роль и задачи современных методов технической диагностики – 100% обследование и выявление ЗКН, определяющих надежность и остаточный ресурс оборудования и конструкций, классификация ЗКН по степени их опасности.

Поверочные расчеты на прочность с оценкой остаточного ресурса предлагается выполнять для ЗКН, остающихся в эксплуатации, с учетом фактических структурно-механических свойств металла, выявленных при обследовании.

Следует отметить, что указанные новые национальные стандарты России не имеют мировых аналогов. Ежегодно на конгрессах Международного института сварки (МИС) стандарты представляются от имени Российского научно-технического сварочного общества (РНТСО) как проекты международных стандартов.

В частности, стандарты по методу магнитной памяти металла ГОСТ Р 52005-2003, ГОСТ Р 52081-2003, СТО РНТСО 004-03 получили признание на уровне международного стандарта ISO 24497-1:2007(E), ISO 24497-2:2007(E), ISO 24497-3:2007(E).

Стандарт ГОСТ Р 52330-2005 «Контроль напряженно-деформированного состояния объектов промышленности и транспорта. Общие требования» был уже дважды представлен как проект международного стандарта (Осака, 11 июля 2004г., Прага, 10-15 июля 2005г.).

В 2009 г. подготовлен проект ГОСТ Р «Контроль неразрушающий. Определение механических напряжений. Классификация методов».

Настоящий стандарт развивает положения, изложенные в стандартах ГОСТ Р 52330-2005 и ГОСТ Р 53006-2008, устанавливает классификацию методов неразрушающего контроля механических напряжений, в основу которой положен процесс взаимодействия физического поля используемого метода с объектом контроля с учетом уровня локальности контроля напряжений.

Предлагаемая классификация неразрушающих методов контроля напряжений учитывает современные достижения материаловедения и механики разрушений, в частности энергетическую концепцию понятия «внутренние напряжения».

Энергетическая концепция понятия «внутренние напряжения» или «остаточные напряжения» потребуют безэталонных методов тарировки средств контроля напряжений.

Международным стандартом ISO 9712-2005 «Квалификация и сертификация персонала» введен новый вид НК – «контроль напряжений». Этот вид контроля включен в Правила функционирования системы добровольной сертификации персонала в области НК и диагностики РОНКТД, утвержденные Президентом РОНКТД 29 августа 2005 г.

В настоящее время предприятием «Энергодиагностика» совместно с ОАО «НТЦ Промышленная безопасность» разработано «Положение об аттестации персонала в области НК напряженно-деформированного состояния». В НОАП «Энергодиагностика» имеется программа обучения специалистов новому виду НК – «контроль напряжений», на I, II и III уровнях. Добро пожаловать в НОАП «Энергодиагностика»!

ИНСПЕКЦИЯ НА БАЗЕ ОЦЕНКИ РИСКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ УСТАНОВКИ КАТАЛИТИЧЕСКОГО КРЕКИНГА В УСЛОВИЯХ ПЯТИЛЕТНЕГО МЕЖРЕМОНТНОГО ПРОБЕГА

Т. А. Сурина, И. В. Эльманович

ООО «Диагностика и анализ риска», Волгоград

В 2007 г. на одном из предприятий Евросоюза был проведен капитальный ремонт всех технологических установок завода (Turn around), и в соответствии правилам Евросоюза (ЕС): 96/82/EC Seveso II Directive, PED 23/97 Pressure Equipment Directive, Pressure Systems Safety Regulations (PSSR) владелец-пользователь внедрил Систему Инспекции на базе оценки риска – ИБОР (Risk Based Inspection – RBI) с пятилетним межремонтным пробегом.

Во время капитального ремонта 2007 г. было проведено техническое диагностирование основного технологического оборудования установок. В данном докладе описана реализация Системы ИБОР на установке каталитического крекинга КТ-1/1.

Наиболее ответственным и напряженным технологическим блоком установки КТ-1/1 является реакторный блок (Fluid Catalytic Cracking – FCC). Технологическая схема блока FCC приведена на рис. 1. По результатам технического диагностирования установлено, что техническое состояние оборудования блока FCC в целом удовлетворительное. Исключение составляют:

- регенератор R-202 – локальный перегрев корпуса до температур, превышающих расчетную (рис. 2).
- реактор R-201 – растрескивание сварных швов приварки циклонов к корпусу реактора (рис. 3).
- трансферная линия V/201/1 от реактора каталитического крекинга к ректификационной колонне – растрескивание кольцевых аустенитных сварных швов сварки трубных секций из хромисто-молибденовой стали 15X5M (рис. 4).

Регенератор R-202

Конструктивно регенератор представляет собой вертикальный сварной аппарат высотой 26800 мм. Верхняя часть аппарата (диаметром 11000 мм) и нижняя часть (диаметром 9000 мм) соединены конической обечайкой. Верхнее днище – сферическое, нижнее днище – коническое. Ввод (Ду = 1200 мм) и вывод (Ду = 1300) катализатора – тангенциальные. Внутренняя поверхность регенератора имеет футеровку.

На корпусе регенератора R-202 выявлена зона локального перегрева стенки до 450 °С (рис. 2). Ввиду ограниченности сроков капитального ремонта предусмотренное стандартной технологией полное восстановление футеровки было невозможно.

Проведенные исследования показали, что неоднородное и нестационарное температурное поле возникает в регенераторе вследствие дефектов (разрушения, нарушения целостности) торкрет-бетонной футеровки. Был проведен многофакторный анализ влияния различных эксплуатационных параметров (температуры в зоне перегрева, размера пятна локального пе-

регрева, времени перегрева, деградации свойств металла корпуса и футеровки, включения и выключения системы охлаждения корпуса и др.) на термосиловую нагруженность металла корпуса регенератора. Характерные кривые изменения термосиловых напряжений в регенераторе приведены на рис. 5.

Реактор R-201

Конструктивно реактор представляет собой вертикальный сварной аппарат высотой 26800 мм. Верхняя часть аппарата (диаметром 11000 мм) и нижняя часть (диаметром 9000 мм) соединены конической обечайкой. Верхнее днище – сферическое, нижнее днище – коническое. Ввод ($D_u = 1200$ мм) и вывод ($D_u = 1300$) катализатора – тангенциальные. Внутренняя поверхность реактора имеет футеровку.

При внутреннем осмотре обнаружено множественное растрескивание сварных швов приварки циклонов к корпусу реактора. Ввиду ограниченности сроков капитального ремонта предусмотренная стандартной технологией полная замена циклонов была невозможна.

Трансферная линия V/201/1

Трубопровод изготовлен из стали 15Х5М, эксплуатируется с 1989 г. Сварные соединения выполнены аустенитными электродами без термообработки.

При сварке хромисто-молибденовых сталей аустенитными электродами возникает электрохимическая неоднородность из-за сварки разных по типу сталей. Аустенитный шов является катодом, основной металл – анодом. С точки зрения электрохимического механизма коррозии наиболее неблагоприятными являются зоны термического влияния и зоны сплавления. В этих зонах наиболее вероятно появление коррозионных трещин. Причиной коррозионного растрескивания является самопроизвольное разрушение металла под одновременным воздействием коррозионной среды и механических напряжений как общих (силовых и термических) нагрузок, так и местных (остаточных напряжений).

Опыт показывает, что примерно после 8 – 10 лет эксплуатации в аустенитных сварных швах возможно прорастание трещин с раскрытием стыков.

При акустико-эмиссионном контроле, проведенном 3 – 4 ноября 2007 г. на отдельных участках трубопровода в районах сварных швов локализованы источники повышенной АЭ активности. Для сварных швов, расположенных в зонах повышенной АЭ активности, был проведен дополнительный (гамма) контроль, подтвердивший наличие в них недопустимых дефектов. В ходе проведенного ремонта выявленные дефекты были частично устранены: магистральные трещины были выбраны шлифмашинкой и заварены. Устранить вторичные коррозионные трещины не представилось возможным (рис. 6). Ввиду ограниченности сроков капитального ремонта предусмотренная стандартной технологией полная переварка аустенитных швов на перлитные с термообработкой была невозможна.

В соответствии с требованиями Системы ИБОР проведена идентификация опасностей и угроз с учетом фактического технического состояния оборудования установки каталитического крекинга КТ-1/1. Установлены действующие механизмы повреждения, выделено критическое оборудование: Регенератор R-202, Реактор R-201, Трансферная линия V/201/1. Проанализированы наиболее вероятные сценарии развития негативных событий:

Сценарий 1 (C1) – растрескивание аустенитных сварных швов трансферной линии от реактора каталитического крекинга к ректификационной колонне $\Rightarrow$ пожар $\Rightarrow$ гибель людей, $\Rightarrow$ внеплановая остановка установки $\Rightarrow$ экономический ущерб.

Сценарий 2 (C2) – локальный перегрев корпуса регенератора $\Rightarrow$ потеря устойчивости стенки регенератора $\Rightarrow$ падение регенератора $\Rightarrow$ пожар $\Rightarrow$ гибель людей, $\Rightarrow$ внеплановая остановка установки $\Rightarrow$ экономический ущерб.

Сценарий 3 (С3) – растрескивание сварных швов приварки циклонов к корпусу реактора $\Rightarrow$ падение циклонов $\Rightarrow$ внеплановая остановка установки $\Rightarrow$ экономический ущерб.

Риск по всем сценариям признан неприемлемым и разработан комплекс специальных мероприятий по поддержанию риска на приемлемом уровне в период до следующего капитального ремонта (2012 г.):

- С1 – установить стационарные волноводы и проводить периодический (1 раз в 3 месяца) акустико-эмиссионный (АЭ) мониторинг на рабочем режиме. АЭ контроль при каждом пуске установки.
- С2 – провести тепловизионное обследование корпуса регенератора. В зонах наибольшего перегрева смонтировать систему воздушного охлаждения наружной поверхности, установить термопары. Систему охлаждения включать при достижении температуры наружной поверхности корпуса 300 °С. При температуре, превышающей 450 °С, провести экстренную остановку установки.
- С3 – циклоны установить в специальные корзины, приваренные к корпусу реактора.

С1. Для отслеживания изменения технического состояния трансферной линии при каждом АЭ контроле проводился анализ параметров регистрируемых импульсов АЭ (параметрический анализ). В соответствии с разработанной технологией АЭ контроля параметрический анализ проводился по определяющим параметрам:

- максимальная энергия регистрируемых импульсов (интенсивность АЭ);
- максимальная активность регистрируемых импульсов (активность АЭ);
- количество локализованных импульсов АЭ (событийность АЭ).

В качестве дополнительного параметра выбрана загрузка установки КТ-1/1, м³/час.

На рис. 7 приведена динамика изменения АЭ параметров импульсов по семи АЭ контролям, проведенным в процессе периодического мониторинга в штатном режиме эксплуатации, и результаты АЭ контроля при пуске установки после ремонта швов, признанных непригодными по результатам АЭ мониторинга.

Проведение Инспекции на базе оценки риска (ИБОР) и разработанные компенсирующие мероприятия и мониторинг позволили обеспечить бесперебойную, безопасную, безаварийную работу оборудования установки КТ-1/1 в течение первых трех лет пятилетнего ремонтного цикла. Для обеспечения последующей безопасной эксплуатации рекомендовано предусмотреть плановый технологический перерыв в работе установки (на 10 дней) в мае – апреле 2011 г.

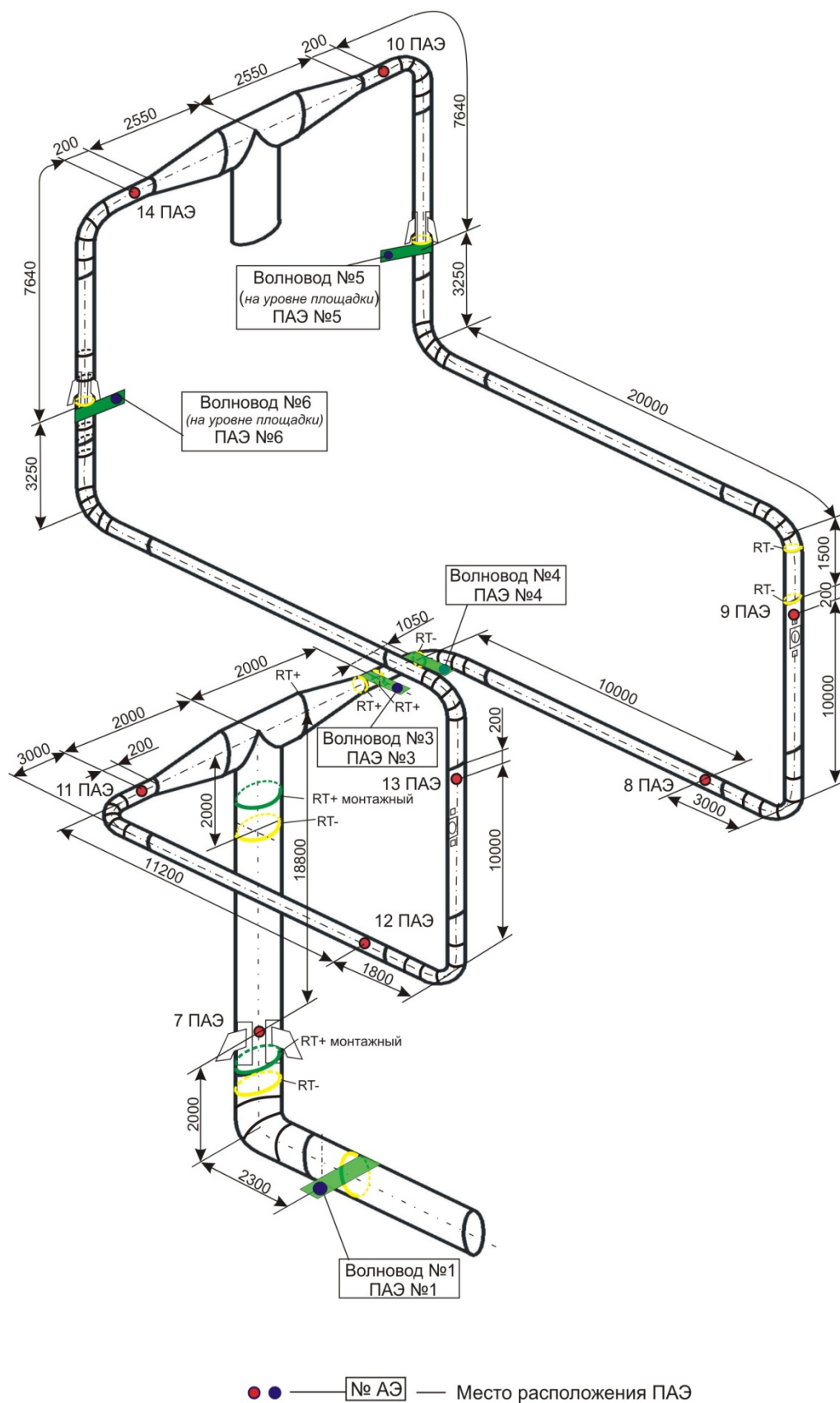


Рис. 4. Трансферная линия V/201/1 от реактора каталитического крекинга к ректификационной колонне

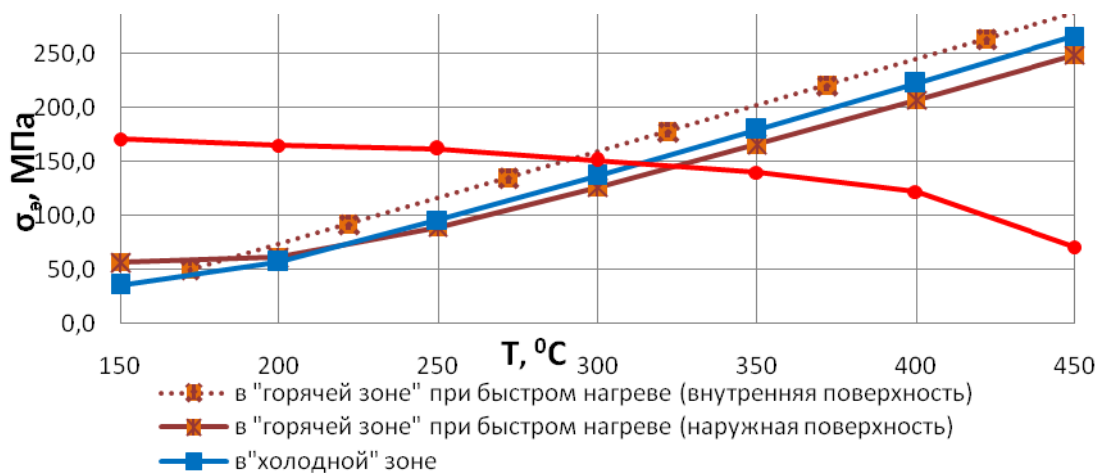


Рис. 5. Зависимость эквивалентных напряжений в корпусе регенератора от температуры локального перегрева стенки при локальном разрушении футеровки



Рис. 6. Магистральная и вторичная трещина в аустенитном сварном шве линии V.201/1: 1 – выборка магистральной трещины; 2 – вторичная коррозионная трещина

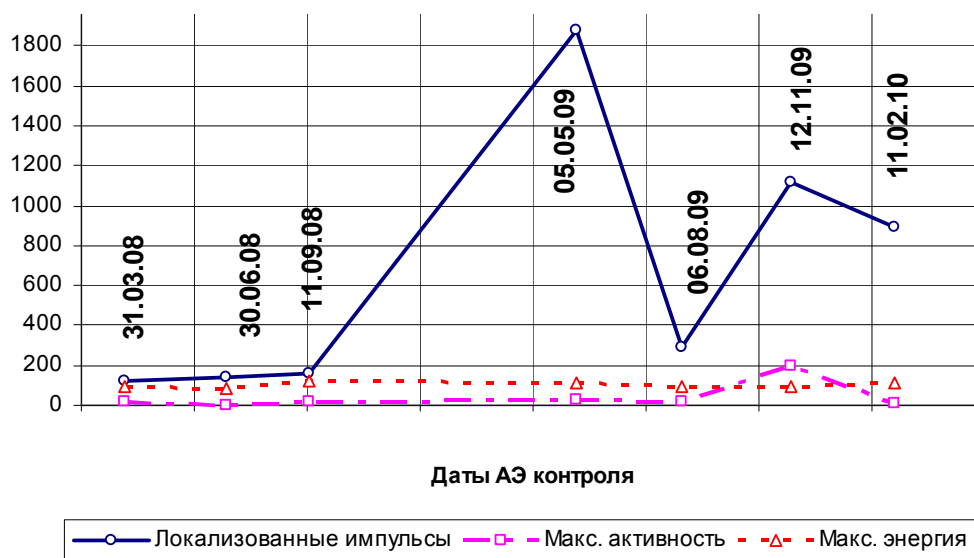


Рис. 7. Изменение количества локализованных импульсов, АЭ активности и интенсивности (максимальной энергии) при периодическом АЭ мониторинге трубопровода V.201/1

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ КРАНОВОЙ ЭСТАКАДЫ САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС

А. И. Сагайдак

НИИЖБ им. А. А. Гвоздева, г. Москва

Введение

Крановая эстакада машинного зала Саяно-Шушенской ГЭС подверглась действию целого ряда непроектных нагрузок в результате аварии на электростанции. Наиболее сильно пострадала колонна крановой эстакады, расположенная около оси 2-го гидроагрегата (колонна по оси Г/2). Кроме того, ряд незначительных повреждений получили подкрановые балки и колонны.

В результате ремонтно-восстановительных работ прочность и жесткость поврежденной колонны была полностью восстановлена.

Проведенные испытания крановой эстакады Саяно-Шушенской ГЭС позволили определить перемещения колонн и прогибы подкрановых балок при различных положениях кранов, динамических воздействиях. Результаты проведенных испытаний позволили, во-первых, уточнить принятую расчетную схему; во-вторых, оценить характер работы бетона колонн и подкрановых балок (упругая или неупругая стадия работы бетона); в-третьих, оценить качество выполненного усиления. Впервые для этих целей применен метод акустической эмиссии в сочетании с результатами тестовых нагружений и измерения деформаций и прогибов массивных железобетонных конструкций крановой эстакады.

Общие сведения о конструктивных решениях крановой эстакады Саяно-Шушенской ГЭС

Крановая эстакада Саяно-Шушенской ГЭС представляет собой многопролетную железобетонную раму и является опорой двух полукозловых кранов. Грузоподъемность каждого крана 500/100/10 тс.

Крановая эстакада расположена по дуге разного радиуса: с верхнего бьефа радиус составляет 462,8 м, с нижнего – 431,55 м. Жесткость рамы крановой эстакады обеспечивается габаритными размерами колонн эстакады ($1,2 \times 3,4$ м – размер колонны) и подкрановой балки ($1,8 \times 2,3$ м – размер поперечного сечения подкрановой балки).

Эстакада разделена на шесть частей температурными швами. В плане в каждом блоке рамы имеют излом, подкрановый путь проходит по дуге, повторяя конфигурацию машинного зала.

Подкрановые балки армируются жесткой арматурой в виде двух ферм и стержневой арматурой класса АIII различного диаметра.

Колонны крановой эстакады армированы жесткой арматурой в виде металлических уголков, расположенных по граням колонны, и стержневой арматурой класса АIII.

Характеристики крана. Кран опытный, полукозловой, предназначен для монтажа и ремонта оборудования. Исполнение: У категории 1 по ГОСТ 15150. Завод-изготовитель п/о Ждановтяжмаш, 1978 г. Грузоподъемность крана 500/100+10: главный подъем 500 т; вспомогательный 100 т, электротали – 10 т. Пролет крана 31,25 м. Полный вес крана 467815 кг; вес моста 133150 кг; тележки с механизмами 166970 кг; опоры 18040 кг. Максимальное давление колеса крана на рельс 100000 кг. Тип рельсов Кр120; радиусы: 462800 и 431550 мм. С каждой стороны кран опирается на 8 колес.

Методика проведения испытаний крановой эстакады

Используемые приборы и оборудование

Прогибы в подкрановых балках и измерение перемещений колонн крановой эстакады производили прогибомерами часового типа с ценой деления 0,01 мм. Измерение производили по стандартной методике с использованием прогибомерной проволоки. Прогибомер крепился на металлической стойке.

Акустико-эмиссионные измерения производили многоканальным акустико-эмиссионным комплексом A-Line 32d. Прибор выпускается ООО «Интерюнис», г. Москва. На рис. 1 – 4 показан внешний вид прибора A-Line 32d. В качестве датчиков АЭ использовались два типа пьезоэлектрических датчиков с керамическим протектором с рабочей полосой частот 30 – 300 кГц (ПАЭ ПК30-300) и датчик акустической эмиссии с полосой частот 10 – 100 кГц, производства «Донские акустические системы».

Порядок проведения испытания крановой эстакады

Испытания проводились для следующих видов нагрузок:

- от одного крана без груза;
- от стоящего одного крана в наиболее невыгодном положении без груза;
- от двух стоящих сближенных кранов в наиболее невыгодном положении без груза;
- от торможения тележки без груза от одного стоящего крана;
- от торможения тележки без груза от двух сближенных стоящих кранов в наиболее невыгодном положении;
- от проезда двух рядом стоящих кранов с грузом 750 тс;
- от двух стоящих сближенных кранов в наиболее невыгодном положении с грузом 750 тс.

Испытание проводились 16 и 17 января 2010 г. В первый день демонтировался ротор 4-го гидроагрегата. Общий вес ротора и металлической траверсы составлял 750 тс. Подъем ротора и его перемещение на монтажную площадку производился двумя кранами. В процессе подъема ротора и его перемещения производились измерения перемещений строительных конструкций крановой эстакады при помощи прогибомеров. На рис. 2 – 4 показаны фотографии подъема и перемещения ротора вдоль крановой эстакады.

Перемещение кранов происходило с постоянной скоростью. Напротив гидроагрегата № 2 краны остановились. Снятие отчетов производилось дважды – в начале и конце 10-ти минутной выдержки. Кранами ротор был перемещен и установлен на монтажной площадке. Прогибомеры и датчики акустической эмиссии устанавливались в середине пролета на боковой поверхности подкрановых балок. На колоннах устанавливались только датчики акустической эмиссии. Датчики акустической эмиссии на колоннах крепились на уровне 2 м от пола машинного зала.

После 4-х часового перерыва испытания крановой эстакады продолжились. Нагрузку к конструкциям крановой эстакады прикладывали с использованием двух сближенных кранов без груза. Краны устанавливались напротив колонн.

На следующий день испытывались конструкции крановой эстакады, расположенные у 5 – 10 гидроагрегатов ГЭС. По технологическим причинам испытания производились с применением одного 500 т крана. Порядок испытаний был следующий: кран останавливался поочередно напротив колонн. Проводилось снятие отчетов, после выдержки через 6 – 10 мин повторно снимались показания. Кран переезжал к следующей колонне. Измерения повторялись. Напротив колонны Б8 создавалось горизонтальное усилие за счет торможения крановой тележкой.

Результаты измерений перемещений

Результаты измерения прогибов в конструкциях крановой эстакады при испытании двумя кранами с грузом 750 тс и без груза показали, что в колоннах и подкрановых балках крановой эстакады имеются незначительные перемещения. Максимальный прогиб был зарегистрирован в подкрановой балке Г/Б2-Ш/2-3 и составлял 0,08 мм при нагружении крановой эстакады максимальной нагрузкой 750 тс.

Порядок подготовки и проведения АЭ измерений

В процессе подготовки АЭ аппаратуры пришлось решать проблему влияния акустических шумов и воздействия вибрации в помещении машинного зала. Как показал опыт практической деятельности, использование низкочастотного датчика с рабочей частотой 5 – 60 кГц неэффективно. Было невозможно даже при выборе порога и частотной фильтрации избавиться от влияния шумов. Широкополосный датчик с рабочей частотой 30 – 300 кГц в сочетании с частотной фильтрацией и использованием в качестве контактной поверхности между датчиками АЭ и бетоном конструкции пластилина позволило решить влияние акустических шумов и вибрации на измерение акустической эмиссии. Крепление датчиков АЭ к конструкции производилось с использованием магнитных прижимов.

Датчики АЭ устанавливались на две колонны и подкрановую балку напротив гидроагрегата № 2 и напротив гидроагрегата № 8. Колонна крановой эстакады напротив гидроагрегата № 2 Г/2 была полностью разрушена и забетонирована заново на уровне площадки машинного зала. На нижнем уровне гидроагрегатов (отм. 320 – 327) колонну Г/2 отремонтировали и усилили железобетонной обоймой. На колонну Г/2 датчики АЭ установили в двух уровнях по высоте – на уровне площадки машинного зала и на уровне гидроагрегатов. Также датчик АЭ был установлен на неповрежденную колонну Г/2-3 и подкрановую балку между колоннами Г/2 – Г/2-3. При аварии данная подкрановая балка крановой эстакады не получила повреждений.

Колонны и подкрановые балки напротив гидроагрегата № 8 в момент произошедшей аварии пострадали незначительно. Датчики АЭ устанавливались на колонны Г/8 и Г8-9 на уровне машинного зала и на подкрановую балку Г/8-Г/8-9.

Испытания крановой эстакады Саяно-Шушенской ГЭС производились в выходные дни. Все работы на период проведения испытаний были прикрашены. Это снизило уровень шума в помещении.

Измерение сигналов АЭ производили непрерывно в процессе всего испытания как при статическом положении кранов и груза, так и при их движении. При записи АЭ информации дополнительно фиксировали положения крана и груза. Используемая акустико-эмиссионная аппаратура позволяла в реальном режиме времени для каждого канала регистрировать параметры сигналов АЭ. В качестве параметров сигналов АЭ использовались: амплитуда, энер-

гия, длительность, активность, частота излучения сигналов АЭ и др. Проведение испытаний крановой эстакады с использованием метода АЭ ставило своей целью оценить действительную работу крановой эстакады и наличие, и степень опасности дефектов в поврежденных и/или усиленных конструкциях. В качестве научной гипотезы принималась следующее:

- Использование циклических нагружений железобетонных конструкций крановой эстакады и эффект Кайзера позволяют получить информацию об уровне напряжений. Научная гипотеза основана на известных положениях открытого для металлов, кирпича и бетона эффекта Кайзера, суть которого состоит в том, что при повторном нагружении конструкции акустическая эмиссия не будет проявляться пока не будет превышен уровень предыдущего нагружения. Нарушение эффекта Кайзера возможно при нагрузках, превышающих напряжения $0,7 - 0,8 \delta/R$.
- Изменение потока акустико-эмиссионных событий позволит определить упругую или неупругую стадию работы бетона. Статистическая обработка результатов измерений характеризует степень опасности развивающихся дефектов в структуре бетона конструкции. Гипотеза основана на том, что поток акустико-эмиссионных событий тесным образом связан с состоянием конструкции – проявлении неупругих деформаций бетона и развитием и укрупнением трещин, разрушение сжатой зоны бетона характеризуется продолжительным временным интервалом выделения сигналов АЭ и значительным ростом энергии, амплитуды сигналов.

Результаты акустико-эмиссионных измерений

В процессе испытания крановой эстакады на действия различных видов нагружений нами были зафиксированы сигналы акустической эмиссии в конструкциях. В качестве примера на рис. 4 приведен график зависимости активности АЭ от времени. График построен по результатам приложения крановых нагрузок к колонне Г/2. В первом случае прикладывалась нагрузка от двух кранов с грузом и без. Во втором крановая нагрузка была от одного крана. В обоих случаях краны находились напротив колонны Б/2. Из графика на рис. 4 следует, что активность сигналов акустической эмиссии зависит от уровня прикладываемой нагрузки. При этом первоначальное нагружения колонны происходило двумя кранами с грузом. Активность АЭ в этом случае составляла в среднем 100 имп/с. Повторное нагружение колонны крановой нагрузкой от двух кранов привело к тому, что акустическая эмиссия практически не проявляется. При первом нагружении поток акустико-эмиссионных событий носит затухающий характер, и в процессе выдержки под постоянной нагрузкой сигналы АЭ не проявляются. После двухчасового перерыва испытания продолжились, и колонна Б/2 была нагружена нагрузкой от одного крана (рис. 6). Было зарегистрировано совершенно малое количество (пять) сигналов АЭ. Таким образом, акустико-эмиссионные измерения показали, что в бетоне колонн и подкрановых балок при действии различных видов нагружений соблюдается эффект Кайзера. Характер выделения сигналов акустической эмиссии указывает на упругую работу бетона и отсутствие значительных дефектов внутренней структуры бетона. Аналогичные результаты были получены при испытании конструкций крановой эстакады у 4-го и 5-го гидроагрегатов.

Выводы

По результатам натурных испытаний был сделан вывод о работоспособном состоянии монолитных железобетонных колонн и подкрановых балок крановой эстакады Саяно-Шушенской ГЭС. Использование метода АЭ в ходе натурных испытаний позволило оценить уровень действующих напряжений и качество выполненного ремонта колонны.



Рис. 1. Акустико-эмиссионный комплекс A-Line 32D производства ООО «Интерюнис»



Рис. 2. Подъем ротора гидроагрегата №4



Рис. 3. Смещение ротора в сторону нижнего бьефа

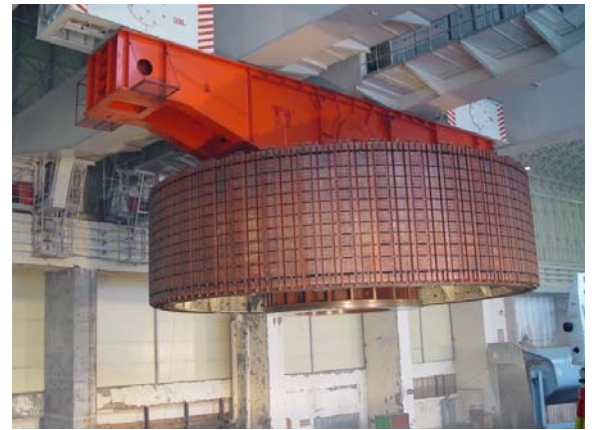


Рис. 4. Остановка у гидроагрегата №2

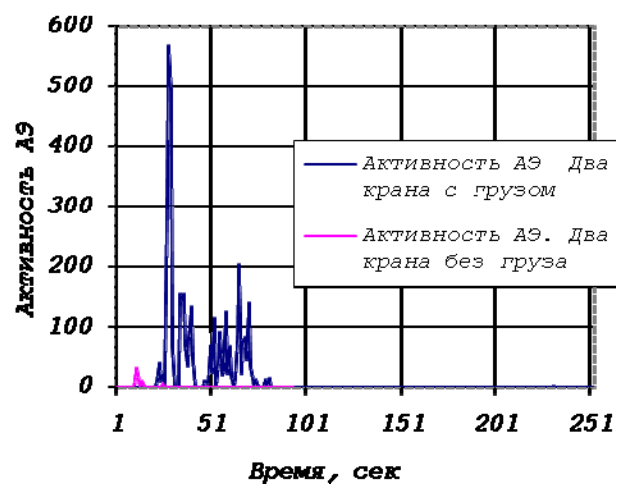


Рис. 5. Характер выделения сигналов АЭ при различных силовых воздействиях на колонну

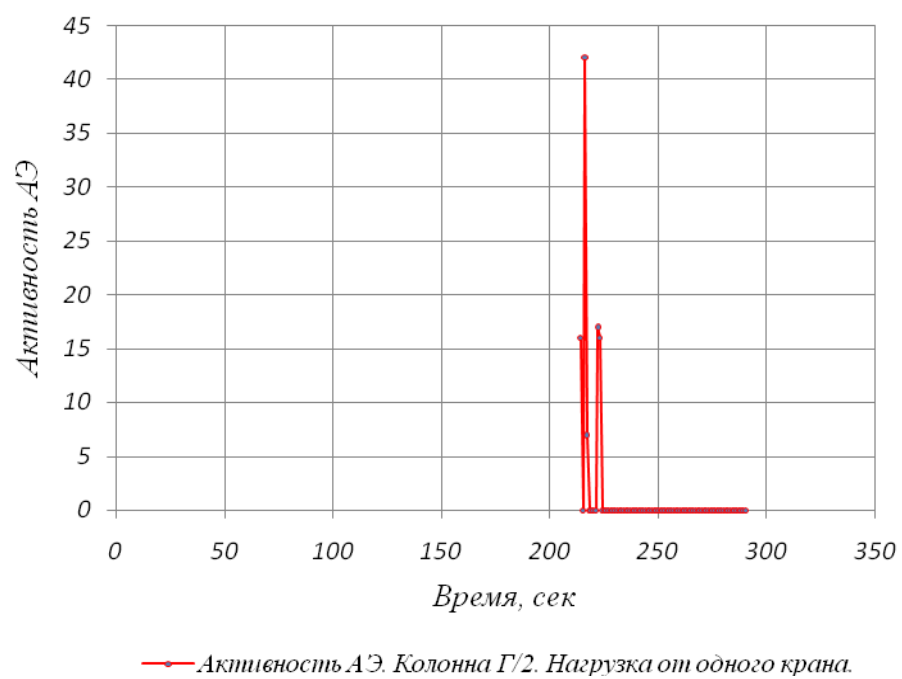


Рис. 6. Характер выделения сигналов АЭ при нагружении колонны Г/2 нагрузкой от собственного веса крана

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ ОАО «ГАЗПРОМ»

С. В. Каменский, Д. А. Зотов, К. Е. Нагинаев

ДОО «Оргэнергогаз», г. Москва

Опыт применения

Первые работы, основанные на использовании акустической эмиссии, появились еще в 1970-х гг. Метод оказался эффективным в авиации, атомной энергетике, строительстве, геологии, химической промышленности и т. д. Поскольку явление акустической эмиссии характерно для большинства структур и сред, метод стал востребованным и в газовой промышленности.

С принятием в России закона о промышленной безопасности ФЗ-116 в конце 1990-х гг. стала складываться нормативно-техническая документация, регулирующая, в том числе, и применение новых методов неразрушающего контроля. ГОСТ, определяющий понятие акустической эмиссии, был принят еще 1988 г., а первые правила АЭ контроля, появились в 1997 г. (РД 03-131-97).

К настоящему времени опыт применения метода акустической эмиссии есть, практически, на всех основных группах технологического оборудования, эксплуатируемого в ОАО «Газпром». Среди этого оборудования выделяют следующие группы:

- сосуды и аппараты, работающие под давлением;
- резервуары;
- технологические, промысловые и магистральные трубопроводы;
- запорно-регулирующая арматура;
- теплообменное оборудование.

ДОО «Оргэнергогаз» как головная организация по координации диагностических работ на объектах ОАО «Газпром» одним из первых начало применять метод акустической эмиссии на этих объектах. Первые экспериментальные попытки внедрить метод в практику диагностического обследования различного технологического оборудования с привлечением специалистов из других областей промышленности закрепились созданием временных методик, в которых были заложены основные подходы диагностирования соответствующих видов оборудования. Выход этих методик приходится на конец 1990-х гг., когда в Газпроме начинают развиваться отраслевые программы диагностического обслуживания: ДООКС, ДООДГ¹.

¹ ДООКС, ДООДГ – целевые программы ОАО «Газпром» диагностического обследования оборудования компрессорных станций (КС) и оборудования объектов добычи газа (ОДГ) соответственно

Фирмы, пропагандирующие метод АЭ, активно начали предлагать свои наработки, технологии и оборудование для выполнения диагностических работ в газовой промышленности. Наиболее сильные позиции, естественно, были у иностранных производителей: фирмы «ПАК» и «Валлен Систем». При отсутствии в то время в инженерно-технических центрах ОАО «Газпром» более-менее квалифицированных специалистов, способных грамотно использовать метод АЭ, затраты на покупку такого оборудования казались неэффективными. Фаза активного применения метода АЭ при диагностировании технологического оборудования ОАО «Газпром» началась, когда ДООАО «Оргэнергогаз» в 2001 г. закупило измерительный АЭ комплекс A-Line 16D, производимый ООО «ИНТЕРЮНИС». Апробация этого прибора на работах по техническому диагностированию оборудования с выявленными опасными дефектами показала его эффективность. Кроме того, грамотная техническая поддержка со стороны ООО «ИНТЕРЮНИС» сыграла ключевую роль в развитии крепких партнерских отношений между двумя организациями.

За счет развития программы ДООКС возросла потребность в использовании метода АЭ в работах по экспертизе промышленной безопасности различного технологического оборудования. Поначалу метод АЭ применялся как арбитражный метод НК – для принятия решения о выводе из эксплуатации оборудования – и использовался в крайних случаях. Но с 2005 г. началось массовое использование метода при диагностическом обследовании различных сосудов, работающих под давлением и аппаратов воздушного охлаждения (АВО) газа.

Если использование метода АЭ при сопровождении испытаний сосудов на прочность, обязательных в соответствии с действующими правилами эксплуатации сосудов, работающих под давлением, было желательным, но необязательным требованием программ экспертизы ПБ, то обследование АВО газа без использования метода АЭ было, фактически, невозможно. Дело в том, что АВО газа, как и сосуды, являются одним из самых массовых видов оборудования, эксплуатируемого ОАО «Газпром», но конструкция АВО газа контроленепригодна для основных методов неразрушающего контроля. Основная часть этого оборудования к началу 2000-х гг. выработала установленный в технической документации ресурс эксплуатации. Потребовалось в короткие сроки провести огромную работу по экспертизе и паспортизации оборудования.

Естественно, в таких условиях невозможно было соблюсти детальный подход при диагностировании каждого технического устройства, многие из которых невозможно было вывести даже на короткое время из рабочего режима. Чтобы решить эти задачи, ДООАО «Оргэнергогаз» на основании «Методики определения остаточного ресурса аппаратов воздушного охлаждения газа, эксплуатируемых на компрессорных станциях РАО «Газпром», разработанной еще в 1997 г. АО «ЛенНИИХиммаш», стало активно внедрять метод АЭ в программы ЭПБ АВО газа.

Надо отметить, что использование метода АЭ при обследовании АВО газа на практике не совсем соответствовало требованиям ПБ 03-593-03, так как нагружение АВО газа рабочим телом (т. е. газом) невозможно провести до давления выше рабочего: для этого пришлось бы переводить ГПА на другой режим работы или использовать какие-то другие компрессорные установки. Поэтому АЭ использовали не для сопровождения испытаний на прочность, а вместо них. Специалисты в области АЭ считали такой подход оправданным при соблюдении ступенчатой программы нагружения и использовании для оценки результатов контроля локально-динамического критерия.

При диагностировании сосудов, работающих под давлением, на объектах ОАО «Газпром» одна из самых сложных и неприятных задач, стоящих перед диагностами – реализация испытаний на прочность. Мало того, что, как правило, при подготовке к этим испытаниям постоянно возникают технические проблемы: нет нагружающего оборудования, воды, низ-

кие температуры окружающей среды, не держит запорная арматура и т. д. Любой специалист в области неразрушающего контроля знает, что нагружение испытательным давлением (в случае гидроиспытаний оно составляет 1,25 от рабочего) не является, строго говоря, методом неразрушающего контроля, а скорее наоборот: межатомные связи в материале объекта, сдерживающие развитие дефектов, ослабевают, что приводит к нежелательным процессам трещинообразования. Поэтому на практике специалисты ДОО «Оргэнергогаз» часто используют акустико-эмиссионный контроль отдельно от гидроиспытаний или пневмоиспытаний, заменяя их нагружением рабочим телом (газом) до рабочего давления, т. е. по той же схеме, что и АВО газа.

Приведенные отступления от определенных законом норм эксплуатации оборудования не могут не вызывать вопросов со стороны Ростехнадзора. До недавнего времени все эти вопросы решались в индивидуальном порядке – с конкретными объектами и конкретными инспекторами Ростехнадзора. С 2009 г. мы имеем отраслевые методики по диагностированию сосудов и АВО газа ([1, 2]), в которых закреплён подход, выработанный специалистами ДОО «Оргэнергогаз».

Распространение метода АЭ в газовой промышленности позволяет сделать выводы, которые должны быть поддержаны коллегами из других областей. Технологически система гидроиспытаний безнадежно устарела. Осмотр поверхности сосуда при гидроиспытаниях в поисках протечек, потений, слезок в сварных швах, вздутий и т. п. и менее качественен, и менее информативен, чем АЭ-контроль. Еще большие трудности в этом смысле возникают при испытаниях технических устройств больших размеров, таких как абсорберы и десорберы на УКПГ газовых промыслов или испарители на СОГ: площадь их поверхности более 70 м², а длина сварных швов – более 70 погонных метров. Последние, к тому же, являются двух- и трехконтурными, и осмотр теплообменных трубок, заключенных в наружный кожух, просто невозможен.

Конечно, на практике специалисты, выполняющие АЭ-контроль на реальном работающем оборудовании, часто сталкиваются с множеством проблем, заставляющих вносить коррективы в разработанные технологии и программы работ. Например, очень часто на объектах контроля, которые нужно изолировать от общей трубопроводной обвязки, не работает запорно-регулируемая аппаратура. Следовательно, невозможно соблюсти программу ступенчатого нагружения. Приходится «выкручиваться» – искать закономерности появления активных источников при плавном нагружении. Каждый специалист или творческий коллектив, работающие в этой теме, имеют свои собственные наработки и «ноу-хау», позволяющие принимать решение по результатам диагностики. Но несомненно одно: чем хуже диагностируемое оборудование с функциональной точки зрения, тем больше «перестраховки» закладывается в оценку технического состояния этого оборудования. Поэтому заказчик диагностических работ (в нашем случае это эксплуатирующие предприятия ОАО «Газпром») всегда несет излишние материальные затраты, когда требует провести экспертизу неработающего оборудования, что теоретически должно стимулировать его правильную эксплуатацию.

Диагностирование запорно-регулируемой арматуры – это поле, на котором метод АЭ может быть широко внедрен и уже используется специалистами ДОО «Оргэнергогаз». Сейчас метод часто применяют для определения течей во внутренних герметизирующих устройствах кранов, задвижек и т. п. Для этих целей достаточно двухканального прибора.

За время использования метода акустической эмиссии при диагностическом обследовании трубопроводов накопился достаточный опыт оценки технического состояния подобных объектов. В комплексе диагностических работ при переизоляции применение АЭ контроля позволяет часто избегать ненужных затрат на раскопку, очистку трубы и использование других методов контроля. Например, при продлении срока эксплуатации трубопроводов

цеха «Союз» в Сохрановском ЛПУ МГ ООО «Волгоградтрансгаз» в 2007 г. был проведен АЭ контроль входного шлейфа, поскольку косвенные признаки указывали на то, что покрытие трубы находится в удовлетворительном состоянии. Даже наличие «активных» источников (дефектов) в трубе позволяет эксплуатировать объект продолжительное время при выполнении рекомендаций специалистов: периодическом обследовании объекта тем же методом акустической эмиссии.

В 2005 г. специально для Майкопской КС ООО «Кубаньгазпром» была разработана программа комплексного диагностического обследования трубопроводной обвязки, где метод акустической эмиссии играл главную роль (рис. 1). С помощью него была дана оценка технического состояния обвязки КС, позволившая допустить станцию к эксплуатации, и принято решение о ежегодном АЭ-мониторинге обвязки.

Таким образом, обосновано, что применение метода акустической эмиссии при планировании ремонта трубопроводов КС существенно сократит затраты на эти цели.

Актуален метод акустической эмиссии при контроле переходов газопроводов через водные преграды, автомобильные, железные дороги, горные перевалы. Первый и пока единственный стандарт ОАО «Газпром» по акустической эмиссии является методикой по акустико-эмиссионному контролю таких переходов [3].

Можно выделить три основных направления использования метода АЭ применительно к оборудованию КС и ОДГ:

1. *Сопровождение испытаний объектов на герметичность и прочность с целью оценки качества проведенных строительно-монтажных и диагностических работ*, поскольку применение АЭ-контроля позволяет уйти от обязательного использования воды при испытаниях и использовать вместо нее газ или воздух.

2. *Использование АЭ-контроля для слежения (мониторинга) за участками трубопроводной обвязки, на которой были выявлены опасные дефекты*. Пример такого использования АЭ мы уже приводили выше – обвязка Майкопской КС.

3. *Мониторинг оборудования при эксплуатации в жестком режиме*, когда остановка работы может привести к значительным материальным издержкам. Такая проблема очень остро стоит на северных газодобывающих предприятиях, где вывод из эксплуатации «неисправного» с точки зрения действующих нормативов объекта на необходимое для ремонта время влечет срыв планов подачи газа основным потребителям.

Данное направление является перспективным для развития метода акустической эмиссии. Примеры мониторинговых систем на базе акустико-эмиссионного контроля уже есть².

Ресурсные испытания

Основной недостаток метода АЭ контроля связан с его сложностью – необходимостью подготовки высококвалифицированных кадров, умеющих грамотно интерпретировать отображаемые аппаратурой данные, полученные при контроле. Таких специалистов невозможно получить после двухнедельного или месячного курса занятий в аттестационном центре. Необходим опыт. Специалисты ДОАО «Оргэнергогаз», занимающиеся АЭ, принимают участие в наиболее сложных работах, в том числе в различных стендовых испытаниях, где производится апробация тех или иных методик контроля, изучаются механизмы разрушения конструкций.

ДОАО «Оргэнергогаз» уже публиковало основные результаты своих исследований, основанных на методе акустической эмиссии [4]. В течение последних пяти лет специалисты

² Например, системы комплексного мониторинга, предлагаемые ООО «ИНТЕРЮНИС»

общества проводили испытания разнообразного технологического оборудования, пытались установить закономерности в разрушениях конструкций от наличия дефектов и условий эксплуатации. Здесь мы приводим краткую информацию по проведенным работам.

2005 г. На территории Арзамасского ЛПУМГ ООО «Волготрансгаз» были проведены стендовые испытания трубопровода с искусственно нанесенными дефектами. Стенд представлял собой прямолинейный участок прямошовной трубы длиной 5100 мм, концы которой были заглушены. В центре стенда находился искусственный дефект, имитирующий сплошную коррозию – выборка основного металла на 1/2 толщины стенки в виде квадрата размерами 300 × 300 (рис. 2). Испытания проходили путем гидравлического нагружения по ступенчатой программе от нулевого давления до давления разрушения. Процесс испытаний сопровождался АЭ-контролем и тензометрией. Основные итоги испытаний: активные источники в области нанесенного дефекта появились при нагружении давлением от 20 до 74 кгс/см²; на давлении³ 94 кгс/см² начался процесс пластической деформации металла в зоне дефекта; разрушение стенда произошло на давлении 148 кгс/см² по нижней границе выборки. На примере данных испытаний специалисты ДОО «Оргэнергосгаз» убедились в возможностях метода АЭ прогнозировать места разрушения задолго до начала необратимых процессов, ведущих к разрушению конструкции.

2005 г. Испытания трубопроводной обвязки компрессорного цеха на КС «Краснотурьинская» ООО «Тюментрансгаз». Основной задачей испытаний было определение соотношений между размерами дефектов и величиной внутритрубоного давления, при которых возникают остаточные неупругие эффекты деформирования. Уникальность испытаний заключалась в том, что работы проводились на реальном объекте с учетом действующих нагрузок от опорных систем и непроектного положения трубопроводов. Испытания проводились по программе циклических нагружений трубопровода водой. В программе нагружений было несколько циклов с различными испытательными давлениями (60, 75, 96, 120 кгс/см²). В ходе испытаний велись наблюдения за развитием дефектов трубопровода: как эксплуатационных, так и искусственно нанесенных. В ходе испытаний с помощью АЭ-контроля было установлено, что дефекты, геометрические размеры которых намного превышают допустимые нормы, не представляют опасности в том случае, если металл в области концентратора напряжений сохраняет свои пластические свойства. В этом случае сохраняется высокое значение вязкости разрушения, и для развития трещиноподобного дефекта требуется более высокое значение приложенной нагрузки. Таким образом, определено, что за период эксплуатации пластические свойства металла обвязки ухудшились незначительно.

2006 г. Испытания коллектора АВО газа фирмы «Хадсон» с дефектом металлургического происхождения. Необходимость проведения испытаний вызвана тем, что при обследовании коллекторов методами неразрушающего контроля были обнаружены многочисленные заводские дефекты в виде закатов. Коллектор был вырезан с АВО газа и оборудован в виде стенда. Работы проводились на базе ПТУ «Сургутгазэнергоремналадка». Особенность испытаний заключалась в том, что работы проводились на объекте с заводским дефектом, который имеет естественную пространственную ориентацию в направлении проката. В ходе проведения испытаний путем гидравлического нагружения использовались дистанционные методы контроля технического состояния стенда: тензометрия – для контроля уровня деформаций и акустическая эмиссия – для контроля развития дефектов. В ходе испытаний выявлено, что данный дефект металлургического происхождения, а именно, закатная плена, не влияет

³ Для справки : 75 кгс/см² – рабочее давление большинства оборудования и трубопроводов, 94 кгс/см² – пробное давление гидроиспытаний

на несущую способность коллектора АВО газа, АЭ-контроль не выявил наличия активных источников, как и не было обнаружено остаточных деформаций в области дефекта.

2007 г. Стендовые испытания технологии ремонта дефектов типа «смещение кромок» на базе ЛЭС Краснотурьинского ЛПУ МГ ООО «Тюментрансгаз». Испытанию подверглась конструкция, состоящая из двух тройниковых соединений с накладками (ТСН) 1420X26-1020×22, сваренных между собой со смещением кромок. Места смещения кромок были усилены специальными композиционными муфтами. Целью испытаний было обоснование целесообразности использования технологии ремонта с помощью композиционных муфт. Нагружение стенда происходило гидравлически по циклической программе (200 циклов). Далее проводилось ступенчатое нагружение до момента разрушения конструкции. Результатами испытаний стали: фиксация развивающихся дефектов конструкции, в которых впоследствии произошли разрушения. Ими оказались места приварки патрубков тройников. Разрушение стенда произошло именно в них на давлении 150 кгс/см². Сварные швы со смещением кромок оказались бездефектными по критериям метода АЭ.

2008 г. Испытания ТСН на производственной базе ЦПП «Газпром трансгаз Чайковский». Непосредственно перед проведением испытаний в местах сварных соединений тройника были нанесены искусственные дефекты в виде пропилов с недопустимыми геометрическими размерами. Помимо искусственных дефектов в ТСН при проведении ультразвукового контроля сварных соединений был обнаружен ряд дефектов, образовавшихся в период сборки и эксплуатации. Суммарный срок эксплуатации и хранения изделия на момент проведения испытаний составлял 30 лет. Гидравлические испытания стенда с ТСН проводилось в несколько этапов: 1) циклические нагружения до рабочего давления 75 кгс/см² с количеством циклом 500; 2) циклические нагружения до давления 94,5 кгс/см² с количеством циклом 100; 3) циклические нагружения до давления 112,5 кгс/см² с количеством циклом 100; 4) ступенчатое нагружение до 220 кгс/см². В ходе испытаний с помощью АЭ-контроля на ранних стадиях нагружения (до превышения рабочего давления) были определены области ТСН, в которых происходили активные процессы АЭ; зафиксирован момент начала пластической деформации в металле конструкции на давлении 140 кгс/см² – в этот момент источники АЭ достигли 4-го класса; доказана высокая степень безопасности АЭ-контроля и достоверности полученных данных: обследования вырезанных элементов тройника с выявленными активными дефектами выявили развитие этих дефектов. За время испытаний физического разрушения конструкции ТСН не произошло.

2009 г. Стендовые испытания корпусов нагнетателей Н-235-21-1 и Н-370-18-1 с целью продления ресурса до 300000 час на промплощадке РЕП Комсомольского ЛПУМГ ООО «Газпром трансгаз Югорск». Применение АЭ контроля было направлено на обнаружение дефектов и мониторинг их развития в ходе гидравлического нагружения по циклической программе (более 15000 циклов). Особенностью нагнетателей как объектов контроля является большая толщина стенки основного металла, сложность геометрии для построения локаций и несплошность конструкции, которая заключается в том, что она состоит из различных сборочных единиц. Стенд для проведения ресурсных испытаний корпусов нагнетателей (рис. 3) проектировался с применением автоматического управления нагнетания и сброса давления с учетом большого количества циклов. Главным управляющим звеном гидроиспытаний стала многофункциональная компьютерная программа, которая в процессе работы отслеживала сигналы датчика повышения и сброса давления. На основании получаемых данных она выдавала команды на электронный блок управления запорной арматурой. Программа учитывала целый спектр различной информации: повышение и сброс давления, количество циклов, время цикла, хронология событий и многое другое. Промежуточным звеном между программой и исполнительным механизмом служил контроллер, который с помощью ав-

томатов подавал питание на открытие или закрытие запорной арматуре. В ходе испытаний были получены следующие результаты: методом АЭ были зафиксированы развивающиеся дефекты – места крепления крышки корпуса нагнетателя, в то же время дефекты, обнаруженные до начала испытаний, развития не получили, что говорит о том, что накопленная концентратором напряжений энергия на момент окончания испытаний недостаточна для подрастания дефекта.

2010 г. Стендовые испытания участка магистрального трубопровода с дефектами эксплуатации типа КРН (коррозионное растрескивание под напряжением) на базе Моршанского ЛПУ МГ ООО «Газпром трансгаз Москва». Стенд представлял из себя 100-метровый трубопровод из 11 труб с заглушенными концами. Каждая труба имела на своем теле многочисленные дефекты КРН, вскрытые при внутритрубной диагностике магистрального газопровода. Глубина трещин КРН до начала испытаний достигала 4 – 5 мм. В местах дефектов КРН были установлены тензодатчики. Испытания проводились путем гидравлического нагружения циклически и по ступенчатой программе. При помощи АЭ-контроля отслеживались процессы роста дефектов, в первую очередь – начало процессов пластической деформации. Основная цель испытаний была апробация «стресс-метода» залечивания усталостных трещин. В моменты нагружения, когда происходил рост пластической деформации, давление резко снижали. Таким образом, снимались напряжения в развивающихся трещинах КРН, и при следующем нагружении они уже не росли. Метод АЭ сыграл основную роль в управлении процессом нагружения. Тем более что после начала пластической деформации – роста трещин КРН, тензометрия уже не работала: тензодатчики были порваны. Отслеживать процессы, происходящие в металле при многократном изменении напряженно-деформированного состояния, оказалось возможным только при помощи АЭ-контроля.

На основании результатов описанных ресурсных испытаний специалисты ДОО «Оргэнергогаз» делают выводы, подтверждающие теоретические основы метода АЭ:

1. Угроза развития дефекта определяется скоростью роста области деформированно-упрочненного металла в зоне концентратора напряжений и зависит от действующих нагрузок и состояния металла.

2. В условиях эксплуатации технологических трубопроводов и оборудования преобладает усталостный механизм развития дефектов. Именно развитие усталостных трещин от различных концентраторов напряжений представляет наибольшую опасность в условиях эксплуатации оборудования газотранспортных систем.

3. При развитии трещин по усталостному механизму проявляются две группы процессов, сопровождающиеся излучением АЭ. Первая группа связана с пластической деформацией: работа дислокационных источников любой природы, движение дислокаций, распад дислокационных комплексов, прорыв дислокационных скоплений через разнообразные границы и т. д. Вторая группа процессов базируется на регистрации сигналов вследствие подрастания трещин в результате когерентных микроразрывов в сплошном металле. Для каждой группы источников акустической эмиссии характерны свои индивидуальные параметры. С процессами пластической деформации в зонах концентрации напряжений, в том числе в вершине трещин, следует связывать низкоамплитудную АЭ, а с процессами распространения трещин, которые проявляются в виде когерентных микроразрывов и сопровождаются появлением новых поверхностей трещин, – высокоамплитудную АЭ.

4. При оценке результатов измерения АЭ в процессе роста усталостной трещины необходимо учитывать влияние изменения режимов работы конструкции. Например, перерыв в нагружении объекта и связанные с ним релаксационные процессы в материале у вершины трещины приводят к тому, что в первом нагружении после перерыва трещина дает более высокий уровень АЭ, чем при непрерывном нагружении. Данное явление может быть положено

в основу методики выявления усталостных трещин в конструкциях без их дополнительного нагружения сверх рабочих нагрузок.

5. Существующие алгоритмы технического диагностирования нуждаются в пересмотре. Смещение приоритетов в диагностическом обслуживании от простого поиска дефектов к определению причин и динамики их развития должно стать первоочередной методологической задачей специалистов неразрушающего контроля. Решить поставленную задачу возможно путем увеличения доли АЭ контроля в диагностическом обеспечении оборудования газо-транспортных систем и построения новых алгоритмов технического диагностирования, в которых метод акустической эмиссии будет играть ведущую роль [5].

Перспективы развития

С самого своего появления метод АЭ ориентировался на то, чтобы максимально заменить трудоемкие традиционные методы неразрушающего контроля. Но сделать это возможно будет лишь в том случае, если изменения АЭ будут отслеживаться не разово (при очередном диагностическом обследовании), а постоянно в режиме мониторинга в реальном масштабе времени при эксплуатации контролируемой системы или объекта. Опыт применения таких систем нами изучается [6] и ведется работа по обоснованию их применения на объектах ОАО «Газпром».

Возможности мониторинговой системы достаточны для того, чтобы уже сейчас отказаться от большинства этапов существующего сейчас подхода к диагностическому обслуживанию оборудования компрессорных станций или объектов добычи газа.

Важнейшей перспективой как в развитии метода акустической эмиссии, так и всей диагностики, является построение системы комплексного мониторинга КС, подразумевающей непрерывный контроль всего технологического оборудования КС во время эксплуатации. Работы в этом направлении ведутся в ДОО «Оргэнергогаз». Внедрение таких систем позволит, наконец, окончательно перейти на эксплуатацию оборудования по фактическому техническому состоянию с минимальными издержками на диагностику.

Очевидно, применение метода акустической эмиссии будет значительно шире распространено на ряд других объектов, эксплуатируемых ОАО «Газпром». Это здания и сооружения, грузоподъемные механизмы, скважины, транспортные системы для перевозки сжиженного газа и пр.

Существующий опыт в ДОО «Оргэнергогаз» и в других организациях позволяет выполнять АЭ-контроль на ряде типовых объектов с высокой эффективностью при низких временных затратах. В ОАО «Газпром» эксплуатируется порядка 500 КС с оборудованием (прежде всего трубопроводами), выработавшим свой ресурс, и остро стоит вопрос о реконструкции многих объектов в связи с возросшими выше нормы объемами перекачки газа. Только использование метода акустической эмиссии гарантирует выполнение стоящих перед ОАО «Газпром» задач.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Р Газпром 2-2.3-398-2009. Рекомендации по проведению технического диагностирования сосудов, работающих под давлением, методом акустико-эмиссионного контроля, 2009.
2. Р Газпром 2-2.3-399-2009. Методика проведения экспертизы промышленной безопасности аппаратов воздушного охлаждения газа на КС, ДКС, КС ПХГ, СОГ ОАО «Газпром», 2009.
3. СТО Газпром 2-2.3-238-2008. Методика акустико-эмиссионного контроля переходов магистральных газопроводов через водные преграды, автомобильные и железные дороги, 2009
4. Трофимов Е. С., Зотов Д. А., Скворцов А. А. Результаты использования метода акустической эмиссии при проведении ресурсных испытаний для определения характера и развития дефектов.

- В кн.: Материалы тематического XXVIII семинара «Диагностика оборудования и трубопроводов компрессорных станций». Т. 1, 2010.
5. Нагинаев К. Е., Лапшин М. Б., Нагинаев Е. Н. и др. Новый подход к экспертизе промышленной безопасности технологического оборудования. – Там же. Т. 2, 2010.
 6. Харебов В. Г., Бородин Ю. П., Шапоров В. А. Система комплексного диагностического мониторинга опасных производственных объектов. – В мире НК. 2006. № 4(34). С. 13–17.

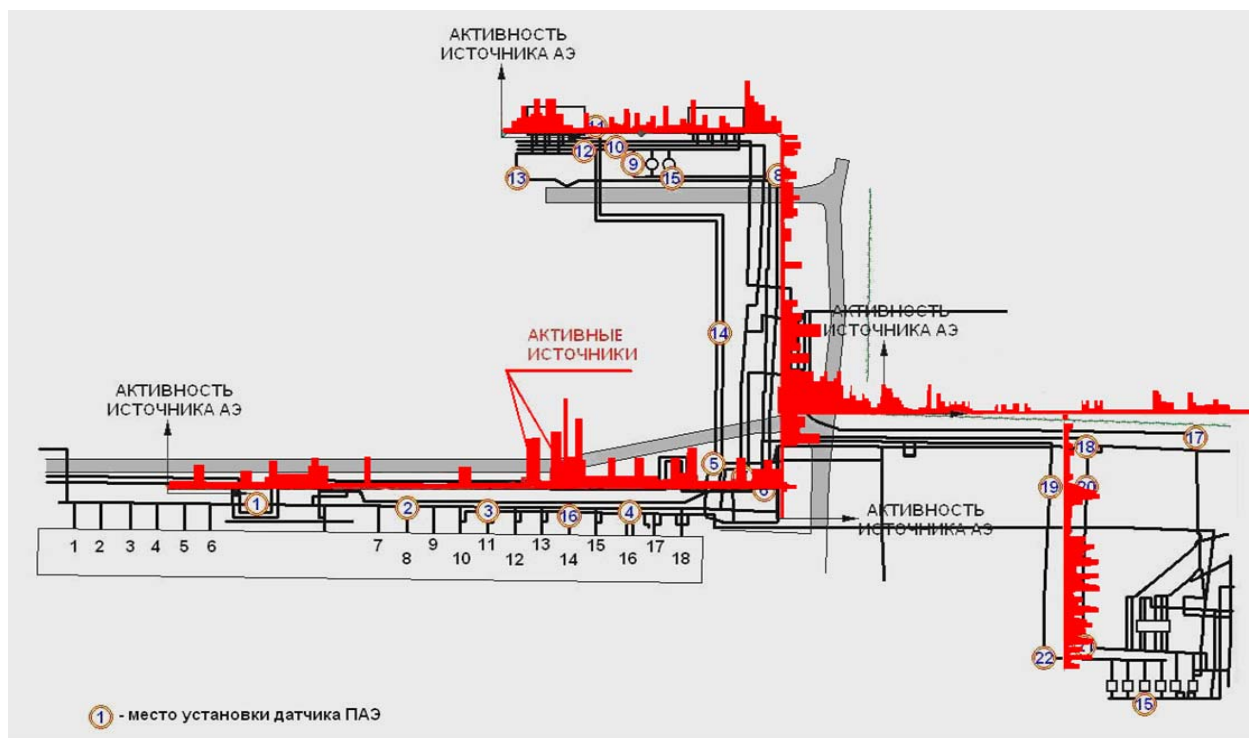


Рис. 1. Акустико-эмиссионный контроль трубопроводной обвязки КС «Майкопская»

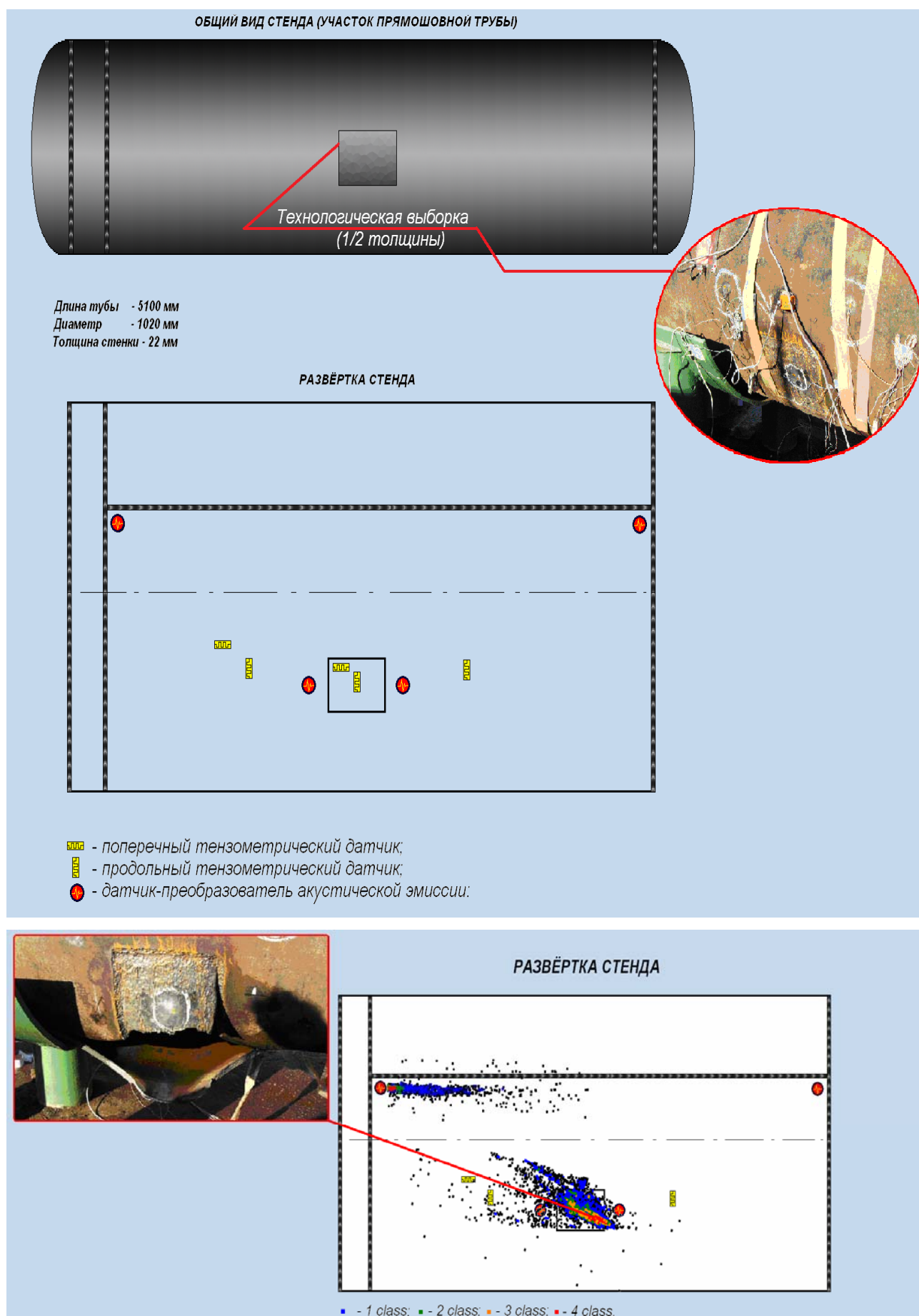


Рис.2. Схема и результаты АЭ-контроля прямошовной трубы с искусственным дефектом



Рис.3. Вид стенда для испытаний нагнетателя Н-370-18-1



Рис. 4. Проект комплексной системы мониторинга КС

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ ОАО «ГАЗПРОМ»

С. В. Каменский, Д. А. Зотов, К. Е. Нагинаев

ДОО «Оргэнергогаз», г. Москва

Опыт применения

Первые работы, основанные на использовании акустической эмиссии, появились еще в 1970-х гг. Метод оказался эффективным в авиации, атомной энергетике, строительстве, геологии, химической промышленности и т. д. Поскольку явление акустической эмиссии характерно для большинства структур и сред, метод стал востребованным и в газовой промышленности.

С принятием в России закона о промышленной безопасности ФЗ-116 в конце 1990-х гг. стала складываться нормативно-техническая документация, регулирующая, в том числе, и применение новых методов неразрушающего контроля. ГОСТ, определяющий понятие акустической эмиссии, был принят еще 1988 г., а первые правила АЭ контроля, появились в 1997 г. (РД 03-131-97).

К настоящему времени опыт применения метода акустической эмиссии есть, практически, на всех основных группах технологического оборудования, эксплуатируемого в ОАО «Газпром». Среди этого оборудования выделяют следующие группы:

- сосуды и аппараты, работающие под давлением;
- резервуары;
- технологические, промысловые и магистральные трубопроводы;
- запорно-регулирующая арматура;
- теплообменное оборудование.

ДОО «Оргэнергогаз» как головная организация по координации диагностических работ на объектах ОАО «Газпром» одним из первых начало применять метод акустической эмиссии на этих объектах. Первые экспериментальные попытки внедрить метод в практику диагностического обследования различного технологического оборудования с привлечением специалистов из других областей промышленности закрепились созданием временных методик, в которых были заложены основные подходы диагностирования соответствующих видов оборудования. Выход этих методик приходится на конец 1990-х гг., когда в Газпроме начинают развиваться отраслевые программы диагностического обслуживания: ДООКС, ДООДГ¹.

¹ ДООКС, ДООДГ – целевые программы ОАО «Газпром» диагностического обследования оборудования компрессорных станций (КС) и оборудования объектов добычи газа (ОДГ) соответственно

Фирмы, пропагандирующие метод АЭ, активно начали предлагать свои наработки, технологии и оборудование для выполнения диагностических работ в газовой промышленности. Наиболее сильные позиции, естественно, были у иностранных производителей: фирмы «ПАК» и «Валлен Систем». При отсутствии в то время в инженерно-технических центрах ОАО «Газпром» более-менее квалифицированных специалистов, способных грамотно использовать метод АЭ, затраты на покупку такого оборудования казались неэффективными. Фаза активного применения метода АЭ при диагностировании технологического оборудования ОАО «Газпром» началась, когда ДООАО «Оргэнергогаз» в 2001 г. закупило измерительный АЭ комплекс A-Line 16D, производимый ООО «ИНТЕРЮНИС». Апробация этого прибора на работах по техническому диагностированию оборудования с выявленными опасными дефектами показала его эффективность. Кроме того, грамотная техническая поддержка со стороны ООО «ИНТЕРЮНИС» сыграла ключевую роль в развитии крепких партнерских отношений между двумя организациями.

За счет развития программы ДООКС возросла потребность в использовании метода АЭ в работах по экспертизе промышленной безопасности различного технологического оборудования. Поначалу метод АЭ применялся как арбитражный метод НК – для принятия решения о выводе из эксплуатации оборудования – и использовался в крайних случаях. Но с 2005 г. началось массовое использование метода при диагностическом обследовании различных сосудов, работающих под давлением и аппаратов воздушного охлаждения (АВО) газа.

Если использование метода АЭ при сопровождении испытаний сосудов на прочность, обязательных в соответствии с действующими правилами эксплуатации сосудов, работающих под давлением, было желательным, но необязательным требованием программ экспертизы ПБ, то обследование АВО газа без использования метода АЭ было, фактически, невозможно. Дело в том, что АВО газа, как и сосуды, являются одним из самых массовых видов оборудования, эксплуатируемого ОАО «Газпром», но конструкция АВО газа контроленепригодна для основных методов неразрушающего контроля. Основная часть этого оборудования к началу 2000-х гг. выработала установленный в технической документации ресурс эксплуатации. Потребовалось в короткие сроки провести огромную работу по экспертизе и паспортизации оборудования.

Естественно, в таких условиях невозможно было соблюсти детальный подход при диагностировании каждого технического устройства, многие из которых невозможно было вывести даже на короткое время из рабочего режима. Чтобы решить эти задачи, ДООАО «Оргэнергогаз» на основании «Методики определения остаточного ресурса аппаратов воздушного охлаждения газа, эксплуатируемых на компрессорных станциях РАО «Газпром», разработанной еще в 1997 г. АО «ЛенНИИХиммаш», стало активно внедрять метод АЭ в программы ЭПБ АВО газа.

Надо отметить, что использование метода АЭ при обследовании АВО газа на практике не совсем соответствовало требованиям ПБ 03-593-03, так как нагружение АВО газа рабочим телом (т. е. газом) невозможно провести до давления выше рабочего: для этого пришлось бы переводить ГПА на другой режим работы или использовать какие-то другие компрессорные установки. Поэтому АЭ использовали не для сопровождения испытаний на прочность, а вместо них. Специалисты в области АЭ считали такой подход оправданным при соблюдении ступенчатой программы нагружения и использовании для оценки результатов контроля локально-динамического критерия.

При диагностировании сосудов, работающих под давлением, на объектах ОАО «Газпром» одна из самых сложных и неприятных задач, стоящих перед диагностами – реализация испытаний на прочность. Мало того, что, как правило, при подготовке к этим испытаниям постоянно возникают технические проблемы: нет нагружающего оборудования, воды, низ-

кие температуры окружающей среды, не держит запорная арматура и т. д. Любой специалист в области неразрушающего контроля знает, что нагружение испытательным давлением (в случае гидроиспытаний оно составляет 1,25 от рабочего) не является, строго говоря, методом неразрушающего контроля, а скорее наоборот: межатомные связи в материале объекта, сдерживающие развитие дефектов, ослабевают, что приводит к нежелательным процессам трещинообразований. Поэтому на практике специалисты ДОО «Оргэнергогаз» часто используют акустико-эмиссионный контроль отдельно от гидроиспытаний или пневмоиспытаний, заменяя их нагружением рабочим телом (газом) до рабочего давления, т. е. по той же схеме, что и АВО газа.

Приведенные отступления от определенных законом норм эксплуатации оборудования не могут не вызывать вопросов со стороны Ростехнадзора. До недавнего времени все эти вопросы решались в индивидуальном порядке – с конкретными объектами и конкретными инспекторами Ростехнадзора. С 2009 г. мы имеем отраслевые методики по диагностированию сосудов и АВО газа ([1, 2]), в которых закреплён подход, выработанный специалистами ДОО «Оргэнергогаз».

Распространение метода АЭ в газовой промышленности позволяет сделать выводы, которые должны быть поддержаны коллегами из других областей. Технологически система гидроиспытаний безнадежно устарела. Осмотр поверхности сосуда при гидроиспытаниях в поисках протечек, потений, слезок в сварных швах, вздутий и т. п. и менее качественен, и менее информативен, чем АЭ-контроль. Еще большие трудности в этом смысле возникают при испытаниях технических устройств больших размеров, таких как абсорберы и десорберы на УКПГ газовых промыслов или испарители на СОГ: площадь их поверхности более 70 м², а длина сварных швов – более 70 погонных метров. Последние, к тому же, являются двух- и трехконтурными, и осмотр теплообменных трубок, заключенных в наружный кожух, просто невозможен.

Конечно, на практике специалисты, выполняющие АЭ-контроль на реальном работающем оборудовании, часто сталкиваются с множеством проблем, заставляющих вносить коррективы в разработанные технологии и программы работ. Например, очень часто на объектах контроля, которые нужно изолировать от общей трубопроводной обвязки, не работает запорно-регулируемая аппаратура. Следовательно, невозможно соблюсти программу ступенчатого нагружения. Приходится «выкручиваться» – искать закономерности появления активных источников при плавном нагружении. Каждый специалист или творческий коллектив, работающие в этой теме, имеют свои собственные наработки и «ноу-хау», позволяющие принимать решение по результатам диагностики. Но несомненно одно: чем хуже диагностируемое оборудование с функциональной точки зрения, тем больше «перестраховки» закладывается в оценку технического состояния этого оборудования. Поэтому заказчик диагностических работ (в нашем случае это эксплуатирующие предприятия ОАО «Газпром») всегда несет излишние материальные затраты, когда требует провести экспертизу неработающего оборудования, что теоретически должно стимулировать его правильную эксплуатацию.

Диагностирование запорно-регулируемой арматуры – это поле, на котором метод АЭ может быть широко внедрен и уже используется специалистами ДОО «Оргэнергогаз». Сейчас метод часто применяют для определения течей во внутренних герметизирующих устройствах кранов, задвижек и т. п. Для этих целей достаточно двухканального прибора.

За время использования метода акустической эмиссии при диагностическом обследовании трубопроводов накопился достаточный опыт оценки технического состояния подобных объектов. В комплексе диагностических работ при переизоляции применение АЭ контроля позволяет часто избегать ненужных затрат на раскопку, очистку трубы и использование других методов контроля. Например, при продлении срока эксплуатации трубопроводов

цеха «Союз» в Сохрановском ЛПУ МГ ООО «Волгоградтрансгаз» в 2007 г. был проведен АЭ контроль входного шлейфа, поскольку косвенные признаки указывали на то, что покрытие трубы находится в удовлетворительном состоянии. Даже наличие «активных» источников (дефектов) в трубе позволяет эксплуатировать объект продолжительное время при выполнении рекомендаций специалистов: периодическом обследовании объекта тем же методом акустической эмиссии.

В 2005 г. специально для Майкопской КС ООО «Кубаньгазпром» была разработана программа комплексного диагностического обследования трубопроводной обвязки, где метод акустической эмиссии играл главную роль (рис. 1). С помощью него была дана оценка технического состояния обвязки КС, позволившая допустить станцию к эксплуатации, и принято решение о ежегодном АЭ-мониторинге обвязки.

Таким образом, обосновано, что применение метода акустической эмиссии при планировании ремонта трубопроводов КС существенно сократит затраты на эти цели.

Актуален метод акустической эмиссии при контроле переходов газопроводов через водные преграды, автомобильные, железные дороги, горные перевалы. Первый и пока единственный стандарт ОАО «Газпром» по акустической эмиссии является методикой по акустико-эмиссионному контролю таких переходов [3].

Можно выделить три основных направления использования метода АЭ применительно к оборудованию КС и ОДГ:

1. *Сопровождение испытаний объектов на герметичность и прочность с целью оценки качества проведенных строительно-монтажных и диагностических работ*, поскольку применение АЭ-контроля позволяет уйти от обязательного использования воды при испытаниях и использовать вместо нее газ или воздух.

2. *Использование АЭ-контроля для слежения (мониторинга) за участками трубопроводной обвязки, на которой были выявлены опасные дефекты*. Пример такого использования АЭ мы уже приводили выше – обвязка Майкопской КС.

3. *Мониторинг оборудования при эксплуатации в жестком режиме*, когда остановка работы может привести к значительным материальным издержкам. Такая проблема очень остро стоит на северных газодобывающих предприятиях, где вывод из эксплуатации «неисправного» с точки зрения действующих нормативов объекта на необходимое для ремонта время влечет срыв планов подачи газа основным потребителям.

Данное направление является перспективным для развития метода акустической эмиссии. Примеры мониторинговых систем на базе акустико-эмиссионного контроля уже есть².

Ресурсные испытания

Основной недостаток метода АЭ контроля связан с его сложностью – необходимостью подготовки высококвалифицированных кадров, умеющих грамотно интерпретировать отображаемые аппаратурой данные, полученные при контроле. Таких специалистов невозможно получить после двухнедельного или месячного курса занятий в аттестационном центре. Необходим опыт. Специалисты ДОАО «Оргэнергогаз», занимающиеся АЭ, принимают участие в наиболее сложных работах, в том числе в различных стендовых испытаниях, где производится апробация тех или иных методик контроля, изучаются механизмы разрушения конструкций.

ДОАО «Оргэнергогаз» уже публиковало основные результаты своих исследований, основанных на методе акустической эмиссии [4]. В течение последних пяти лет специалисты

² Например, системы комплексного мониторинга, предлагаемые ООО «ИНТЕРЮНИС»

общества проводили испытания разнообразного технологического оборудования, пытались установить закономерности в разрушениях конструкций от наличия дефектов и условий эксплуатации. Здесь мы приводим краткую информацию по проведенным работам.

2005 г. На территории Арзамасского ЛПУМГ ООО «Волготрансгаз» были проведены стендовые испытания трубопровода с искусственно нанесенными дефектами. Стенд представлял собой прямолинейный участок прямошовной трубы длиной 5100 мм, концы которой были заглушены. В центре стенда находился искусственный дефект, имитирующий сплошную коррозию – выборка основного металла на 1/2 толщины стенки в виде квадрата размерами 300 × 300 (рис. 2). Испытания проходили путем гидравлического нагружения по ступенчатой программе от нулевого давления до давления разрушения. Процесс испытаний сопровождался АЭ-контролем и тензометрией. Основные итоги испытаний: активные источники в области нанесенного дефекта появились при нагружении давлением от 20 до 74 кгс/см²; на давлении³ 94 кгс/см² начался процесс пластической деформации металла в зоне дефекта; разрушение стенда произошло на давлении 148 кгс/см² по нижней границе выборки. На примере данных испытаний специалисты ДОО «Оргэнергогаз» убедились в возможностях метода АЭ прогнозировать места разрушения задолго до начала необратимых процессов, ведущих к разрушению конструкции.

2005 г. Испытания трубопроводной обвязки компрессорного цеха на КС «Краснотурьинская» ООО «Тюментрансгаз». Основной задачей испытаний было определение соотношений между размерами дефектов и величиной внутритрубногo давления, при которых возникают остаточные неупругие эффекты деформирования. Уникальность испытаний заключалась в том, что работы проводились на реальном объекте с учетом действующих нагрузок от опорных систем и непроектного положения трубопроводов. Испытания проводились по программе циклических нагружений трубопровода водой. В программе нагружений было несколько циклов с различными испытательными давлениями (60, 75, 96, 120 кгс/см²). В ходе испытаний велись наблюдения за развитием дефектов трубопровода: как эксплуатационных, так и искусственно нанесенных. В ходе испытаний с помощью АЭ-контроля было установлено, что дефекты, геометрические размеры которых намного превышают допустимые нормы, не представляют опасности в том случае, если металл в области концентратора напряжений сохраняет свои пластические свойства. В этом случае сохраняется высокое значение вязкости разрушения, и для развития трещиноподобного дефекта требуется более высокое значение приложенной нагрузки. Таким образом, определено, что за период эксплуатации пластические свойства металла обвязки ухудшились незначительно.

2006 г. Испытания коллектора АВО газа фирмы «Хадсон» с дефектом металлургического происхождения. Необходимость проведения испытаний вызвана тем, что при обследовании коллекторов методами неразрушающего контроля были обнаружены многочисленные заводские дефекты в виде закатов. Коллектор был вырезан с АВО газа и оборудован в виде стенда. Работы проводились на базе ПТУ «Сургутгазэнергоремналадка». Особенность испытаний заключалась в том, что работы проводились на объекте с заводским дефектом, который имеет естественную пространственную ориентацию в направлении проката. В ходе проведения испытаний путем гидравлического нагружения использовались дистанционные методы контроля технического состояния стенда: тензометрия – для контроля уровня деформаций и акустическая эмиссия – для контроля развития дефектов. В ходе испытаний выявлено, что данный дефект металлургического происхождения, а именно, закатная плена, не влияет

³ Для справки : 75 кгс/см² – рабочее давление большинства оборудования и трубопроводов, 94 кгс/см² – пробное давление гидроиспытаний

на несущую способность коллектора АВО газа, АЭ-контроль не выявил наличия активных источников, как и не было обнаружено остаточных деформаций в области дефекта.

2007 г. Стендовые испытания технологии ремонта дефектов типа «смещение кромок» на базе ЛЭС Краснотурьинского ЛПУ МГ ООО «Тюментрансгаз». Испытанию подверглась конструкция, состоящая из двух тройниковых соединений с накладками (ТСН) 1420X26-1020×22, сваренных между собой со смещением кромок. Места смещения кромок были усилены специальными композиционными муфтами. Целью испытаний было обоснование целесообразности использования технологии ремонта с помощью композиционных муфт. Нагружение стенда происходило гидравлически по циклической программе (200 циклов). Далее проводилось ступенчатое нагружение до момента разрушения конструкции. Результатами испытаний стали: фиксация развивающихся дефектов конструкции, в которых впоследствии произошли разрушения. Ими оказались места приварки патрубков тройников. Разрушение стенда произошло именно в них на давлении 150 кгс/см². Сварные швы со смещением кромок оказались бездефектными по критериям метода АЭ.

2008 г. Испытания ТСН на производственной базе ЦПП «Газпром трансгаз Чайковский». Непосредственно перед проведением испытаний в местах сварных соединений тройника были нанесены искусственные дефекты в виде пропилов с недопустимыми геометрическими размерами. Помимо искусственных дефектов в ТСН при проведении ультразвукового контроля сварных соединений был обнаружен ряд дефектов, образовавшихся в период сборки и эксплуатации. Суммарный срок эксплуатации и хранения изделия на момент проведения испытаний составлял 30 лет. Гидравлические испытания стенда с ТСН проводилось в несколько этапов: 1) циклические нагружения до рабочего давления 75 кгс/см² с количеством циклом 500; 2) циклические нагружения до давления 94,5 кгс/см² с количеством циклом 100; 3) циклические нагружения до давления 112,5 кгс/см² с количеством циклом 100; 4) ступенчатое нагружение до 220 кгс/см². В ходе испытаний с помощью АЭ-контроля на ранних стадиях нагружения (до превышения рабочего давления) были определены области ТСН, в которых происходили активные процессы АЭ; зафиксирован момент начала пластической деформации в металле конструкции на давлении 140 кгс/см² – в этот момент источники АЭ достигли 4-го класса; доказана высокая степень безопасности АЭ-контроля и достоверности полученных данных: обследования вырезанных элементов тройника с выявленными активными дефектами выявили развитие этих дефектов. За время испытаний физического разрушения конструкции ТСН не произошло.

2009 г. Стендовые испытания корпусов нагнетателей Н-235-21-1 и Н-370-18-1 с целью продления ресурса до 300000 час на промплощадке РЕП Комсомольского ЛПУМГ ООО «Газпром трансгаз Югорск». Применение АЭ контроля было направлено на обнаружение дефектов и мониторинг их развития в ходе гидравлического нагружения по циклической программе (более 15000 циклов). Особенностью нагнетателей как объектов контроля является большая толщина стенки основного металла, сложность геометрии для построения локаций и несплошность конструкции, которая заключается в том, что она состоит из различных сборочных единиц. Стенд для проведения ресурсных испытаний корпусов нагнетателей (рис. 3) проектировался с применением автоматического управления нагнетания и сброса давления с учетом большого количества циклов. Главным управляющим звеном гидроиспытаний стала многофункциональная компьютерная программа, которая в процессе работы отслеживала сигналы датчика повышения и сброса давления. На основании получаемых данных она выдавала команды на электронный блок управления запорной арматурой. Программа учитывала целый спектр различной информации: повышение и сброс давления, количество циклов, время цикла, хронология событий и многое другое. Промежуточным звеном между программой и исполнительным механизмом служил контроллер, который с помощью ав-

томатов подавал питание на открытие или закрытие запорной арматуре. В ходе испытаний были получены следующие результаты: методом АЭ были зафиксированы развивающиеся дефекты – места крепления крышки корпуса нагнетателя, в то же время дефекты, обнаруженные до начала испытаний, развития не получили, что говорит о том, что накопленная концентратором напряжений энергия на момент окончания испытаний недостаточна для подрастания дефекта.

2010 г. Стендовые испытания участка магистрального трубопровода с дефектами эксплуатации типа КРН (коррозионное растрескивание под напряжением) на базе Моршанского ЛПУ МГ ООО «Газпром трансгаз Москва». Стенд представлял из себя 100-метровый трубопровод из 11 труб с заглушенными концами. Каждая труба имела на своем теле многочисленные дефекты КРН, вскрытые при внутритрубной диагностике магистрального газопровода. Глубина трещин КРН до начала испытаний достигала 4 – 5 мм. В местах дефектов КРН были установлены тензодатчики. Испытания проводились путем гидравлического нагружения циклически и по ступенчатой программе. При помощи АЭ-контроля отслеживались процессы роста дефектов, в первую очередь – начало процессов пластической деформации. Основная цель испытаний была апробация «стресс-метода» залечивания усталостных трещин. В моменты нагружения, когда происходил рост пластической деформации, давление резко снижали. Таким образом, снимались напряжения в развивающихся трещинах КРН, и при следующем нагружении они уже не росли. Метод АЭ сыграл основную роль в управлении процессом нагружения. Тем более что после начала пластической деформации – роста трещин КРН, тензометрия уже не работала: тензодатчики были порваны. Отслеживать процессы, происходящие в металле при многократном изменении напряженно-деформированного состояния, оказалось возможным только при помощи АЭ-контроля.

На основании результатов описанных ресурсных испытаний специалисты ДОО «Оргэнергогаз» делают выводы, подтверждающие теоретические основы метода АЭ:

1. Угроза развития дефекта определяется скоростью роста области деформированно-упрочненного металла в зоне концентратора напряжений и зависит от действующих нагрузок и состояния металла.

2. В условиях эксплуатации технологических трубопроводов и оборудования преобладает усталостный механизм развития дефектов. Именно развитие усталостных трещин от различных концентраторов напряжений представляет наибольшую опасность в условиях эксплуатации оборудования газотранспортных систем.

3. При развитии трещин по усталостному механизму проявляются две группы процессов, сопровождающиеся излучением АЭ. Первая группа связана с пластической деформацией: работа дислокационных источников любой природы, движение дислокаций, распад дислокационных комплексов, прорыв дислокационных скоплений через разнообразные границы и т. д. Вторая группа процессов базируется на регистрации сигналов вследствие подрастания трещин в результате когерентных микроразрывов в сплошном металле. Для каждой группы источников акустической эмиссии характерны свои индивидуальные параметры. С процессами пластической деформации в зонах концентрации напряжений, в том числе в вершине трещин, следует связывать низкоамплитудную АЭ, а с процессами распространения трещин, которые проявляются в виде когерентных микроразрывов и сопровождаются появлением новых поверхностей трещин, – высокоамплитудную АЭ.

4. При оценке результатов измерения АЭ в процессе роста усталостной трещины необходимо учитывать влияние изменения режимов работы конструкции. Например, перерыв в нагружении объекта и связанные с ним релаксационные процессы в материале у вершины трещины приводят к тому, что в первом нагружении после перерыва трещина дает более высокий уровень АЭ, чем при непрерывном нагружении. Данное явление может быть положено

в основу методики выявления усталостных трещин в конструкциях без их дополнительного нагружения сверх рабочих нагрузок.

5. Существующие алгоритмы технического диагностирования нуждаются в пересмотре. Смещение приоритетов в диагностическом обслуживании от простого поиска дефектов к определению причин и динамики их развития должно стать первоочередной методологической задачей специалистов неразрушающего контроля. Решить поставленную задачу возможно путем увеличения доли АЭ контроля в диагностическом обеспечении оборудования газо-транспортных систем и построения новых алгоритмов технического диагностирования, в которых метод акустической эмиссии будет играть ведущую роль [5].

Перспективы развития

С самого своего появления метод АЭ ориентировался на то, чтобы максимально заменить трудоемкие традиционные методы неразрушающего контроля. Но сделать это возможно будет лишь в том случае, если изменения АЭ будут отслеживаться не разово (при очередном диагностическом обследовании), а постоянно в режиме мониторинга в реальном масштабе времени при эксплуатации контролируемой системы или объекта. Опыт применения таких систем нами изучается [6] и ведется работа по обоснованию их применения на объектах ОАО «Газпром».

Возможности мониторинговой системы достаточны для того, чтобы уже сейчас отказаться от большинства этапов существующего сейчас подхода к диагностическому обслуживанию оборудования компрессорных станций или объектов добычи газа.

Важнейшей перспективой как в развитии метода акустической эмиссии, так и всей диагностики, является построение системы комплексного мониторинга КС, подразумевающей непрерывный контроль всего технологического оборудования КС во время эксплуатации. Работы в этом направлении ведутся в ДОО «Оргэнергогаз». Внедрение таких систем позволит, наконец, окончательно перейти на эксплуатацию оборудования по фактическому техническому состоянию с минимальными издержками на диагностику.

Очевидно, применение метода акустической эмиссии будет значительно шире распространено на ряд других объектов, эксплуатируемых ОАО «Газпром». Это здания и сооружения, грузоподъемные механизмы, скважины, транспортные системы для перевозки сжиженного газа и пр.

Существующий опыт в ДОО «Оргэнергогаз» и в других организациях позволяет выполнять АЭ-контроль на ряде типовых объектов с высокой эффективностью при низких временных затратах. В ОАО «Газпром» эксплуатируется порядка 500 КС с оборудованием (прежде всего трубопроводами), выработавшим свой ресурс, и остро стоит вопрос о реконструкции многих объектов в связи с возросшими выше нормы объемами перекачки газа. Только использование метода акустической эмиссии гарантирует выполнение стоящих перед ОАО «Газпром» задач.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Р Газпром 2-2.3-398-2009. Рекомендации по проведению технического диагностирования сосудов, работающих под давлением, методом акустико-эмиссионного контроля, 2009.
2. Р Газпром 2-2.3-399-2009. Методика проведения экспертизы промышленной безопасности аппаратов воздушного охлаждения газа на КС, ДКС, КС ПХГ, СОГ ОАО «Газпром», 2009.
3. СТО Газпром 2-2.3-238-2008. Методика акустико-эмиссионного контроля переходов магистральных газопроводов через водные преграды, автомобильные и железные дороги, 2009
4. Трофимов Е. С., Зотов Д. А., Скворцов А. А. Результаты использования метода акустической эмиссии при проведении ресурсных испытаний для определения характера и развития дефектов.

- В кн.: Материалы тематического XXVIII семинара «Диагностика оборудования и трубопроводов компрессорных станций». Т. 1, 2010.
5. Нагинаев К. Е., Лапшин М. Б., Нагинаев Е. Н. и др. Новый подход к экспертизе промышленной безопасности технологического оборудования. – Там же. Т. 2, 2010.
 6. Харебов В. Г., Бородин Ю. П., Шапоров В. А. Система комплексного диагностического мониторинга опасных производственных объектов. – В мире НК. 2006. № 4(34). С. 13–17.

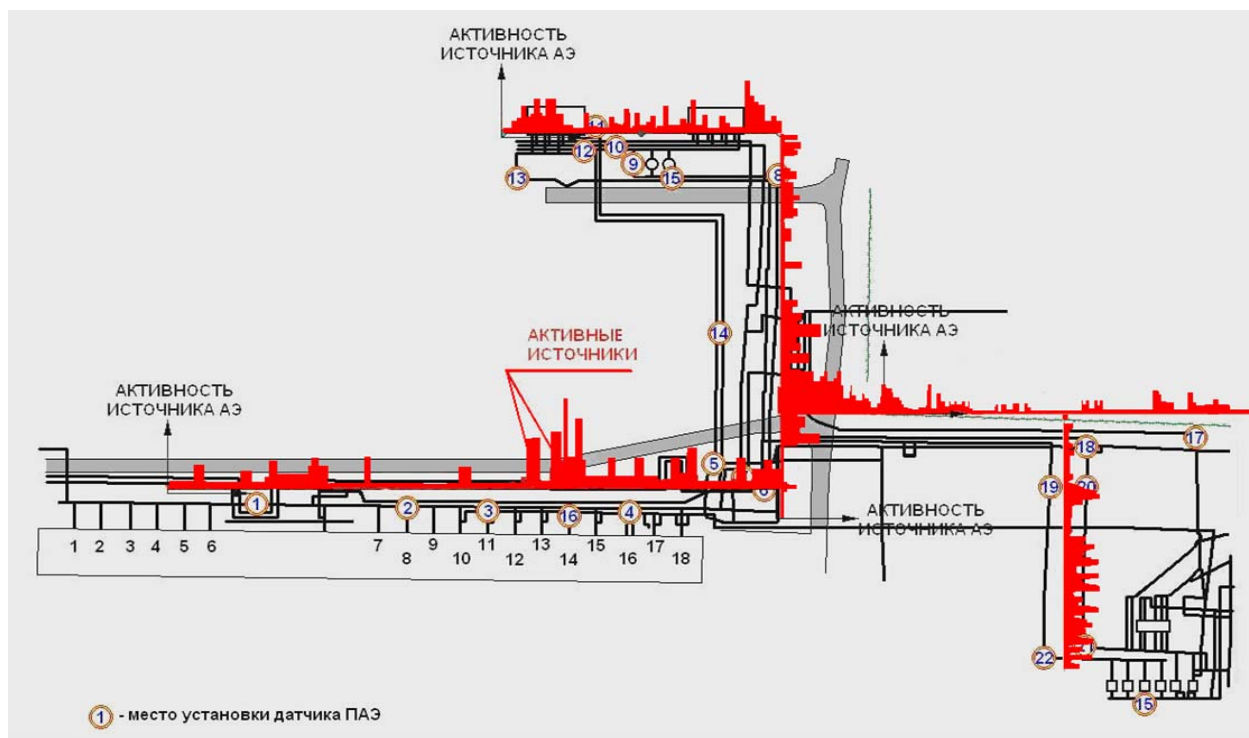


Рис. 1. Акустико-эмиссионный контроль трубопроводной обвязки КС «Майкопская»

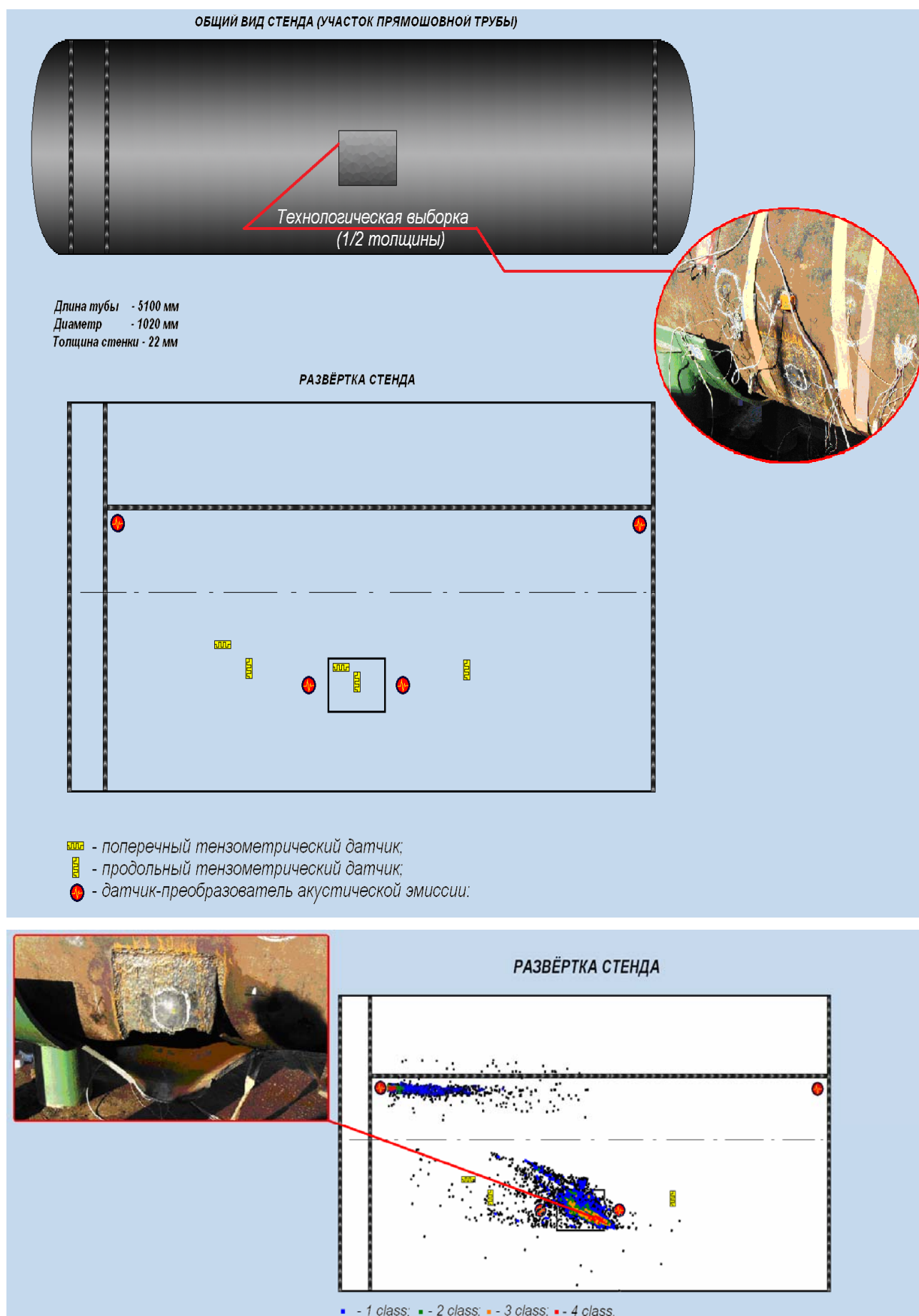


Рис.2. Схема и результаты АЭ-контроля прямошовной трубы с искусственным дефектом



Рис.3. Вид стенда для испытаний нагнетателя Н-370-18-1



Рис. 4. Проект комплексной системы мониторинга КС

О ВЫЯВЛЯЕМОСТИ ДЕФЕКТОВ В МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЯХ С ПРИМЕНЕНИЕМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

**К. В. Владимиров, А. И. Гневко, С. В. Гразион, О. Е. Зубов,
А. А. Сорокин, М. Б. Морозов**

ЗАО НПЦ «Эталон», г. Москва

Акустическая эмиссия (АЭ) продолжает оставаться одним из самых эффективных, а иногда, практически единственным процессом, который позволяет своевременно обнаруживать самое слабое место, самый опасный дефект, скрытый в металлоконструкциях под защитными покрытиями, кладкой, закрытый другими деталями, часто на значительных расстояниях от места установки контролирующих датчиков. Вместе с тем, применение эмиссии требует учета ее особенностей, отработки технологии, что во многих случаях проводится недостаточно. Недостаточная отработка приводит к тому, что снижается достоверность контроля, некоторые опасные дефекты могут остаться не выявленными или возникают сигналы АЭ, не связанные с развитием дефектов. Особую опасность представляет то, что некоторые дефекты могут определять остаточный ресурс и влияют на безопасность проведения испытаний металлоконструкций пробными нагрузками. Важным условием безопасности, которое позволяет во многих случаях заменять гидравлические испытания сосудов пневматическими, когда применяется АЭ, является возможность обнаружить заблаговременно развитие процесса разрушения и предотвратить его, снизив нагрузку. Нами были выполнены исследования, которые позволили установить некоторые, малоизвестные случаи, в которых условия безопасности могут не выполняться и АЭ не обеспечивает достаточно времени для снижения нагрузки.

Первый случай связан с гидравлическими испытаниями стальных баллонов. Контроль состояния баллонов осуществлялся методом АЭ в соответствии с ПБ 03-593-03. Целью испытаний являлась проверка запаса прочности баллона. После того, как давление в три раза превысило рабочее, достигло 1200 атмосфер, нагружение было остановлено. Сигналов АЭ ни по одному из двух независимых каналов не наблюдалось при четкой регистрации контрольного сигнала Су-Нильсона в самой удаленной от места установки датчика части баллона. Толщина стенки баллона составляла 30 мм. По известным характеристикам трещиностойкости стали баллона был проведен расчет критической глубины и длины трещины, которая в несколько раз превысила толщину стенки. В ходе испытаний на трещиностойкость АЭ позволяла обнаружить начало роста трещины при нагрузках порядка 50 % от разрушающей для образца. Тогда было принято решение: постепенно при снятом давлении проводить сверление с наружной стороны стенки (сверло диаметром 10 мм). При углублении на каждые 5 мм в баллон снова подавалось давление 1100 атмосфер. Сигналов АЭ не наблюдалось. Когда остаточная глубина толщины стенки в месте сверления составила примерно 1 мм, при очередном повышении давления сигналов АЭ не обнаруживалось вплоть до 600 атмосфер. При дальнейшем повышении давления был зарегистрирован мощный сигнал АЭ, и практически

мгновенно произошел прорыв жидкости в виде струи. Деформаций баллона вне места сверления не обнаружено. Особенностью места прорыва являлся характер действия давления, свойственный арочной конструкции. Разрушение арочной конструкции обычно наступает в связи с потерей устойчивости, что и имело место. Потеря устойчивости происходит лавинообразно и практически мгновенно. Таким образом, если дефект стенки сосуда, работающего под давлением, развивается снаружи, то контроль АЭ может не обеспечить достаточного времени для снижения нагрузки и предотвращения разрушения. Кроме того, могут остаться не выявленными коррозионные язвы на внешних частях трубопроводов и сосудов под кирпичной кладкой или теплозащитой, например, в котлах.

Другой пример недостаточной выявляемости дефектов в случае применения АЭ связан с особенностью поведения материала, содержащего трещину. Известно, что в большинстве случаев, чем выше прочность материала, тем меньше период от обнаружения роста трещины до окончательного разрушения. Поэтому при обследовании конструкций из высокопрочных материалов и для сварных соединений следует проверять возможность заблаговременного обнаружения разрушения. Вместе с тем, результаты испытаний относительно мягких алюминиевых образцов с трещиной, а также металлоконструкций и баллонов показали, что при традиционной методике АЭ начальное развитие разрушения или пластической деформации может не обнаруживаться вплоть до окончательного разрушения. Испытывались компактные образцы внецентренного растяжения с заранее созданной усталостной трещиной (тип 3 в соответствии с ГОСТ 25.506-85) толщиной 10 мм. Образцы изготавливались из полос сплава АМг 6, полученных прокаткой. Расположение трещин вдоль и по направлению прокатки. В ходе нагружения регистрировалась скорость счета АЭ в соответствии с ПБ 03-593-03. Сигнал АЭ обнаруживался при нагрузках, составлявших приблизительно 50 % от разрушающих. При дальнейшем увеличении нагрузки сигнал АЭ не превышал порогового уровня, т.е. не обнаруживался вплоть до 95% нагрузки от разрушающей. С увеличением нагрузки наблюдались лавинообразное развитие трещины и катастрофически активный сигнал АЭ, сопровождавший быстрое окончательное разрушение образца, при этом времени на снижение нагрузки практически не оставалось.

Изучение выявляемости развития трещин с контролем АЭ при испытаниях лабораторных образцов обеспечивает возможность использования в определенных случаях избыточной получаемой информации для сокращения расходов на проведение диагностирования. Примером служит способ проведения акустико-эмиссионного контроля с применением одноканальной аппаратуры [1, 2]. Сущность способа определяется тем, что одновременно с нагружением диагностируемого объекта производят периодический опрос датчиков АЭ, установленных в необходимом количестве на поверхности объекта. Датчики последовательно подключаются к одноканальному прибору при помощи мультиплексора – устройства, имеющего соответствующее число входных каналов для датчиков и выходной канал для подключения к прибору АЭ. Способ применяется в случае, если металлоконструкции объекта изготовлены из металла, пластическое деформирование и развитие трещин в котором сопровождается генерацией серий сигналов АЭ продолжительностью не менее периода опроса всех датчиков. Испытания компактных образцов внецентренного растяжения на трещиностойкость по ГОСТ 25.506-85 и стальных баллонов с заранее нанесенными концентраторами напряжений при ступенчатом нагружении показали, что сигнал АЭ, сопровождающий приращение трещины, длится не менее 20 с после приложения заданной для ступени нагрузки. Испытывались образцы из сталей с пределами прочности от 300 до 1200 МПа и толщиной от 5 до 30 мм. В случаях ступенчатого нагружения образцов до пластических деформаций при изгибе длительность генерации сигнала АЭ достигала 20 мин. АЭ регистрировалась 12-канальным мультиплексором, соединенным с прибором «Поиск-2М». Время опроса датчи-

ков не превышало одной секунды. Каждое приращение трещины или пластической деформации при увеличении нагрузки на 10 % четко обнаруживалось (регистрировалась скорость счета и амплитуда сигналов АЭ). Особенностью использования многоканального мультимплексора является нерегулярное обнаружение контрольного сигнала Су-Ниельсона в связи с его кратковременностью, что делает необходимым его повторение или применение более длительных контрольных сигналов. Применение способа позволяет на порядок снизить стоимость аппаратуры АЭ при проведении контроля сложных объектов, требующих одновременного использования большого числа датчиков.

Еще одной причиной, затрудняющей выявление недопустимого развития трещин при контроле АЭ, является наличие инкубационного периода, предшествующего их распространению. Как показали результаты испытаний стальных образцов на замедленное разрушение по ГОСТ 9.903-81 продолжительность инкубационного периода может превышать 10 суток. Поэтому применение АЭ для металлоконструкций из сталей, склонных к замедленному разрушению, определяет необходимость исследования влияния на выявляемость трещин продолжительности выдержек под нагрузкой на ступенях.

В отмеченных случаях для обеспечения эффективности метода АЭ требуется проведение отработки методики АЭ на лабораторных образцах материалов и реальных объектах, а также применения комплекса других методов разрушающего и неразрушающего контроля.

Вместе с тем, наряду с упомянутыми ошибками первого рода (не выявляются опасные дефекты) при применении метода АЭ могут наблюдаться курьезные ошибки второго рода (сигналы АЭ, не связанные с дефектами), которые не сразу удастся правильно истолковать. Например, при гидравлических испытаниях сосудов давление создавалось водой, которая в процессе испытаний была дополнена веретенным маслом. Всплывающее в воде при подаче в сосуд очередной порции жидкости масло вызывало сигналы АЭ, аналогичные помехам при дожде.

Другим примером служит влияние на АЭ растворимости газов под давлением в различных веществах. При пневматических испытаниях стального баллона возникли сигналы АЭ. Некоторое снижение нагрузки не привело к уменьшению сигнала, что могло свидетельствовать о его катастрофической активности. Нагрузка была снята полностью, но сигнал не прекратился и продолжался не менее получаса. Позднее было обнаружено наличие слоя ржавчины внутри баллона. После очистки баллона аномальные сигналы АЭ больше не возникали. Наиболее вероятной причиной возникновения сигнала являлось дополнительное растворение воздуха при повышении давления в капиллярной влаге, которую практически всегда содержит ржавчина.

Отмеченными случаями не исчерпывается все многообразие аномальных ситуаций, которые возникают при использовании метода АЭ. Но изложенный опыт может способствовать предотвращению ошибок, связанных с наблюдающимся в последние годы сокращением объема исследований процессов АЭ.

Литература

1. Гневко А. И., Лазарев Д. В., Казаков Н. А., Гразион С. В. Способ проведения акустико-эмиссионного контроля с применением одноканальной аппаратуры / Патент 2210766 РФ, № 2001134547/28. Заяв. 21.12.2001; опуб. 20.08.2003. Бюл. № 23.
2. Лазарев Д. В., Султановский В. И., Сорокин А. А. и др. Многоканальное устройство контроля акустической эмиссии / Патент 61458 РФ, № 2006139636/22. Заяв. 09.11.2006; опуб. 27.02.2007. Бюл. № 6.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

В. А. Барат, А. Н. Кузьмин*, М. Ю. Ростовцев

ООО «ИНТЕРЮНИС», г. Москва;

*Филиал «ИНТЕРЮНИС-Урал», Екатеринбург

Одной из проблем акустико-эмиссионного контроля является большое количество помех, влияющих на результаты диагностирования. Электрические шумы, электромагнитные наводки, фоновый акустический шум, шумы трения – далеко не полный перечень шумов, присутствующих при проведении измерений. При высоком уровне помех оператор вынужден повышать порог регистрации импульсов акустической эмиссии, снижая чувствительность контроля и рискуя пропустить опасный дефект. Отсутствие фильтрации данных может приводить к неверной локации и ошибочному определению степени опасности источника акустической эмиссии. Для повышения помехоустойчивости акустико-эмиссионного контроля необходимо применять алгоритмы фильтрации данных.

В системе A-Line 32D реализованы различные алгоритмы обработки АЭ сигналов, повышающие помехоустойчивость акустико-эмиссионного контроля:

- частотная фильтрация (КИХ и БИХ фильтры, фильтры с произвольной передаточной функцией);
- фильтры для удаления аддитивного белого шума;
- подавление импульсных помех.

Традиционная частотная фильтрация применяется в том случае, когда сигнал и помеха лежат в разных частотных диапазонах. Применение низкочастотных, высокочастотных, полосовых и режекторных фильтров позволяет выделять диапазоны частот, соответствующие диагностическому сигналу акустической эмиссии.

На базе цифровой фильтрации можно осуществлять при необходимости интегрирование и дифференцирование сигналов. Возможность задания произвольной формы передаточной характеристики фильтра позволяет осуществлять операцию деконволюции или обратной фильтрации, в результате которой происходит компенсация искажений, вносимых в сигнал измерительным трактом.

Фильтрация импульсных помех

Очень распространенными являются импульсные помехи – это разнообразные электрические и электромагнитные помехи (рис. 1а, б), возникающие в случае проблем с заземлением или при нарушении принципов электромагнитной совместимости.

Применение частотной фильтрации для удаления импульсных помех не приводит к приемлемому результату, поскольку помехообразные импульсные сигналы имеют широкий спектр, перекрывающийся со спектром сигнала акустической эмиссии. Для борьбы с импульсными помехами применяется медианная фильтрация. Одномерный медианный фильтр представляет собой скользящее окно, включающее нечетное количество отсчетов сигнала. Центральный отсчет заменяется медианой всех отсчетов в окне. При выборе окна фильтра-

ции, превышающим длительность импульсных составляющих помех, последние будут подавляться, в то время как энергия сигнала акустической эмиссии будет уменьшаться незначительно.

Медианная фильтрация также может помочь при фильтрации узкополосных амплитудно-модулированных помех (рис. 1в); в этом случае медианной фильтрации подвергается спектр сигнала. Спектр такого сигнала имеет явно выраженный одиночный максимум, который удаляется при медианной фильтрации спектра сигнала (1). Энергия узкополосной квазигармонической помехи при медианной фильтрации спектра уменьшается в сотни раз, в то время как энергия сигнала акустической эмиссии, который не имеет в спектре выраженных одиночных максимумов, меняется незначительно.

$$s(n) = (1/2\pi) \sum_{i=1}^N \text{median} [F(\Omega)] \exp \{-jn(2\pi i/N)\} \quad (1)$$

Фильтрация белого шума

После выделения в сигнале нужного диапазона частот и исключения импульсных помех нерешенной остается проблема исключения из реализаций сигналов акустической эмиссии аддитивного белого шума. Для фильтрации аддитивных случайных помех в системе A-Line 32D используется алгоритм вейвлет-фильтрации.

Алгоритм осуществляется на базе дискретного вейвлет-преобразования [1]. Сигнал акустической эмиссии представляется в виде набора детализирующих и аппроксимирующих коэффициентов, соответствующим различным значениям масштаба наблюдения (2).

$$s(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} A_{m',k} \phi_{m',k}(n) + \sum_{m=m'} \sum_{k=-\infty}^{\infty} D_{m,k} \psi_{m,k}(n), \quad (2)$$

где $\phi(n)$ – базисная функция последовательности ортогональных вложенных подпространств, а $\psi(n)$ – ее ортогональное дополнение.

Представление в виде вейвлет-декомпозиции является органичным для многокомпонентного сигнала акустической эмиссии, который представляет собой пакет различных волновых мод. Характеристики отдельных мод волнового пакета описываются коэффициентами детализаций и аппроксимаций.

Схема алгоритма показана на рис. 2. После расчета вейвлет-декомпозиции осуществляется пороговое ограничение коэффициентов детализации, а затем обратное восстановление сигнала [2].

Применение порогового алгоритма эквивалентно адаптивному сглаживанию. Когда нулю приравняются отсчеты коэффициентов детализации, соответствующие высокочастотным компонентам сигнала, осуществляется низкочастотная фильтрация сигнала. С другой стороны, обнуляются только те отсчеты, в которых доля высокочастотных составляющих относительно невелика (меньше порога); фрагменты сигнала, в которых высокочастотная составляющая превалирует, при этом не искажаются. Таким образом, осуществляется локальное селективное удаление высокочастотных шумовых составляющих.

Одним из ключевых вопросов применения алгоритма является правильный выбор порога. Допустим информативный сигнал акустической эмиссии $f(n)$ наблюдается на фоне аддитивного шума $\text{noise}(n)$, в результате преобразователь измеряет сигнал $s(n)$:

$$s(n) = f(n) + \text{noise}(n). \quad (3)$$

При выборе оптимального значения порога минимизируется функция риска, равная математическому ожиданию нормы разности функций $f(n)$ и функции $s(n)$ после пороговой обработки. Наиболее эффективным и распространенным является критерий оценки риска

SURE – Stein’s unbiased risk estimation [3]. Основным достоинством оценки SURE является то, что она не зависит от вида сигнала.

Пример вейвлет-фильтрации АЭ сигнала показан на рис. 3. Стационарный белый шум удален практически полностью, соотношение энергии сигнала и шума для импульса меньшей амплитуды увеличилось в пять раз.

Применение метода главных компонент для фильтрации АЭ данных

Особенную сложность для фильтрации представляют шумы, схожие по форме с сигналами акустической эмиссии. Это шумы, создаваемые различными механическими воздействиями – стуками, ударами посторонних предметов, осадками. Подобного рода шумы возникают также при нагревании контролируемого объекта и при различных гидродинамических явлениях, например, в результате кавитации.

Такие шумы ни по форме, ни по спектру не отличаются от сигналов акустической эмиссии. Поэтому для их фильтрации не применим ни один из описанных выше методов. Основным различием шумового процесса и процесса пластической деформации (процесса образования дефекта) является различная закономерность возникновения (регистрации) импульсов, характеризующих тот или иной процесс. Времена регистрации импульсов, соответствующих шумовому воздействию, распределяются квазиравномерно (как в случае стуков или осадков) или в соответствии с законом Пуассона (в случае кавитации или теплового воздействия). Импульсы, характеризующие активный источник акустической эмиссии, подчинены сложному закону распределения, параметры которого меняются по мере развития дефекта.

Для идентификации процессов с различным характером периодичности можно воспользоваться одним из методов анализа временных рядов – методом главных компонент. Метод главных компонент позволяет разделить сигнал акустической эмиссии, представленный в виде временного ряда, на несколько составляющих (компонент) – периодические составляющие, случайные вариации и тренд. В задаче интерпретации сигналов акустической эмиссии периодические составляющие характеризуют, как правило, детерминированные помехи, случайные вариации – случайные помехи, а импульсные составляющие характеризуют активность источника акустической эмиссии.

Предварительная обработка сигнала

Применение методов анализа временных рядов требует записи длинных реализаций сигналов акустической эмиссии. Длительность сигнала должна измеряться десятками минут, при этом объем регистрируемой информации составит десятки гигабайт. Анализ такого временного ряда неэффективен и непроизводителен.

Для уменьшения объема данных рекомендуется работать не с самим сигналом, а с его огибающей. Такая замена не приводит к снижению точности алгоритма, поскольку спектр сигнала, в данном случае, не является информативным. Огибающая характеризует низкочастотную часть сигнала, поэтому она может быть эффективно сжата при помощи вейвлет-преобразования. Степень сжатия данных зависит от степени сужения частотного диапазона. Если при выделении огибающей сигнала значение верхней частоты спектра уменьшилось в 8 раз, длительность огибающей можно уменьшить по сравнению с длиной исходного сигнала в 8 раз без существенных потерь информации.

На рис. 4а показан сигнал, полученный в результате имитации шума трения. На фоне периодического шума трения можно наблюдать импульс акустической эмиссии, пришедший от имитатора. На рис. 4б показана огибающая АЭ сигнала, сжатая в 1000 раз.

Описание метода

Метод главных компонент является методом многомерного анализа данных, но для анализа временных рядов учеными Санкт-Петербургского государственного университета, была разработана специальная его модификация – метод «Гусеница» [6]. Этот метод предполагает преобразование одномерного временного ряда (гусеницы) в набор временных рядов, представляющих собой множество фрагментов исходного сигнала (звеньев гусеницы), вырезанных скользящим временным окном. Длительность временного окна должна быть выбрана таким образом, чтобы успели проявиться все процессы: шумовые процессы и процессы пластической деформации.

$$X_i = (s_{i-1}, \dots, s_{i+L-2}). \quad (4)$$

Если параметры выбраны правильно, то в результате применения метода главных компонент сигнал разделяется на несколько компонент, характеризующих различные процессы, порожденные различными источниками, как шумовыми, так и источниками акустической эмиссии.

Для разделения временного ряда на компоненты вычисляется матрица ковариации $\mathbf{V}$ (5), вычисляются ее собственные числа и собственные вектора $\mathbf{P}$ (6), при разложении ковариационной матрицы по собственным векторам получается набор главных компонент временной реализации.

$$\mathbf{V} = (1/k)\mathbf{X}^T\mathbf{X} \quad (5)$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{P}\mathbf{L}\mathbf{P}^T, \quad (6)$$

Сами собственные вектора являются импульсными составляющими фильтров y_i , выделяющих различные составляющие процесса (7):

$$\mathbf{X}\mathbf{P} = \mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_M). \quad (7)$$

В частности, среди главных компонент можно выделить тренд, медленно меняющиеся составляющие, периодические компоненты и шум. Разложение сигнала акустической эмиссии на главные компоненты является информативным, т. к. позволяет получить представление о процессах, происходящих в контролируемом объекте.

На рис. 5 показан пример успешного применения метода главных компонент для фильтрации АЭ сигнала (рис. 4). В результате декомпозиции сигнала (7) оказывается, что периодический шум и полезный импульсный сигнал соответствуют различным компонентам разложения. Сигнал, показанный на рис. 5, восстановлен без учета периодических шумовых составляющих.

Заключение

В работе рассматриваются различные методы фильтрации данных акустической эмиссии. Описан алгоритм фильтрации импульсных помех при помощи медианного фильтра. Показана эффективность вейвлет-фильтрации для удаления белого стохастического шума. Также описан способ удаления шумов при помощи анализа временных рядов методом главных компонент.

Литература

1. Daubechies I. Ten lectures on wavelets. – Philadelphia: SIAM, 1992.
2. Donoho D. L. De-Noising by Soft-Thresholding. – IEEE Trans. Information Theory. 1995.V. 41. P. 613–627,
3. Mallat S. A wavelet tour of signal processing. 1999. – 673 p.
4. Айвазян С. А., Бухштабер В. М. Енюков И. С., Мешалкин Л. Д., Прикладная статистика. В 3-х томах. 1989.

5. Suzuki H., Kinjo T., Hayashi Y. et al. Wavelet Transform of Acoustic Emission Signals. – J. Acoustic Emission. 1996. V. 14. No .2. P. 69–84.
6. Метод «Гусеница»-SSA: прогноз временных рядов / Учеб. пособие. – СПб: Изд-во СПбГУ, 2004. – 52 с.

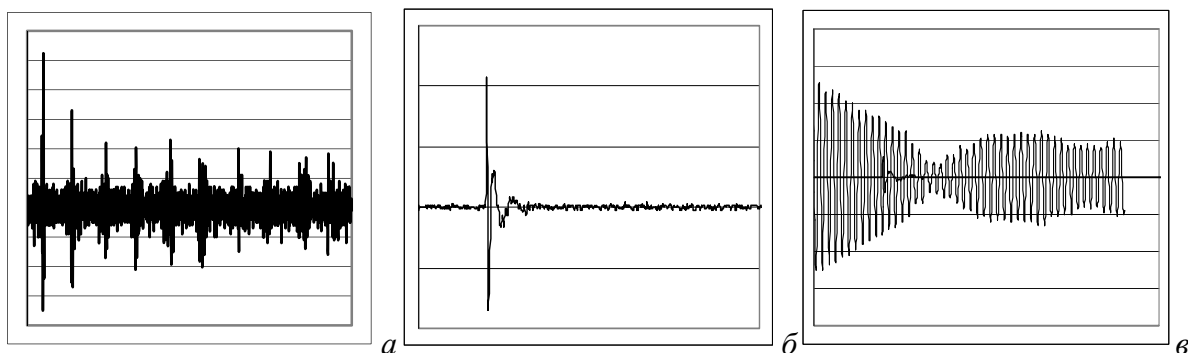


Рис. 1. Некоторые виды помехообразных сигналов: *а* – электромагнитная помеха; *б* – электрическая помеха; *в* – узкополосная гармоническая помеха

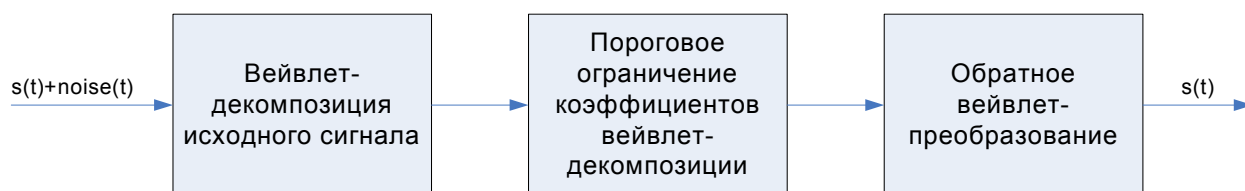


Рис. 2. Алгоритм вейвлет фильтрации

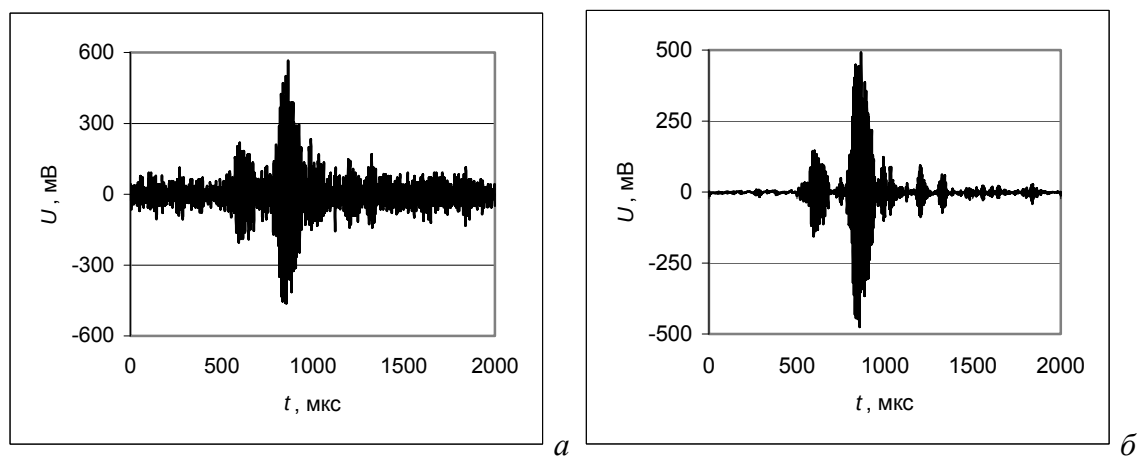


Рис. 3. Результат вейвлет-фильтрации: *а* – исходный АЭ сигнал; *б* – АЭ сигнал после вейвлет-фильтрации

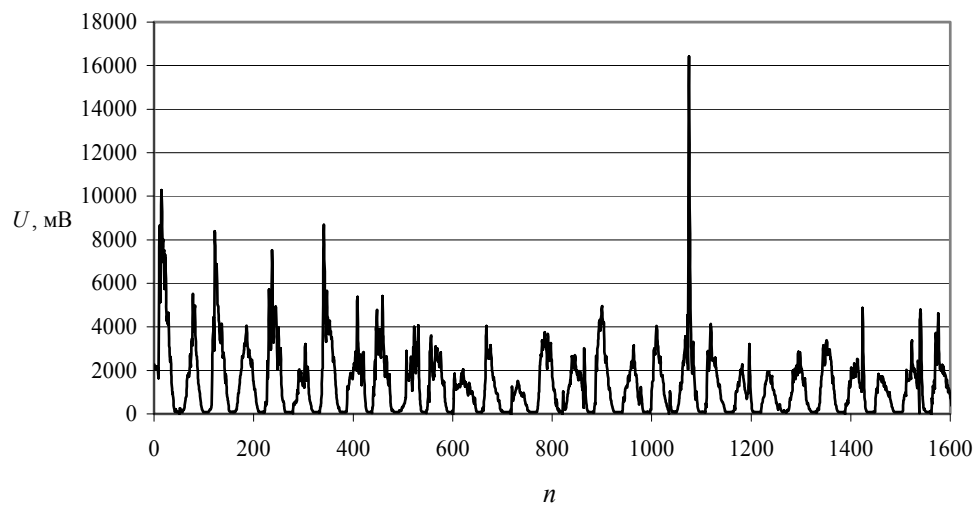
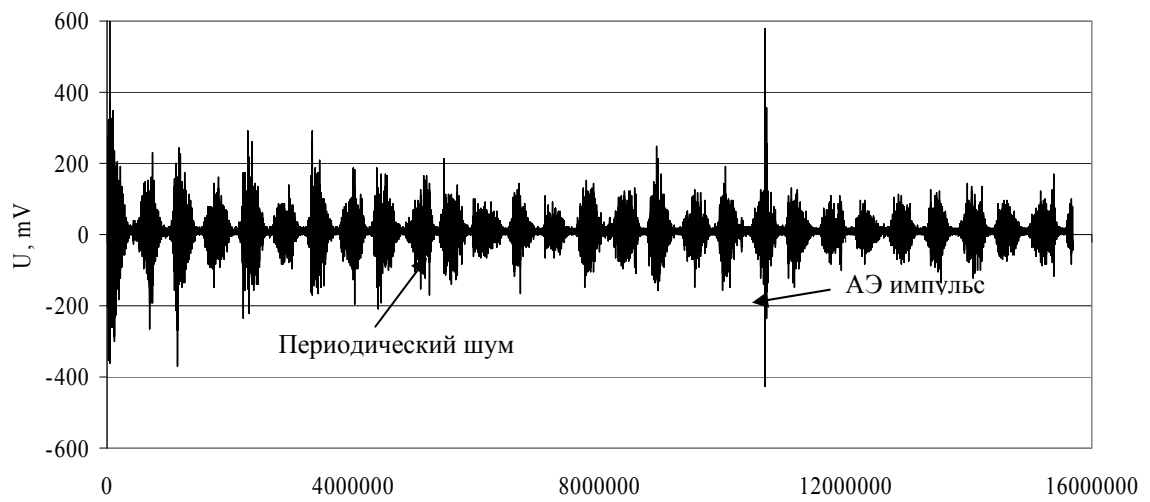


Рис.4. Зашумленный АЭ сигнал и его огибающая

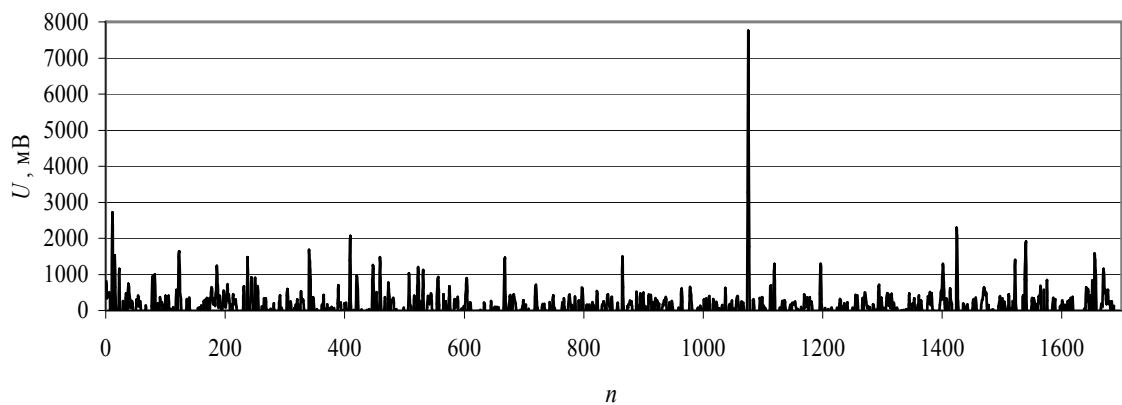


Рис. 5. Результат обработки АЭ сигнала

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СТАНДАРТОВ И РУКОВОДЯЩИХ ПРИНЦИПОВ. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА И ПЕРСПЕКТИВЫ

А. И. Сагайдак

НИИЖБ им. А. А. Гвоздева, г. Москва

Стандарты играют важную роль в обобщении результатов исследований и развитии сотрудничества в интеллектуальной, научно-технической и экономических областях. Грядущее вступление России во Всемирную торговую организацию диктует необходимость внедрения международных стандартов как эффективного инструмента повышения уровня безопасности жизни и здоровья граждан, имущества физических и юридических лиц, государственного и муниципального имущества.

Анализ отдельных стандартов и руководящих принципов по применению метода акустической эмиссии (АЭ), опубликованных международными, национальными и региональными организациями по стандартизации, а также деятельность некоммерческих государственных структур, позволяет нам дать оценку современному состоянию в стандартизации и определить основные области, где используется АЭ, а также установить перспективные направления ее дальнейшего использования.

Проведенный анализ показал, что метод АЭ широко применяется во многих странах мира в различных отраслях промышленности, научных исследованиях и широко стандартизирован. Статус организаций-разработчиков стандартов – от международных, таких как ISO, CEN, RELEM, AFNOR; региональных (CEN, EWCAE, DGZ1P, ASME, IEEE); национальных (ASTM, ASME, ANST, AENOR) до различных национальных рабочих групп по АЭ и отраслевых организаций, например, где документы по существу являются рекомендательными.

Основными органами, занимающимися разработкой стандартов и руководящих принципов по использованию метода АЭ являются:

Международные организации:

ISO – Международная организация по стандартизации;

RILEM – Международный союз лабораторий и экспертов в области строительных материалов, систем и конструкций.

Региональные организации:

EWGAE – Европейской рабочей группы по акустической эмиссии;

CEN – Европейский комитет по стандартизации.

Национальные организации:

ASTM – Американское общество по испытаниям и материалам;

ASME – Американское общество инженеров-механиков;

ANST – Американское общество по неразрушающему контролю;

AFNOR – Французская ассоциация по стандартизации;

DGZfP – Немецкое общество по неразрушающему контролю;

AAR – Ассоциация американских железных дорог;

IEEE – Институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике;

JIS – Японский институт по стандартизации;

Стандарты по акустической эмиссии можно условно отнести к четырем группам:

1. Терминология и определения по акустической эмиссии;
2. Общие положения по применению метода акустической эмиссии;
3. Методика измерений и калибровка датчиков акустической эмиссии;
4. Области применения и конкретные методики использования метода АЭ.

В табл. 1 приведены данные по количеству и группам стандартов по АЭ, разработанные различными международными, региональными, национальными организациями.

Терминология и определения

Терминология по АЭ приводится в различных международных региональных и национальных стандартах. ISO 1216 содержит 67 определений, стандарт ASTM E1316-02 раздел «В» содержит 65 определений, стандарт DGZfP SE-1 содержит 46 терминов, и Евронормы EN 1330-9 содержит 44 определения. В общей сложности 108 различных терминов приводятся в этих четырех документах. Китайский национальный стандарт GB/T 12604.4-2005 содержит 58 терминов по АЭ и в целом, этот стандарт соответствует соответствующему американскому стандарту.

Основная часть документа ISO1216 является идентичным стандарту ASTM E1316-02 за исключением некоторых деталей. Различие между этими двумя документами состоит в отсутствии некоторых определений в стандарте ISO. Общими для стандартов являются 13 терминов: акустическая эмиссия (АЭ), продолжительность сигнала, время нарастания сигнала АЭ, локационная группа датчиков, счет АЭ, непрерывная эмиссия, событие АЭ, время (интервал) прибытия, местоположение источника, зона местоположения, сигнал АЭ, пиковая амплитуда (сигнала), и волновая АЭ.

В различных документах даже общие термины отличаются в своем определении. ISO1216 и ASTM 1316-02 определяют «акустическую эмиссию» как «класс явлений, который производит переходные упругие волны в результате быстрого высвобождения энергии из локализованных источников и сами волны». Стандарт EN1330-9 определяет «акустическую эмиссию» как «переходные упругие волны, созданные в результате освобождения энергии в материале или некоторым процессом». ГОСТ Р 52727-2007 трактует термин «акустическая эмиссия» как «излучение волн напряжений при быстрой локальной перестройке структуры материала».

В сравнении определения термина «акустическая эмиссия» даже при том, что они являются технически правильными, так или иначе содержат кажущиеся неполными определения во всех документах (ISO, ASTM и или EN и ГОСТ Р, соответственно).

По количеству терминов национальный стандарт ГОСТ 27655-88 (содержит 15 терминов) требует существенного дополнения по терминологии.

Общие положения по применению метода акустической эмиссии

Европейский стандарт EN 473 и американский стандарт ASTM E543 устанавливают принципы в отношении аккредитации, квалификации и аттестации персонала и лабораторий выполняющий промышленный неразрушающий контроль. Стандарт EN 13554 определяет общие принципы использования АЭ. Этот документ содержит краткую информацию о акустико-эмиссионном методе контроля, а также преимущества и недостатки метода по отношению к другим неразрушающим методам испытаний. Приводятся область применения и материалы (металл, композиты, керамика, бетон и т. д.), где может использоваться метод АЭ.

Следует отметить, что область применения, представленная в стандарте, не в полной мере отражает современные возможности метода АЭ в неразрушающем контроле. Информация, приведенная в документе, ограничивается общими рекомендациями. Например, выбор приемника и рабочей частоты измерения, перечень факторов, которые влияют на датчик и выбор рабочей частоты измерений носят общий характер. ISO 22096 устанавливает общие принципы, необходимые для применения метода АЭ для контроля состояния и диагностики машин.

В описании к области применения ГОСТ Р 52727-2007 сказано, что данный нормативный документ устанавливает порядок применения акустико-эмиссионной диагностики при неразрушающем контроле, разрушающем контроле (исследовании), техническом диагностировании, техническом освидетельствовании, обследовании, экспертизе промышленной безопасности сложных технических систем (технических устройств, зданий, сооружений и их элементов, мостов, строительных конструкций и других объектов, разрушение которых наносит ущерб или ухудшает безопасность) с целью оценки соответствия их требованиям промышленной безопасности. Область применения ГОСТ охватывает практически все имеющиеся и перспективные направления, где может применяться метод АЭ. При подготовке стандарта ГОСТ Р 52727-2007 к сожалению не учитывался опыт зарубежных коллег и в нем не приводятся некоторые специфические понятия и термины, например, эффект Кайзера, эффект Фелисити, параметры сигнала АЭ и др. ГОСТ Р 52727-2007 не содержит ни одной ссылки на международные стандарты, а имеющиеся ссылки на нормативные документы не позволят людям с недостаточным опытом и квалификацией с успехом использовать метод АЭ для определенного класса задач и материалов. В этом случае желательно иметь ссылки на «второй уровень» документов, детализирующих процедуры для многих случаев испытаний, или, по крайней мере, предоставляющих детальные примеры в качестве директив того, как делать соответствующий выбор. Такие документы были бы полезны для людей с ограниченным опытом применения метода АЭ для определенного класса объектов и материалов.

Такие процедуры должны были быть развиты соответствующими техническими комитетами, имеющими дело с соответствующими результатами исследований и обобщением имеющегося опыта работы. Следует отметить работу технического комитета ТК212 РИМЕМ «Акустическая эмиссия и связанные с ней неразрушающие методы для обнаружения трещин и повреждений», который обобщил имеющийся опыт применения метода АЭ, опубликовал большое количество статей и выпустил несколько книг по мониторингу строительных конструкций. Разработано три проекта стандартов по мониторингу строительных конструкций методом АЭ.

Методика измерений и калибровка датчиков акустической эмиссии. Проверка работоспособности оборудования

Большая группа стандартов посвящена методам калибровки датчиков АЭ и измерению сигналов АЭ. Стандарты по калибровке датчиков АЭ подразделяются на стандарты, включающие в себя описание процедуры калибровки датчиков АЭ в лабораторных условиях (первичная и вторичная калибровка), и проверку датчиков в рабочих условиях.

Процедура калибровки датчиков АЭ описывается в ISO12713, ISO12714, E1106, E1781, E2075, DGZfP-SE2, DGZfP-SE3.

Международные стандарты ISO12713 и ISO12714, американские стандарты E1106, E1781 устанавливают методы первичной и вторичной калибровки акустических преобразователей. Стандарты призваны установить единообразие абсолютной калибровки датчиков АЭ для того, чтобы служить основой для корреляции данных, а также обеспечить интерпретацию результатов, полученных разными лабораториями в разное время.

Стандарт E976 является руководством по определению воспроизводимости датчиков АЭ и является простым и экономичным методом, позволяющим провести сравнение характеристик датчиков. Эта процедура не позволяет обеспечить абсолютную калибровку датчиков. Процедуры для проверки работоспособности АЭ оборудования в составе одного или нескольких каналов приводятся в EN13477. Стандарт призван оказать помощь операторам при подготовке АЭ оборудования к измерению и определению эксплуатационных характеристик измерительных систем. Методика генерации тестовых АЭ сигналов, проверка работоспособности оборудования, точность локационного измерения источника АЭ приводится в E2374. Американский стандарт E650 содержит рекомендации по пошаговой установке пьезоэлектрических датчиков на поверхность объектов контроля.

Области применения и конкретные методики применения метода АЭ

Анализ нормативных документов четырех организаций (ISO, CEN, ASTM и DGZfP) показывает, что большинство документов (8 из 24) посвящены АЭ контролю резервуаров для хранения жидкостей и газа или сосудов высокого давления. Полимерным материалам посвящено 7 стандартов, далее следуют металлы (6) и керамика (1). Методика конкретного применения метода АЭ рассматривается в 12 американских стандартах. К ним относятся следующие нормативные документы.

E569 регламентирует использование АЭ для контроля сосудов под давлением, трубопроводов и других сооружений, испытание которых производится с помощью повышения внутреннего давления или температуры. Основной задачей контроля этих сооружений методом АЭ является обнаружение, локация и классификация источников АЭ. Другие методы неразрушающего контроля могут использоваться для дальнейшей оценки значимости акустических сигналов.

E749 описывает процедуры использования метода АЭ для контроля качества сварных швов ходе непрерывной сварки как во время производства работ, так и после их окончания. Задача контроля – обнаружение разрывов и дефектов в свариваемой зоне.

E751 описывает процедуру применения метода АЭ в ходе точечной сварки.

E1067 описывает использование метода АЭ для неразрушающего контроля цистерн, сосудов под давлением, выполненных из стеклопластика на основе эпоксидных смол.

E1118 описывает применение метода АЭ для определения целостности термоизолированных труб.

E1139 описываются методы непрерывного мониторинга металлических сосудов, трубопроводов и других систем, находящихся под давлением.

E1211 описывается метод обнаружения и локализации протечек (газов и жидкостей) из систем, находящихся под давлением.

E1419 описывает применение метода АЭ для неразрушающего контроля бесшовных баллонов высокого давления (трубопроводов), которые используются для транспортировки (хранения) газа в промышленных условиях.

E1888 описываются методы обследования герметичных контейнеров из стекловолокна и армированного пластика с применением АЭ. Контейнеры такого типа обычно используются для цистерн, предназначенных для перевозки опасных химических веществ.

E1930 описывает принципы контроля надземных резервуаров для хранения жидкости.

E2076 описывается применение метода АЭ для испытаний армированных стекловолокном лопастей вентилятора. Этот тип лопастей используется в промышленных градирнях и теплообменниках.

E2191 описывает руководящие принципы для рассмотрения АЭ в волокно-композитных сосудах под давлением, Например, для топливных баков в транспортных средствах, использующих природный газ.

E2478 описывается использование АЭ в процессе тестирования образцов композитов.

Российский руководящий документ РД 50-447-83 устанавливает правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов; устанавливает требования, обеспечивающие организацию и проведение акустико-эмиссионного контроля объектов, подконтрольных Госгортехнадзору России, которые распространяются на проведение АЭ контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов, работающих при избыточном давлении. Документ содержит требования к организации работ исполнителям и порядок подготовки к выполнению акустико-эмиссионного контроля, требования к аппаратуре и оборудованию, определяет проведение контроля, обработку, анализ и оценку результатов контроля. В документе приводится система классификации источников АЭ.

Новые приложения применения метода АЭ

Большей частью коммерческого применения метода АЭ были и останутся процедуры контроля при тестовых нагрузках и оценке состояния цистерн и емкостей для перевозки и хранения нефтепродуктов, резервуаров для хранения сжиженного газа, сосудов давления и магистральных трубопроводов для транспортировки углеводородов. Перспективным направлением оценки состояния является кратковременное, длительное или постоянное наблюдение за техническим состоянием сложных промышленных объектов и технологического оборудования с использованием метода АЭ. С успехом метод АЭ применяется для оценки состояния и мониторинга строительных конструкций. В НИИЖБ им. А. А. Гвоздева разработаны критерии, позволяющие оценивать состояние конструкций по данным АЭ измерений и заблаговременно определять разрушающую стадию работы конструкции. Метод АЭ с успехом можно использовать для оценки состояния строительных конструкций при тестовом приложении нагрузки. Разработаны методики, позволяющие при помощи циклических нагружений неразрушающими методами оценить несущую способность закладных деталей. Накопленный опыт не нашел своего отражения в директивах или стандартах по АЭ.

На сегодняшний день в нашей стране и за рубежом не существует нормативных документов по применению метода АЭ в строительстве. Многочисленные исследования в строительстве с использованием метода АЭ для неразрушающего контроля показывают перспективность этого метода. Гражданские и инженерные сооружения (например, мосты, высотные здания, гидротехнические сооружения, атомные станции и т. д.) составляют класс тестовых объектов, для которых оценка структурной целостности методом АЭ может стать коммерчески успешным приложением.

Другой перспективной областью применения АЭ являются композитные материалы. Композитные материалы широко используются в автомобилестроении, авиационной и космических отраслях, требующих разработки новых процедур и оценки состояния конструкций из этих материалов и конструкций, усиленных этими материалами.

Перспективы будущей деятельности по стандартизации. Гармонизация стандартов

Хотя глобальное понятие типа «один стандарт, одно испытание признанное везде» все еще в стадии разработки, многое было достигнуто за последние несколько лет органами стандартизации на национальном, международном и региональном уровнях. Увеличение числа повсеместно принимаемых международных стандартов и схем по оценке соответствия

содействует росту международной гармонизации и сокращению потенциальных барьеров в торговле. Гармонизация дает возможность местным производителям иметь доступ на рынок ближайших и удаленных по миру партнеров. Доступ на рынок приносит дополнительные деньги и повышает занятость в местной экономике. Принятие законопроекта, разработанного на основе положений Федерального закона «О техническом регулировании» с учетом международного опыта в этой сфере деятельности, обеспечит гармонизацию законодательства о техническом регулировании с положениями Европейской Директивы. «Соблюдение российскими производителями требований Технического регламента в большинстве случаев будет означать соответствие оборудования, работающего под избыточным давлением, обязательным требованиям, установленным в странах ЕС, что будет способствовать устранению технических барьеров в области торговли между странами-членами ЕС и Россией, повышению конкурентоспособности отечественного оборудования на мировом рынке».

Закон «О техническом регулировании» предусматривает три уровня стандартов:

- Международный стандарт (МС = ГОСТ);
- Национальный стандарт (НС = ГОСТ Р);
- Стандарт организации (СТО) и Свод правил (СП).

Положения закона «О техническом регулировании» обуславливает использование международных стандартов как основу для разработки Российских национальных стандартов.

Прямое применение МС осуществляется по предложению потребителя, при условии, что в договоре имеется ссылка на конкретный международный стандарт. **Косвенное применение международного стандарта** осуществляется четырьмя способами:

1. Утверждением НС, **идентичного МС**. В этом случае НС представляет собой копию перевода на русский язык соответствующего МС, дополненного национальной обложкой без изменения структуры и технических отклонений (метод обложки);

2. Утверждением НС, **идентичного МС**. НС представляет собой аутентичный перевод соответствующего стандарта без изменения его структуры и технического содержания с идентифицированными дополнениями и изменениями (метод переиздания);

3. Утверждением НС, **модифицированного по отношению к МС**. НС представляет собой аутентичный перевод с учетом изменений ряда разделов, внесением новых разделов, пунктов, приложений или изменением структуры с указанием причин их внесения при условии, что измененная структура обеспечит сравнение двух стандартов;

4. Утверждением НС, **неэквивалентного МС**. НС представляет собой полный или частичный перевод с существенным изменением структуры МС в интересах экономики РФ.

Заинтересованным организациям и коллективам необходимо определить перечень международных стандартов, принятие которых необходимо в Российской Федерации. В первую очередь необходимо гармонизировать стандарты, касающиеся терминологии по АЭ, методики калибровки датчиков и АЭ систем. Важной и необходимой является разработка методических основ конкретного применения метода АЭ для решения прикладных задач, прежде всего в строительстве.

ПРИЛОЖЕНИЕ: ПЕРЕЧЕНЬ МЕЖДУНАРОДНЫХ, РЕГИОНАЛЬНЫХ И НАЦИОНАЛЬНЫХ СТАНДАРТОВ И РУКОВОДЯЩИХ ПРИНЦИПОВ ПО АЭ

ISO Международная организация по стандартизации

1. ISO 12713 Non-Destructive Testing – Acoustic Emission Inspection – Primary Calibration of Transducers.
2. ISO 12714 Non-Destructive Testing – Acoustic Emission Inspection – Secondary Calibration of Acoustic Emission Sensors.
3. ISO 12716 Non-Destructive Testing - Acoustic Emission Inspection – Vocabulary
4. ISO/DIS 16148 Gas Cylinders – Refillable Seamless Steel gas Cylinders – Acoustic Emission Examination (AEE) for Periodic Inspection.
5. ISO 18436-6 Condition monitoring and diagnostics of machines – Requirements for qualification and assessment of personnel – Part 6: Acoustic emission.
6. ISO 22096 Condition monitoring and diagnostics of machines – Acoustic emission.

CEN – Европейский комитет по стандартизации

1. EN 473 Non destructive testing - Qualification and certification of NDT personnel – General principles.
2. BS EN 1330-9:2009, Non-Destructive Testing – Terminology – Part 9, Terms Used in Acoustic Emission Testing.
3. BS EN 13477-1:2001, Non-Destructive Testing – Acoustic Emission – Equipment Characterization – Part 1, Equipment Description.
4. EN 13477-2, Non-Destructive Testing – Acoustic Emission – Equipment Characterization – Part 2, Verification of Operating Characteristics.
5. EN 14584, Non-Destructive Testing – Acoustic Emission – Examination of Metallic Pressure Equipment during Proof Testing; Planar Location of AE Sources.

ASTM – Американское общество по испытаниям и материалам

1. E569 Standard Practice for Acoustic Emission Monitoring of Structures during Controlled Stimulation.
2. E650 Standard Guide for Mounting Piezoelectric Acoustic Emission Sensors.
3. E749 Standard Practice for Acoustic Emission Monitoring During Continuous Welding.
4. E750 Standard Practice for Characterizing Acoustic Emission Instrumentation.
5. E751 Standard Practice for Acoustic Emission Monitoring During Resistance Spot-Welding.
6. E976 Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensors Response.
7. E1067 Standard Practice for AE Examination of Fiberglass Reinforced Plastic Resin (FRP).
8. E1106 Standard Method for Primary Calibration of Acoustic Emission Sensors.
9. E1118 Standard Practice for Acoustic Emission Examination of Reinforced Thermosetting Resin Pipe (RTRP).
10. E1139 Standard Practice for Continuous Monitoring of Acoustic Emission from Metal Pressure Boundaries.
11. E1211 Standard Practice for Leak Detection and Location Using Surface-Mounted Acoustic Emission Sensors.
12. E1316-05 Nondestructive Examinations.
13. E1419 Standard Test Method for Examination of Seamless, Gas-Filled, Pressure Vessels Using Acoustic Emission.
14. E1495 Standard Guide for Acousto-Ultrasonic Assessment of Composites, Laminates, and Bonded Joints.
15. E1736 Standard Practice for Acousto-Ultrasonic Assessment of Filament-Wound Pressure Vessels.

16. E1781 Standard Practice for Secondary Calibration of Acoustic Emission Sensors.
17. E1888 Standard Test Method for Acoustic Emission Examination of Pressurized Containers Made of Fiberglass Reinforced Plastic with Balsa Wood Cores.
18. E1930 Standard Test Method for Examination of Liquid Filled Atmospheric and Low Pressure Metal Storage Tanks Using Acoustic Emission.
19. E1932 Standard Guide for Acoustic Emission Examination of Small parts.
20. E2075 Standard Practice for Verifying the Consistency of AE-Sensor Response Using an Acrylic Rod.
21. E2076 Standard Test Method for Examination of Fiberglass Reinforced Plastic Fan Blades Using Acoustic Emission.
22. E2191 Standard Test Method for Examination of Gas-Filled Filament-Wound Composite Pressure Vessels Using Acoustic Emission.
23. E2374 Standard Guide for Acoustic Emission System Performance Verification.
24. E2478 Standard Practice for Determining Damage-Based Design Criteria for Fiberglass Reinforced Plastics (FRP) materials, Using Acoustic Emission.
25. E2598 Standard Practice for Acoustic Emission Examination of Cast Iron Yankee and Steam Heated Paper Dryers.

ASME – Американское общество инженеров-механиков

1. Acoustic Emission Examination of Fiber-Reinforced Plastic Vessels, Article 11, Subsection A, Section V, Boiler and Pressure Vessel Code.
2. Acoustic Emission Examination of Metallic Vessels During Pressure Testing, Article 12, Subsection A, Section V, Boiler and Pressure Vessel Code.
3. Continuous Acoustic Emission Monitoring, Article 13 Section V.

ASNT – Американское общество по неразрушающему контролю

1. ANSI/ASNT CP-189, ASNT Standard for Qualification and Certification of Nondestructive Testing Personnel.
2. CARP Recommended Practice for Acoustic Emission Testing of Pressurized Highway Tankers Made of Fiberglass reinforced with Balsa Cores.

AAR – Американская ассоциация железных дорог

1. Procedure for Acoustic Emission Evaluation of Tank Cars and IM-101 tanks, Issue 1, and Annex Z thereto, “Test Methods to Meet FRA Request for Draft Sill Inspection program, docket T79.20-90 (BRW)”, Preliminary 2.

JIS – Японский институт по стандартизации

1. JIS Z 2342, Methods for Acoustic Testing of Pressure Vessels during Pressure Tests and Classification of Test Results.

JSNDI – Японское общество по неразрушающему контролю

1. NDIS 2106-79, Evaluation of performance Characteristics of Acoustic Emission Testing Equipment.
2. NDIS 2109-91, Methods for Absolute calibration of Acoustic Emission Transducers by Reciprocity Technique.
3. NDIS 2412-80, Acoustic Emission Testing of Spherical Pressure Vessels of High Tensile Strength Steel and Classification of Test Results.
4. NDIS 2421 Recommendation Practice for In Situ Monitoring AE of Concrete Structures by AE.

Китайские национальные стандарты

1. GB/T 12604.4-2005 Non-destructive testing -Terminology - Terms used in acoustic emission testing.
2. GB/T 19800-2005 Non-destructive testing - Acoustic emission inspection -Primary calibration of transducers.

3. GB/T 19801-2005 Non-destructive testing - Acoustic emission inspection -Secondary calibration of acoustic emission sensors.

Национальные и ведомственные нормативные документы России

1. ГОСТ 25.002-80 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения.
2. ГОСТ 92-1500-84. Контроль неразрушающий. Сварные конструкции при прочностных испытаниях. Акустико-эмиссионный метод.
3. ГОСТ Р52727-2007 Акустико-эмиссионная диагностика Общие требования.
4. ГОСТ 27655-88. Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения.
5. ГОСТ 25.002-80. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения.
6. ПБ 03-593-03 Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов.
7. РД 50-447-83. Общие положения и испытания на прочность. Акустическая эмиссия. Общие положения. – М.: Изд-во стандартов, 1984.
8. РД 03-300-99. Требования к преобразователям акустической эмиссии, применяемым для контроля опасных производственных объектов.
9. МР 204-86. Расчеты и испытания на прочность. Применение метода акустической эмиссии для контроля сосудов, работающих под давлением, и трубопроводов. – М.: Госстандарт. ВНИИНМАШ, 1988.
10. МИ 1786-87. ГСИ. Основные параметры приемных преобразователей акустической эмиссии. Методика выполнения измерений. – Госстандарт. НПО Дальстандарт. 1987.
11. МИ 207-80. Методика определения местоположения развивающихся дефектов акустико-эмиссионным методом. Госстандарт. – НПО Дальстандарт. 1980.
12. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением. – М.: Металлургия, 1989.

Табл. 1. Нормативные документы по АЭ разработанные различными организациями

Наименование организаций	Всего документов	Терминология и определения	Общие положения по применению	Методика измерения и калибровка датчиков	Область применения и конкретные методики использования
ASTM	30	1	3	7	17
ISO	4	1	0	2	1
CEN	6	1	2	2	1
EWGAE	5	1	1	1	2
AENOR	6	1	2	1	2
DGZfP	4	1	0	3	0
Ростехрегулирование	2	1			1

АЭ МОНИТОРИНГ ЦИКЛИЧЕСКИ НАГРУЖЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Е. Ю. Нефедьев

НПО ЦКТИ им. И. И. Ползунова, Санкт-Петербург

Традиционные методы неразрушающего контроля (НК) способны проконтролировать лишь отдельные элементы, например сварные швы, и не позволяют оценить работоспособность всего объекта. Для контроля процесса разрушения конструкций в процессе эксплуатации или испытания из всех известных на настоящий момент методов НК наиболее приемлем метод АЭ [1]. Однако существующие критерии для оценки стадии разрушения методом АЭ недостаточно ясно отражают физическую сущность контролируемого процесса. Решение этой проблемы возможно лишь на основе всестороннего исследования различных механизмов разрушения. Методологической основой решения такой задачи являются представления о том, что макроскопическому разрушению предшествует процесс зарождения микротрещин, их укрупнения, и на основе этого формирования очага разрушения, развитие которого и завершает общий процесс разрушения [2]. Мы рассмотрим основные и наиболее опасные механизмы разрушения: статическое разрушение, циклическое разрушение и коррозионное растрескивание.

Статическое разрушение

На базе кинетического описания процесса разрушения и двух стадийного характера его протекания во времени была предложена модель разрушения конструкционных сталей и методика определения прогностического признака начала формирования очага макроскопического разрушения.

Наши исследования [3] показали, что основным источником сигналов акустической эмиссии в конструкционных сталях являются микротрещины. Для того чтобы по анализу сигналов АЭ судить о состоянии конструкций, проведены тщательные количественные металлографические исследования.

Объединение трещин приводит к отклонению от логарифмически нормального распределения их по размерам. Это приводит к увеличению дисперсии (или стандартного отклонения) распределения трещин по размерам. Поэтому момент времени начала увеличения дисперсии распределения трещин по размерам можно принять за начало образования очага разрушения, т. е. за предвестник макроскопического разрушения материала.

Связь размеров микротрещин с амплитудой сигналов АЭ в конструкционных сталях подробно и последовательно изучена в работе [4] с применением методов механических испытаний, количественной металлографии, акустической эмиссии и математической статистики. Вычисление первообразной интегралов позволило найти функциональную связь между амплитудой и длиной микротрещины в виде степенного уравнения с показателем степени равным 1,5.

$$A = f_1(L). \quad (1)$$

Это свидетельствует о том, что энергия, выделяемая микротрещиной, которую находят как квадрат амплитуды, пропорционально разрушенному объему, в котором она была запасена. Полученная таким образом функциональная зависимость между размером микротрещины и амплитудой генерируемого ею сигнала позволяет дистанционно контролировать размеры образующихся микротрещин и по ним судить о характере разрушения.

Следует отметить, что предложенный критерий начала формирования очага разрушения не связан с размерами зоны, излучающей АЭ, и, в довольно широких пределах, – с маркой стали, из которой она изготовлена. Это позволяет использовать его как при изучении разрушения образцов, так и при контроле состояния стальных конструкций. Полученные результаты использованы при изучении закономерности формирования очага разрушения в конструкционных сталях: 22К, 08ГДНФЛ, 25Х1МФ, 25ХНЗМФА и др. Подтверждена работоспособность предложенного критерия.

Циклическое разрушение

Весьма успешным оказалось применение данного подхода и при изучении циклического разрушения образцов с трещинами [5].

Мы провели серию исследований по изучению связи различных параметров сигналов АЭ со скоростью роста усталостной трещины на образцах на внецентренное растяжение различной толщины. Толщина образцов менялась от 10 до 150 мм. Была получена линейная связь между величиной стандартного отклонения амплитудного распределения сигналов АЭ (S_A) и скоростью роста (V) усталостной трещины на линейном участке Пэриса диаграммы циклического разрушения.

$$V = f_2(S_A). \quad (1)$$

В данных экспериментах, кроме того, подтвердилась справедливость полученной ранее связи (1) между размером микротрещин и амплитудой сигналов АЭ. Для этого на разных стадиях продвижения усталостной трещины вырезались образцы для фрактографического исследования. Сопоставлялись распределения размеров хрупких фасеток на поверхности усталостной трещины (рис. 1), выявленных на растровом электронном микроскопе PSEM-500, с амплитудами сигналов АЭ, зарегистрированными при продвижении фронта усталостной трещины в данном месте.

Весьма показательно можно проиллюстрировать применимость данной возможности определять скорость роста усталостной трещины по параметрам амплитудного распределения сигналов АЭ при исследовании усталостного разрушения образца, содержащего две естественные трещины.

Плотность распределения сигналов АЭ по длине образца показывает, что методом АЭ четко локализованы координаты двух имеющихся дефектов. При этом необходимо отметить, что первый дефект (большой по размеру) во время нагружения излучает примерно вдвое меньше сигналов, чем второй. Исходя из этого можно предположить его меньшую потенциальную опасность. Это находит свое подтверждение на рис. 2, где показана относительная скорость роста этих дефектов во время циклического нагружения, вычисленная по данным АЭ с помощью формулы (2).

Из рисунка видно, что за 60 тыс. циклов нагружения скорость роста первого дефекта выросла от 4 до 5 относительных единиц. За это же время второй дефект развивался с большей скоростью, и его скорость возросла с 5 до 9 относительных единиц. Из этого можно делать выводы о том, что метод АЭ может выявлять развитие реальных дефектов в сталях и предсказывает двумя способами большую опасность второго дефекта. Это свидетельствует о большем коэффициенте интенсивности напряжений в вершине меньшей трещины.

После 60 тыс. циклов усталостного испытания данный образец был разрушен статически. Как мы и предполагали, образец разрушился по трехмиллиметровой трещине. Необходимо еще раз подчеркнуть, что трещины в данном исследовании были не искусственного, а реального происхождения. Поэтому данные результаты не опровергают основ механики разрушения, а лишь свидетельствуют о том, что природные трещины могут различаться степенью остроты концентратора. Этот пример подчеркивает преимущества метода АЭ перед традиционными методами НК, которые определяют геометрические размеры дефекта, а не степень истинной его опасности.

В дальнейшем мы использовали данную методику в нашей системе АЭ мониторинга состояния станин стана 5000 – самого большого прокатного стана Европы (рис. 3).

Мы определили безопасное усилие, при котором трещины не развивались. Но прокатка листов при данном усилии была невозможна. Поэтому с помощью данной методики мы в течение 8 лет успешно следили за развитием двух кольцевых трещин длиной по 1,5 м и глубиной до 40 мм и вовремя предупредили о скачкообразном возрастании скорости роста данных трещин (рис. 4).

Выводы

Данное исследование показывает, что три наиболее важных случая разрушения: статическое, циклическое и коррозионное растрескивание под напряжением могут быть проанализированы методом АЭ в рамках одной модели двух стадийного разрушения. Основные закономерности объясняются образованием микротрещин под действием напряжений. Размеры микротрещин связаны с размерами структурных элементов – зерен. Амплитуды сигналов АЭ напрямую связаны с размерами образующихся микротрещин. По величине стандартного отклонения амплитудного распределения сигналов АЭ можно рассчитать скорость роста усталостной трещины и тем самым оценить степень опасности различных дефектов в стальных конструкциях.

Литература

1. ASTM E569-85. Standard recommended practice for acoustic emission monitoring of structures during controlled stimulation.
2. Нефедьев Е. Ю. Прогнозирование разрушения элементов стальных конструкций методом акустической эмиссии / Автореф. дисс. на соиск. уч. степени канд. ф.-м. наук. – Л.: ФТИ АН СССР, 1986.
3. Нефедьев Е. Ю., Савельев В. Н., Ляшков А. И. Выявление закономерности формирования очага разрушения в сталях методом акустической эмиссии. – В кн.: Тезисы докладов II Всесоюзной конф. по акустической эмиссии. – Кишинев, 1987, с. 85.
4. Нефедьев Е. Ю., Волков В. А., Кудряшов С. В. и др. Связь размеров микротрещин с параметрами акустической эмиссии и структурой деформированной роторной стали. – Дефектоскопия. 1986. № 3. С. 41–44.
5. Нефедьев Е. Ю., Волков В. А., Ляшков А. И., Савельев В. Н. Контроль роста усталостной трещины в литой стали методом акустической эмиссии. – Проблемы прочности. 1987. № 1. С. 28–31.

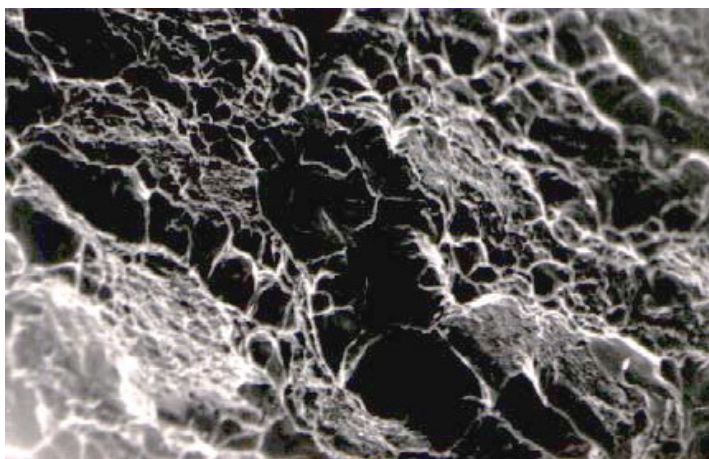


Рис. 1. Фасетки хрупкого скола на поверхности усталостной трещины

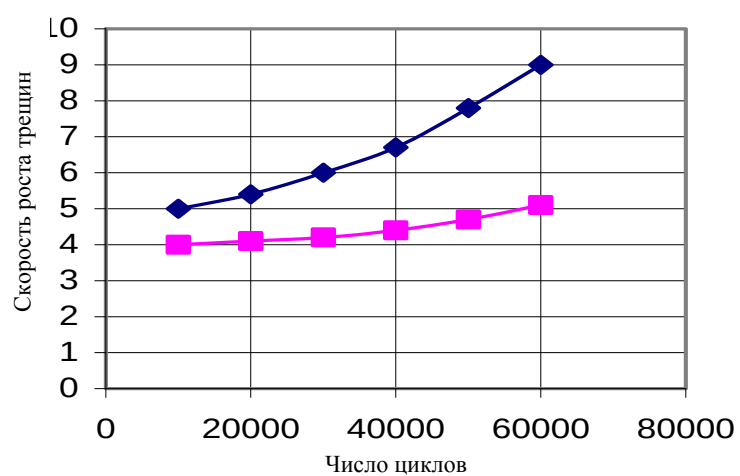


Рис. 2. Скорость роста двух реальных поверхностных трещин при усталостном нагружении, вычисленная по данным акустической эмиссии: синий цвет – трещина 3 мм; красный цвет – трещина 5 мм



Рис. 3. Прокатный стан «5000» (ширина листа до 5000 мм)

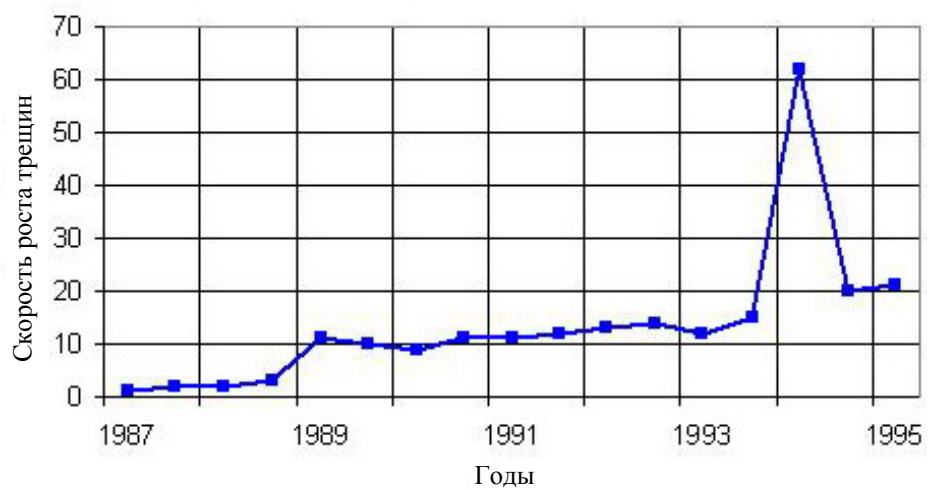


Рис. 4. Скорость роста трещины в станине прокатного стана по данным акустической эмиссии

ПАРАДОКСЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АЭ-КРИТЕРИАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В. А. Кобзев

ОАО «УкрНИИхиммаш», г. Харьков

Основой эффективности использования метода акустической эмиссии (АЭ) для оценки технического состояния оборудования нефтехимических предприятий является после проведения АЭ испытаний адекватный ответ на вопрос: «Что делать?». Особенно актуален этот вопрос для специалистов с недостаточным квалификационным опытом, совершающих вследствие этого ошибки при установке исходных параметров проведения испытаний. В практике производственного использования АЭ метода для окончательного ответа на этот вопрос специалисты обращаются к проверке результатов по ряду критериев, рекомендованных нормативными документами России и ряда других стран. В каждом из этих документов четко представлены правила оценки по тому или иному критерию, но при этом не оговорена методология комплексного использования их для формирования окончательного вывода. Выбор и использование критериев специалисты, проводящие АЭ контроль, производят самостоятельно. При этом возможен неудачный, ошибочный выбор критерия оценки, в результате которого потребуются дополнительный контроль неразрушающими методами, что в производственных условиях, если дефекты не будут найдены, не всегда приветствуется из-за лимита времени и средств. Недостатки в нормативных документах по АЭ, действующих в Украине, которые приведены в работе [1], сводятся в ДСТУ 4227 [2] только к анализу активности АЭ и упоминанию в рекомендованном приложении ДСТУ 4046 [3], касающегося метода АЭ, о существовании в природе амплитудного, интегрального и локально-динамического критериев оценки технического состояния объектов АЭ контроля. Понятно, что если опираться на этот пакет нормативных документов, то во многих случаях при АЭ испытаниях могут быть получены результаты, требующие дополнительного контроля. Например, когда испытание сопровождается большим числом сигналов (более 100), пришедших из зоны, составляющей 10 % расстояния между преобразователями АЭ (ПАЭ), необходимо прекратить испытание без определения того, что делать дальше. При этом могут быть получены парадоксальные результаты, когда амплитуда большого числа зарегистрированных импульсов близка к уровню порога и не имеет никакого отношения к наличию в металле исследуемого объекта дефектов. Такое положение с нормативными документами в нашей стране не может удовлетворять тех, кто использует метод АЭ при диагностике оборудования особо опасных химических и нефтехимических производств. Поэтому процесс диагностирования с применением АЭ метода проводится или на основе разработки и утверждения соответствующих стандартов предприятий или руководствуясь предварительно согласованными с Заказчиком Программами и методиками с необходимыми разделами АЭ критериального анализа. Если учесть, что в настоящее время основу многих химических и нефтехимических

предприятий Украины составляет российский капитал, а программное обеспечение диагностического оборудования, в частности, АЭ систем, как правило, строится на основе нормативов страны-поставщика, то было бы не лишним для обеспечения на этих предприятиях безопасной эксплуатации оборудования опираться не только на нормативную базу страны местоположения предприятия, но и на необходимые положения нормативных документов страны держателя капитала. Эти положения могут быть сформулированы в стандартах предприятий или в решениях технического руководства о том, что для повышения уровня безопасной эксплуатации при диагностировании оборудования специализированным организациям, проводящим диагностические работы, необходимо руководствоваться соответствующим стандартом России или другой страны. Такие меры, на наш взгляд, ускорили бы внедрение и гармонизацию нормативных документов стран, имеющих в диагностическом процессе общие точки соприкосновения или по линии собственности предприятий, или по линии используемого диагностического оборудования.

Но вернемся к собственно АЭ контролю. Критериальная оценка результатов АЭ испытания формируется на основе тех параметров, которые сопровождали АЭ испытание, и отклике объекта контроля на воздействие испытательной нагрузки. Поэтому рассмотрим последовательно основные параметры, формирующие после испытания критериальную оценку. Мы в работе используем систему фирмы «ИНТЕРЮНИС» A-Line 32D (DDM). Обычная технология проведения АЭ контроля начинается с определения некоторых исходных параметров (уровня шума, скорости, затухания, частотного диапазона, усиления, порога, геометрических параметров объекта контроля, координат установки на нем ПАЭ и т. д.). Достоверное определение и введение в качестве исходных этих параметров, понятно, влияет на качество формирования результата. Здесь можно заметить, что скорость лучше устанавливать более высокую из набора предварительно обнаруженных, частотный диапазон желательно брать узким, но таким, чтобы из него не «выпадала» резонансная частота ПАЭ из-за возможности потери чувствительности. Высокие частоты устанавливаются при малом расстоянии между ПАЭ, например, при проведении испытаний образцов на разрывной машине, а низкие – при большом, например, при испытании трубопроводов. Но наиболее важным при установке исходных параметров является установление параметров сигнала АЭ. На наш взгляд, чтобы не засорять излишней информацией картину окончательного результата, но при этом сохранить информацию о возможных дефектах объекта контроля, мы устанавливаем следующие временные интервалы параметров АЭ сигналов: SCETO – 50 мкс, максимальная длительность сигнала – 15000 мкс, мертвое время – 10000 мкс. Если максимальная длительность сигнала в постобработке может быть уменьшена, мертвое время может быть откорректировано расчетом переотражений АЭ сигнала на конкретной конструкции, то завышенное значение SCETO может сформировать АЭ сигнал путем наложения сигналов переотражений или, если исходить из теории пачек АЭ сигналов, формированием нескольких пачек АЭ сигналов в одну упаковку окончательно зафиксированного АЭ сигнала. Фактически SCETO формирует структуру окончательно зафиксированного АЭ сигнала, изменить или откорректировать который в постобработке, как правило, не очень просто. Поэтому здесь важно, чтобы выбранные параметры SCETO соответствовали пачкам импульсов АЭ с малыми, не превышающими 50 мкс интервалами следования. На нашем опыте при повышенном значении SCETO, например, 500 или 1000 мкс мы в постобработке вынуждены будем работать с длинными сигналами, имеющими сильно завышенное время нарастания переднего фронта.

Основной нашей задачей при проведении АЭ испытания является сформировать предельные параметры условного АЭ импульса (пачки) таким образом, чтобы к постобработке прийти с набором максимально не искаженных импульсов, параметры которых наиболее достоверно включали бы в себя параметры АЭ импульсов реального разрушения. Реальное

разрушение характеризуется, как известно, малым временем нарастания переднего фронта АЭ импульса (до 15 мкс), общая продолжительность которого, как правило, не превышает 100 мкс [4]. Эти параметры являются основой формирования условных сигналов АЭ при проведении фильтрации АЭ информации в режиме постобработки. Имеющиеся в результате АЭ контроля длинные импульсы (до 15000 мкс) позволят проконтролировать наличие непрерывной АЭ, характеризующей обычно течи, или турбулентность рабочего агента (жидкости, газа) в ходе испытания, если таковые будут иметь место. По ходу испытания непрерывная эмиссия позволяет определять возможные течи во фланцевых соединениях. После окончания испытания мы проводим фильтрацию таким образом, чтобы оставшаяся информация соответствовала параметрам АЭ сигналов, характеризующим деформацию и разрушение. Мы оставляем для окончательного анализа условные сигналы АЭ с общей длительностью 150 – 200 мкс и временем роста переднего фронта – 30 – 50 мкс. Такая фильтрация позволяет ограничить длину пачки АЭ и учесть только те из них, где максимум значений амплитуд достигает за 30 – 50 мкс. Фактически такая операция соответствует фильтрации пачек, поэтому соответствующую опцию программного обеспечения мы не используем.

Теперь можно проводить оценку результатов АЭ испытания по рекомендуемым критериям. Основными для нас являются два критерия: амплитудный и локально-динамический. В качестве вспомогательного последнее время мы используем статистический критерий. Используя эти три критерия совместно, мы имеем возможность проводить общую оценку влияния на результат энергетического фактора (амплитудный критерий), оценить динамическое взаимодействие энергетического и силового фактора в ходе АЭ испытания (локально-динамический критерий), установить степень упорядоченности сигналов АЭ, сопровождающих испытание. Использование одного из этих критериев, как правило, не позволяет получить исчерпывающей информации о степени и характере дефектности объекта контроля.

Практический пример совместного использования трех критериев с предварительной фильтрацией информации можно проследить на примере результатов испытания реактора, у которого внутренняя плакировка была выполнена путем наплавки полосы нержавеющей стали шириной 60 мм и толщиной 0,5 мм в 9 – 10 слоев [1]. После фильтрации амплитудный критерий соответствовал 4 классу (рис. 2), локально-динамический – первому, а статистический определил совокупность зарегистрированных АЭ импульсов как относительно упорядоченную. Здесь мы наблюдаем явный парадокс. Пользуясь амплитудным критерием, мы должны были прекратить испытания. При дальнейшем обследовании выяснилось, что причиной больших амплитуд было повсеместное отслоение на внутренней поверхности реактора 1 – 2 слоев плакировки. При этом несущая способность реактора не изменилась, о чем свидетельствует локально-динамический критерий. Поэтому, несмотря на высокий уровень амплитуд АЭ сигналов, их структура упорядочена и не оказывает влияния на силовой фактор сопротивления реактора действующим нагрузкам. Аналогичные парадоксы могут возникать и при испытании сосудов с внутренними устройствами, имеющими контакт с корпусом, когда для прохождения АЭ сигналов имеется дополнительный путь по металлу внутреннего устройства. В этом случае также возможно повышение значения амплитудного критерия, а в некоторых случаях это может оказать влияние на повышение локально-динамического критерия, если напряжения в металле внутреннего устройства по мере роста нагрузки возрастают. Поэтому в этом случае в ходе дополнительного контроля методами НК необходимо проводить обследование не только корпуса сосуда, но и его внутренних устройств.

Особо по отношению к критериальной оценке характера повреждений необходимо выделить испытание лабораторных образцов на растяжение, выполненных из пластичных материалов, а также результаты АЭ контроля при циклических испытаниях.

На рис. 5 – 8 представлены результаты АЭ контроля при испытании на разрыв образца из стали 20Х13. Два ПАЭ были установлены на противоположных нерабочих участках образца на расстоянии 150 мм друг от друга. Испытания до разрушения проводили в клиновых захватах на разрывной машине «ИНСТРОН» со скоростью 0,2 мм/мин. Образец разрушился при испытании. Но при этом все критериальные оценки были положительны: амплитудный критерий – 2-й класс; локально-динамический – 1-й класс; статистический характеризовал относительный порядок. Образец разрушился в зоне перехода его рабочей части в нерабочую на расстоянии 33 мм от ПАЭ 2. Здесь следует отметить, что основная масса АЭ импульсов пришла не из рабочей части образца, как принято изображать в многочисленных учебниках, в том числе и в классическом [4], а из нерабочей зоны, близкой к захватам. Эта масса АЭ импульсов является результатом деформации не в рабочей части образца, а зонах близких к захватам разрывной машины, отражая, таким образом, результат взаимодействия образца с клиновыми захватами. Естественно, что без проведения локации этот факт установить было невозможно, поэтому в многочисленных литературных источниках он интерпретируется как увеличение акустической активности в рабочей части образца в период достижения в нем предела текучести. В приведенном примере мы, используя систему АЭ A-Line 32D (DDM), подтвердили установленный нами в 2006 г. факт наличия большого процента эмиссии, исходящей из зон захватов, отражая динамику их взаимодействия с образцом. Тогда мы использовали разработанную нами экспериментальную систему АЭ Кросс-16 [5].

При проведении малоцикловых испытаний двухлинзового компенсатора [5] локально-динамический критерий использовать невозможно, но отмечено, что на стадии разрушения, составляющей в нашем случае 65 циклов из общего числа (3102 цикла), амплитуда АЭ несколько уменьшается при значительном росте активности от 2 до 88 имп/с (рис. 9 – 10).

Приведенные примеры иллюстрируют, как можно попасть в затруднительное положение при принятии решения по результатам критериальных оценок после АЭ контроля. Конечно, палочка-выручалочка для специалистов АЭ метода – дополнительный контроль с помощью методов НК, поэтому критериальная оценка результатов должна совершенствоваться на основе экспериментальных данных соответствия параметров АЭ и реальной деформации и разрушения. На наш взгляд, было бы не лишним для фильтрации использовать образы сигналов, характеризующих разрушение того или иного материала на основе реальных усредненных АЭ спектрограмм разрушения и деформации, с которыми с определенной степенью корреляции сопоставляются результаты АЭ контроля объекта испытания. Все, что оказывается за пределами корреляции – отбрасывается, а информация из зоны корреляции подвергается дальнейшей обработке. Значительную помощь в проведении оценки опасности дефекта имела бы возможность выделения на локационной картине скоплений локационных импульсов и проведения на этих скоплениях критериальных оценок с просмотром динамики локаций в этих зонах во времени и в пространстве. Эта операция помогла бы выделять из нескольких скоплений АЭ импульсов наиболее опасные зоны.

Таким образом, проведение критериальных оценок степени опасности вероятного дефекта при АЭ контроле является наиболее существенным элементом технологии использования метода АЭ для испытания объектов повышенной опасности. Для повышения достоверности контроля необходимо использовать несколько критериев. В связи с взаимным влиянием экономик разных стран пришло время организации нормативного сопровождения испытаний не на основе государственных стандартов, а на основе стандартов соответствующих международных технических обществ, имеющих общие точки соприкосновения или по линии общей собственности на средства производства, или по линии общности используемого оборудования. В этом случае, на наш взгляд, значительно ускорится процесс необходимо-

го совершенствования технологии контроля, что приведет к существенному повышению качества АЭ контроля.

Литература

1. Кобзев В. А. Критериальная оценка результатов АЭ контроля объектов повышенной опасности. – В кн.: Матеріали 6-й Нац. науково-технічної конф. та виставки «Неруйнівний контроль та технічна діагностика». – Киев, 2009, с. 77–82.
2. ДСТУ 4227-2003. Настанови щодо проведення акустико-емісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки. – 25 с.
3. ДСТУ 4046-2001. Обладнання технологічне нафтопереробних, нафтохімічних та хімічних виробництв. Технічне діагностування. Загальні технічні вимоги. – 25 с.
4. Грешников В. А., Дробот Ю. В. Акустическая эмиссия. Применение для испытания материалов и изделий. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 272 с.
5. Кобзев В. А., Кравец М. В., Суций О. В. Локационная фильтрация параметров акустической эмиссии при проведении испытаний на растяжение. – Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2006. № 4. С. 3–7.

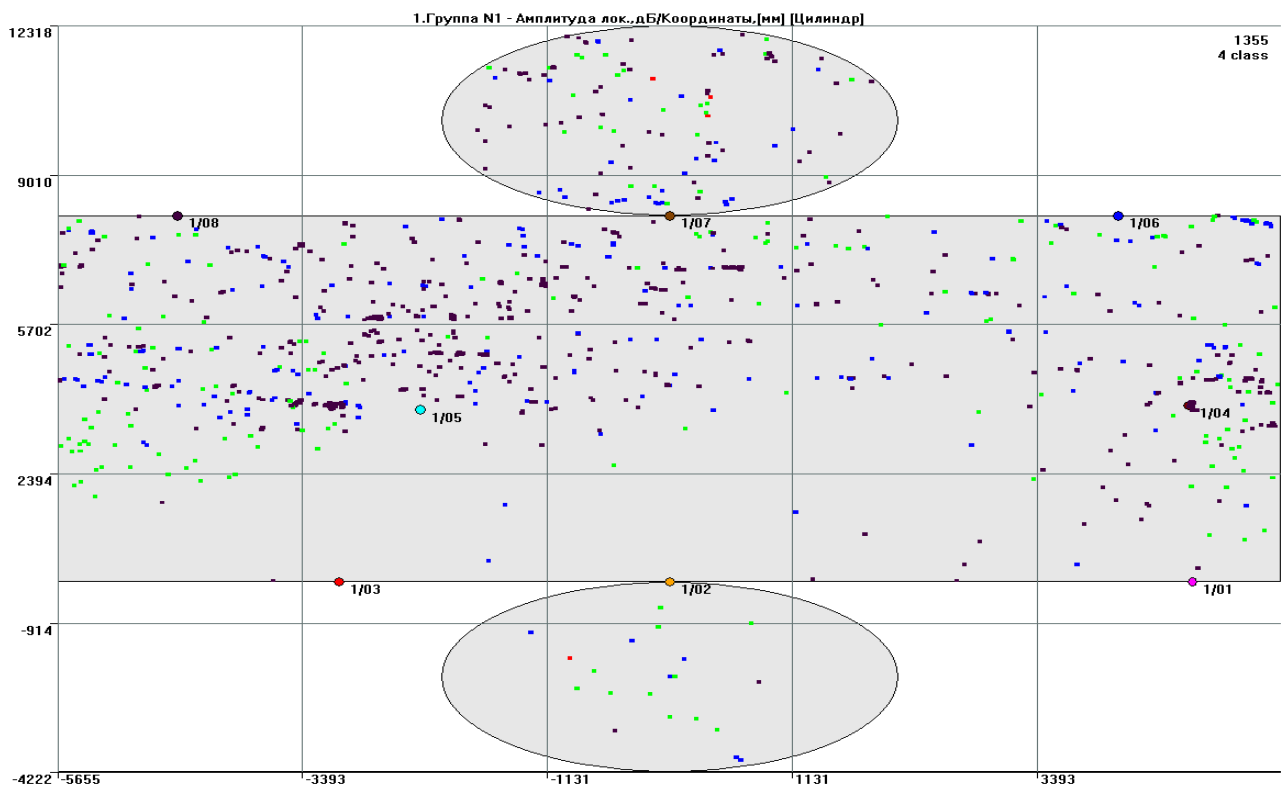


Рис. 1. Исходная информация после АЭ контроля реактора

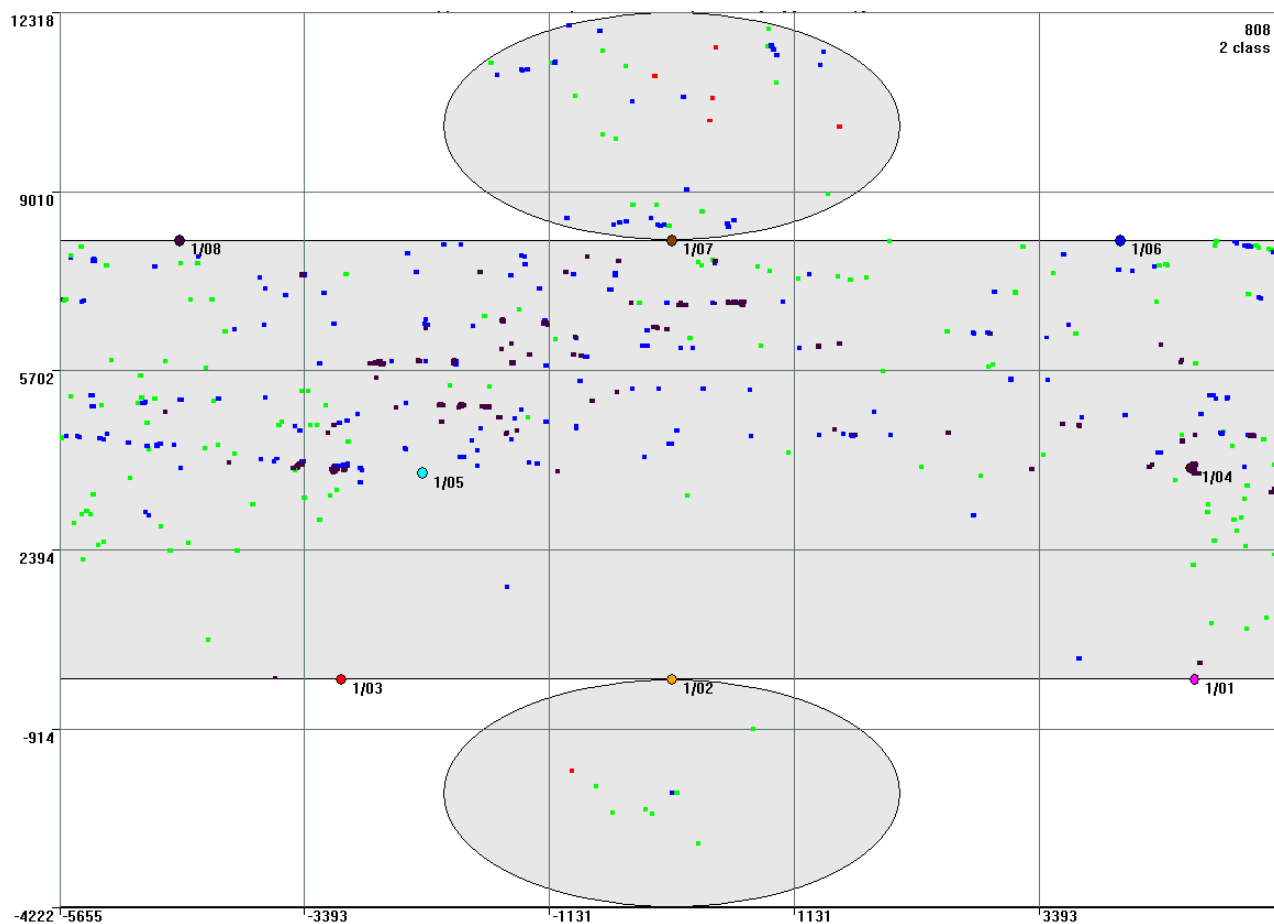


Рис. 2. Результат постобработки информации АЭ контроля реактора

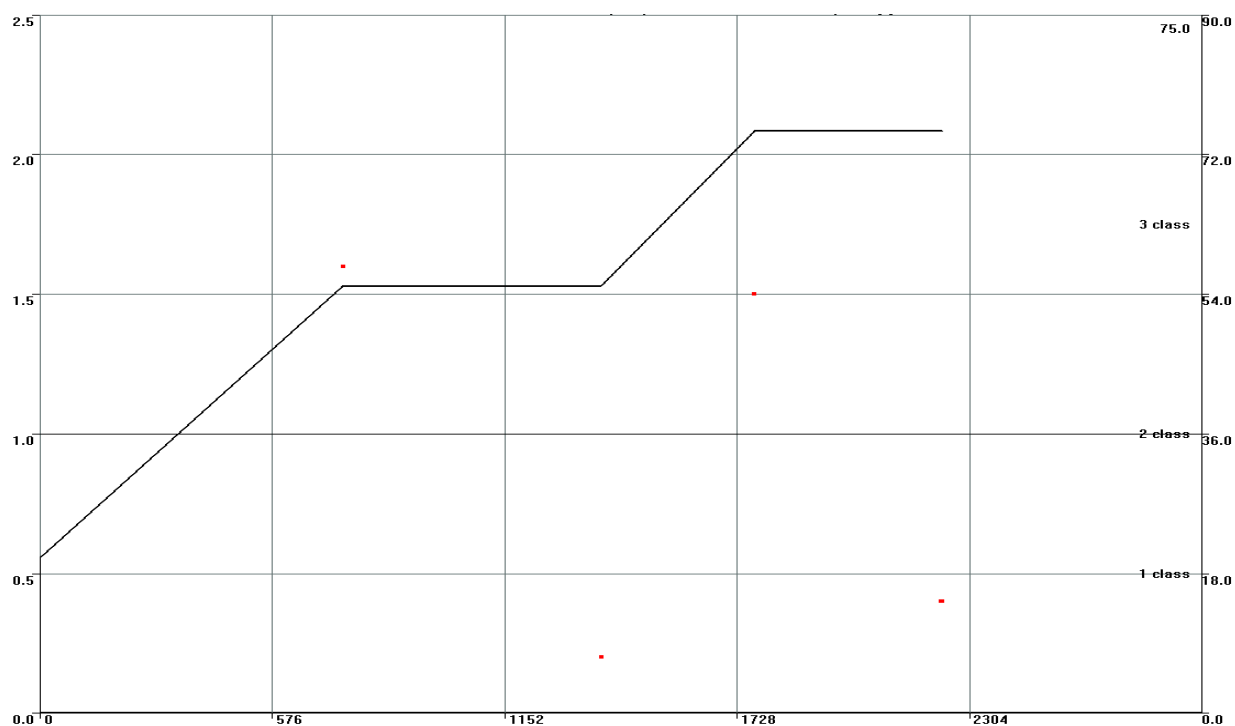


Рис. 3. Локально-динамический критерий при АЭ испытании реактора

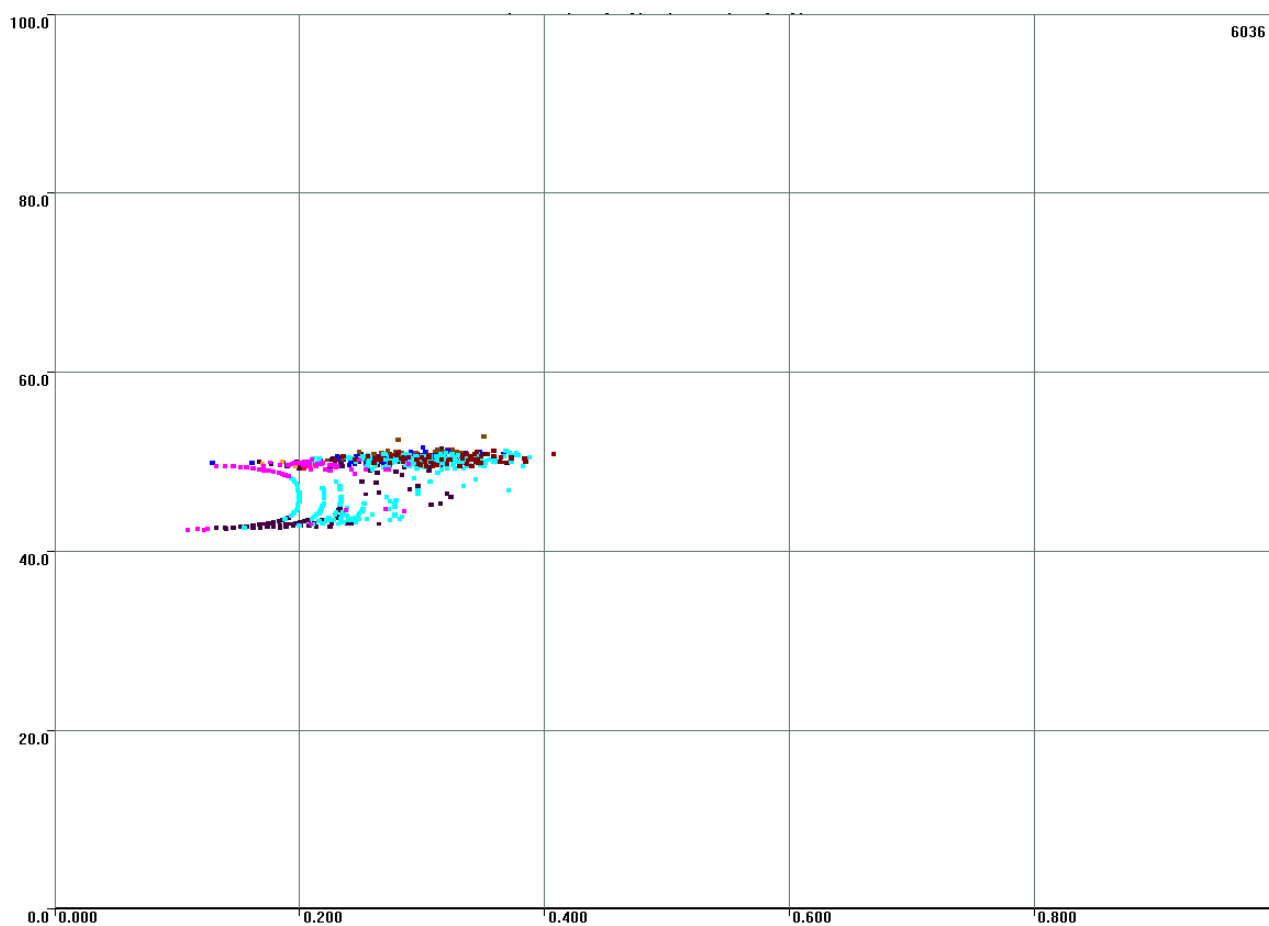


Рис. 4. Статистический критерий при АЭ испытании реактора

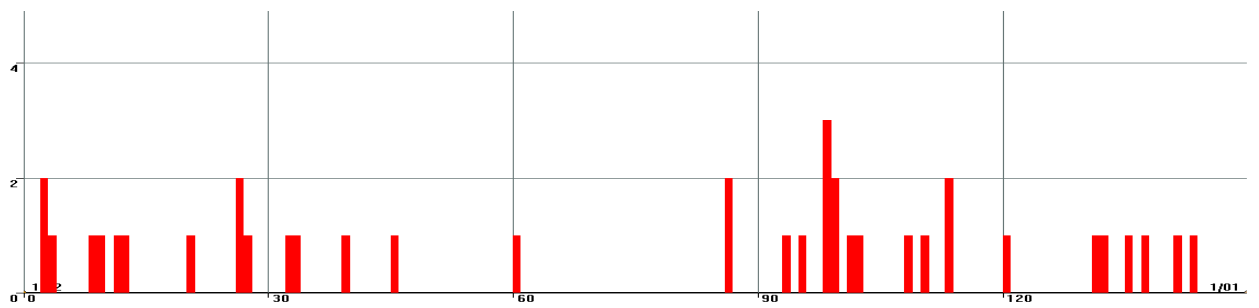


Рис. 5. Результат АЭ локации при испытании образца из стали 20X13 (без фильтрации)

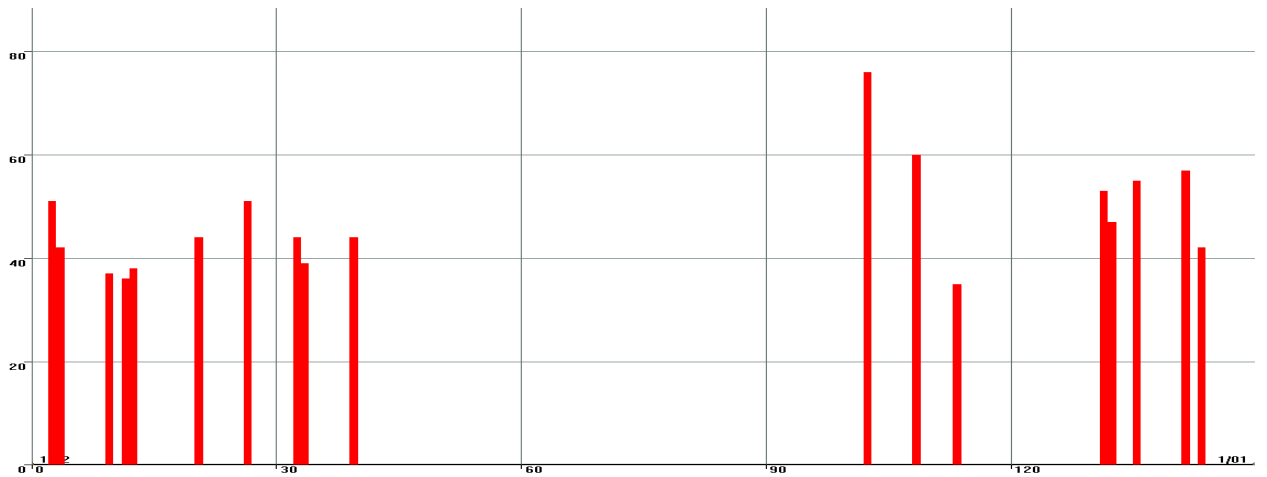


Рис. 6. Результат распределения амплитуд АЭ локации при испытании образца из стали 20X13 (без фильтрации)

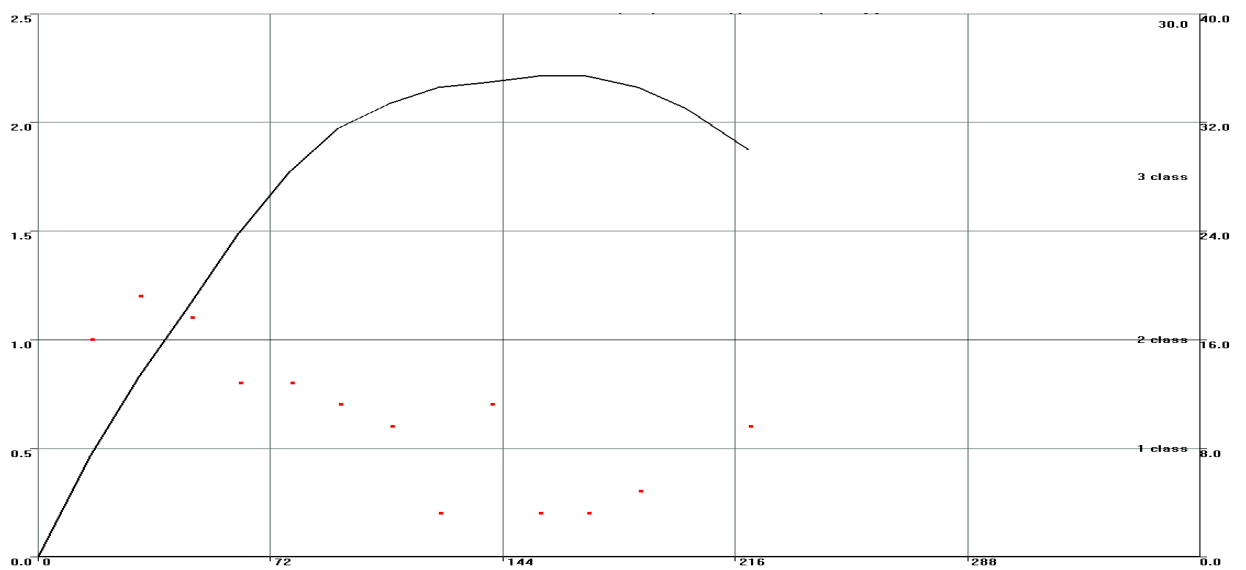


Рис. 7. Результат применения локально-динамического критерия при испытании образца из стали 20X13 (без фильтрации)

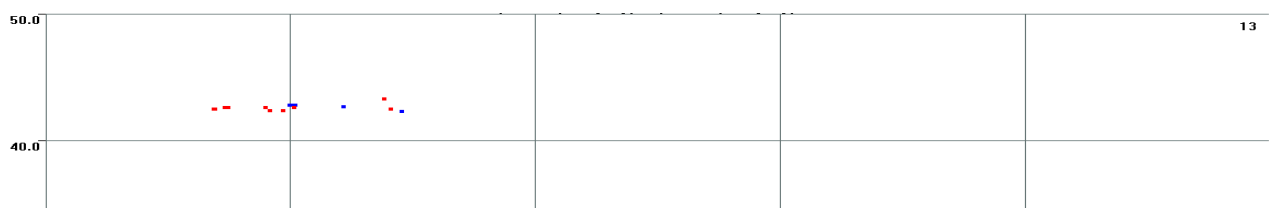


Рис. 8. Результат применения статистического критерия при испытании образца из стали 20X13 (без фильтрации)

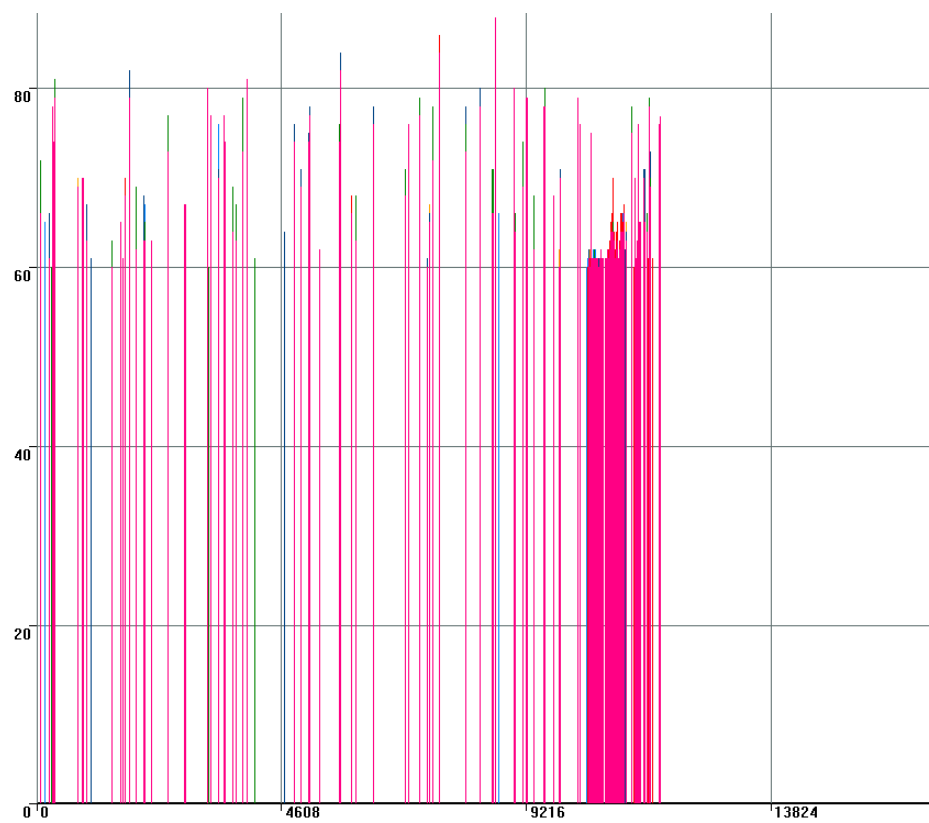


Рис. 9. Амплитудное распределение на конечной стадии испытания двухлинзового компенсатора

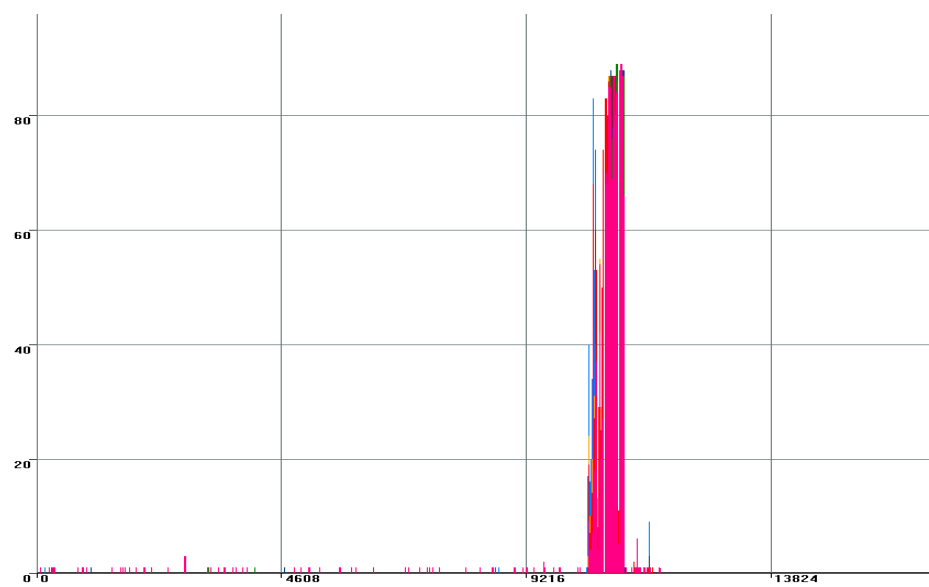


Рис. 10. Активность АЭ на конечной стадии испытания двухлинзового компенсатора

ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА МАГНИТНОЙ ПАМЯТИ МЕТАЛЛА ДЛЯ МОНИТОРИНГА РАЗВИТИЯ ТРЕЩИН

А. А. Дубов, Ал. А. Дубов

ООО «Энергодиагностика», г. Москва

В статье [1] были представлены возможности метода магнитной памяти металла (МПМ) для исследования процесса «деформация–разрушение» стальных образцов в условиях циклической нагрузки. Кривые усталости, построенные по изменению собственного магнитного поля образцов в процессе циклического нагружения, экспериментально подтвердили возможность оценки ресурса оборудования по параметрам магнитной памяти металла.

Магнитограммы, зафиксированные в процессе циклического нагружения образцов в режиме реального времени, подтвердили возможность использования метода МПМ и приборов типа ИКН для мониторинга технического состояния оборудования под нагрузкой непосредственно в процессе эксплуатации (рис. 1).

Рассмотрим возможности метода МПМ для мониторинга развития трещин под нагрузкой в условиях работы «какао-пресса», установленного на ОАО «Кондитерский концерн Бабаевский».

В 2010 г. при обследовании корпуса «какао-пресса» в зоне галтельного перехода методом МПМ была обнаружена трещина длиной более 100 мм (рис. 2). Дополнительным ультразвуковым контролем было установлено, что максимальная глубина трещины составляет 70 мм при толщине корпуса 130 мм. Руководством предприятия было принято решение о временном продолжении эксплуатации указанного пресса. С целью наблюдения за развитием трещины в процессе эксплуатации в зоне максимальной концентрации напряжений вблизи трещины были установлены датчики регистрирующего прибора типа ИКН (измеритель концентрации напряжений магнитометрический). На рис. 3 показано место установки датчиков вблизи трещины.

На рис. 4 представлен график временного изменения давления масла гидравлической системы на поршень пресса. Точки 1 – 4 на рис. 4 – контрольные точки изменения давления масла. Время одного цикла нагрузки на поршень составляет 28 мин.

На рис. 5 представлены магнитограммы изменения собственного магнитного поля H_p , зафиксированные с помощью датчиков прибора ИКН, установленных вблизи трещины, в трех циклах нагрузки I, II, III.

Контрольные точки 1 – 4 на магнитограммах по времени и нагрузке на поршень соответствуют точкам 1 – 4, указанных на рис. 1.

Из сравнения рис. 4 и 5 видно, что графики изменения магнитного поля H_p вблизи трещины и изменения давления масла на поршень качественно совпадают. Из рис. 5 также видно, что с каждым циклом нагрузки величина поля H_p немного возрастает. В результате таких измерений было установлено, что через 6 ÷ 7 циклов нагрузки значение поля H_p стабилизировалось. При этом было замечено, что каждый незначительный прирост в развитии трещины сопровождается скачком в изменении магнитного поля, фиксируемого датчиками прибора ИКН.

Литература

1. Махутов Н. А., Дубов А. А., Денисов А. С. Исследование статистических и циклических деформаций с использованием метода магнитной памяти металла. – Заводская лаборатория. 2008. № 3. С. 42–46.

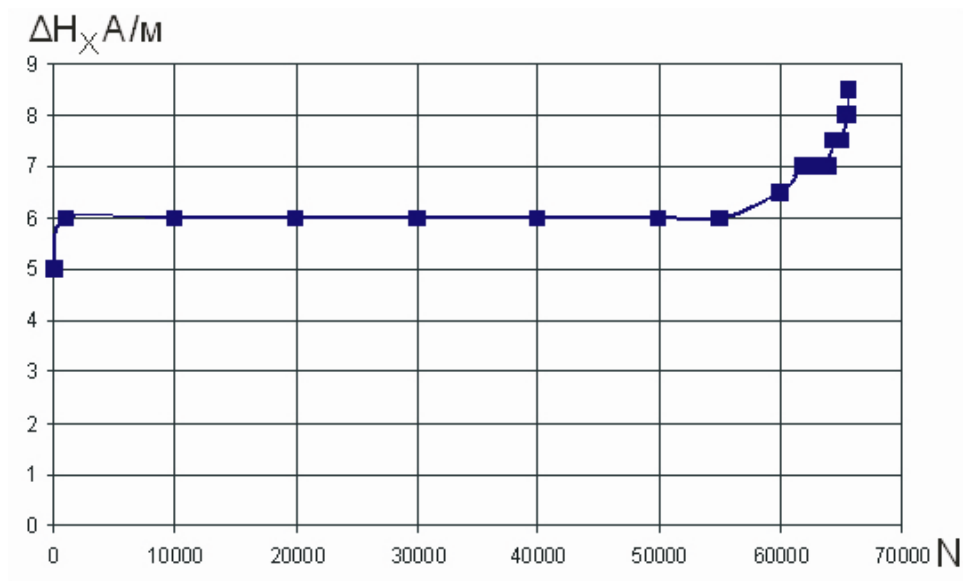


Рис. 1. Изменение тангенциальной составляющей магнитного поля ΔH_x в зоне концентрации напряжений стального образца в зависимости от числа циклов нагружения растягивающей нагрузкой $N (0,2 \div 0,95)\sigma_T$ с частотой 10 Гц

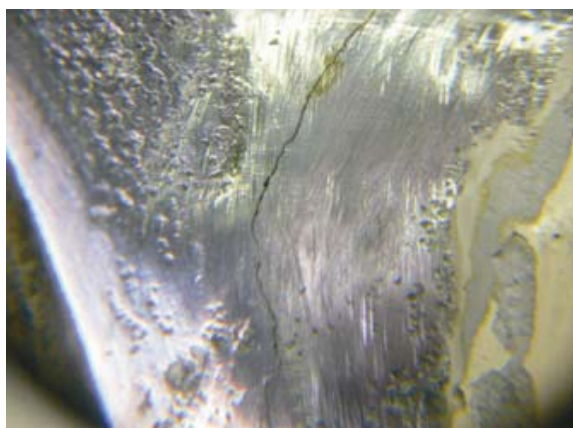


Рис. 2

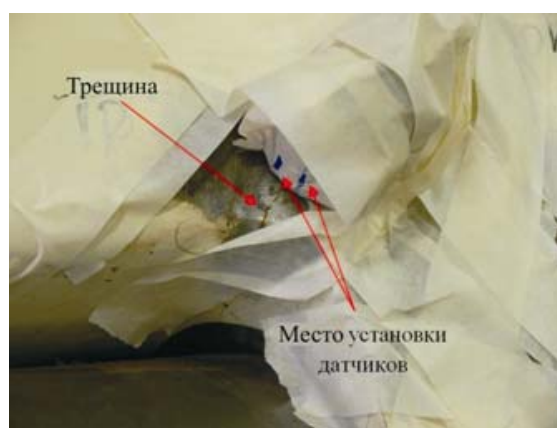


Рис. 3

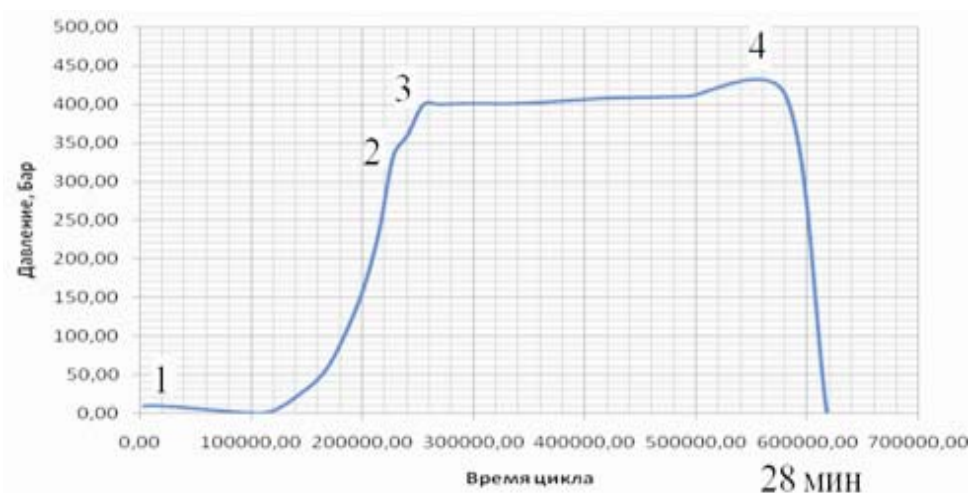


Рис. 4. Динамика изменения давления (P) на поршень какао-пресса при цикле

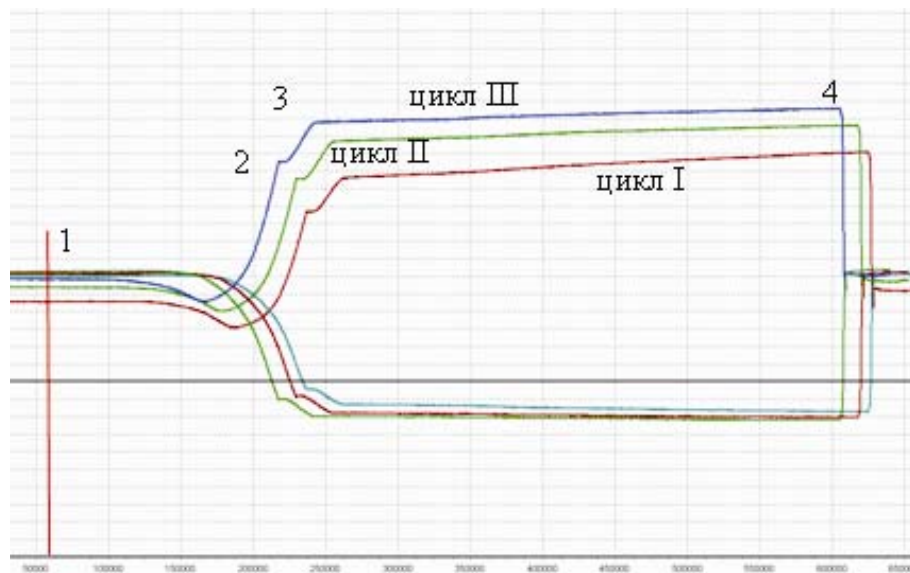


Рис. 5. Магнитограмма изменения СМПП в зоне трещины, характеризующая рост напряженно-деформированного состояния в металле от цикла к циклу, и, как следствие, продолжение развития трещины

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ АЭ СИСТЕМ – ВОЗМОЖНОСТИ, РЕГИСТРИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ И СОВМЕСТНАЯ РАБОТА

А. Г. Комаров

ОАО «ВНИКТИнефтехимоборудование», Волгоград

Программное обеспечение (ПО) является важнейшей составляющей каждой акустико-эмиссионной (АЭ) системы, и наряду с аппаратной составляющей определяет качество, скорость, полноту анализа зарегистрированных данных и оценку состояния контролируемого объекта. ПО разрабатывается компанией-производителем АЭ аппаратуры, составляя, тем самым, программно-аппаратный (ПА) комплекс для регистрации/анализа/оценки АЭ данных.

Анализ/обработка/оценка зарегистрированной информации обычно занимает время, намного превышающее непосредственно сам АЭ контроль, и роль ПО в этом процессе невозможно переоценить.

Для оценки состояния развития ПО в настоящее время рассмотрим некоторые аспекты аппаратно/программного обеспечения для обработки АЭ данных.

Формирование АЭ импульсов, файл данных и ПО

Формирование АЭ импульсов из потока электрических сигналов АЭ происходит в различных системах практически по одной схеме (рис. 1) с использованием по-разному называемых, но сходных по назначению атрибутов выделения АЭ импульсов. Эти атрибуты сведены в табл. 1.

Табл. 1. Параметры выделения АЭ импульсов

	DiSP, Samos (PAC)	AMSY-5 (Vallen Systeme)	A-Line 32D (ООО «ИНТЕРИОНИС»)	Малахит (Диатон)
1	Peak Definition Time (PDT) – интервал определения пика			Интервал контроля пика (ИКП) - предназначен для правильного измерения амплитуды пика сигнала
2	Hit Definition Time (HDT) – интервал определения импульса	Duration Discrimination Time (DDT) – время ограничения длительности импульса	SCETO – таймаут окончания АЭ сигнала	Интервал контроля длительности сигнала (ИКД) – служит для определения момента времени, который считается окончанием длительности сигнала
3	Hit Locout Time (HDT) – интервал блокировки канала	Rearm Time (RT) – время перевооружения – определяет период, по истечению которого канал АЭ системы должен быть готов к регистрации следующего импульса	Dead Time – время после окончания АЭ сигнала, в течение которого канал не может регистрировать АЭ сигналы	Интервал контроля конца сигнала (ИКК) – служит для задания времени блокировки канала после регистрации сигнала АЭ
4			Max Duration – максимальная длительность АЭ сигнала	

В результате формируются параметры АЭ импульса, которые можно условно разделить на три группы:

1. Традиционные параметры АЭ сигнала (формируются всеми АЭ системами – в данном сообщении рассматриваются АЭ системы I класса в соответствии с РД 03-299-99):

- канал;
- время регистрации;
- пиковая амплитуда;
- время нарастания;
- длительность;
- количество выбросов;
- RMS и/или ASL – значение фоновых шумов на канале в течение периодов отсутствия превышения порога;
- данные формы волны сигнала, если система способна ее регистрировать.

2. Набор дополнительных параметров, определяемый подходом разработчика аппаратуры к АЭК:

Для систем DiSP, Samos (PAC):

- энергия;
- сила сигнала;
- абсолютная энергия;
- количество выбросов до пика;
- средняя частота АЭ сигнала (количество выбросов/длительность);
- Частота начала АЭ сигнала (количество выбросов/время нарастания);
- Частота реверберации АЭ сигнала (количество выбросов/длительность-время нарастания).

Для систем AMSY (Vallen Systeme):

- E – энергия основной части импульса. Может быть одним из двух типов: «Истинная энергия» определяется суммированием квадратов амплитуд оцифрованных АЭ сигналов АЭ импульса, «Интенсивность сигнала» вычисляется суммированием абсолютных значений АЭ сигналов в импульсе.

Ряд параметров, используемых при формировании т.н. «каскадных» импульсов:

- CHITS – количество импульсов в каскадном импульсе;
- CENY – полная энергия импульса, включая энергии основной и каскадной части;
- CCNT – количество выбросов в основной и каскадной части.

Для систем Малахит (Диатон):

- Energy - энергия, мкВ*мкВ*мс;
- SL – Signal Level – энергетический параметр (площадь под сигналом), мкВ*мс;
- FreqR – частота до максимума (CountR/Rise), кГц;
- CountR – количество осцилляций до максимума;
- Freq – вычисляемая частота (Count/Durat), кГц;
- AmplP – величина 1-го пика, дБ;
- CountP – количество осцилляций до 1-го пика;
- RiseP – время нарастания сигнала до 1-го пика, мкс;
- FreqP – частота до 1-го пика (CountP/RiseP).

Для систем A-Line 32D (ООО «ИНТЕРЮНИС»):

- Энергия – сумма квадратов амплитуд отсчетов за время длительности сигнала, Дж или дБ;
- Длительность/Время нарастания импульса АЭ.

3. Набор вспомогательных параметров или «флагов» состояния:

Для систем AMSY (Vallen Systeme):

- Т – флаг установлен, если импульс завершен автоматически по тайм-ауту;
- А – флаг установлен, если импульс следует за импульсом, прерванным по тайм-ауту;
- Е – флаг установлен, если импульс зарегистрирован в режиме Long Rearm;
- Д – флаг установлен, если импульс зарегистрирован в режиме Long Duration;
- R – флаг установлен, если зарегистрировано превышение порога после истечения DDT и до окончания RT и начинается формирование каскадного импульса;
- С – флаг установлен, если импульс инициирован процессом автоматической калибровки программным способом;
- с – флаг установлен, если импульс зарегистрирован в течение 18 мс после инициированного процессом автоматической калибровки импульса (отмеченного флагом С).

Для систем A-Line 32D (ООО «ИНТЕРЮНИС»):

- флаг переполнения АЦП по амплитуде;
- флаг окончания сигнала по максимальной длительности.

Таким образом, несмотря на то, что формирование АЭ импульсов происходит по схожей схеме, АЭ системы каждого производителя регистрируют свой набор АЭ параметров, и имеют, как следствие, уникальный формат файла данных (в данном сообщении не затрагивается вопрос сопоставимости параметров, регистрируемых различными АЭ системами – это касается, в основном, энергии, которая рассчитывается практически каждым разработчиком АЭ систем по уникальному алгоритму).

Формируемый файл АЭ данных включает, как правило, несколько типов записей: записи АЭ импульсов, записи опроса состояния системы, записи опроса параметрических входов, служебные (управляющие) записи, записи меток или комментариев и т. п. (так, современный файл данных систем РАС включает до 255 типов записей).

Каждый производитель АЭ систем предполагает также определенную идеологию и подход к анализу, обработке и оценке регистрируемой ПА комплексом информации, предлагая, в том числе, и системы критериев оценки состояния оборудования (например, технология АЭК сосудов, работающих под давлением, MONPAC). Эта идеология реализуется в программном обеспечении для регистрации и пост-обработки зарегистрированных данных:

- пакеты AEWIn, Noesis – РАС;
- пакет VisualCircle (VisualAE, VisualTR, VisualClass) – Vallen Systeme;
- программы A-Line 32D и A-Line OSC Processing – ООО «ИНТЕРЮНИС»;
- пакет AE Studio – Диатон.

Программное обеспечение, поставляемое в составе различных АЭ систем, часто включает уникальные инструменты анализа/обработки/оценки данных. Примеры:

- технология АЭК MONPAC, включенная в пакет AEWIn (РАС);
- распознавание образов и алгоритмы нейронных сетей пакета NOESIS (РАС);
- анализатор локации, математический и программный процессоры, процессор предупреждений пакета VisualAE (Vallen Systeme) и т. д.

При этом, если при регистрации данных, оператор ограничен ПО используемой АЭ системы, то при обработке/оценке зарегистрированных данных такие ограничения снимаются, и использование иных программных продуктов ограничивается наличием нужного конвертора (и, конечно, доступностью соответствующего ПО).

Использование стороннего ПО становится необходимым, если ПО системы, которая производит регистрацию данных, не обладает достаточными или необходимыми возможностями анализа или ПО/АЭ система морально устарели.

Программное обеспечение и форматы данных различных АЭ систем

Некоторые производители АЭ аппаратуры (РАС, ООО «ИНТЕРЮНИС») публикуют или предоставляют на иных условиях в распоряжение независимых разработчиков форматы файлов данных своих систем. Данные о доступности ПО, формата файла данных и взаимной совместимости систем сведены в табл. 2.

Табл. 2. Некоторые данные о доступности ПО современных АЭ систем

Название систем	DiSP, Samos, (РАС, США)	AMSY-5, (Vallen Systeme, Германия)	A-Line 32D DDM, PCI-8, (ООО «ИНТЕРЮНИС», Россия)	Малахит (Диатон, Россия)	Эксперт 2000, Ресурс 2000, (Алькор, Россия)
Наличие пробной версии	Нет	Да	Да	Да	Нет
Формат файла	Открытый	Закрытый	Закрытый	Закрытый	Закрытый
Информация о формате файла	Да	Нет	Да, по договоренности	Нет	Нет
Имеются конвертеры в формат	–	РАС	–	–	–
Имеются конвертеры из формата	–	РАС	–	–	–

В разное время сторонними разработчиками выполнялись более или менее удачные попытки самостоятельной разработки приложений для обработки и оценки данных АЭ испытаний. Сложилось так, что разрабатывалось, в основном, ПО для обработки данных систем РАС (вследствие доступности информации о формате файла данных РАС систем). Известны разработки:

- ПО «Нафтан», г. Новополюцк (для систем РАС);
- Томск (для систем РАС);
- Обнинск (для систем РАС);
- ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, Санкт-Петербург (для систем РАС);
- ОАО «ВНИКТИнефтехимоборудование», Волгоград (для систем РАС, ООО «ИНТЕРЮНИС»).

Особенности ПО различных производителей

Рассмотрим особенности ПО некоторых производителей АЭ аппаратуры.

Программное обеспечение АЭ систем компании РАС

Системы компании РАС являются стандартом de facto среди АЭ систем. Семейство программных продуктов компании РАС включает AEWin, MONPAC, NOESIS.

AEWin – основная программа регистрации/оценки/анализа результатов АЭК.

Работает с тремя типами данных: импульсами/событиями, формой волны АЭ сигнала и с периодически записываемыми параметрами.

Имеются опции выделения (выбора) импульсов/событий. Произведенный выбор автоматически отражается на всех графиках и таблицах.

Имеется возможность выбора импульсов (на точечном/кумулятивном графике, в т. ч. локационном, либо в таблице) с одновременным отображением соответствующих оцифрованных сигналов (рис. 2).

Предусмотрены следующие типы локации: зонная, линейная, локация на плоскости (в том числе использующая регрессионный алгоритм), локация на цилиндре, локация на конусе, локация на сфере, локация в объеме с автоматическим или ручным размещением ПАЭ. Возможно комбинирование различных типов локации. Предусмотрена опция рисования карты объекта, включающая такие конструкции как плоскость, вертикальный/горизонтальный

сосуд, сфера, структура произвольной формы. Для каждого типа конструкции имеется отдельный пункт меню со специфическим набором установок, что облегчает решение задачи размещения ПАЭ на объекте и отображения его конструктивных особенностей, таких как места расположения сварных швов, патрубков и других. Имеется надстройка оценки «Вероятности выявления дефекта/локации» с использованием данных кривой затухания.

AEWinPost – одно из дополнений к AEWin, предназначенное для осуществления графической фильтрации, в том числе с использованием логических операций. Имеется возможность выделения АЭ параметров из оцифрованных сигналов.

MONPAC – нельзя не отметить технологию АЭ контроля MONPAC, также программно реализованную как дополнение к AEWin. В настоящее время, на наш взгляд (ОАО «ВНИКТИнефтехимоборудование» является пользователем MONPAC с 1988 г. и по этой технологии обследовано более 500 сосудов), технология MONPAC – одна из наиболее востребованных технологий АЭК и систем оценки состояния сосудов и аппаратов.

NOESIS – инструмент детального исследования АЭ данных (в том числе и в реальном времени) с использованием алгоритмов распознавания образов и нейронной сети в сочетании с функциями вычисления параметров АЭ по записанным формам импульсов (AEWinPost является упрощенной версией NOESIS).

Возможности автоматической и ручной кластеризации данных на основе анализа параметров АЭ импульсов.

Возможность выбора группы точек (хитов) на графике: захватом мышью или с помощью опции фильтрации. Произведенный выбор автоматически отражается на всех графиках и таблицах.

Имеются функции как графической фильтрации, так и фильтрации с помощью сложных логических выражений.

Опция «Выделения Признаков» из оцифрованных сигналов поддерживает выделение признаков как во временной, так и в частотной областях.

Возможность увеличения числа выделяемых признаков путем использования Расчетных Признаков, которые получаются из имеющегося набора признаков с помощью простейших арифметических операций.

Получение/отображение корреляционной/ковариационной матрицы признаков, дендограммы корреляции признаков, статистических критериев, используемых в задаче распознавания (Уилка, R_{ij} и другие), статистических характеристик классов/кластеров (центров кластеров, внутри и межкластерных расстояний, и т. д.).

Различные алгоритмы автоматической кластеризации и классификации, в том числе, максиминное расстояние, К-среднее, нейронные сети и другие.

Возможность получения кластеров вручную.

Возможность слияния/разбиения полученных кластеров по желанию пользователя.

Запись результатов кластеризации в PAC-совместимые файлы данных с возможностью последующего использования в качестве эталонных при решении задачи классификации.

Программное обеспечение Vallen Systeme

ПО Vallen Systeme для АЭ систем составляет т. н. Visual Circle, включающий VisualAE – основную программу анализа, VisualTR – программу анализа TR-данных и VisualClass – программу классификации АЭ данных по их форме волны.

В **VisualAE** реализована неструктурная обработка/анализ данных – процесс анализа представляет собой формирование древообразной Структуры обработки данных, где к «стволу» – исходному файлу (в т. ч. и TR-данных) присоединяются «ветки» – процессоры разных типов, формирующие новые параметры (путем обработки изначально существующих

или сформированных ранее, например, локационные координаты, точность локации, принадлежность к кластеру и количество данных в кластере...) или обрабатывающие уже сформированные другими процессорами параметры (например, путем фильтрации). «Ветки» заканчиваются «листьями» – процессорами визуализации (или визуальными элементами) – диаграммами и таблицами. Среди процессоров необходимо отметить:

- математический процессор, позволяющий путем использования формул формировать из исходных данных и/или данных формируемых другими процессорами новые параметры;
- программный процессор, позволяющий путем использования встроенного языка программирования выполнять с АЭ параметрами любые действия;
- процессор локализации, реализующий ряд различных алгоритмов зонной, линейной, плоскостной, сферической локации, а также локации днищ резервуаров;
- процессор классификации, реализующий вычисление параметров Severity и Historic Index;
- процессор полигонов (графическая фильтрация).

Необходимо отметить также ряд полезных и уникальных особенностей/возможностей анализа данных в VisualAE:

- двух и трехмерные диаграммы, наличие левой и правой оси;
- каждая АЭ диаграмма может отображать как традиционные АЭ параметры, так и параметры, сформированные любыми другими процессорами;
- для каждого параметра возможность одновременного вывода как Корреляции и Распределения на одной диаграмме;
- множество планов для Корреляций и Распределений, различаемых цветами, индивидуальные наборы фильтров для каждого плана;
- связь между различными визуальными элементами (диаграммами, таблицами и диаграммами формы волны);
- для оценки точности вычисления местоположения источника АЭ может быть применен параметр LUCY (Location UnCertaintY);
- полная документируемость процесса обработки;
- уникальный Анализатор локации (рис. 3).

VisualClass – программа распознавания образов и классификации предназначена для:

- быстрого, удобного и понятного формирования аналитического классификатора для распознавания образов различных сигналов АЭ по форме волны;
- использования управляемых и неуправляемых стратегий обучения;
- дальнейшего развития базы классификатора;
- классификационная программа присваивает номер класса и параметры принадлежности к классу для каждого нового набора неизвестных данных.

Номер класса и параметры принадлежности к классу могут использоваться в VisualAE (опция SWBN), комбинироваться с классическими параметрами АЭ, результатами локализации и параметрическими данными, могут подвергаться статистическому анализу, отображаться на диаграммах, в таблицах и использоваться при фильтрации как в режиме онлайн, так и в режиме офлайн.

В состав ПО входят также инструменты вэйвлет-анализа данных формы волны, расчета дисперсионных кривых, программы-конвертеры данных.

Программное обеспечение компании «Интерюнис»

В настоящее время ПО компании «ИНТЕРЮНИС» для систем линейки A-Line представляет собой динамично развивающийся, в том числе благодаря пожеланиям пользователей, пакет программ, включающий ряд уникальных функций и алгоритмов обработки данных. Особенности ПО систем линейки A-Line:

- локация разных типов: линейная и планарная, зонная и объемная, на цилиндрических и сферических сосудах, днищах резервуаров;
- используются различные методы вычисления координат по выбору: по разности времен прихода или по достижению максимума сигнала, триангуляционный или ректангуляционный с возможностью подбора скорости. Реализован алгоритм нечеткой локации антеннами произвольной формы;
- результаты локации могут быть наглядно представлены в виде наложения их на развертки и объемные модели объектов контроля (рис. 4). Возможна кластеризация объекта по количеству слоцированных АЭ событий и по расчетной амплитуде источника АЭ;
- проводится классификация источников АЭ по степени опасности в терминах амплитудного, локально-динамического критериев согласно ПБ 03-593-03. Результаты могут быть представлены в виде диаграммы Severity/Historic Index;
- возможна классификация источников АЭ в соответствии с информационным статистическим критерием;
- предоставляет возможность, как в постобработке, так и при сборе данных производить наложение на любые окна графической маски, представляющей карту швов и особенности сложной конструкции двумерного или трехмерного объекта для визуализации результатов локации;
- использует спектральный анализ АЭ сигналов – удобный инструмент прецизионного анализа формы АЭ волны. Программа предоставляет возможности по статистической обработке как сигналов и их спектров, так и задаваемых частотных областей этих спектров между собой. Это дает возможность проведения кластерного анализа по заданным характеристикам формы сигналов или частотных областей спектра;
- содержит корреляционный анализ АЭ сигналов и их спектров, что позволяет делать заключения о вероятном происхождении сигналов, поступающих на разные датчики.

Возможность совместной работы ПО АЭ систем

Таким образом, ПО многих современных АЭ систем имеет ряд уникальных инструментов, интересных для пользователей, применяющих другую аппаратуру. Эти инструменты доступны для них при условии наличия необходимых конвертеров (и этого программного обеспечения, конечно).

В настоящее время полноценные конвертеры имеются лишь в составе ПО компании Vallen Systeme – доступны конвертеры данных PAC-AMSY и AMSY-PAC, а также конвертер AMSY-MONPAC, и, таким образом, VisualAE является отличным дополнением к ПО, предоставляемому в составе АЭ систем PAC.

В ОАО «ВНИКТИнефтехимоборудование» с начала 1990-х гг. разрабатываются ПО для анализа, обработки и оценки данных АЭК, одной из характеристик которых является поддержка «мультисистемности». Это ПО обеспечивает работу с данными всех систем компании PAC (Spartan 3000, Spartan 2000, DiSP, Samos) и систем семейства A-Line компании «ИНТЕРЮНИС», предназначено для анализа, оперативной обработки и оценки данных в соответствии с некоторыми критериями и системами оценки: MONPAC, локально-динамическим критерием.

В ОАО «ВНИКТИнефтехимоборудование» разработаны также конвертеры из форматов Spartan и A-Line в формат DiSP.

Примером применения подобного конвертера является контроль днища резервуара с целью выявления местоположения течи. Данные, зарегистрированные системой A-Line, были конвертированы в формат DiSP и, далее, в формат VisualAE штатными средствами ПО

Vallen Systeme. Местоположение течи было выявлено (и впоследствии подтверждено при внутреннем осмотре) в течение нескольких минут.

Выводы

Поскольку АЭК является распространенным и документируемым видом контроля (данные сохраняются и могут быть проанализированы дополнительно после испытания), то, на наш взгляд, ПО поставляемое в составе АЭ систем, должно предоставлять возможности:

1. Сравнения результатов, регистрируемых различными АЭ системами;
2. Дополнительного анализа результатов АЭК с использованием стороннего ПО;
3. Применения для оценки состояния контролируемого объекта различных систем критериев.

Указанные требования могут быть выполнены:

1. Разработкой или принятием общего формата данных АЭ систем, в который (и из которого) должно быть обеспечено преобразование данных каждой АЭ системы;
2. Открытием и описанием форматов файлов данных АЭ систем;
3. Постепенным переходом к регистрации данных в совместимом формате;
4. Принятие общего формата данных невозможно, по-видимому, без создания ассоциации разработчиков аппаратного/программного обеспечения АЭ систем.

Основное требование к такому универсальному формату файла – возможность включения как традиционных АЭ параметров, так и дополнительных параметров, регистрируемых конкретными АЭ системами.

Таким общим форматом может, на наш взгляд, стать формат данных компании RAS, являющийся стандартом *de facto* среди АЭ систем, существующий и развивающийся в течение 20 лет в соответствии с изменениями возможностей АЭ систем. Как было упомянуто, для формата данных RAS существует достаточно большое количество интересных независимых разработок ПО, существуют конвертеры в другие форматы (например, Vallen Systeme).

Этот формат представляет собой набор записей переменной длины: первые два байта – длина записи, следующий байт – ее тип. Далее следует уникальная информация самой записи. Такая организация записей позволяет включить достаточно большой объем дополнительных параметров АЭ импульса.

Конечно, при конвертировании данных любой АЭ системы в другой формат некоторые параметры будут исключены, но возможность анализа/оценки зарегистрированных данных с помощью всех преимуществ, предоставляемых различными разработчиками и производителями инструментов, с лихвой перекрывает эти потери.

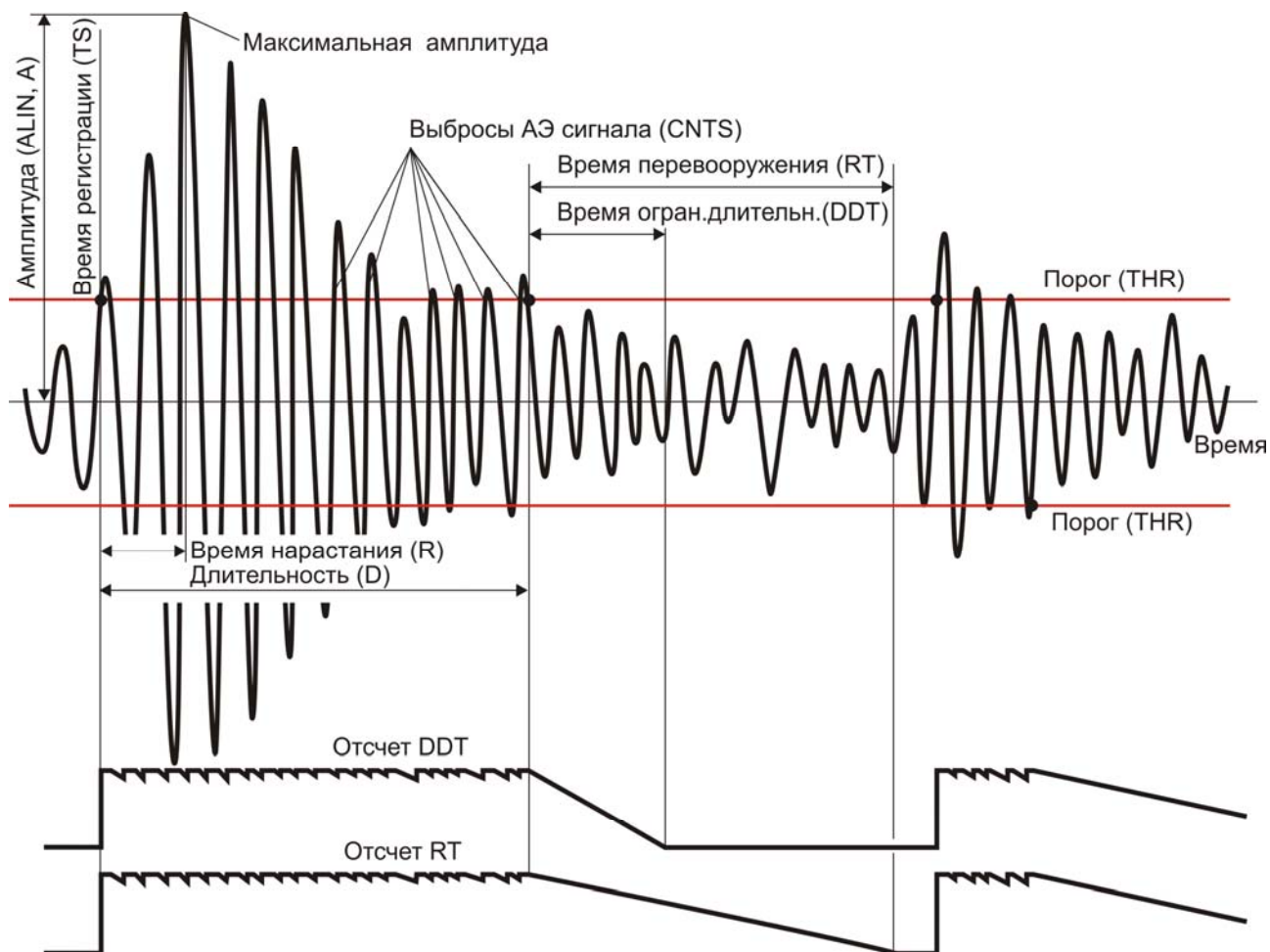


Рис. 1. Пример выделения АЭ импульса для АЭ системы AMSY-5

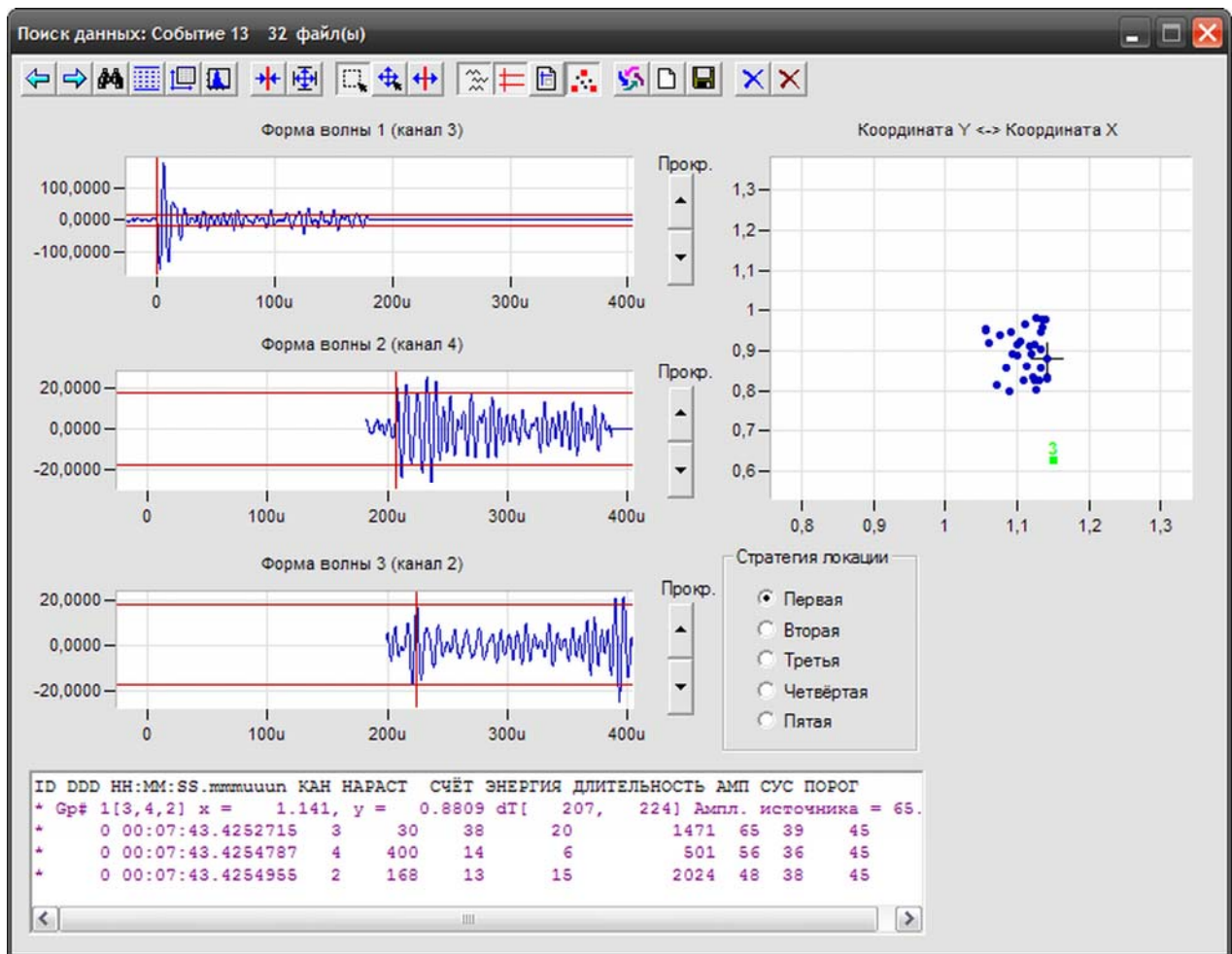


Рис. 2. Форма волны импульсов локализованного события – AEWin, PAC

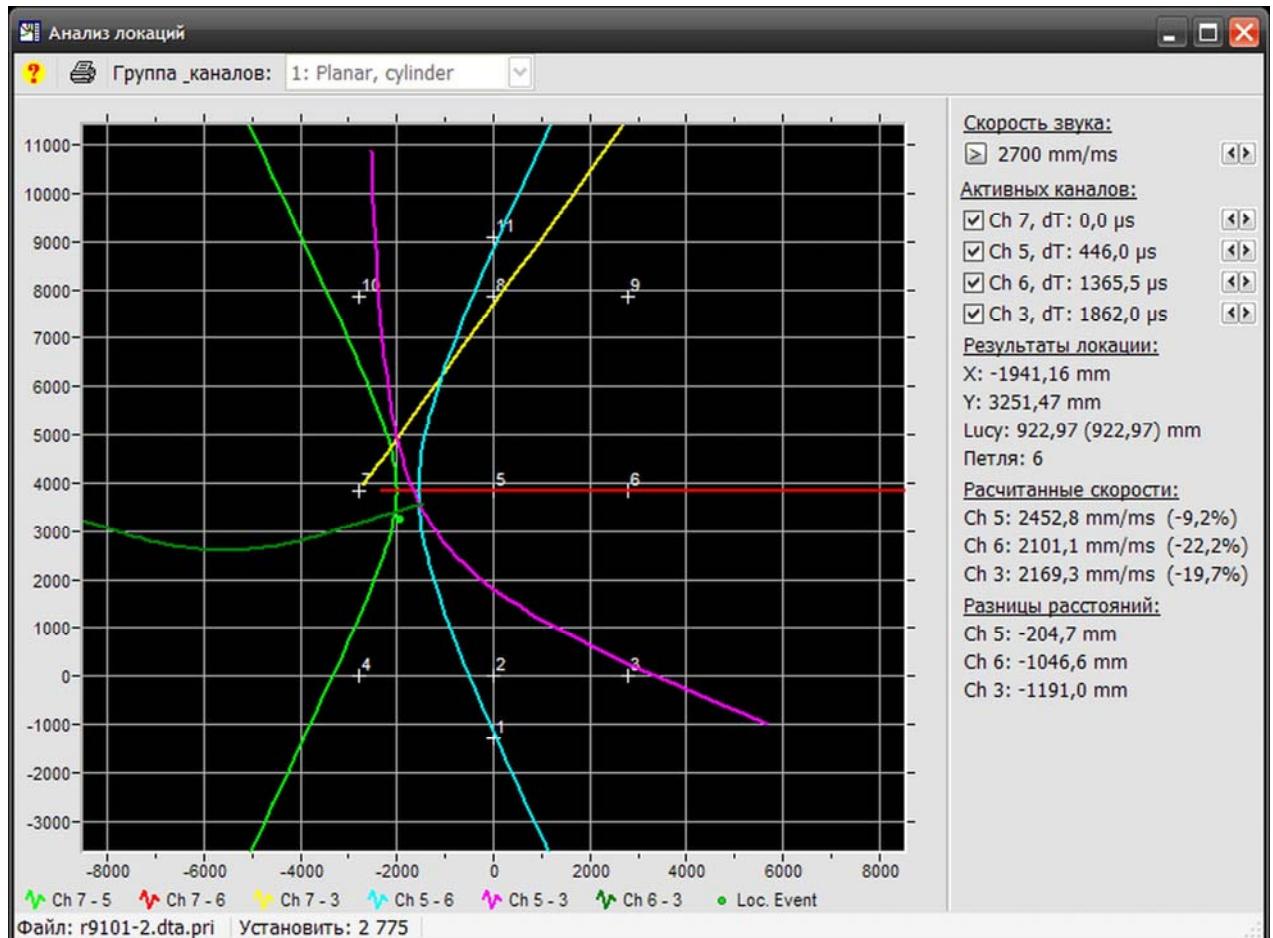


Рис. 3. Анализатор локации Vallen VisualAE

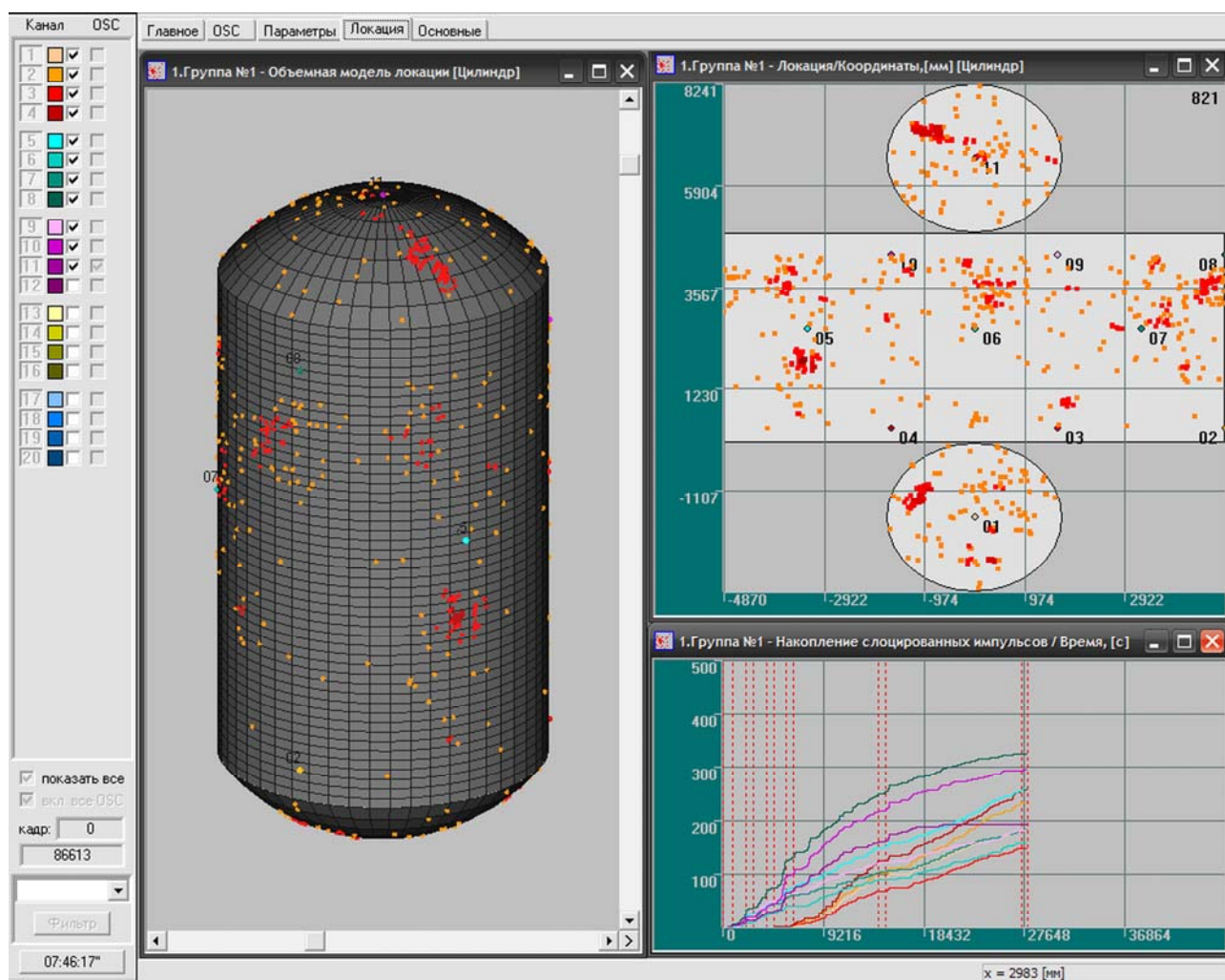


Рис. 4. Представление лоцированных источников АЭ в A-Line 32D

КАЛИБРОВКА ПАЭ В ПРОГРАММЕ «A-LINE 32D»

М. Ю. Ростовцев, В. А. Барат, Д. А. Терентьев

ООО «ИНТЕРЮНИС», г. Москва

Основные сведения

Под калибровкой подразумевается автоматизированная процедура проверки качества установки преобразователей акустической эмиссии (АЭ), сокращенно ПАЭ, на объекте контроля (ОК). Эта процедура состоит из трех составных частей:

- неоднократное и поочередное излучение упругой волны преобразователями АЭ, подключенными к модулям комплекса Лель /A-Line 32D (DDM)/ [1];
- регистрация аппаратурой импульсов АЭ (ИАЭ), являющихся фронтом излученной волны, и вычисление их параметров;
- использование в программном обеспечении (ПО) комплекса специального алгоритма для анализа полученных параметров ИАЭ и получения оценки качества такой «прозвучки».

Кроме излучения модулем комплекса Лель /A-Line 32D (DDM)/ допускается использование источника Су-Нильсена или любого другого, обеспечивающего генерацию серий упругих волн, и приводящего к регистрации этих волн хотя бы парой ПАЭ.

Процедура предполагает одинаковые настройки и состав всех используемых в калибровке каналов (в т. ч. ПАЭ).

Для учета сложной акустической обстановки на ОК и корректного вычисления параметров регистрируемых упругих волн в общей процедуре калибровки предусмотрены два предварительных теста для программной подстройки параметров аппаратуры. В первом тесте производится (без всякого излучения) оценка фоновой (подпороговой) уровня сигнала (шума) на ОК без нагружения, априори предполагая равенство этих уровней у разных каналов. Во втором тесте производится пробное поочередное излучение всеми каналами и выявление факта их приема. После завершения работы каждого теста производится назначение таких настроек системы, с которыми вычисление параметров принимаемых калибровочных импульсов при самой калибровке будет оптимальным.

Ссылка на загрузку документа «Описание автоматизированной процедуры калибровки» с подробным руководством по настройке находится по адресу [2], в подразделе «Основные изменения» для версии 4.96.

Контроль уровня шума

Первая процедура позволяет выделить те каналы, для которых подпороговые уровни сигнала выделяются из общей статистики по каналам. Для этого задается зачетная продолжительность теста, по истечении которой сначала производится оценка поканальных основных статистик: средних (ASL) и среднеквадратичных (RMS) посекундных значений уровня сигнала. По заранее заданным «проходным» интервалам для вычисленных статистик производится первичное выделение подозрительных каналов. Для каждого подозрительного канала оператор должен выбрать одно из трех действий (выбор оператора – ВО):

- прервать процедуру;
- исключить канал и продолжить процедуру;
- произвести переустановку ПАЭ, предполагая что ситуация вызвана некачественной установкой этого ПАЭ на ОК, а после переустановки запустить процедуру повторно.

Затем осуществляется вторичное выделение подозрительных каналов, для чего применяются два метода межканальной оценки на выброс среди вычисленных статистик ASL и RMS: критерий 3σ и критерий Шовене. Для каждого подозрительного канала осуществляется ВО.

Среди подозрительных каналов могут быть те, у которых установлены ПАЭ с разной чувствительностью (в том числе обрыв и короткое замыкание в соединяющем кабеле). Возможен и случай установки ПАЭ на такое место ОК, шумовая обстановка на котором отличается от остальных мест контроля, что противоречит первоначальным предположениям.

После удачного завершения теста назначается уровень порога для дальнейших вычислений.

Пробное излучение

Вторая процедура позволяет выявить отсутствие калибровочных пачек от излучения по каждому каналу. Калибровочная пачка – это совокупность ИАЭ, принятых разными каналами и являющихся следствием калибровочного излучения. При калибровке модулями комплекса Лель /A-Line 32D (DDM)/ минимальное число каналов, регистрирующих фронт упругой волны, должно быть не меньше одного. Это связано с тем, что модуль при формировании сигнала для излучения преобразователем АЭ создает специфический ИАЭ, время регистрации которого совпадает со временем излучения по этому каналу. Этот импульс является запусковым при формировании пачки и назначается опорным, от которого отсчитывается время для вычисления разницы времен прихода (РВП) для остальных импульсов пачки.

В случае «ручной» калибровки минимальное число каналов, регистрирующих фронт упругой волны, должно быть не меньше двух. При этом канал, ПАЭ которого находится возле места излучения, является запусковым при формировании пачки.

Подозрительными каналами в процедуре считаются те, излучения от которых после трех излучений не регистрируются минимальным числом каналов. Для них осуществляется ВО.

Среди подозрительных каналов могут быть те, ПАЭ которых были некачественно установлены в соответствующих местах ОК, как того требует ПБ [3].

Только каналы, успешно прошедшие оба критерия, участвуют в дальнейших измерениях.

Калибровка каналов

Все каналы, прошедшие тесты на уровень шума и пробную калибровку, принимают участие в основной процедуре калибровки. Так же как и при пробной калибровке, все каналы по очереди производят излучение, но не менее семи раз. Вся статистика аккумулируется в окне «Калибровка каналов» в виде таблиц, располагаемых на соответствующих вкладках по каждому измеряемому параметру (рис. 1). Параметры ИАЭ следующие: РВП, амплитуда, энергия, длительность, выбросы, время нарастания, а также число зарегистрированных импульсов всеми принимающими каналами от излучения ПАЭ каждого канала. Строки таблицы отвечают за излучения, а столбцы – за прием этого излучения. Результаты в таблицах могут быть представлены в величинах среднего, медианного и в значениях вариации выборки в процентах. По умолчанию отображаются медианные величины, как менее подверженные случайным выбросам в выборке. Оценить же разброс можно по величине вариации, определяемой как отношение среднеквадратичного отклонения к значению мат. ожидания (среднего) собранной статистики (рис. 2). Символами «+» помечаются те выборки, для которых ва-

риация не превышает 2 %. В обратных фигурных скобках отмечаются те статистики, что превышают 5 %.

Поканальные величины качества отображаются в столбцах принимающих каналов и вычисляются через оценку симметричности матрицы излучения-приема. На рис. 1 и 2 значения качества отображаются по пятибалльной шкале, где 5,0 соответствует лучшей оценке. Для каждого измеряемого параметра вычисляются свои поканальные медианные значения качества, которые проходят отсев на заданные минимальные проходные величины. Для каналов, качество которых хоть по одному измеряемому параметру меньше заданных проходных значений, осуществляется ВО. Для всех прошедших отбор каналов вычисляются общие (финальные) поканальные оценки качества калибровки, где измеряемые параметры имеют свои уровни значимости, задаваемые в настройках калибровки. Для финальных поканальных величин качества также задается минимальный проходной уровень, по уровню которого производится ВО.

Определение параметров среды

На основе медианных статистик по амплитуде и РВП, а также используя координаты ПАЭ на ОК, элементарно вычисляются затухание и скорость акустической волны.

Авторасстановка ПАЭ

Если на ОК замерены только некоторые координаты ПАЭ, то на основе медианных статистик по РВП становится доступным использование алгоритмов из работы [4]. Этот алгоритм базируется на итерационной корректировке координат ПАЭ таким образом, чтобы времена распространения волн между преобразователями соответствовали матрице РВП.

Литература

1. Патент RU 44390 U1, 10.03.2005.
2. http://www.interunis.ru/products/pci/izmeneniya_v_programme_a-line_32d/
3. ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов.
4. Терентьев Д. А., Алякритский А. Л., Ростовцев М. Ю. Автоматическое определение координат преобразователей на объекте при акустико-эмиссионном контроле. – Контроль. Диагностика. 2007. № 1 (103). С. 31–34.



Рис. 1. Общий вид окна статистики калибровки каналов по параметру РВП по медианным значениям

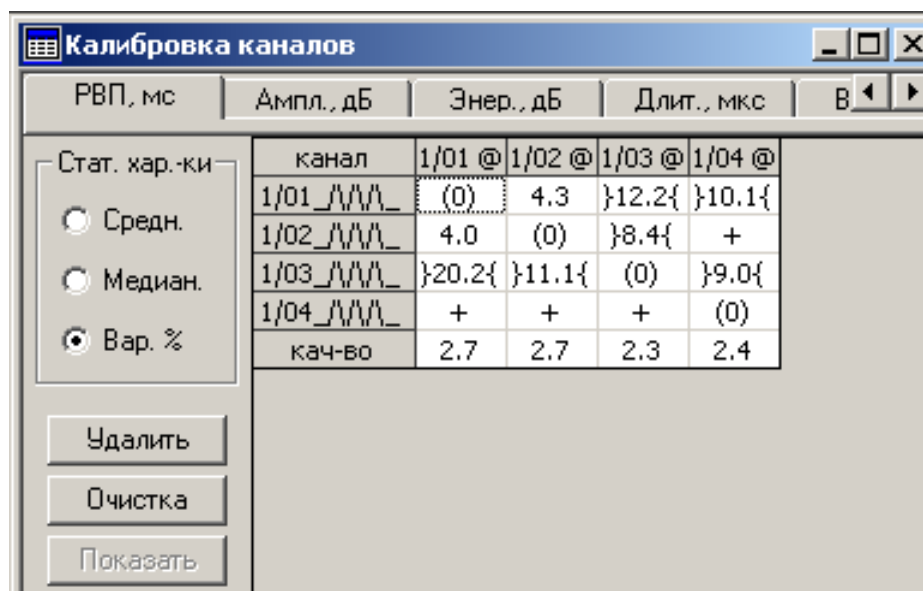


Рис. 2. Окно статистик калибровки по параметру РВП по вариации

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ ТРЕНИИ МАНЖЕТЫ ВНУТРИТРУБНОГО ОБЪЕКТА О СТЕНКУ ТРУБОПРОВОДА

А. Н. Калинин, Б. М. Лапшин

Томский политехнический университет, г. Томск

В последние десятилетия в трубопроводном транспорте нефти и газа начали широко использовать акустические приборы (СПРА-4, ДПС-7В, ClampOn DSP PIG Detector) для автоматического контроля прохождения всех видов очистных устройств, поршней и средств внутритрубной диагностики, движущихся с потоком перекачиваемой жидкости по трубопроводу при различных условиях технологического процесса, и передачи необходимой информации в автоматизированную систему управления продуктопроводом [1].

Регистрируя акустические сигналы (шумы) при помощи таких приборов, устанавливаемых на трубопровод без нарушения его целостности (без врезки в трубу), определяют момент прохождения внутритрубным объектом (ВТО) контрольной точки на трубопроводе.

Все акустические сигналы, возникающие в трубопроводе, можно разделить на две группы: акустические помехи (например, течение продукта по трубопроводу, осадки, работа насосно-перекачивающих станций и др. случайные внешние акустические сигналы) и акустические сигналы от прохождения ВТО, источником которых является трение ВТО о стенку трубопровода, основная энергия которого сосредоточена в определенном частотном диапазоне. Работая в этом диапазоне частот, аппаратура способна выделять полезный сигнал на фоне помех, что позволяет зафиксировать момент прохождения ВТО при скорости потока от 0,1 до 10 м/сек.

Однако природа физического взаимодействия ВТО со стенкой трубопровода до сих пор остается во многом не изученной из-за сложности постановки таких экспериментов и многообразия процессов, сопровождающих относительное движение двух тел, находящихся в контакте. Контакт осуществляется посредством дисков, манжет и др., изготовленных из материалов, стойких к истиранию. При определенных условиях трения скольжения в сопряжении возникают упругие колебания, которые можно зафиксировать, применяя специальную аппаратуру. Можно считать, что упругие колебания, в том числе сопровождающиеся акустической эмиссией, обусловлены триботехническими свойствами материалов, составляющих пару трения – интенсивностью износа и коэффициентом трения [2].

В литературе указывается достаточно противоречивая информация по выбору частотного диапазона, в котором должен работать акустический сигнализатор: в одном случае эта частоты от 10 кГц до 4 МГц [3], в другом – от 100 до 200 кГц [4]. В связи с этим существует проблема – какой частотный диапазон использовать для достоверного контроля прохождения ВТО.

Задача экспериментальных исследований – исследование распределения частотного спектра акустического сигнала, полученного в результате трения скольжения трибосистемы, в области ультразвуковых частот в зависимости от скорости передвижения ВТО. Тем самым можем определить условия достоверной работы акустического датчика, что в основном определяет возможность использования акустических сигнализаторов прохождения ВТО в экс-

плуатационных условиях. Кроме того, задачей испытаний является исследование указанных параметров в зависимости от типа транспортируемой по трубопроводу среды: жидкой или газообразной.

Для проведения экспериментальных исследований параметров сигнала, полученного в результате прохождения ВТО, была разработана и сооружена специальная установка, принципиальная схема которой приведена на рис. 1.

Испытуемый образец 1 жестко закреплен на валу 2 и контактирует с поверхностью участка трубопровода 3. Вращение вала передается от электродвигателя 4 при помощи ременной передачи со шкивами 5. Электродвигатель закреплен на стойке 6, которая может перемещаться по направляющим 7 для регулировки натяжения ремней при изменении скорости вращения вала с испытуемым образцом 1.

Устройство для замера частоты оборотов 8 и, следовательно, скорости скольжения установлено напротив вала 2 и состоит из датчика, который при каждом прохождении светоотражающей метки, закрепленной на валу, подает сигнал на персональный компьютер 9, на котором при помощи специального программного обеспечения выводится информация о скорости вращения.

При экспериментальных исследованиях регистрируются акустические сигналы. Для этого к участку трубопровода был прикреплен приемный преобразователь 10, который передает акустические сигналы для первичной обработки на аналогоцифровой преобразователь PCS500 11. После чего преобразованные сигналы поступают на персональный компьютер для окончательной обработки.

В экспериментальных исследованиях для регистрации частотных спектров сигналов АЭ нами использовался набор резонансных пьезопреобразователей с пластинами, изготовленными из пьезокерамики ЦТС-19 и настроенными на частоты 107, 146, 180, 215 и 269 кГц, что позволило полностью перекрыть частотный диапазон, в котором проводились исследования.

В ходе испытаний непрерывно регистрировались частотные спектры непрерывной АЭ и сопоставлялись интенсивности их различных частотных составляющих.

Испытания образцов проводятся по схеме диск–плоскость: образец из исследуемого материала (диск с наружным диаметром 150 мм) скользит по поверхности участка трубопровода с заданными скоростями, в диапазоне от 0,3 до 5 м/с.

Исходя из опыта применения стандартных типов ВТО, были изготовлены образцы из следующих материалов: щеточный диск из отрезков стального троса; диск из высокоэластичной, износостойкой, устойчивой к действию топлива и масел резины; диск из полиуретана – материала подходящего на смену резине.

Тестирование системы производилось без контакта образец–стенка трубопровода. Полученный при помощи описанной аппаратуры спектр акустических шумов установки приведен на рис. 2б.

Как видно из рис. 2, спектр акустических шумов установки практически не отличается от собственных шумов датчика, что позволяет работать только с исследуемым акустическим сигналом, полученным в результате трения образца о стенку участка трубопровода.

Полученные экспериментальным путем частотные спектры непрерывной АЭ для установившихся режимов трения различных материалов, достигнутых при соответствующих скоростях скольжения, приводятся на рис. 3а – в для жидкой и на рис. 3г – е и газообразной сред.

Также качественная зависимость полученных результатов для сухого трения была экспериментально подтверждена на испытательном стенде, схема которого приведена на рис. 4.

Значительный разброс амплитуды (резкие всплески или падения максимума частотного спектра) можно объяснить, исходя из следующих соображений. Известно, что воспроизводимость результатов фрикционных испытаний невысока. В частности, в обычных атмосферных условиях имеет место существенный разброс значений коэффициента трения. Он обусловлен тем, что на фрикционные свойства поверхностей оказывает влияние большое число факторов (состав и температура окружающей среды, микрогеометрия поверхностей, их физико-химические свойства и т. п.), меняющихся даже при постоянных нагрузках и скоростях скольжения. Еще в большей степени эти факторы влияют на параметры АЭ, которые более чувствительны к процессам в зоне фрикционного контакта, чем коэффициент трения. Кроме того, АЭ при трении представляет собой непрерывный случайный процесс, и при измерениях регистрируются выбросы этого процесса, превышающие уровень дискриминации [2].

Полученные результаты показывают, что любое перемещение ВТО по трубопроводу приводит к возникновению сигналов АЭ. Анализ распределения частотных спектров показывает, что увеличение скорости скольжения испытуемых материалов относительно участка стенки трубопровода приводит к увеличению амплитуды по всему спектру регистрируемых частот.

Также можно сделать вывод, что сигнал от прохождения ВТО при нормальном режиме перекачки продукта по магистральному трубопроводу (скорость перекачки нефти от 1 до 2 м/с, газа от 1 до 5 м/с) можно уверенно регистрировать на фоне шумов трубопровода, на частотах до 250 кГц.

Литература

1. Штин И. В., Тарасов А. П., Размыслов А. Г., Лапшин Б. М. Опыт эксплуатации сигнализаторов прохождения внутритрубных объектов типа СПРА-4. – Трубопроводный транспорт нефти. 2004. № 3.
2. Баранов В. М., Кудрявцев Е. М., Сарычев Г. А. и др. Акустическая эмиссия при трении. – М.: Энергоатомтздат, 1998. – 216 с.
3. Алексеев В. А., Донченко В. А., Сакенко А. Г., Шапоров В.Я. Устройство для контроля прохождения очистного объекта в трубопроводе. Патент 2030678 РФ. Заявлено 16.01.1992; опубл. 10.03.1995.
4. Лапшин Б. М., Штин И. В., Николаева Е. Д., Саенко В. А. Устройство контроля прохождения очистных объектов в трубопроводах. Авт. свид. 1629684 СССР. Заявлено 31.03.1989; опубл. 23.02.1991.

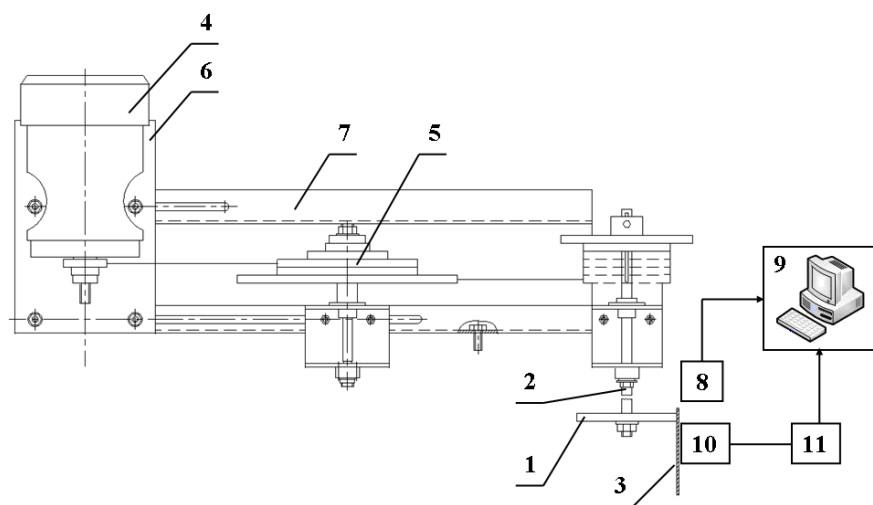


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:

1 – испытуемый образец; 2 – вал для крепления испытуемого образца; 3 – участок трубопровода; 4 – электродвигатель; 5 – ременная передача со шкивами; 6 – стойка; 7 – направляющие; 8 – датчик для замера скорости вращения; 9 – персональный компьютер; 10 – приемный преобразователь; 11 – аналого-цифровой преобразователь

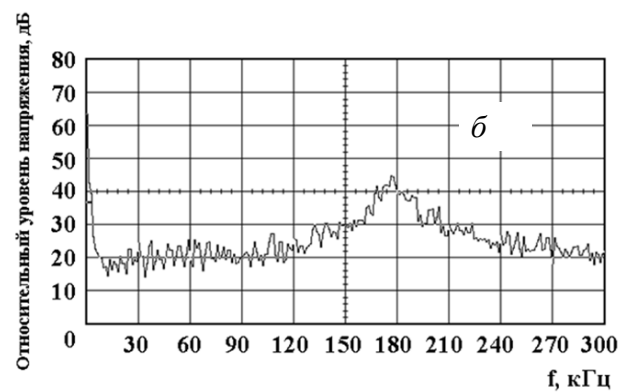
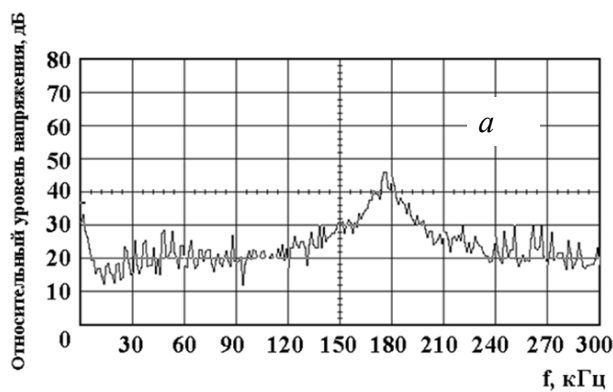


Рис. 2. Частотные спектры: *a* – собственных шумов датчика с пьезопластиной диаметром 10 мм и толщиной 8 мм при выключенной установке; *б* – акустических шумов включенной установки

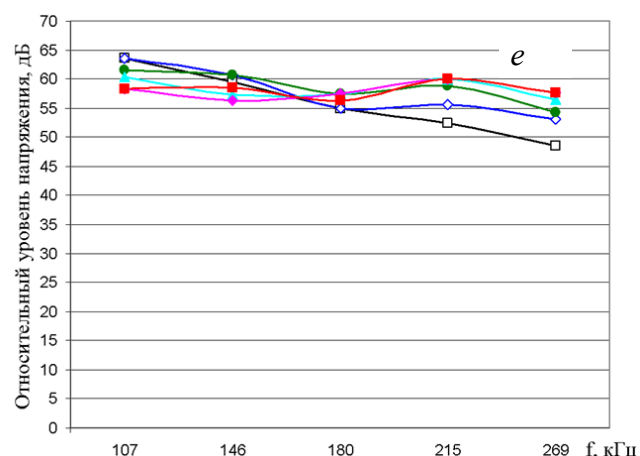
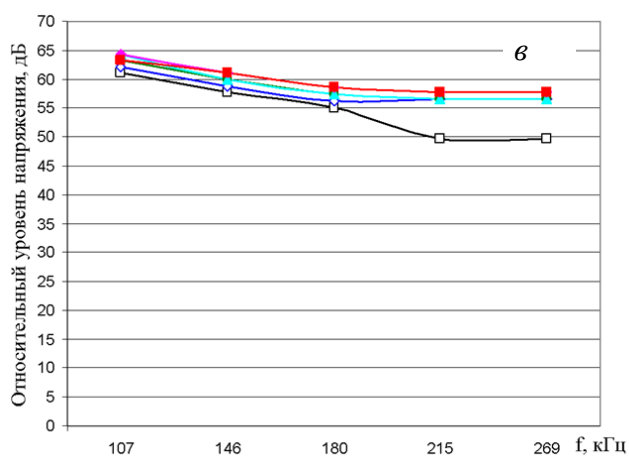
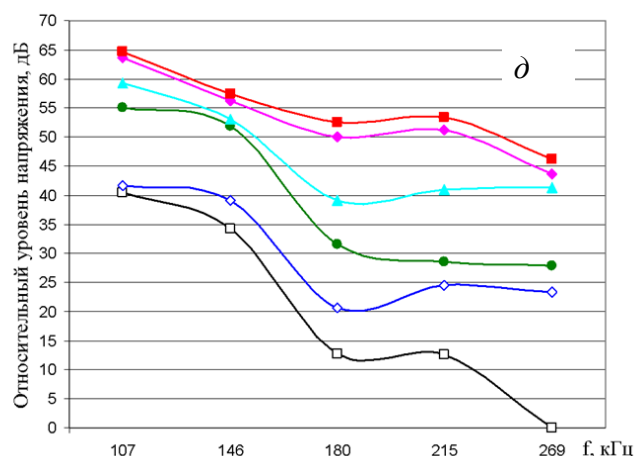
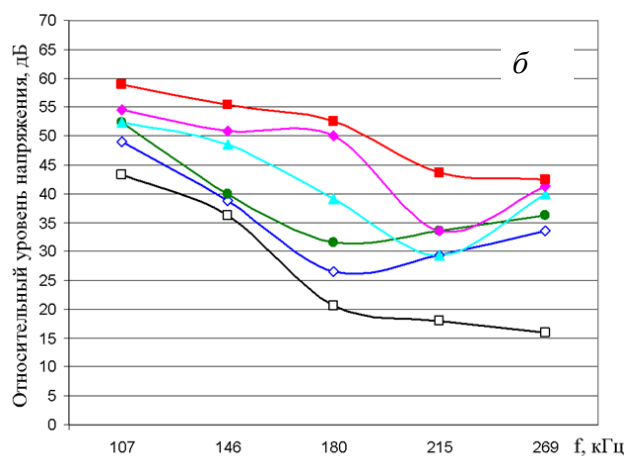
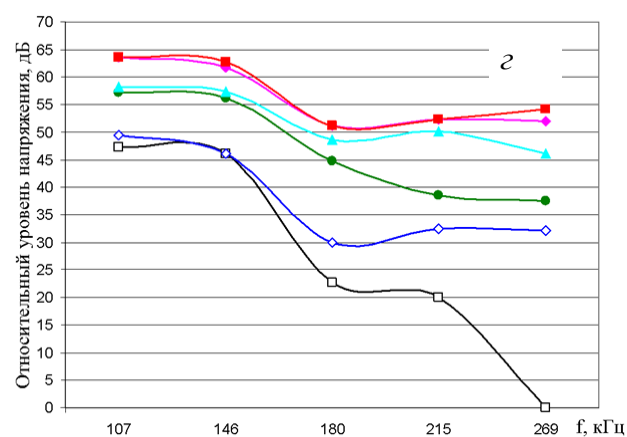
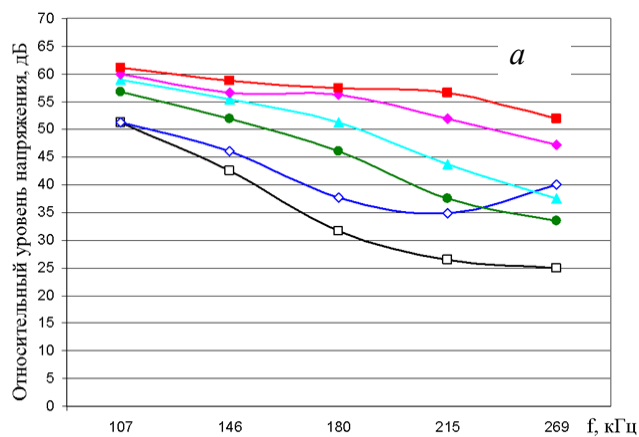


Рис. 3. Распределение частотных спектров сигналов, полученных от образцов из резины (*a*), полиуретана (*б*) и металлической щетки (*в*) в жидкой среде; из резины (*г*), полиуретана (*д*) и металлической щетки (*е*) в газообразной среде, в зависимости от различных скоростей скольжения: $\square$ – 0,3; $\diamond$ – 0,5; $\blacklozenge$ – 1,0; $\blacktriangle$ – 2,0; $\blacklozenge$ – 3,0; $\blacksquare$ – 5,0 м/с

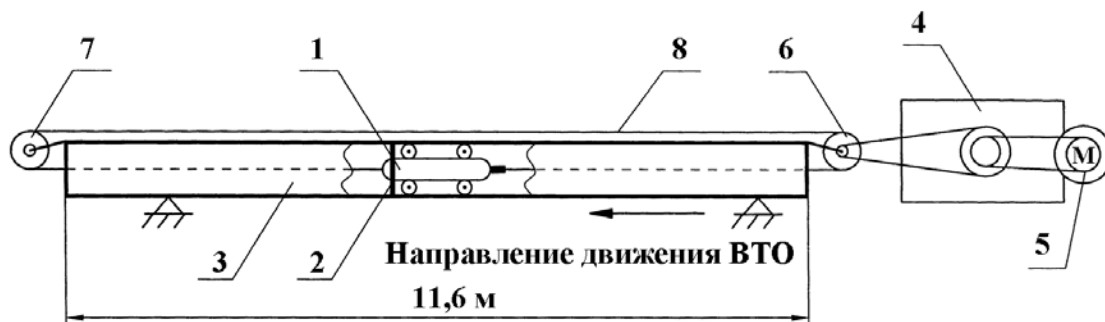


Рис. 4. Схема испытательного стенда: 1 – ВТО; 2 – манжета из исследуемого материала; 3 – трубопровод 325х7 мм; 4 – редуктор на шкивах; 5 – электродвигатель; 6 – ведущий шкив; 7 – ведомый шкив; 8 – шнур для протягивания ВТО

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РАСПОЗНАВАНИЕ ДИСПЕРСИОННЫХ КРИВЫХ НА СПЕКТРОГРАММЕ АЭ СИГНАЛА

К. А. Булыгин, Д. А. Терентьев

ООО «ИНТЕРЮНИС», г. Москва

Введение

Основной целью новых разработок в области акустической эмиссии (АЭ) является создание методик, основанных на интеллектуальной обработке осциллограмм, а не на анализе ограниченного набора АЭ параметров [1].

В большинстве случаев АЭ контроль проводится на объектах с толщиной стенки 3 – 50 мм. Эта величина сравнима с длинами акустических волн, которые на типичных рабочих частотах преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ) 30 – 500 кГц лежат в диапазоне от 5 до 170 мм. В этой ситуации возникает необходимость использовать модель нормальных волн Лэмба [2].

Решения волнового уравнения в пластинах зависят от частоты и толщины стенки, причем на одной и той же частоте может существовать несколько решений. Каждому такому решению, называемому модой, соответствует своя картина колебаний в пластине, а также своя скорость распространения (рис. 1, 2). Полное число возможных мод увеличивается с ростом частоты колебаний. Как правило, в пластине распространяется линейная комбинация мод различного порядка, однако основную часть энергии в большинстве случаев переносят нулевые симметричная S_0 и антисимметричная A_0 моды.

Для стали ($C_L = 5,9 \cdot 10^3$ м/с, $C_T = 3,1 \cdot 10^3$ м/с) значения групповой скорости меняются в диапазоне от нуля: $C_{A_0}(0) = 2[E/3\rho(1 - \mu^2)]^{1/4}(\pi f h)^{1/2}$ до $5,3 \cdot 10^3$ м/с: $C_{S_0}(f \rightarrow 0) = [E/\rho(1 - \mu^2)]^{1/2} = C_T[2(1 - \mu)]^{1/2}$.

В пределе при $f \rightarrow \infty$ групповые скорости всех мод стремятся к скорости поверхностной волны Рэлея [2], для стали равной $2,9 \cdot 10^3$ м/с. Здесь h – толщина пластины, E – модуль Юнга, μ – коэффициент Пуассона, ρ – плотность материала, C_L и C_T – скорости объемных продольной и поперечной волн в материале объекта.

АЭ сигнал излучается микротрещиной в виде широкополосного импульса длительностью 0,001 – 0,01 мкс [1]. Наличие зависимости скорости распространения от частоты приводит к тому, что различные частотные составляющие сигнала приходят на преобразователь акустической эмиссии с разбросом в десятки и сотни микросекунд, что существенно снижает точность определения координат источников АЭ.

Перспективным методом анализа АЭ сигналов, распространяющихся в виде волн Лэмба, является использование спектрограмм $W(t, f)$ – специальных преобразований сигнала $A(t)$, дающих представление о распределении его энергии и по времени, и по частоте. Поскольку $W(t, f)$ представляет собой функцию от двух переменных, для визуализации спектрограмм используется цветовая диаграмма (рис. 3), ось абсцисс на которой соответствует времени, ось ординат – частоте, а распределение модуля величины $W(t, f)$ отображается при помощи различных оттенков цвета [3].

Рассмотрим случай короткого широкополосного АЭ сигнала, излученного источником в момент времени t_0 , распространяющегося по объекту толщиной h в виде комбинации S_0 и A_0 мод и принятого преобразователем АЭ, находящимся на расстоянии L от источника [4]. Каждая из частотных составляющих импульса придет на ПАЭ дважды, а именно в моменты времени $t = L/v_{ГР S_0} + t_0$ и $t = L/v_{ГР A_0} + t_0$. Соответственно, на спектрограмме сигнала будут видны (рис. 3) две кривые, заданные уравнениями

$$t(f) = \begin{cases} L/v_{ГР S_0}(f, h) + t_0 \\ L/v_{ГР A_0}(f, h) + t_0 \end{cases} \quad (1)$$

Таким образом, зная толщину объекта, расстояние до источника и время излучения, можно рассчитать общий вид спектрограммы АЭ сигнала, и наоборот – выявив на спектрограмме сигнала дисперсионные кривые волн Лэмба, можно определить расстояние до источника, время излучения и толщину объекта [3 – 5].

Метод распознавания

Помимо указанных выше параметров на форму осциллограммы АЭ сигнала и, следовательно, на вид его спектрограммы влияют пространственное положение трещины и ее тип, затухание сигнала, амплитудно-частотная характеристика ПАЭ, шумы, отражения сигнала от краев объекта. Точные значения коэффициентов, характеризующих влияние этих факторов, зачастую неизвестны, что делает невозможным применение простых аналитических методов вычисления толщины объекта, расстояния до источника и времени излучения.

Поэтому для определения указанных параметров было решено использовать метод распознавания дисперсионных кривых, основанный на преобразовании Хафа, специально модифицированном для поиска дисперсионных кривых волн Лэмба.

Пусть имеется семейство дисперсионных кривых, заданных уравнением (1) с параметрами $\{L, t_0, h\}$. Параметры данного семейства образуют так называемое фазовое пространство, каждая точка которого соответствует некоторой дисперсионной кривой на плоскости $\{t, f\}$. Так как входные данные имеют дискретный характер, то фазовое пространство преобразуется в дискретное. Для этого в фазовом пространстве вводится сетка, разбивающая его на ячейки, каждая из которых соответствует набору дисперсионных кривых с близкими значениями параметров. Каждой ячейке фазового пространства ставится в соответствие число (счётчик), равное количеству точек на спектрограмме, удовлетворяющих условию $|W\{t, f\}| > \varepsilon \max(|W|)$ и принадлежащих дисперсионной кривой (1), соответствующей данной ячейке $\{L, t_0, h\}$. Здесь ε – задаваемый пользователем уровень порога (обычно составляет несколько процентов), $\max(|W|)$ – максимальное по модулю значение величины $W\{t, f\}$ на обрабатываемой спектрограмме. Сравнение значений счётчиков позволяет найти на спектрограмме дисперсионную кривую, на которых лежит наибольшее количество точек со значениями выше порогового (рис. 3).

Обнаружено, что наиболее подходящими для анализа экспериментальных данных являются спектрограммы на основе преобразований Вигнера-Вилля и Чои-Вильямса.

Практическое применение

Для ручной и автоматической обработки осциллограмм и спектрограмм АЭ сигналов компанией «ИНТЕРЮНИС» было разработано специализированное программное обеспечение «A-Line OSC Processing» (рис. 3), позволяющее производить следующие операции [6], как связанные с анализом волн Лэмба:

- построение графика групповых скоростей волн Лэмба;

- получение спектрограмм на основе различных преобразований (непрерывное вейвлет-преобразование, распределение Чои-Вильямса, распределение Вигнера-Вилля);
- наложение дисперсионных кривых на спектрограммы, так и универсальные;
- получение частотного спектра;
- фильтрация осциллограмм сигналов;
- объединение и усреднение осциллограмм, частотных спектров и спектрограмм;
- фильтрация шумов в осциллограммах сигналов;
- проведение вычислений специальных параметров по осциллограммам, частотным спектрам и спектрограммам: величин энергии в каждом частотном диапазоне, величин корреляции по осциллограммам и спектрам, частот спектральных максимумов и т. д.;
- сортировка сигналов по указанным выше параметрам;
- преобразование осциллограмм в звуковые файлы.

Добавление к указанным возможностям программы «A-Line OSC Processing» метода распознавания дисперсионных кривых на спектрограммах позволило разработать три принципиально новых методики.

Первая методика позволяет определять местоположение АЭ источника при приходе сигнала только на один ПАЭ. Необходимость в такой методике возникает, например, при контроле газопроводов с большим расстоянием между шурфами, либо при наличии только одностороннего доступа к какому-либо протяженному объекту. В этом случае при приходе сигналов на ПАЭ происходит регистрация осциллограмм, вычисление соответствующих им спектрограмм и выявление дисперсионных кривых с вычислением параметра L , характеризующего расстояние до источника сигнала. Точность локации в отличие от стандартного метода, основанного на разнице времен прихода (РВП), достигает 1 % от расстояния между ПАЭ и источником.

Испытания данной методики проводились при контроле газопровода с расстоянием между шурфами около 40 м. При обследовании объекта был зарегистрирован ряд АЭ сигналов, приходивших только на один из установленных ПАЭ. Отсутствие информации о времени прихода на второй ПАЭ не давало возможности определить координаты источников, что, в свою очередь, не позволяло вычислить эффективную амплитуду сигнала и определить класс опасности источника АЭ [2]. Проведенная предложенным методом локация показала, что источники находятся на расстояниях от 1 до 3,5 м от ПАЭ, что позволило вычислить эффективные амплитуды сигналов и отнести их ко II классу опасности.

Вторая методика позволяет в процессе автокалибровки АЭ системы определять координаты преобразователей АЭ, установленных на объекте. Со всеми преобразователями проводится следующая операция: по очереди каждый ПАЭ по команде акустико-эмиссионной системы излучает импульсный широкополосный сигнал, все остальные преобразователи его принимают. АЭ комплекс путем анализа спектрограмм вычисляет расстояние между всеми близко расположенными парами ПАЭ и затем итерационным способом [7] находит их координаты с точностью до 1 % от характерного расстояния между ПАЭ.

Третья методика существенно расширяет возможности стандартного АЭ оборудования и позволяет проводить измерения средней (интегральной) толщины [8] стенки объекта контроля (например, газопровода или цистерны) между двумя точками доступа с точностью до 1 % от исходного значения. Такая технология может быть использована для экспресс-измерения или мониторинга общей потери массы металла. Особую ценность метод представляет при обследовании объекта, обладающего большими геометрическими размерами, либо при контроле объекта, доступ к большей части поверхности которого невозможен или затруднен, например, из-за нежелательности снятия изоляции. Схема работы следующая: на

объекте на расстоянии нескольких метров или десятков метров друг от друга устанавливаются излучатель и приемник (рис. 4). В качестве излучателя используется преобразователь акустической эмиссии, подключенный к имитатору АЭ сигналов (рис. 5) либо системе A-Line DDM производства компании «ИНТЕРЮНИС» (рис. 6), приемником является ПАЭ с широкой полосой чувствительности, например, GT200. Излучатель испускает импульсный (длительностью порядка микросекунды) и широкополосный сигнал. Путем вычислений, аналогичных приведенным в описании первой методики, определяется значение параметра h , характеризующего среднее значение толщины стенки объекта между источником и приемником.

Для проверки работы второй и третьей методик проведена серия экспериментов на трубопроводах и вырезанных участках труб с толщиной стенки 8 – 17 мм и диаметром 530 – 1220 мм с изоляцией и без нее, с жидкостью наполнения и без нее, а также на сферическом газгольдере с толщиной стенки 40 мм. Эксперименты, проведенные на газгольдере и на газопроводе с новой заводской изоляцией, показали, что размер одновременно контролируемой области между источником и приемником может достигать 10 – 12 м. Эксперименты на газопроводе без изоляции доказали успешность работы на дистанциях как минимум до 56 м (рис. 7). Эксперименты также показали, что сварные швы (их количество в эксперименте доходило до 4) не оказывают влияния на процессы измерения средней толщины и расстояния между ПАЭ.

Литература

1. В.И. Иванов, И.Э. Власов. Метод акустической эмиссии. – В кн.: Неразрушающий контроль / Справочник в 7 т. // Под ред. В. В. Клюева. Т. 7. Кн. 1. – М. Машиностроение, 2005, с. 46.
2. Викторов И. А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. – М.: Наука, 1966, – 169 с.
3. Терентьев Д. А., Елизаров С. В. Вейвлет-анализ сигналов АЭ в тонкостенных объектах. – Контроль. Диагностика. 2008. № 7; см. также <http://interunis.ru/index.php?newsid=25>.
4. Hamstad. M. A., O’Gallagher A., Gary J. Examination of the Application of a Wavelet Transform to Acoustic Emission Signals. – J. Acoustic Emission. 2002. V. 20. P. 39–81; см. также <http://www.engr.du.edu/profile/pdf/20-039.pdf> и <http://www.engr.du.edu/profile/pdf/20-062.pdf>.
5. Method and system for interpreting and utilizing multimode dispersive acoustic guided waves. U. S. Patent US 6360609; <http://www.freepatentsonline.com/6360609.pdf>.
6. Программное обеспечение A-Line. 32D. <http://interunis.ru/products/pci/>.
7. Терентьев Д. А., Алякритский А. Л., Ростовцев М. Ю. Автоматическое определение координат преобразователей на объекте при акустико-эмиссионном контроле. – Контроль. Диагностика. 2007. № 1 (103). С. 31–34.
8. DSP Corrosion-Erosion Monitoring. <http://www.clampon.com/?page=2&show=7&title=DSP%20Corrosion-Erosion%20Monitoring>
9. Харебов В.Г., Жуков А. В., Кузьмин А. Н. Практическая оценка метода акустической эмиссии на технологических газопроводах. – В мире НК. 2008. № 3(41). С. 24–26; см. также <http://interunis.ru/index.php?newsid=29>.
10. Быков С. П., Юшин А. В., Морозов И. Л. Особенности акустико-эмиссионного контроля мостовых кранов. – Тезисы докладов конференции «Управление Рисками, Промышленная Безопасность, Контроль и Мониторинг». – М.: НПС «РИСКОМ», 2006. <http://himmash.irk.ru/ru/content/view/194/24/>

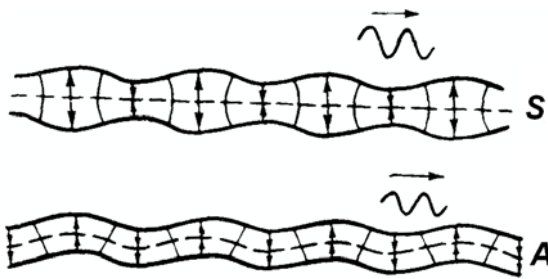


Рис.1. Нормальные волны Лэмба в пластинах [2]

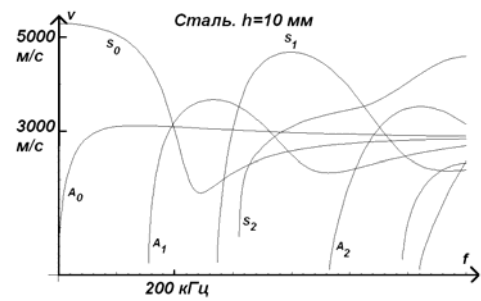


Рис. 2. Частотные зависимости групповой скорости волн Лэмба

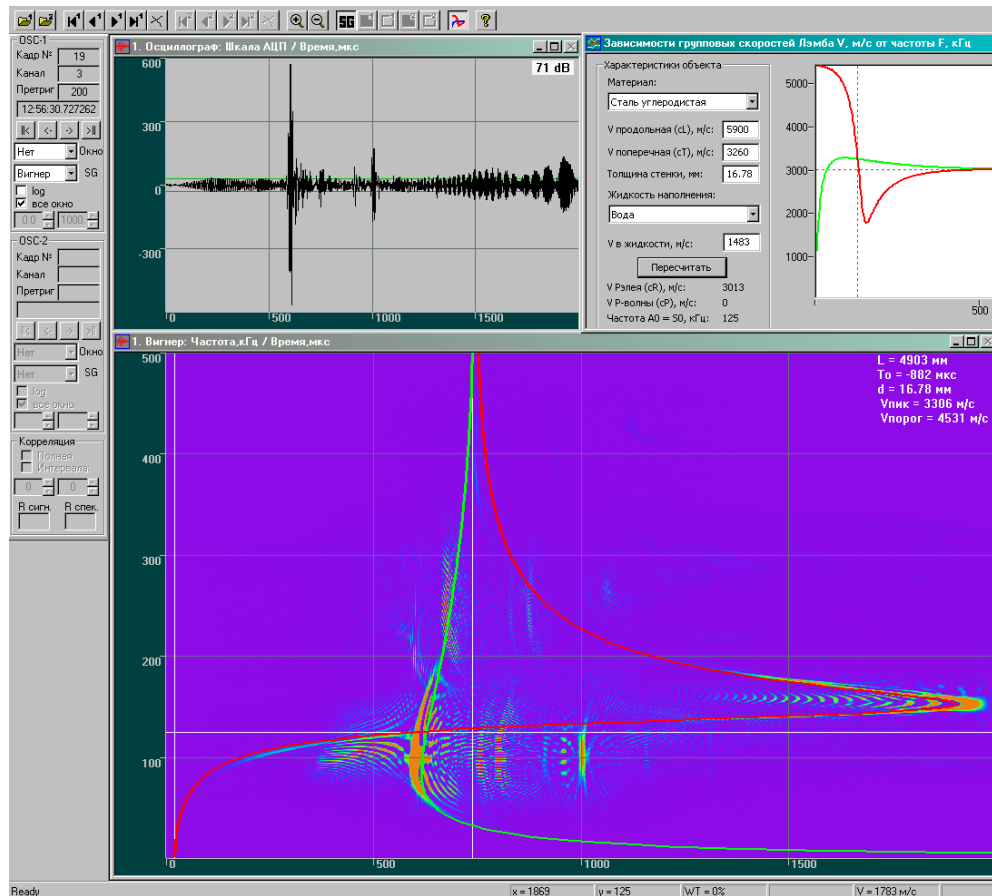


Рис. 3. Осциллограмма АЭ сигнала, график дисперсионных кривых волн Лэмба и спектрограмма АЭ сигнала

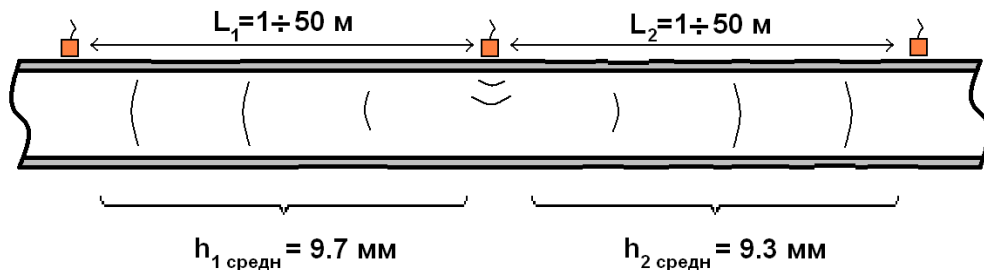


Рис. 4. Расположение излучателя и приемников на объекте контроля и значения средних толщин между ними



Рис. 5. Имитатор АЭ сигналов



Рис. 6. Система A-Line



Рис. 7. Эксперимент по интегральной толщинометрии на участке трубопровода со снятой изоляцией [9]

ПОДГОТОВКА И АТТЕСТАЦИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ НК ПО АКУСТИКО-ЭМИССИОННОМУ МЕТОДУ КОНТРОЛЯ

Т. Э. Чепик, Г. П. Батов

ООО «НУЦ «Качество», г. Москва

Обеспечение надежности и повышение достоверности оценки технического состояния объекта в высокой степени зависит от квалификации и компетентности специалистов и, в первую очередь, специалистов в области неразрушающего контроля, технической диагностики, экспертизы.

ООО «НУЦ «Качество» ставит первостепенной задачей подготовку (обучение) по различным методам контроля, при этом программа включает не только вопросы физических основ, параметров, технологии и средств контроля, но уделяется внимание специфическим особенностям контроля конкретных объектов, изучению требований соответствующих нормативных документов.

Рассмотрим более подробно наши возможности для работ в области подготовки и аттестации специалистов НК по акустико-эмиссионному методу контроля.

Первым этапом является предэкзаменационная подготовка персонала, в случае если специалисты обладают достаточным уровнем практических навыков и стажем работы, или обучение специалистов.

В НУЦ «Качество» разработаны специализированные программы подготовки специалистов по акустико-эмиссионному (АЭ) методу контроля:

- системы газоснабжения (газораспределения);
- оборудование нефтяной и газовой промышленности;
- оборудование взрывопожароопасных и химически опасных производств;
- объекты котлонадзора;
- оборудование металлургической промышленности;
- подъемные сооружения;
- объекты угольной промышленности;
- объекты горнорудной промышленности.

ПРИМЕР ПРОГРАММЫ ПОДГОТОВКИ ПО СПЕЦИАЛЬНОМУ КУРСУ «ОБОРУДОВАНИЕ НЕФТЯНОЙ И ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ»

Введение

Настоящая программа предназначена для подготовки специалистов I и II уровней квалификации, проводящих контроль объектов нефтяной и газовой промышленности.

1. Характеристика и технические особенности следующих объектов нефтяной и газовой промышленности, включенных в перечень объектов контроля:

- оборудование для бурения скважин;
- оборудование для эксплуатации скважин;
- оборудование для освоения и ремонта скважин;
- оборудование газонефтеперекачивающих станций;

- газонепфтепродуктопроводы;
- резервуары для нефти и нефтепродуктов.

2. Материалы, применяемые для изготовления объектов нефтяной и газовой промышленности

Влияние структуры и акустических свойств материалов (скорость распространения упругих колебаний, акустическое затухание, импеданс) на выбор ПАЭ и схем контроля.

3. Обзор нормативных документов

РД 03-299-99, РД 03-300-99, ГОСТ Р 52727-07, «Методика контроля подземных резервуаров установок сжиженного газа», МУ-01-003-01 «Методические указания по проведению акустико-эмиссионного контроля металлоконструкций подъемников для ремонта скважин», РД153-39.4Р-124-02 «Положение о порядке проведения технического освидетельствования и продления срока службы технологического оборудования НПС МН», РД153-39.4Р-145-03 «Методика оценки технического состояния, аттестации технологических и вспомогательных нефтепроводов НПС и прогнозирования безопасного срока их эксплуатации». и др.

4. Основные схемы проведения контроля

объектов нефтяной и газовой промышленности. Влияние геометрической формы объектов на выбор схем контроля.

5. Технология контроля

Подготовка к контролю, приборы и средства контроля, настройка аппаратуры, проведение контроля, фиксация источников АЭ, порядок действий при обнаружении источников АЭ, оценка степени опасности источников АЭ*. Форма записи и классификация результатов контроля.

*6. Разработка и оформление технологической карты контроля**

*7. Проведение калибровки с использованием имитатора источника АЭ. Расшифровка файла, предназначенного для подготовки**

Однако просто прослушивания курса по разработанным Программам недостаточно, необходима сертификация (аттестация) специалистов. То есть оценка соответствия их уровня компетенции и практического опыта требованиям нормативных документов. Допуск к контролю на опасных производственных объектах должны получать лишь сертифицированные (имеющие квалификационный уровень) специалисты.

В НУЦ «Качество» проводится сертификация специалистов по всем методам контроля на все квалификационные уровни (I, II, III) по всем производственным секторам.

Квалификационный экзамен на I и II уровни квалификации включает в себя:

Общий экзамен – письменный экзамен по физическим основам, основным закономерностям и параметрам определенного метода неразрушающего контроля.

Специальный экзамен – письменный экзамен по технологии контроля, применяемой в конкретном секторе, а также по знаниям контролируемой продукции и знаниям применяемых стандартов и других нормативных и методических документов, технических условий и критериев приемки изделий.

Количество специальных экзаменов соответствует количеству секторов, на которые претендует кандидат.

Практический экзамен – экзамен, по практическим навыкам, на котором кандидат демонстрирует способность работать с необходимым контрольным оборудованием, умение проводить практические расчеты, расшифровывать файлы, радиографические снимки и т. д.

Экзамен на расширение области аттестации (добавляющий другой сектор в тот же метод) включает специальный экзамен и практический по этому методу на одном образце.

* Для специалистов, претендующих на II уровень квалификации

Общий и специальный экзамены проводятся путем использования сборников вопросов с набором ответов, утвержденных Органом по сертификации. Вопросы могут быть введены в персональный компьютер или напечатаны на бумажном носителе.

Вопросы по общему экзамену выбираются из сборника случайным образом путем использования компьютерного генератора случайных чисел. Вопросы специального экзамена выбираются случайным образом из имеющегося сборника вопросов, относящихся к определенному промышленному сектору или секторам.

Каждый экзаменационный вопрос имеет четыре варианта ответов, из которых только один правильный, а остальные три – неверные или неполные.

Специальные вопросы могут быть вопросами, требующими расчетов, вопросами на знание стандартов, технических условий и технологии контроля. При сдаче специального экзамена допускается форма «прямой вопрос – письменный ответ».

Требования к проведению экзаменов по правилам безопасности Ростехнадзора России

Экзамены по правилам безопасности сдаются по каждому документу отдельно. Их количество определяется заявленной областью аттестации кандидата. По каждому документу сдается 10 вопросов.

Экзамен считается сданным при условии не менее 80 % правильных ответов.

Процедура сдачи экзамена по правилам безопасности аналогична сдаче общего и специального экзамена.

ПРИМЕР СОСТАВА КВАЛИФИКАЦИОННОГО ЭКЗАМЕНА

1. Общий экзамен

2. Специальный экзамен

- о РД 03-299-99. Требования к АЭ аппаратуре, используемой для контроля опасных производственных объектов.
- о РД 03-300-99. Требования к преобразователям АЭ, применяемым для контроля опасных производственных объектов.
- о ГОСТ Р 52727-07 Техническая диагностика, Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования.
- о Форма предоставления типового отчета по результатам АЭ контроля. ПБ 03-440-02 (1 – 2 уровень).
- о ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения АЭ контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов.
- о Методика АЭ контроля подземных резервуаров установок сжиженного газа.
- о Методика по АЭ контролю оборудования и газопроводов газорегуляторных пунктов.
- о МУЗ-АЭ. Временные методические указания по АЭ диагностике металлических конструкций кранов.
- о НК ШПМ 516-1-82И. Инструкция по дефектоскопии деталей шахтных подъемных машин.
- о РТМ 07.01.021-87. Технологическая инструкция по дефектоскопии деталей тормозных устройств подъемных машин, подвесных и парашютных устройств подъемных сосудов, осей копровых шкивов.
- о МУ-01-003-01. Методические указания по проведению АЭ контроля металлоконструкций подъемников для ремонта скважин.
- о РД 153-39.4Р-124-02, Приложение М. Методика определения технического состояния корпусов оборудования акустико-эмиссионным методом.
- о Диагностика объектов ЛЧ магистральных нефтегазопроводов методом АЭ.

- о РД 153-39.4Р-145-03. Методика оценки технического состояния, аттестации технологических и вспомогательных нефтепроводов НПС и прогнозирования безопасного срока их эксплуатации.
- о СА-03-008-08. Приложение 9. АЭ контроль вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов.
- о АЭ контроль металлоконструкций технических устройств, зданий и сооружений.
- о Строительные конструкции.
- о Цели и задачи обследования строительных конструкций.
- о Российский морской регистр судоходства.
- о Основные сведения об объектах контроля, технологии их изготовления и ремонта, условиях эксплуатации.

3. Практический экзамен

Технологическая карта (для специалистов II уровня)

Контроль образца

Контроль образца / Расшифровка файла

Для экзамена по акустико-эмиссионному контролю экзаменационный образец может быть заменен объектом с имитатором источника АЭ (имитатор трещины, имитатор течи и др.). Претендент на I уровень должен доказать свою способность установить контрольное оборудование, проверить его работоспособность, зарегистрировать результаты контроля. Претендент на II уровень должен, кроме того, доказать свою способность интерпретировать и оценить по меньшей мере 2 набора ранее зарегистрированных данных по контролю.

В качестве контролируемого объекта при сдаче экзамена по акустико-эмиссионному контролю может быть предложен файл с записью проведенного испытания.

ПРИМЕР ПРАКТИЧЕСКОГО ЭКЗАМЕНА НА II УРОВЕНЬ

Экзаменационное задание

Разработать технологическую карту (инструкцию) акустико-эмиссионного контроля экзаменационного образца, исходные данные на который прилагаются.

Нормативные документы: ПБ 03-593-03, РД 03-299-99, РД 03-300-99.

Выдаваемые материалы:

- а) исходные данные на образец;
- б) нормативные документы по контролю, указанные в «Исходных данных» на образец;
- в) бланк для оформления технологической карты (инструкции).

Проконтролировать экзаменационный образец по технологической карте (инструкции), разработанной по п. 1 данного экзаменационного задания.

Оценить годность экзаменационного образца в соответствии с российскими нормами, указанными в «Исходных данных» на образец. Оформить протокол, дефектограмму и заключение по результатам контроля.

Выдаваемые материалы:

- а) экзаменационный образец;
- б) акустико-эмиссионная система и другие средства контроля;
- в) бланки протокола, дефектограммы и заключения.

Расшифровать два файла с данными АЭ-контроля. Оценить годность объектов контроля по результатам расшифровки. Оформить протоколы.

Выдаваемые материалы:

- а) файлы для расшифровки;
- б) бланки протоколов.

Примечания:

Максимальное время на разработку технологической карты (инструкции) контроля – 2 ч, на проведение контроля и оформление результатов на экзаменационный образец – 3 ч, на расшифровку одного файла – 3 ч.

Задание разработано в соответствии с требованиями ПБ 03-440-02 «Правила аттестации персонала в области НК».

ПОРЯДОК СЕРТИФИКАЦИИ СПЕЦИАЛИСТОВ НК

- О проведение квалификационных экзаменов, оценка результатов экзаменов;
- О проведение процедуры сертификации (аттестации), т. е. экспертиза комплекта представленных документов, протоколов с результатами экзаменов и принятие решения о возможности присвоения кандидату соответствующего квалификационного уровня;

Чтобы получить допуск к сертификации, кандидат должен в каждой части экзамена (общей, специальной и практической) получить по меньшей мере 70 %. Поэтому весовое значение минимума в 70 % должно быть достигнуто по каждому экзаменационному образцу на практическом экзамене как и при составлении письменной инструкции для контроля, если необходимо.

- О при положительном решении: оформление, регистрация и выдача сертификата и удостоверений.
- О при отрицательном решении: сообщение о невозможности сертификации с указанием причин.

НУЦ «Качество» аккредитовано в трех различных системах сертификации персонала:

- СДСПНК «РОНКТД» - система добровольной сертификации персонала (рис. 1);
- ЕСОС. Сертификация персонала в соответствии с ПБ 03-440 (свидетельство об аккредитации) НОАП-0034 (рис. 2);
- DAR TGA (Германия). Сертификация персонала в соответствии с европейскими (EN-473) и международным (ISO-9712) стандартами (рис. 3).

Это обеспечивает право аттестованных в нашем центре специалистов проводить контроль объектов расположенных как на территории РФ, так и за ее пределами, или предназначенных для иностранных заказчиков. Удостоверения, полученные специалистами в НУЦ «Качество», а, следовательно, и заключения о результатах контроля подписанные ими признаются на территории Евросоюза и большинства стран мира. ООО НУЦ «Качество» является участником договора о взаимном признании сертификатов органов по сертификации персонала на территории Европейского союза (рис. 4).

НУЦ «Качество» обладает правом на аттестацию лабораторий по всем методам НК, в том числе акустико-эмиссионному, и объектам контроля (рис. 5).

Центр также проводит аттестацию методических документов с выдачей «Свидетельства об аттестации» в соответствии с правилами аттестации методических документов по НК. Аттестованный документ имеет статус разрешающего документа в ЕС ОС.

НУЦ качество обладает правом аттестации экспертов и экспертов Высшей квалификации по направлениям (рис. 6):

- О строительные конструкции зданий и сооружений на опасных производственных объектах;
- О объекты нефтяной и газовой промышленности;
- О объекты котлонадзора;
- О объекты газораспределения и газопотребления.

НУЦ «Качество» обладает широкой сетью региональных центров и экзаменационных лабораторий (около 40).

Система менеджмента качества НУЦ «Качество» сертифицирована в соответствии с ISO 9001 (рис.7).

Это означает, что перечисленные услуги в НУЦ «Качество» оказываются на Европейском уровне в соответствии с ISO 9001.



Рис. 1. Аккредитация DAR TGA (Германия) на право сертификации персонала НК



Рис. 2. Аккредитация в ЕС ОС на право сертификации персонала НК



Рис. 3. Аккредитация DAR TGA (Германия) на право сертификации персонала НК



Рис. 4. Соглашение о многостороннем признании сертификата



Рис. 5. Свидетельство НОАЛ



Рис.6. Аккредитация в ЕС ОС на право сертификации Экспертов

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ УТЕЧЕК НА МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗО- И НЕФТЕПРОВОДАХ

Б. М. Лапшин, А. Л. Овчинников, Д. А. Мозырин

ООО «Фонон», г. Томск

При строительстве новых и реконструкции старых трубопроводов они испытываются на прочность и проверяются на герметичность. Однако несмотря на это полностью исключить утечки не удастся. Основными причинами возникновения утечек являются необнаруженные дефекты в стенке трубы и дефекты в сварных швах. Поскольку испытания проводятся после полной готовности участка или всего трубопровода (полной засыпки, обвалования или крепления на опорах, очистки полости, установки арматуры и т. д.), то точное обнаружение местоположения утечек сопряжено с такими же трудностями, как и их поиск на действующем трубопроводе.

Безальтернативным методом обнаружения утечек на магистральных трубопроводах является метод акустической эмиссии (АЭ). Пороговая чувствительность метода 1,2 – 2 л/ч при давлении 2,0 МПа. Такая чувствительность позволяет обнаруживать все утечки, имеющие место на трубопроводах [1] (щелеобразные отверстия закупориваются окончательно за короткое время, если они не шире 0,09 мм).

Принцип действия АЭ приборов основан на регистрации акустической эмиссии, возникающей при истечении жидкости через сквозное отверстие в стенке трубопровода, находящегося под давлением. Основными механизмами генерации сигналов АЭ при этом являются турбулентные пульсации и кавитация.

Наиболее полные экспериментальные исследования АЭ, генерируемой утечками жидкости, для разработки внутритрубного течеискателя были выполнены в работе [2] и проанализированы в [3]. Негерметичности стенки трубы моделировались с помощью искусственных течей с круглым и прямоугольным сечением (с расходом от единиц до сотен литров в час). Для имитации условий в месте выхода на внешней стенке трубы использовались различные граничные среды: нефть; нефть и песок; нефть и гравий; воздух. Сигналы АЭ регистрировали с помощью широкополосных преобразователей, установленных внутри трубы. Минимальные акустические давления наблюдались при истечении нефти в воздух. Максимальные – при истечении нефти в нефть. В последнем случае при достижении определенного избыточного давления в трубе происходил резкий скачок интенсивности сигнала АЭ, сигнализирующий о переходе к кавитационному механизму генерации, а затем наблюдалось ее снижение. Наличие гравия или песка на выходе течи вызывало смещение начала возникновения интенсивной АЭ в сторону более низких избыточных давлений. Частотные характеристики различных модельных дефектов имеют сходный спектр в диапазоне от единиц до сотен килогерц с максимумом в пределах 10 – 40 кГц. Однако при щелеобразных отверстиях и при отверстиях малого диаметра верхняя граница диапазона частот возрастает. Уровень зву-

кового давления АЭ на расстоянии 1 м от утечки составляет 130 – 160 дБ (относительно $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па), что на 40 – 70 дБ выше акустических шумов течения жидкости и шумов приемно-регистрирующей аппаратуры.

В НИИ интроскопии ТПУ для обнаружения утечек на речных и болотных трубопроводах был предложен бесконтактный метод контроля с поверхности водоема и создана соответствующая аппаратура [4 – 6]. Согласно работ [2, 3] эпицентр АЭ находится с внешней стороны трубопровода. На рис. 1 представлен сегмент трубы с трещиной, вырезанный после испытания на герметичность водой. Четко просматриваются следы кавитационной эрозии металла с внешней стороны трубопровода, что подтверждает высокий уровень звукового давления в эпицентре утечки.

Поскольку длина волны сигналов АЭ значительно больше геометрических размеров течи, источник АЭ можно считать точечным со сферической диаграммой направленности. Для сферической волны, волновая поверхность которой растет с расстоянием r от источника как r^2 , звуковое давление волны убывает пропорционально r^{-1} . Тогда звуковое давление в произвольной точке расположения датчика на поверхности водоема с глубиной H при перемещении вдоль створа трубопровода запишется в виде:

$$P_1(t) = (1/r) P_T(t) \cdot e^{-\alpha r}. \quad (1)$$

где $P_T(t)$ – звуковое давление в эпицентре утечки; r – расстояние от утечки до места установки датчика; α – коэффициент поглощения.

Поскольку $r = (H^2 + l^2)^{1/2}$, где l – расстояние от эпицентра утечки до приемного преобразователя (проекция на горизонтальную ось), H – глубина водоема, то выражение (1) переписывается в виде:

$$P_1(t) = (H^2 + l^2)^{-1/2} P_T(t) \cdot e^{-\alpha (H^2 + l^2)^{1/2}}. \quad (2)$$

Так как для воды ослабление сигнала, связанное с расхождением звуковых волн от сферического источника, намного больше затухания, вызванного поглощением звука, множитель $e^{-\alpha (H^2 + l^2)^{1/2}}$ можно опустить. Тогда характеристика направленности по поверхности водоема примет вид:

$$P_1(t) = (H^2 + l^2)^{-1/2} P_T(t). \quad (3)$$

или в безразмерной форме:

$$P_{ПВ}(t) = P_1(t) P_T^{-1}(t) = (H^2 + l^2)^{-1/2}. \quad (4)$$

Из (4) следует, что при $l = H$ величина звукового давления снижается до величины 0,707, и l в этом случае можно считать полушириной характеристики направленности при локализации утечки с поверхности водоема.

Дальнейший анализ выражения (4) показывает, что точность локализации зависит от погрешности измерения звукового давления средством контроля и от глубины водоема. При глубине водоема до 30 м может быть обеспечена точность локализации утечки $\pm (1 - 3)$ м. Точность может быть повышена по способу, изложенному в [7].

Анализ показывает, что на глубоких водоемах утечка может быть обнаружена на удалении до 1000 м от датчика.

На основе этих исследований был создан акустико-эмиссионный течеискатель АЭТ-1МС.

Прибор предназначен для обнаружения и определения местоположения утечек в процессе сооружения и эксплуатации речных и болотных трубопроводов. Течеискатель АЭТ-1МС состоит из двух блоков: акустического зонда и пульта с органами управления и коммутации, соединенных между собой кабелем. Показания регистрируются с помощью стрелочного измерителя. Внешний вид прибора представлен на рис. 2.

Первоначально этот прибор предназначался для обнаружения и локализации утечек в подводных трубопроводах [5], однако, по мере накопления опыта эксплуатации и учета требований потребителей, был существенно доработан в части расширения его функциональных возможностей. В доработанном исполнении эти приборы в течение многих лет широко применяются управлениями транспорта нефти и газа. Прибор до настоящего времени остается востребованным.

Поиск утечек на подводных трубопроводах осуществляется бесконтактно через слой воды толщиной до 30 м. При этом пороговая чувствительность по расходу воды составляет 8 – 25 л/ч, что эквивалентно расходу через отверстие диаметром 0,3 мм. Погрешность локализации не превышает 10 % от глубины водоема. В зависимости от времени года контроль осуществляется двумя способами: летом с плавсредства, зимой со льда.

Летом пульт течеискателя устанавливают на плавсредстве, акустический зонд погружают в воду, и они перемещаются по поверхности водоема. Впервые эта технология была реализована для поиска утечки на подводном переходе через реку Обь нефтепровода Александровское – Анжеро-Судженск. Подводная часть нефтепровода была отрезана от основной части трубы и заполнена речной водой. Давление составляло 2,0 МПа. Утечка представляла собой трещину в поперечном сварном шве сбоку трубы. Площадь сечения трещины 1 – 1,5 мм², длина 25 мм. Величина грунтовой засыпки над трубой в месте утечки составляла 0,5 м при общей глубине водоема 7 м. Время поиска утечки составило 1,5 ч.

Для поиска утечек в зимнее время вдоль трубопровода выполняются во льду скважины с интервалом (20 ± 5) м. Акустический зонд в этом случае опускается в воду ниже уровня кромки ледового покрова, и также производятся измерения акустического шума. Местоположение утечки определяется по максимуму значения акустического шума.

На этапе внедрения этим прибором по предложенной методике были обнаружены утечки:

- на основной нитке подводного перехода через реку Обь в районе деревни Сайгатино нефтепровода «Нижневартовск – Усть-Балык». Труба диаметром 720 мм, толщина стенки 10 мм, длина перехода 1800 м;
- на подводном переходе через реку Кама нефтепровода «Альметьевск – Горький II». Труба диаметром 500 мм, толщина стенки 10 мм, длина перехода 6030 м;
- в верхней нитке подводного перехода водовода через реку Шексна водоснабжения г. Череповец. Труба диаметром 1020 мм, толщина стенки 10 мм, длина перехода 1000 м;
- в нижней нитке подводного перехода водовода через реку Шексна водоснабжения г. Череповец. Труба диаметром 1020 мм, толщина стенки 10 мм, длина перехода 1000 м;
- в урезной части средней нитки подводного перехода Мызинского канализационного коллектора через реку Ока в районе Нижнего Новгорода. Труба диаметром 1400 мм, толщина стенки 12 мм, длина дюкера 1000 м;
- в подводной части нижней нитки подводного перехода Мызинского канализационного коллектора через реку Ока в районе Нижнего Новгорода. Труба диаметром 1400 мм, толщина стенки 12 мм, длина дюкера 1000 м;

Кроме поиска утечек на подводных трубопроводах прибор позволяет определять местоположение утечек жидкости и газа на подземных трубопроводах. В этом случае для доступа к трубе выполняются шурфы с интервалом 100 – 300 м. Акустический зонд устанавливается на стенку трубы. В трубопроводе создается избыточное давление. Поиск утечки разбивается на две стадии: первая – определение участка с утечкой; вторая – определение местоположения утечки на этом участке. Пороговая чувствительность прибора в этом случае составляет также 8 – 25 л/ч, точность локализации 5 – 10 м.

Варианты использования прибора приведены на рис. 3.

К настоящему времени изготовлено и поставлено в трубопроводные управления 260 приборов.

Методика поиска утечки на подводном переходе трубопровода с помощью течеискателя АЭТ-1МСС требует сканирования акустическим зондом над трубопроводом. Эта процедура трудоемка и не всегда осуществима. Кроме того, погрешность измерений существенно зависит от глубины водоема, что ограничивает возможную область применения прибора водоемами, глубина которых не превышает 30 м, т. е. это переходы через реки и болота. Однако в связи с разработкой месторождений на континентальном шлейфе возникла потребность в приборах, способных обнаружить утечку на больших глубинах. Повысить точность локализации и одновременно исключить сканирование можно применением взаимнокорреляционного метода обработки, который принципиально отличается от рассмотренного выше, поскольку координата утечки определяется по разности времен распространения сигнала на разнесенные в пространстве преобразователи. Метод взаимной корреляции широко применяется для контроля герметичности подземных трубопроводов, однако, для контроля подводных трубопроводов до настоящего времени широко не использовался.

Для реализации этого метода был разработан корреляционный течеискатель ТАК-2004. Прибор состоит из двух акустических зондов и блока обработки и регистрации, в качестве которого использован портативный компьютер. Прибор позволяет обнаружить утечку из сквозного отверстия с эквивалентным диаметром 0,5 мм в радиусе 50 м и более при давлении в трубопроводе не менее 0,5 МПа. Обследование переходов с помощью прибора может быть осуществлено летом с борта легкого плавсредства, зимой – с кромки льда через скважины диаметром 100 – 150 мм с интервалом до 50 м. Методика поиска утечки отличается тем, что в водоем одновременно помещаются два датчика (рис. 4), и измерения проводятся по двум каналам. Если утечка находится в зоне обнаружения прибора, то на дисплее отражается расстояние до нее и возможная ошибка локализации.

Рассмотренные приборы предназначены для периодического контроля герметичности и используются обычно для определения местоположения утечки в условиях, когда о факте ее существования уже известно. Вместе с тем на подводных переходах нефтепроводов, переходах нефтепроводов через железные и автодороги, участках вблизи населенных пунктов необходимо не только точно локализовать утечку, но и, что более важно, обнаружить ее в короткое время, чтобы минимизировать последствия. В этой связи в НИИ интроскопии совместно с ОАО «Магистральные нефтепроводы Центральной Сибири» были выполнены работы по созданию системы непрерывного контроля герметичности подводных переходов нефтепроводов, базирующейся на АЭ методе. При разработке аппаратуры с целью определения максимально возможной зоны контроля при заданной пороговой чувствительности были проведены теоретические [8] и экспериментальные исследования затухания АЭ сигналов в трубопроводе. Было получено, что сигнал поглощения зависит от расстояния, и эта зависимость носит нелинейный характер. Однако для оценки зоны контроля в большинстве практических случаев величина затухания может быть положена равной 0,35 дБ/м.

Разработанная аппаратура включает в себя группу датчиков, располагаемых на трубе с интервалом 100 – 150 м, и микропроцессорный контроллерный блок (рис. 5). Максимальное число датчиков может достигать 100. Датчики устанавливаются непосредственно на изоляционное пленочное покрытие и не нарушают его целостности. Датчики и контроллерный блок соединены кабелем, при этом все датчики подключены к одному кабелю. Это позволяет в зависимости от длины контролируемого участка нефтепровода формировать систему с любым количеством датчиков, не изменяя аппаратную часть. Длина участка, охватываемого одной системой контроля, может достигать 10 км. Цикл опроса датчиков – раз за 2 – 5 мин.

Таким образом, с момента появления утечки до момента получения диспетчером сигнала «утечка» наружу из трубы может выйти лишь несколько литров нефти.

Первоначально аппаратура разрабатывалась в виде автономного прибора с питанием от сети 220 В и подключением к телемеханике любого типа. Эта аппаратура получила название СНКГН-1. В дальнейшем, после аварии на подводном переходе через р. Белая в ОАО «Уралсибнефтепровод», был разработан программно-аппаратный модуль системы обнаружения утечек (ПАМ СОУ) в составе программируемого логического контроллера (ПЛК «Элси-Т»). Такой модуль ПАМ СОУ был создан совместно с фирмой АОЗТ «Элеси» (г. Томск). Аппаратура получила название СНКГН-2.

При появлении утечки система контроля через линейную телемеханику посылает сигнал «утечка» на центральный диспетчерский пункт управления трубопроводом. Различные акустические помехи, которые могут произойти при работе трубопровода и вызвать ложную тревогу, исключаются оригинальными схемными решениями и программным способом.

В аппаратно-программном комплексе СНКГН-2 заложена возможность диалога между этим комплексом и компьютером СДКУ (оснащенным соответствующим программным обеспечением). Это позволяет:

- проверять режимы работы аппаратуры и корректировать базы данных комплекса;
- получать информацию о состоянии контролируемого участка трубопровода;
- определять местоположение течи;

Обнаружение утечки в СНКГН-2 реализуется на двух уровнях. На нижнем определяется наличие утечки, время и номер ближайшего датчика, в районе которого произошла утечка. На верхнем – координаты утечки.

В ОАО АК «Транснефть» было поставлено 24 системы обнаружения утечек, из которых 5 – СНКГН-1, 19 – СНКГН-2 и 284 датчика герметичности, три системы поставлены в ОАО «Сургутнефтегаз» и 2 системы – в ОАО «Лукойл-Пермнефть». На рис. 6 и 7 соответственно представлены схема установки датчика на нефтепровод и вариант конструкции защиты датчика на трубопроводе при протаскивании трубопровода через реку Обь в районе с. Александровское.

Системы СНКГН-1 и СНКГН-2 испытывались в ОАО «Уралтранснефтепродукт» и в ОАО «Верхневолжскнефтепровод» с реальными утечками нефти (табл. 1). По результатам испытаний СНКГН-1, проведенных в ОАО «Уралтранснефтепродукт» на р. Белая и СНКГН-2 в ОАО «Верхневолжскнефтепровод» на р. Суворощь, получено, что расстояние между датчиками можно увеличить до 300 м, однако, в этом случае заметно снижается пороговая чувствительность аппаратуры (до 0,5 – 1,0 м³/ч). Разрывы в трубопроводе датчики чувствуют на удалении до 350 м. За счет снижения частоты регистрации АЭ утечек расстояние между датчиками может быть еще увеличено. Однако в отдельных случаях это может привести к повышению вероятности ложной тревоги.

Табл. 1. Результаты испытаний системы СНКГН-2 в ОАО «Верхневолжскнефтепровод»

Диаметр отверстия, мм	Суммарный выход нефти, л	Время обнаружения утечки, мин	Расстояние от утечки до ближайшего датчика, м	Отношение сигнал/шум при регистрации утечки
3,5	4	3,5	15	72
1,15	1,5	3,5	15	63
3,5	11	2,5	55	10,2
1,15	1,2	2,5	55	2,25

Опыт по оснащению речных переходов магистральных нефтепроводов аппаратурой непрерывного контроля герметичности позволяет сделать вывод о том, что использование

данных систем на малых речных переходах наиболее приемлемо. Установка систем на подводных участках нефтепроводов протяженностью более 150 м требует дополнительной проработки вопросов технологии монтажа. В ходе монтажных, пусконаладочных работ и на начальной стадии эксплуатации выявились узкие места: малое расстояние между датчиками и наличие кабельной линии связи между системой датчиков и контроллерным блоком. В тоже время подтвердились правильность выбора частотного диапазона работы аппаратуры, схемных, конструкторских и технологических решений, а также работоспособность программного обеспечения.

Другой системой мониторинга герметичности является датчик герметичности камер пуска-приема очистных и диагностических устройств ДГК-1. Данное устройство предназначено для непрерывного контроля герметичности узлов пуска-приема очистных и диагностических устройств магистральных трубопроводов, в том числе концевых затворов камер пуска-приема и прилегающей запорной арматуры. Оно также позволяет осуществлять контроль несанкционированного доступа к прилегающей запорной арматуре с целью отбора продукта (нефти, нефтепродуктов).

Прибор состоит из трех блоков: акустического датчика, соединительной коробки и блока питания и реле. К одному блоку питания можно подключить до трех датчиков. Датчик устанавливается на внешнюю поверхность стенки камеры без нарушения ее целостности и позволяет обслуживать зону до 50 м (т. е. всю зону одной камеры и связанной с ней арматуры). Пороговая чувствительность по расходу нефти при этом не хуже 50 л/ч. Время обнаружения утечки в зависимости от ее величины колеблется в интервале от 3 до 15 мин. Прибор снабжен схемой самодиагностики и совместим с любой телемеханикой. Питание прибора осуществляется от сети 220 В 50 Гц при потребляемой мощности не более 7 ВА. Внедрено 3000 приборов.

Литература

1. Veerling C. W. N. Leckgrenze der Rotterdam-Rhein-Pipeline. – Rohres-Rohrleitungsbau-Rohrleitungs-Transport. 1965. Bd 4. H. 3. S. 141–146, 171–174.
2. Riemsdijk A. J., Bosselaar H. Betriebsunterbrechungsfreie Aufspürung von geringfügigen Undichtheiten von Rohölpipelines. – Erdöl-Erdgas-Zeitschrift. 1970. Bd 86, H. 1. S. 12–18.
3. Naudascher E., Martin W. W. Akustische Leckererkennung in Rohrleitungen. – Rohre Rohrleitungsbau Rohrleitungstransport. 1975. Bd 14, H. 8. S. 452–461.
4. Лапшин Б. М., Корбут А. Я. Обнаружение утечки в подводном переходе нефтепровода при помощи акустоэмиссионного течеискателя АЭТ-1. – В кн.: Реферативный научно-технический сборник. Сер. Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. Вып. 6. – М.: ВНИИОЭНГ, 1981, с. 4–7.
5. Лапшин Б. М. Акустический метод поиска дефектов на подводных трубопроводах. – Строительство трубопроводов. 1984. №2. С. 28–30.
6. Лапшин Б. М., Янисов В. В. Течеискатель для подводных трубопроводов. – Дефектоскопия. 1985. № 8. С. 79–81.
7. Лапшин Б.М. Николаева Е.Д. Способ определения местоположения течи в трубопроводах. Авторское свидетельство на изобретение №1651016 кл. F17D S/06.
8. Лапшин Б. М., Николаева Е. Д., Рубинович И. М. Анализ затухания звука в трубе с жидкостью при акустико-эмиссионном контроле герметичности продуктопроводов. – Дефектоскопия. 1991. № 1. С. 80–88.



Рис. 1. Участок трубы с щелевым отверстием размером $0,1 \times 25 \text{ мм}^2$



Рис. 2. Течеискатель АЗТ-1МСС

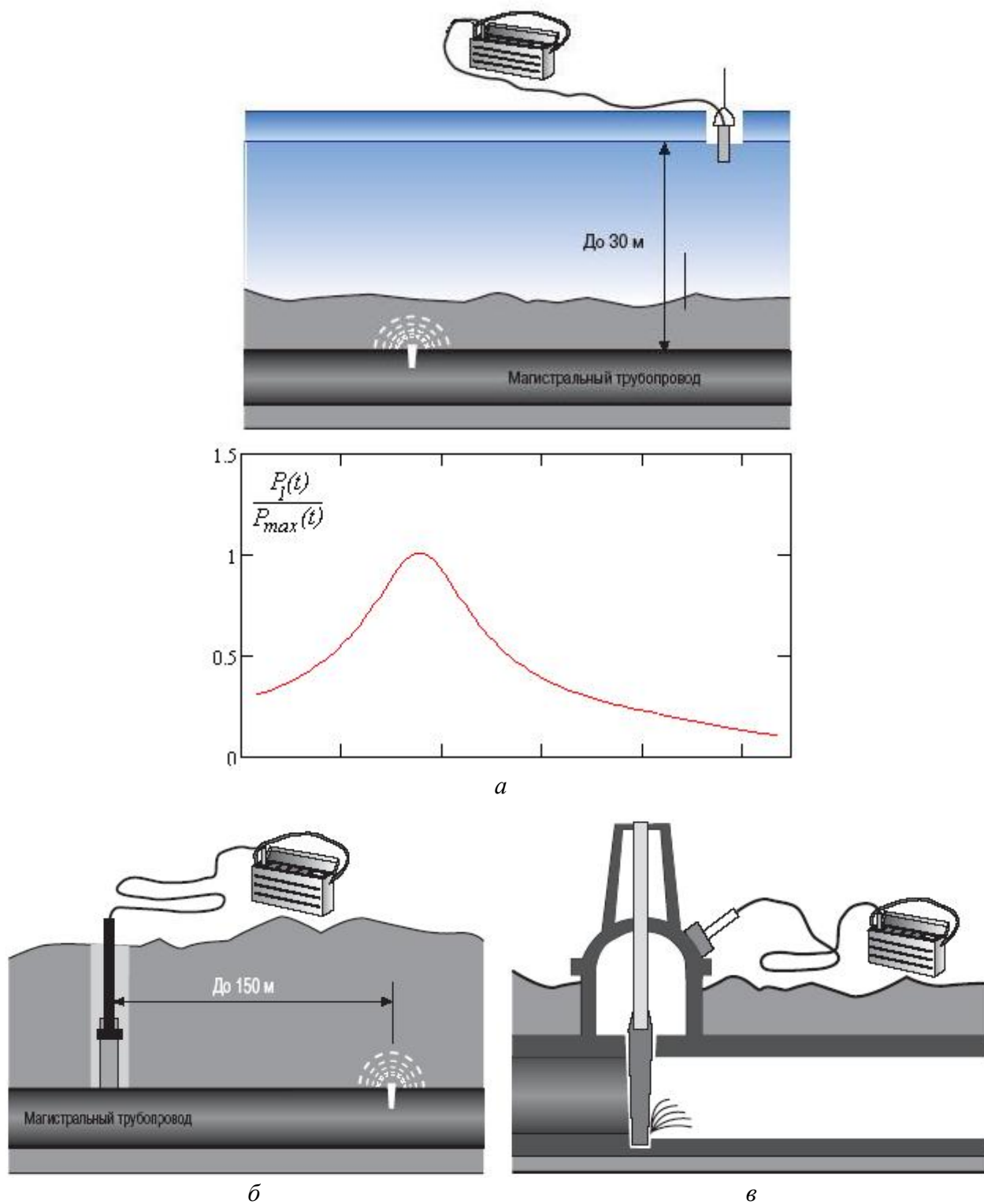


Рис. 3. Варианты поиска утечек прибором АЭТ-1МСС
a – в подводном трубопроводе; *б* – в подземном трубопроводе; *в* – в трубопроводной арматуре

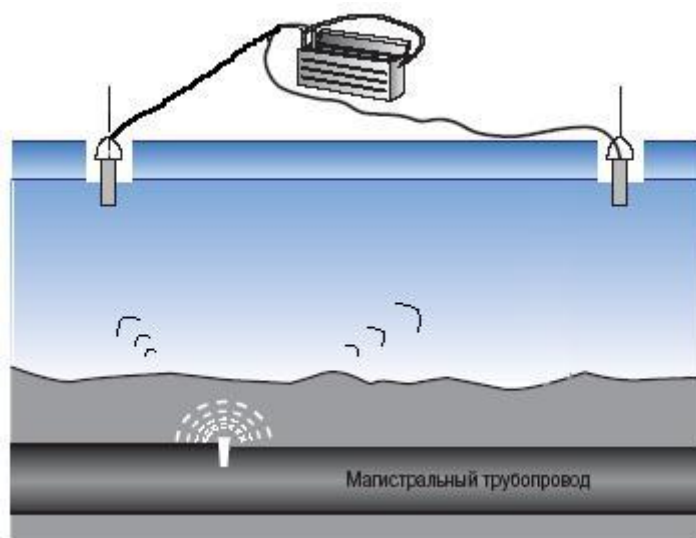


Рис. 4. Схема использования течеискателя ТАК-2004

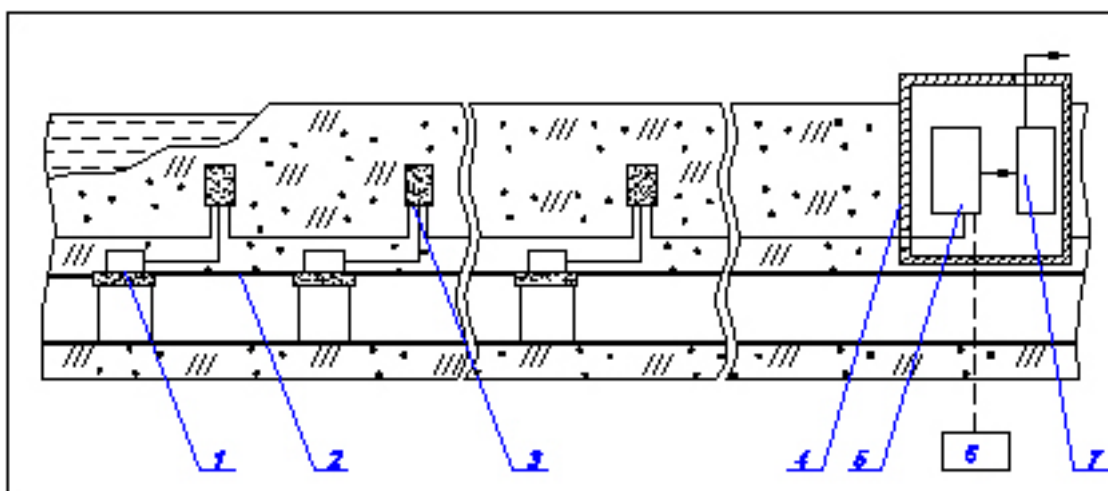


Рис. 5. Система непрерывного контроля герметичности СНКГН-1:
 1 – датчик герметичности; 2 – трубопровод; 3 – кабельная муфта; 4 – блок-бокс (КП);
 5 – автономный контроллерный блок; 6 – портативный компьютер; 7 – аппаратура линейной телемеханики нефтепровода

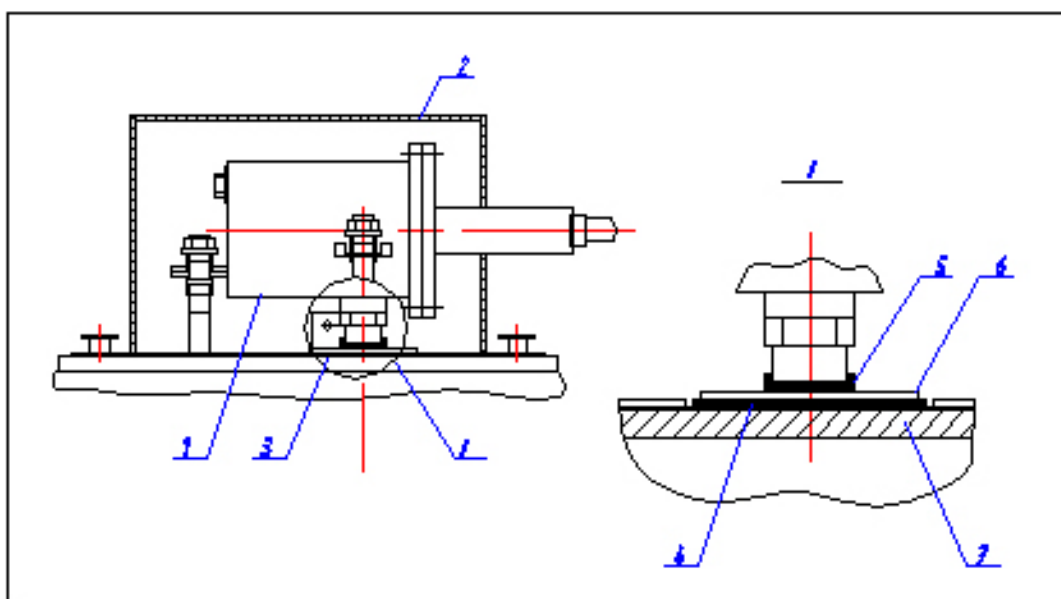


Рис. 6. Схема установки датчика герметичности на нефтепровод:
 1 – корпус датчика; 2 – защитный кожух; 3 – платформа крепления датчика; 4 – грунтовка;
 5 – контактная смазка; 6 – противокоррозионная пленочная изоляция; 7 – стенка трубы



Рис. 7. Конструкция защиты датчика на трубопроводе
(при протаскивании трубопровода через реку)