

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1	
Общие вопросы разработки и применения метода акустической эмиссии как метода технического диагностирования	6
1.1. Область применения метода акустической эмиссии и его сравнение с другими видами контроля	6
1.2. История развития метода акустической эмиссии	14
1.3. Современное состояние и перспективы развития метода акустической эмиссии	18
ГЛАВА 2	
Методология совершенствования акустико-эмиссионного диагностирования как основа повышения его эффективности	22
2.1. Общие вопросы диагностирования	22
2.2. Принципы информационной оптимизации акустико-эмиссионного диагностирования	33
2.3. Показатели надёжности технических объектов как предмет АЭ-диагностирования	42
2.4. Параметры акустической эмиссии и их физические модели	44
ГЛАВА 3	
Система неразрушающего контроля и сертификации её персонала	81
3.1. Стандартизация средств неразрушающего контроля и технического диагностирования	81
3.2. Система аттестации персонала по НК и ТД	85
ГЛАВА 4	
Остаточный ресурс технического объекта и принципы его прогнозирования	94
4.1. Физические основы прогнозирования остаточного ресурса	94
4.2. Физические основы долгосрочного экспресс-прогнозирования механического разрушения	100
4.3. Микромеханическая модель акустической эмиссии и принципы прогнозирования остаточного ресурса	113

## ГЛАВА 5

Метрологические аспекты акустико-эмиссионной оценки АЭ-показателей прочностной надёжности	128
5.1. Способы определения диагностических показателей и анализ их диагностической ценности	128
5.2. Влияние помех на результаты оценки диагностических показателей	153

## ГЛАВА 6

Измерительная акустико-эмиссионная система и способы определения координат источников АЭ	165
6.1. Измерительная акустико-эмиссионная система	165
6.2. Определение координаты источника АЭ, скорости прохождения и коэффициента затухания упругой волны в материале	174

## ГЛАВА 7

АЭ-диагностика состояния технических объектов	176
7.1. АЭ-диагностика образцов сварных соединений	176
7.2. АЭ-диагностика сосудов, работающих под давлением	191
7.3. АЭ-диагностика металлоконструкций грузоподъёмных машин	231
7.4. АЭ-диагностика шарнира противовеса подъёмного механизма Дворцового моста через реку Неву	244

## ГЛАВА 8

АЭ-контроль продукции в процессе производства	251
8.1. Влияние технологических и эксплуатационных факторов работы конструкционных материалов на прочность и параметры микромеханической модели	251
8.2. Контроль качества заготовок для производства горячекатанной полосы	255
8.3. Оценка удароопасности участка массива горных пород на основе микромеханической модели акустической эмиссии, зафиксированной после технологического взрыва	266

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	281
------------	-----

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	285
----------------------------------	-----

## ВВЕДЕНИЕ

*Акустическая эмиссия (АЭ)* – явление излучения объектом (диагностирования, контроля, испытаний) акустических волн под воздействием нагрузки или влияний иных факторов. *Акустическая эмиссия материала* – АЭ, вызванная изменением структуры материала объекта, является отражением происходящих в нём процессов, определяющих работоспособность изделий или сооружений. Основанный на анализе параметров волн АЭ *акустико-эмиссионный метод диагностирования* даёт возможность нахождения координаты дефекта, оценки степени его опасности, показателей прочности, остаточного ресурса объекта диагностирования без определения размеров дефектов. Возможности метода весьма широки, и уже сегодня он является наиболее мощным методом неразрушающего контроля и технической диагностики. Вместе с тем метод АЭ активно развивается, повышая эффективность диагностирования и раскрывая всё новые области своего применения.

Всеобщая автоматизация и компьютеризация средств неразрушающего контроля способствовала опережающему развитию аппаратной базы сбора первичной измерительной информации по отношению к методическому обеспечению обработки результатов АЭ-контроля и формулировки конечного диагноза. В настоящий момент создалась потребность в более глубоком осмыслении явления АЭ, увязывании его параметров с показателями надёжности объектов контроля и создании на основе этого соответствующего современным требованиям методического обеспечения. При этом надо учитывать, что особенностью метода является связь сигналов АЭ с эксплуатационными свойствами объекта контроля, поскольку сами источники этих сигналов являются представителями этих свойств. Акустико-эмиссионный метод диагностирования должен рассматриваться как звено в цепи сбора и обработки информации, связывающей происходящие в материале процессы с регистрируемыми сигналами АЭ и показателями надёжности. Изучению явления АЭ, связанных с ним процессов, определяющих ресурс, метрологических аспектов акустико-эмиссионного неразрушающего контроля и оценки показателей прочностной надёжности технических объектов посвящён данный учебный курс.

# **ГЛАВА 1**

## **ОБЩИЕ ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ КАК МЕТОДА ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ**

### **1.1. Область применения метода акустической эмиссии и его сравнение с другими видами контроля**

Неразрушающий контроль, диагностика состояния и прогнозирование работоспособности машин, оборудования, конструкций и сооружений, являясь одной из составляющих общей проблемы надёжности, связана с решением таких задач, как предотвращение аварий, оптимизация производственных и ремонтных технологий, обоснование необходимости проведения поддерживающих работоспособность профилактических мероприятий, обеспечение экологически чистых и безопасных условий труда рабочих. В технике используются новые конструкционные материалы, работают и вводятся вновь в эксплуатацию крупномасштабные конструкции, глубокие подземные сооружения, непредвиденное разрушение которых может привести к большим человеческим жертвам и тяжелым экологическим последствиям.

Из-за недостатков в качестве выпускаемой продукции развитые страны ежегодно теряют до 10% своего национального дохода. Потери только от дефектов, приводящих к усталости материала в США, составляют более 100 млрд дол. в год, от коррозии – 200 млрд дол. в год. Убытки от недостаточно высокого качества машин и сооружений в нашей стране значительно выше, и их существенное сокращение возможно на основе внедрения средств диагностики и контроля, затраты на которые по подсчётам специалистов должны составлять не менее 30% от стоимости диагностируемого объекта. В области же атомной энергетики, нефте- и газодобывающей промышленности, химической и нефтехимической отраслях, аэрокосмической техники, транспорта и строительства в США, например, они в три раза превосходят стоимость самих сооружений.

На территории России насчитывается около 100 тысяч опасных производств и объектов, из которых около 1500 ядерных, 3000 химических и биологических объектов особой опасности. Средний период чрезвычайных ситуаций составляет 10-15 лет для аварий и ка-

тастроф с ущербом до 2 млрд долларов, 15-45 дней с ущербом до 100 млн долларов США. Потери от техногенных аварий, катастроф (взрывы, пожары, разрушения, выбросы радиоактивных и отравляющих веществ, крушения и т.п.) и природных катаклизмов (землетрясения, обвалы, ураганы, сели, оползни, наводнения и др.) с каждым годом возрастают на 10-30%. В нефтяной и газовой промышленности эксплуатируется 206 тыс. км магистральных газопроводов, 65 тыс. км магистральных нефтепроводов, более 6 тыс. км продуктопроводов и более 300 тыс. км промысловых трубопроводов различного назначения. 1/3 магистральных трубопроводов имеет возраст более 15 лет, в год на газо- и нефтепроводах происходит более 100 аварий и наблюдается тенденция к росту. Применение систем диагностики удорожает продукцию, однако их использование на всех стадиях изготовления, проверки и эксплуатации существенно повышает надёжность объектов контроля и, в конечном счёте, является экономически выгодным.

Превышение числа техногенных катастроф над природными составило 1,2-1,7 раза при темпах роста порядка 10-12% в год; для природных катастроф эта величина была на уровне 7-8% в год. Если к концу XX века экономические ущербы от природных превышали ущербы от техногенных катастроф, то, начиная с первого десятилетия XXI века основной ущерб приносили уже техногенные катастрофы, в том числе крупнейшие – на Саяно-Шушенской ГЭС, морской платформе BP в Мексиканском заливе, на АЭС «Фукусима-1» (с ущербами от каждой от 5 до 20 млрд долларов США). Важно, что при этом темпы роста мирового валового продукта составляли 2-3,5% в год. Это в целом указывает на снижение возможностей мирового сообщества предупреждать и парировать техногенные риски.

В Российской Федерации в последние годы относительная устойчивость числа техногенных катастроф на уровне 350-500 в год сопровождалась ростом общих ущербов от них при постепенном снижении темпов роста ВВП (от 4 до 1% в год). С учетом отмеченных основных закономерностей экономического развития и изменения техногенных рисков для дальнейшего анализа и прогноза состояния и повышения уровня национальной и промышленной безопасности исключительно большое значение имеет развитие средств диагностики и неразрушающего контроля.

Развитие средств диагностики идёт по пути повышения точности и оперативности получения результатов диагностирования на основе разработки новых автоматизированных систем контроля и алгоритмов количественной обработки его данных. В настоящее время для контроля и диагностики машин, приборов и технических объектов используется более 100 физических методов, тысячи типов приборов. Метод акустической эмиссии здесь рассматривается как наиболее перспективный.

Акустическая эмиссия как физическое явление, используемое для исследования веществ, материалов, объектов, а также для неразрушающего контроля и технической диагностики контролируемых объектов, позволяет формировать адекватную систему классификации дефектов и критерии оценки состояния объекта, основанные на реальном влиянии дефекта на объект. Типичные объекты АЭ-контроля показаны на рис. 1.1.



Рис. 1.1. Наиболее ответственные объекты, подведомственные Ростехнадзору, требующие АЭ-контроля их состояния:

а, г – подъёмно-транспортные машины,  
б, д – трубопроводы, в – сосуды давления

Главной особенностью метода акустической эмиссии является возможность получения информации не только о наличии микротрещин в материале, но и о кинетике микротрещинообразования. Это дает

возможность прогнозирования развития процесса разрушения материала. Характерными особенностями метода АЭ-контроля, определяющими его возможности и область применения, являются следующие:

- метод АЭ-контроля обеспечивает обнаружение и регистрацию только развивающихся дефектов, что позволяет классифицировать дефекты не по размерам, а по степени их опасности;

- метод АЭ-контроля обладает весьма высокой чувствительностью к растущим дефектам и позволяет выявить в рабочих условиях приращение трещины порядка долей мм. Предельная чувствительность акустико-эмиссионной аппаратуры по теоретическим оценкам составляет порядка  $1 \times 10^{-6}$  мм<sup>2</sup>, что соответствует выявлению скачка трещины протяженностью 1 мкм на величину 1 мкм;

- свойство интегральности метода АЭ-контроля обеспечивает контроль всего объекта с использованием одного или нескольких преобразователей АЭ-контроля, неподвижно установленных на поверхности объекта;

- метод АЭ позволяет проводить контроль различных технологических процессов и процессов изменения свойств и состояния материалов. Контроль можно производить при удалении оператора от контролируемого объекта, поэтому контролю доступны такие протяженные объекты, как магистральные трубопроводы. Возможность проведения контроля без выключения конструкции из производственного процесса делает применение метода очень выгодным с точки зрения экономии времени и денежных средств;

- положение и ориентация объекта не влияют на выявляемость дефектов;

- метод АЭ имеет меньше ограничений, связанных со свойствами и структурой материалов;

АЭ-контроль технического состояния обследуемых объектов проводится только при создании в конструкции напряженного состояния, инициирующего в материале объекта работу источников АЭ. Для этого объект подвергается нагружению силой, давлением, температурным полем и т. д. Выбор вида нагрузки определяется конструкцией объекта и условиями его работы, характером испытаний и проводится в «Программе работ по АЭ-контролю объектов».

Обстоятельством, ограничивающим применение метода АЭ, является в ряде случаев трудность выделения сигналов АЭ из помех. Это объясняется тем, что сигналы АЭ являются шумоподобными, по-

скольку АЭ есть стохастический импульсный процесс. Поэтому, когда сигналы АЭ малы по амплитуде, выделение полезного сигнала из помех представляет собой сложную задачу. При развитии дефекта, когда его размеры приближаются к критическому значению, амплитуда сигналов АЭ и темп их генерации резко увеличивается, что приводит к значительному возрастанию вероятности обнаружения такого источника АЭ.

Целью АЭ-контроля является обнаружение, определение координат и слежение (мониторинг) за источниками акустической эмиссии, связанными с неоднородностью на поверхности или в объеме стенки объекта контроля, сварного соединения и изготовленных частей и компонентов. Все индикации, вызванные источниками АЭ, должны быть при наличии технической возможности оценены другими методами неразрушающего контроля. Метод АЭ может быть использован для оценки скорости развития дефекта в целях заблаговременного прекращения испытаний и предотвращения разрушения изделия. Также метод АЭ может быть использован для контроля объектов при их изготовлении, в процессе приемочных испытаний, при периодических технических освидетельствованиях, в процессе эксплуатации. Одна из обширных областей применения метода АЭ связана с наблюдением за процессом сварки, что способствует совершенствованию технологии сварки и может существенно повысить надежность сварных соединений.

В ряду рекомендованных Ростехнадзором методов неразрушающего контроля метод АЭ является наиболее характерным пассивным акустическим методом (рис. 1.2). Информационно метод АЭ основан на анализе связи результатов регистрации акустических волн, излучаемых с поверхности материала, и характеристик вызывающих их процессов. Такими процессами являются, главным образом, повреждение структуры (образование, рост и накопление концентрации микротрещин) и пластические деформации (перемещение дислокаций). Кроме этого, источниками АЭ могут быть процессы трения и износа, радиационного, химического и электрохимического взаимодействия, утечки жидкости или газа, фазовые превращения.

Сравнительная чувствительность некоторых методов неразрушающего контроля прочности сварных соединений характеризуется данными рис. 1.3, показывающими, что акустические методы обладают высокой чувствительностью к дефектам.



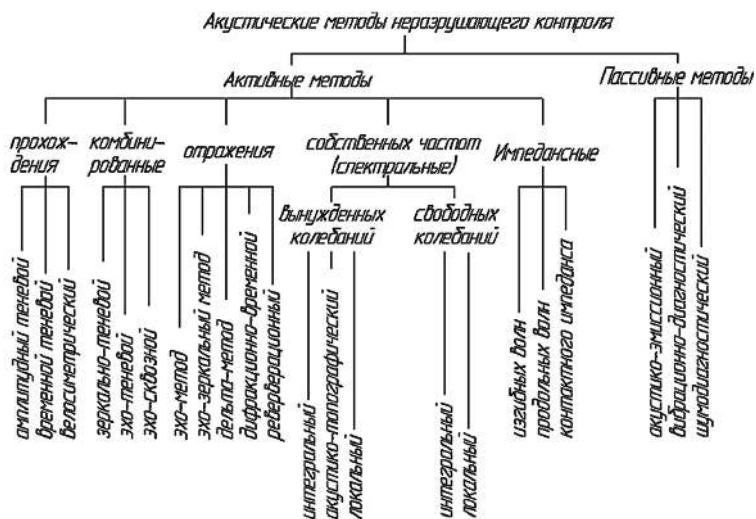


Рис. 1.2. Классификация акустических методов контроля

Однако применяемые методы контролируют признаки, не всегда обладающие большой диагностической ценностью по отношению к прочности. В частности, радиографический метод, предназначенный для обнаружения трещин и непроваров в сварном шве, не гарантирует выявления дефектов, расположение которых не совпадает с направлением измерений. Капиллярный метод, обладая значительной чувствительностью к поверхностным дефектам типа трещин, не обеспечивает выявления внутренних дефектов. Ультразвуковой метод, обеспечивающий выявление дефектов типа трещин, предъявляет значительные требования к чистоте обработки поверхности околошовной зоны в месте установки приемного датчика. Перечисленные методы используются, как правило, на завершающей стадии изготовления изделий, не дают информации о кинетике повреждений и связанной с ней степени опасности дефектов, что, в свою очередь, затрудняет принятие заключения о состоянии объекта. Данную проблему решает метод АЭ, который позволяет несколькими стационарно расположенными датчиками проконтролировать за одно обследование весь объект, выявляет наиболее опасные развивающиеся дефекты. Эксперименты, выполненные при АЭ-диагностике оборудования, недоступного для

контроля традиционными методами, показали чрезвычайную перспективность данного метода для обоснования возможности переназначения проектного срока службы и продления ресурса.

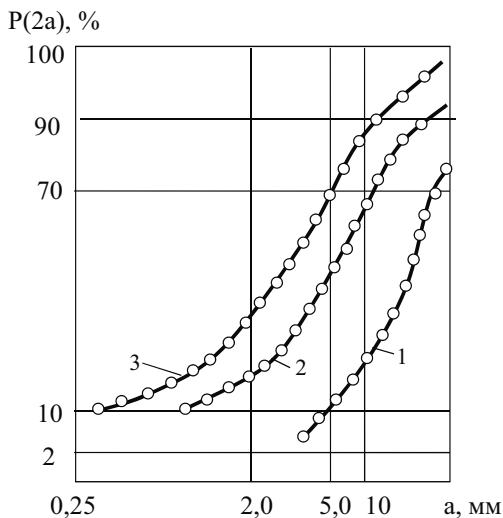


Рис. 1.3. Характеристические кривые чувствительности обнаружения дефектов методами неразрушающего контроля: 1 – рентгеновский метод; 2 – с применением окрашивающих жидкостей; 3 – ультразвуковой импульсный метод;  $a$  – характерный размер (полудлина) дефекта;  $P(2a)$  – вероятность обнаружения дефекта

Акустические волны (сигналы АЭ) принимаются через контактирующие с изделием пьезопреобразователи (ПАЭ). Для регистрации сигналов АЭ используются диагностические системы. Различные системы АЭ контроля показаны на рис. 1.4.

Характер выявляемых дефектов показан на рис. 1.5, а схема прочностного АЭ-контроля изображена на рис. 1.6. Развитию методического обеспечения, выявлению универсальных информативных показателей надежности, составлению математических моделей параметров акустической эмиссии и освоению основанных на них методик АЭ-диагностирования в данном пособии уделено основное внимание.

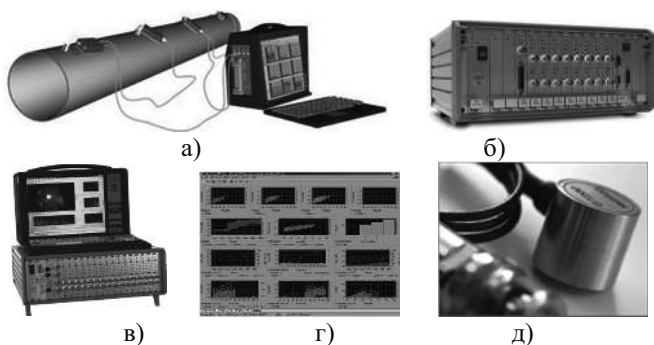


Рис. 1.4. Схематичное изображение акустико-эмиссионного контроля трубопровода системой A-Line 32D производства фирмы «Интерюнис» (а), внешний вид 16-канальной системы фирмы «Промдиагностика» (б) и 32-канальной системы производства *Vallen-Systeme* (Германия) (в), программная поддержка неограниченного числа графиков в сочетании с многостраничной организацией (г) и внешний вид пьезопреобразователя АЭ (ПАЭ) (д)

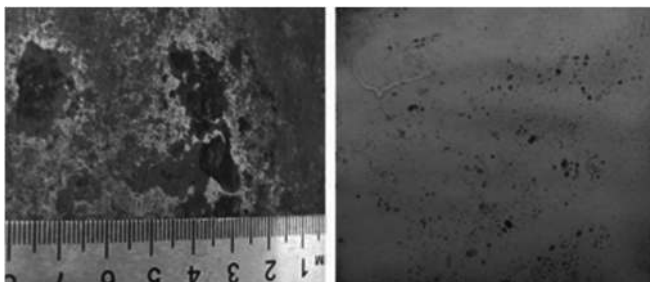


Рис. 1.5. Пример выявляемых методом АЭ участков с локальными коррозионными повреждениями: слева – язвенная коррозия с глубиной проникновения до 50% толщины стенки трубопровода, справа – индикаторные картины питтинговых коррозионных дефектов с глубиной проникновения до 80% толщины стенки трубопровода

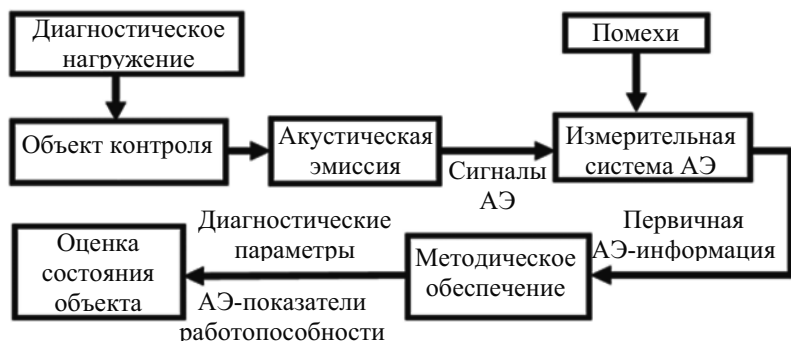


Рис. 1.6. Схема прочностного АЭ-контроля

## 1.2. История развития метода акустической эмиссии

Акустико-эмиссионный контроль применялся с самых древних времен для оценки прочности различных, в основном деревянных, объектов, для которых сигналы АЭ обладают амплитудой в звуковом диапазоне, достаточной для восприятия их на слух.

Еще 6500 лет до н. э. гончары прислушивались к звукам, возникавшим при остывании керамики и указывавшим на разрушение структуры материала. При обработке металлов термин «крик олова» (звуковые волны, вызванные перестройкой структуры в чистом олове в процессе пластической деформации) появился среди плавильщиков в Малой Азии приблизительно в 3700 до н. э. Происходивший в XIX веке быстрый рост промышленного производства привел к возрастанию интереса к свойствам различных конструкционных материалов, и к концу века был накоплен большой объем данных об их строении и о происходящих в них процессах изменения структуры и разрушения.

Изучение акустической эмиссии при пластической деформации и росте трещин происходило практически параллельно. В начале XX века связь акустической эмиссии с процессами, происходящими при пластической деформации в различных металлах и сплавах, была описана в работах С. И. Губкина, Р. Таммана, К. Чохральского, А. Портевена, А. Ле Шателье, Р. Андерсена, Э. Шайля, Ф. Фёрстера.

В 1920-е годы А. Ф. Иоффе и М. В. Классен наблюдали звуковые эффекты, сопровождавшие процесс деформации кристаллов каменной соли и цинка. В 1948 году Вэррен П. Мейсон, Герберт Дж. Мак-Скимин и Вильям Шоклей (США) предположили, что регистрация сигналов АЭ позволяет следить за движением дислокаций в металлах, так как при их движении возникают волны напряжений. Начало исследованию явления АЭ в СССР положили проводившиеся в 1950-х годах по инициативе акад. А. А. Скочинского и акад. Г. А. Гамбурцева в Институте физики Земли им. О. Ю. Шмидта и Институте горного дела им. А. А. Скочинского опыты по регистрации деформационных шумов в горных породах, значительные успехи были достигнуты в области использования явления АЭ для прогнозирования выбросов угля и газа в шахтах. В 1953 году в диссертации немецкого ученого Джозефа Кайзера было отмечено появление шумов при деформации широкого круга материалов, изменение параметров этих шумов при напряжениях, соответствующих пределам упругости, текучести и прочности, установлено явление невоспроизводимости шумов при повторном нагружении (эффект Кайзера). Причиной возникновения АЭ Кайзер считал процессы скольжения дислокаций в деформируемом кристалле и взаимное трение поверхностей разрыва (трещины). Исследования, проведенные этим ученым, положили начало современному использованию метода акустической эмиссии.

Дальнейшее изучение явления АЭ при деформировании велось в направлении совершенствования аппаратуры с целью улавливания сигналов меньшей интенсивности. После Кайзера большой объем научно-исследовательских работ с целью выяснения физической природы АЭ был проведен в 1954 году в США под руководством Брэдфорда Х. Скофилда. По-видимому, именно Скофилд впервые для деформационных шумов ввел термин «акустическая эмиссия» («acoustic emission»). Работа коллектива началась с изучения корреляции АЭ с движением дислокаций при деформировании монокристаллов цинка, алюминия и золота. Последующие работы Скофилда были посвящены созданию методов оценки дефектности материала конструкций с использованием метода АЭ.

В 1960-х годах одновременно в нескольких странах было предложено использовать явление АЭ для неразрушающих испытаний различных конструкций. В 1961 году в США А. Грин, К. Локман и Р. Стил применили метод АЭ для оценки целостности корпусов ра-

кетных двигателей. В 1963 году Х. Данеган предложил использовать АЭ для обследования сосудов давления. В это же время в СССР ряд научно-исследовательских институтов начали изучение явления акустической эмиссии и его применения для определения свойств различных материалов, обнаружения трещин, неразрушающего контроля конструкций. Активные исследования проводились во Всесоюзном научно-исследовательском институте неразрушающего контроля, Хабаровском филиале Всесоюзного научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений, в Московском инженерно-физическом институте, Ленинградском физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе АН СССР, Ленинградском политехническом институте, Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова, Институте сварки им. Е. О. Патона и других научно-исследовательских учреждениях. Было замечено, что при переходе материала объекта контроля к макроскопическому разрушению происходила смена закономерности изменения различных параметров АЭ: резкое увеличение активности АЭ, амплитуды и энергии импульсов, дисперсии распределения амплитуд импульсов и др.

История развития метода АЭ наиболее полно раскрывается из анализа подходов к решению *основной задачи АЭ-диагностики* – определения связи параметров сигналов АЭ с характером процесса разрушения, степенью поврежденности материала, показателями надёжности и ресурса. Как и во всей диагностике, существует два основных подхода к решению данной задачи – *статистический и физический*. Первый из них заключается в построении статистических моделей АЭ на основе проведения большого количества испытаний. Второй предполагает создание физически обоснованных моделей параметров АЭ на основе различных моделей разрушения твердого тела, которые в свою очередь опираются на два основных подхода к понятию прочности: *механический и кинетический*. Совершенствование метода АЭ идёт по пути обобщения накапливаемой статистической информации, формулировки универсальных физических закономерностей, подбора информативных диагностических параметров и составления методик оценки ресурса объектов контроля.

Примером применения статистического подхода к определению степени поврежденности материала может служить использование статистических инвариантов, метода определения J-интеграла по данным АЭ испытаний, состоящий в сравнении полученного в опыте

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)