

ТРУДЫ И ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ

12-16 ноября 2012



ГРУППА КОМПАНИЙ «ИНТЕРЮНИС»

III Международная научно-техническая конференция
«Акустическая эмиссия. Роль метода в системах
комплексного мониторинга технического состояния опасных
производственных объектов»



НАУЧНО-ПРОМЫШЛЕННЫЙ СОЮЗ «РИСКОМ»

II научно-практический семинар
«Оценка и управление индустриальными
рисками в промышленной безопасности.
Мониторинг рисков объектов
нефтепереработки
и нефтехимии»

Москва, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

II научно-практический семинар

«Оценка и управление индустриальными рисками в промышленной безопасности. Мониторинг рисков объектов нефтепереработки и нефтехимии» 7

Г.П. Воронин

Техническое регулирование спустя десять лет. 8

Н.А. Махутов

Категорирование объектов, опасностей и рисков в проблемах промышленной безопасности 19

Н.А. Махутов

Основы анализа рисков возникновения чрезвычайных ситуаций на объектах техносферы 28

М.М. Гаденин

Научные основы комплексного анализа рисков и обеспечения безопасности 46

А.М. Лепихин, А.П. Черняев

Методические аспекты анализа риска аварий технических систем 67

В.Г. Харебов, В.И. Эльманович, В.С. Едигаров, Т.А. Сурина

Стандарты ООО «ИНТЕРЮНИС» в области анализа безопасности, управления и мониторинга рисков 75

В.Н. Костюков, А.П. Науменко, Ан.В. Костюков

Оценка риска принятия решения в системах мониторинга 87

А.А. Дубов, Ал.А. Дубов

Оценка остаточного ресурса и риска на опасных производственных объектах (ОПО) с использованием экспресс-методов НК 97

В.Р. Ржевкин, А.Б. Самохвалов

РСМС – Программное обеспечение управления состоянием оборудования на базе оценки рисков 104

III международная научно-техническая конференция

«Акустическая эмиссия. Роль метода в системах комплексного мониторинга технического состояния опасных производственных объектов» 106

В.А. Барат, Д.А. Терентьев

Обзор материалов конференции Европейской рабочей группы по акустической эмиссии EWGAE 2012 107

<i>В.И. Иванов</i> Сигналы Акустической Эмиссии. Модели и интерпретации.	112
<i>В.А. Шапоров, Ю.С. Попков</i> Системы комплексного диагностического мониторинга опасных производственных объектов	132
<i>Аннагурт Аннагурдов</i> Метод АЭ в практике неразрушающего контроля и технической диагностики . . .	136
<i>С.В. Каменский, Е.С. Трофимов</i> Основные аспекты применения метода акустической эмиссии при диагностике технологических трубопроводов компрессорных станций	143
<i>В.Г. Харебов, В.И. Эльманович, В.С. Едигаров, Т.А. Сурина, О.Н. Алфутова</i> Применение метода акустической эмиссии при оценке пригодности к эксплуатации технологического оборудования после пожара	144
<i>В.И. Эльманович, А.Л. Колбин</i> Метод акустической эмиссии в процедурах risk-based inspection резервуарных парков	162
<i>В.А. Барат, С.В. Елизаров</i> Новый портативный инструмент НК «UNISCOPE».	173
<i>В.Г. Харебов, А.Н. Мисейко, А.С. Ушаков</i> Опыт и перспективы внедрения систем мониторинга технического состояния нефтеперерабатывающего оборудования с дефектами	179
<i>С.В. Каменский, Е.С. Трофимов</i> Акустико-эмиссионный контроль трубопроводов теплосети	188
<i>А.Н. Кузьмин, Е.Г. Аксельрод, С.Ю. Филиппов</i> Оценка возможности использования метода акустической эмиссии в системах мониторинга тепловых сетей	193
<i>Р.В. Жуков, В.М. Давыдов, Б.А. Арифанов, П.И. Мельников</i> Опыт применения метода акустической эмиссии при диагностировании шаровых резервуаров аммиака объемом 2000 м ³	204
<i>Г.А. Бигус, Ю.П. Бородин, А.А. Травкин</i> Исследования процессов усталости с помощью метода акустической эмиссии. . .	210
<i>Ю.П. Бородин</i> Методика определения коррозионного состояния внутренней стенки трубы	215
<i>О.В. Башков, Т.И. Башкова</i> Роль идентификации источников акустической эмиссии в прогнозировании предельного состояния материалов и конструкций	219

<i>А.Н. Мисейко, А.В. Шведков</i> Изменение напряженно-деформированного состояния участка магистрального трубопровода в результате скачка трещины	221
<i>Ю.С. Попков, Е.А. Марков, М.В. Черных</i> Перспективы применения метода акустической эмиссии в системах коррозионного мониторинга оборудования нефтеперерабатывающих предприятий	229
<i>Н.А. Махутов, А.В. Фомин, В.И. Иванов, И.Е. Васильев, В.Н. Пермяков</i> Исследование напряженно-деформированных состояний с использованием методов хрупких покрытий и акустической эмиссии	239
<i>В.Н. Костюков, А.П. Наumenко, С.Н. Бойченко, Ал.В. Костюков</i> Исследование АЭ-сигналов коррозионных процессов	249
<i>В.И. Эльманович</i> Гармонизация российских норм и правил в области акустической эмиссии с международными стандартами	258
<i>В.И. Эльманович, В.С. Едигаров, Т.А. Сурина</i> Технический аудит организационно-технической готовности технологических установок нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий к переводу на увеличенные межремонтные пробеги.	260
<i>Ю.П. Бородин, Д.А. Терентьев</i> Опыт проведения в условиях города АЭ-диагностирования газопровода высокого давления	274
<i>А.Н. Мисейко, А.В. Шведков</i> Достоверность результатов акустико-эмиссионного контроля магистральных трубопроводов	281
<i>А.М. Лепихин, А.П. Черняев</i> Методические аспекты анализа риска аварий технических систем	283

Уважаемые коллеги!

От имени ООО «ИНТЕРЮНИС» и Научно-промышленного союза «РИСКОМ» сердечно приветствую участников II научно-практического семинара «Оценка и управление индустриальными рисками в промышленной безопасности. Мониторинг рисков объектов нефтепереработки и нефтехимии» и III Международной научно-технической конференции «Акустическая эмиссия. Роль метода в системах комплексного мониторинга технического состояния опасных производственных объектов».

Очень рад, что, несмотря на высокую профессиональную занятость, Вы смогли найти время для нашей встречи, которая имеет все предпосылки стать основополагающей по выработке единых подходов в решении прикладных задач неразрушающего контроля с использованием метода акустической эмиссии. Современных технологий внедрения комплексных систем диагностического мониторинга. Анализа и мониторинга риска.

Основной целью предстоящей конференции является объединение накопленного каждым из нас опыта для определения перспективных путей развития и интеграции АЭ-метода, средств неразрушающего контроля и технической диагностики, комплексных систем безопасности и систем мониторинга на предприятиях с объектами повышенной опасности.

Искренне желаю Вам плодотворной работы на конференции!

*Председатель совета директоров В.Г. Харемов
группы компаний ООО «ИНТЕРЮНИС»*



II НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ СЕМИНАР

**«Оценка и управление индустриальными
рисками в промышленной безопасности.**

**Мониторинг рисков объектов
нефтепереработки и нефтехимии»**

ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СПУСТЯ ДЕСЯТЬ ЛЕТ

Г.П. Воронин, председатель Комитета ТПП РФ по качеству продукции, профессор, лауреат Государственных премий СССР и РФ в области науки и техники, заслуженный машиностроитель РФ, заслуженный инженер РФ

Исполнилось десять лет с момента принятия Федерального закона «О техническом регулировании». В силу широчайшей области охвата этот закон привлек огромное внимание научно-технической общественности и промышленности. И... оказался практически не работающим. Предполагалось, что он даст толчок появлению исчерпывающих, самодостаточных технических регламентов – законов, по которым можно выпускать продукцию, строить объекты недвижимости, развивать технологические процессы, подтверждать их соответствие и проводить государственный контроль и надзор за ними. Ничего так и не произошло.

На заседании Президиума Государственного Совета по вопросу инновационного развития транспортного комплекса в Ульяновске 24 ноября 2009 г. Президент России Д.А. Медведев оценил результаты применения закона следующим образом: «И в отношении технического регулирования... Здесь беда какая-то просто, я просто не знаю, что делать с этим... Может быть, отказаться от этого закона? Он не работает. Наша попытка создать стройную систему технического регулирования ничем не закончилась. Мы не можем принять эти решения в том порядке, в котором это вытекает из закона... Если нужно будет отменить закон, пожалуйста, я его отменю».

Закон на протяжении десяти лет находится в перманентном состоянии доработки, и поскольку он не учитывает ни интересы реального сектора экономики, ни международный опыт, он оказался никому не нужным. Все эти десять лет переходного периода в стране работали правила и процедуры, установленные до принятия закона. Какие именно? Национальные стандарты, ставшие преемниками государственных стандартов, а также отраслевые стандарты и технические условия, не предусмотренные законом. По СНиПам, по специальным ТУ строились здания. По федеральным авиационным правилам разрабатывались самолеты.

Согласитесь, ситуация абсолютно абсурдная! Упустить из-под своего контроля такие инструменты обеспечения любых государственных социально-экономических задач, как стандарты, – значит для государства полностью самоустраниться от решения задач обеспечения безопасности граждан, продукции и инфраструктуры.

В течение десяти лет во исполнение Федерального закона правительством было принято пять программ разработки технических регламентов (ТР), финансируемых из средств федерального бюджета. Ни одна из них выполнена не была. По состоянию на 1 января 2009 г. принято лишь 15 технических регламентов, и только 8 из них значатся в названных выше программах. Можно говорить о том, что процедура принятия регламентов очень длительная. Но не замечать того, что принятые ТР не работают, а если и применяются, то вопреки интересам целых отраслей потребите-

лей продукции, – это значит, подобно страусам, зарывать голову в песок и множить ошибки, которые неизбежно будут иметь серьезные последствия для безопасности и конкурентоспособности продукции, да и для экономики в целом.

Вступившие в силу технические регламенты обладают существенными недостатками – сразу же после их принятия потребовалось внести в них существенные изменения. Большинство проанализированных специалистами проектов ТР устанавливают к продукции и процессам производства чрезмерно детализированные требования, во многом основываясь при этом на устаревших ведомственных нормативах и инструкциях. По существу, такие проекты представляют собой огромные производственные инструкции. Они способны лишь сковывать инициативу производителей или быть инструментом ведомственной политики. Их выполнение повлечет за собой неоправданную реорганизацию производства и значительные затраты.

Существенные противоречия самого федерального закона были видны специалистам, начиная с момента его принятия. Неоднократно отмечались отсутствие четкой методической базы разработки ТР, а также значительные расхождения с международными, прежде всего с европейскими подходами к разработке регламентов, противоречия с документами ВТО.

Симптоматично, что на заседании Правительства РФ 13 апреля 2006 г. глава Правительства М.Е. Фрадков так оценил результаты реформы технического регулирования: «Проведена супероперация в интересах наших глобальных конкурентов. Предстоит разобраться, кто сверг нас в пучину с такой степенью некомпетентности». К сожалению, в сути проблемы до последнего выступления Президента РФ по этому вопросу разобраться никто не пытался.

Берусь утверждать, что серьезные проблемы в реформировании технического регулирования во многом обусловлены двумя непродуманными решениями: ликвидацией Госстандарта России и передачей его функций по техническому регулированию Минпромторгу РФ и отменой Закона Российской Федерации «О стандартизации».

Министерство промышленности и торговли РФ для квалифицированного руководства сложнейшими вопросами нормирования в народном хозяйстве, особенно в отраслях, не относящихся к компетенции министерства (агропромышленный комплекс, энергетика, транспорт, здравоохранение и др.), не имеет ни опыта, ни кадров.

Для организации в стране централизованной деятельности по техническому регулированию необходимо создать профессиональный специализированный орган. Им мог бы быть Госстандарт, который отвечал бы перед Правительством РФ за деятельность в области нормирования и контроля требований к продукции и нес бы всю полноту ответственности за конечный результат. К примеру, деятельностью по техническому регулированию в Белоруссии руководит именно такой орган.

По результатам упомянутого выше заседания Госсовета в Ульяновске, Президент РФ Д.А. Медведев поручил Правительству РФ подготовить предложения об упрощении и ускорении процедуры подготовки и утверждения технических регламентов (в том числе путем адаптации правил и норм Европейского союза), а также предложения о наделении соответствующими полномочиями отдельного федерального органа исполнительной власти. В результате в ускоренном режиме был подготовлен и при-

нят 30 декабря 2009 г. закон № 385-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон № 184-ФЗ «О техническом регулировании». Однако при этом не были учтены многочисленные предложения специалистов. В итоге принятый закон создал условия для дальнейшего ухудшения ситуации в техническом регулировании. По существу сформированы предпосылки для потери суверенитета России в нормативно-технической сфере. Закон создает новые возможности для допуска на рынок опасной продукции, несмотря на то, что техногенные катастрофы и аварии последнего периода настоятельно свидетельствуют о необходимости приоритетного обеспечения технической безопасности в стране.

Закон, в частности, разрешает прямое применение в РФ международных стандартов, региональных (европейских) стандартов и зарубежных национальных стандартов для обеспечения соблюдения требований технических регламентов при условии формальной (учетной) регистрации этих стандартов. Аналогов подобного применения иностранных стандартов в развитых и наиболее значимых развивающихся странах попросту нет.

Между тем, у России уже есть отрицательный опыт прямого применения иностранных стандартов. Так, при реализации проекта «Сахалин-II» на базе прямого применения иностранных стандартов потери российских подрядчиков составили, по экспертным оценкам, от 5 до 7 млрд долларов.

Без адаптации иностранных стандартов к национальной нормативно-технической системе и российской технологической и природно-климатической среде их прямое применение чревато многими негативными последствиями. Прежде всего, это частичная потеря суверенитета России и утрата влияния государства на формирование требований к продукции. Законом вводится, по сути, параллельная система регулирования, допускающая применение альтернативных правовых норм и стандартов. Таким образом, нарушается базовый принцип о недопущении дублирования правовых актов. Законом также создаются преимущества для иностранного бизнеса – он получает возможность обеспечить обращение своей продукции на российском рынке, не выполняя при этом требования российских стандартов, не адаптируя свою технологию и продукцию к нашим условиям.

Принятый закон приведет к деградации национальной системы стандартизации, продолжится дальнейшее разрушение национальной школы технического нормирования. Промышленность на какое-то время утратит интерес к развитию собственной системы стандартизации, объемы разработки национальных стандартов существенно снизятся. Закон не содержит механизма актуализации текстов иностранных стандартов, да этого и в принципе нельзя сделать, что может привести к «воспроизведению» устаревшей техники и технологий.

Российская Федерация утратит возможность использования национальных стандартов в качестве эффективного инструмента государственной политики. Таким образом, принятый закон явно не обеспечивает целей, намеченных Президентом РФ для ускорения реформы технического регулирования на основе опыта передовых стран.

Тем не менее во исполнение Федерального закона «О техническом регулировании» сформирована очередная Программа разработки технических регламентов.

Усилия научно-технического сообщества она направляет по наезженной в течение десяти лет колее, ведущей экономику страны в тупик. Разработчики программы даже не потрудились четко ранжировать технические регламенты в зависимости от их масштабности и важности. А предложенные в программе нереальные сроки рассмотрения и принятия ТР обернутся низким качеством этих обязательных к применению документов.

К сожалению, до настоящего времени в России отсутствуют установленные на государственном уровне промышленная и потребительская политика, а также государственные программы поддержки качества продукции и экспортоориентированных отраслей экономики. А ведь одним из ключевых элементов этих программ является техническое регулирование, стандартизация и подтверждение соответствия, обеспечивающие широкое признание их результатов за рубежом.

Напрасны надежды, что бизнес сам проведет необходимые исследования, установит нормативы и обеспечит их совместимость. Появляются многочисленные корпоративные стандарты, на их основе создаются местечковые непрозрачные системы сертификации и допуска продукции на рынки отдельных корпораций и холдингов. При этом из-за необходимости создавать специальные технические и технологические решения для каждого заказчика стоимость продукции растет. Возникает опасность картельных сговоров. В результате лоббирования некоторых российских компаний и госкорпораций для подтверждения соответствия технических регламентов предлагается применять стандарты организаций.

Что можно противопоставить этим опасностям? Приходится констатировать, что государственная политика в области стандартизации в России в настоящее время отсутствует. Проект закона «О стандартизации», предусматривающий установление основополагающих принципов такой политики и создание инструментов ее реализации, лежит без движения в Минпромторге России более четырех лет, несмотря на положительные результаты широкого публичного обсуждения.

России сейчас важно учесть опыт развитых стран, активно использующих в сфере стандартизации государственную политику. Показателен опыт США в части государственной политики в области стимулирования разработки и применения стандартов. Я уже подробно писал об этом – отношу внимание читателей к статье, опубликованной в № 2-3 (2010) журнала «Представительная власть». В США утверждены как обязательные 11 тыс. регламентирующих стандартов (regulatory standards). Эти стандарты, законы и другие обязательные правовые акты сведены в Кодекс федеральных регламентов.

Преимущества стандартизации как эффективного инструмента социально-экономической политики государства общеизвестны. Это обеспечение не только безопасности продукции, работ и услуг, но и технической (конструктивной, электромагнитной и т.д.) и информационной (программной и т.д.) совместимости, а также взаимозаменяемости продукции, согласования и увязки ее показателей и характеристик, кодирования, классификации, унификации, типизации и агрегатирования машин и изделий, обеспечение единства методов контроля и единства маркировки.

Таким образом, экономятся все виды ресурсов (снижение материалоемкости, энергоемкости, трудоемкости, применение малоотходных технологий). В результате эффективного применения инструментов стандартизации устраняются технические барьеры в торговле, повышается конкурентоспособность и качество продукции.

Стандартизация – гибкий и мощный инструмент воздействия на рынок. Стандарт может содействовать защите освоенного рынка, привлечению партнеров, захвату рынка. Он может повлиять на отстающих в развитии, вывести с рынка небезопасную продукцию, побуждать к развитию инноваций, запрещая остальные технологии.

Благодаря созданию эффективной системы стандартизации и использованию ее в государственной политике в развитых странах достигнуты впечатляющие результаты в экономике. Это и дополнительный 1% ВВП в экономике Германии, Швейцарии и Австрии, и существенное повышение производительности труда, и 25-процентный вклад в технологические преобразования в Великобритании. Государство должно быть максимально заинтересовано в извлечении всех преимуществ стандартизации, в том числе на федеральном уровне. Оно должно стимулировать внедрение прогрессивных технологий в промышленности, установленных в стандартах. В странах G8 и еще ряде стран «Большой двадцатки» власти буквально принуждают бизнес к технологическому переустройству предприятий. Стандартизация играет ключевую роль в развитии инновационной экономики.

В Евросоюзе, взявшем курс на создание конкурентоспособной инновационной экономики, сформулирован ряд задач в области стимулирования инновационного развития. Среди них – не только увеличение затрат на НИОКР в странах ЕС с 1,9 до 3% ВВП (прежде всего за счет роста ассигнований частного сектора), создание единого Европейского исследовательского пространства, но и развитие стандартизации, являющейся катализатором и инструментом поэтапного внедрения инноваций.

Когда российские «инноваторы» говорят о том, что стандартизация и инновационный процесс несовместимы, то это или лукавство (для ухода на уровень корпоративных стандартов), или незнание процесса разработки и постановки продукции на производство. Стандартизация позволяет концентрировать ресурсы: побеждает не самая «продвинутая» инновация, а самая необходимая. Она обеспечивает инновации метрологически: для инноваций актуален тезис «Если нельзя измерить, то невозможно создать». Гарантирует востребованность продукции, ведь дешевле заплатить за стандарт, чем за научную разработку, тем более что продукция, выпущенная по стандарту, непременно будет безопасной, надежной, качественной, совместимой и востребованной. Стандартизация сопровождает инновационную продукцию на всех стадиях ее жизненного цикла, начиная с создания и коммерциализации и заканчивая ее эксплуатацией и утилизацией.

Таким образом, без применения стандартизации и инструментов подтверждения и проверки соблюдения стандартов невозможно говорить о реализации намеченных руководством страны планов модернизации экономики. Невозможно преодолеть технологическое отставание российской промышленности. А ведь при этом разработанная по специальному решению Совета Безопасности РФ программа стандартиза-

ции, которая должна была обеспечить гармонизацию с международными стандартами более 3,5 тыс. национальных стандартов по шести критическим для российской экономики направлениям, не финансируется государством с момента ее разработки в 2007 г. Сравните: в Китае аналогичная специальная программа стандартизации, содержащая более 10 тыс. стандартов, успешно реализуется при финансировании государством на 75%: 25% расходов в рамках частно-государственного партнерства взял на себя бизнес.

По нашим оценкам, на осуществление мер, связанных со вступившим в силу ФЗ, в том числе на разработку проектов технических регламентов, расходуется до 6 млрд рублей в год. Если бы хотя бы четверть этих средств ежегодно выделялось на стандартизацию, можно было бы полностью обновить необходимый для экономики России фонд стандартов, повысить степень их гармонизации с международными.

В 2009 г. за счет средств бюджета было разработано более 90% национальных стандартов. Однако основной потребитель и пользователь стандартов – промышленность – практически не участвует в их разработке, ограничиваясь подготовкой экспертных заключений. Между тем, пора поставить точку в дискуссии по вопросу отнесения затрат на разработку национальных стандартов на производство. Этот вопрос обсуждается на различных уровнях уже более двух лет. Необходимость принятия данной меры поддержана ТПП РФ, РСПП, «Деловой Россией», Общественной палатой РФ, отраслевыми министерствами. Однако до настоящего времени эта проблема не решена, что препятствует выходу на темпы обновления фонда национальных стандартов, предусмотренные Концепцией развития национальной стандартизации, которая одобрена Правительством РФ.

Уже на протяжении шести лет – начиная с 2007 г. – идет активное обсуждение проекта закона «О стандартизации», который и призван решить проблему стимулирования разработки и применения стандартов в экономике России, в том числе и в сферах, не входящих в поле Федерального закона «О техническом регулировании». Вне рамок законодательного регулирования остались вопросы качества продукции, ее взаимозаменяемости, унификации, совместимости, вопросы охраны труда, безопасности и качества услуг, другие аналогичные вопросы. С момента вступления в силу ФЗ «О техническом регулировании» многие из этих вопросов оказались вне законодательного поля из-за того, что утратил свою силу Закон РФ «О стандартизации», несмотря на прямое указание в Конституции РФ на то, что стандарты находятся в ведении РФ (п. «р» ст. 71 Конституции РФ). Вопросы, находящиеся в ведении РФ и напрямую указанные в Конституции РФ, как правило, регламентируются федеральными законами.

Техническое регулирование и стандартизация – соприкасающиеся, но разные социальные институты. Они отличаются между собой по предмету и объекту регулирования. Национальная система стандартизации – это база, на которую опирается не только система технического регулирования, но и другие правовые области, обеспечивающие регулирование промышленной безопасности, ядерной и радиационной безопасности, экологической безопасности, система поддержки государственной со-

циально-экономической политики... Более 30 федеральных законов и нормативных правовых актов опираются на систему стандартизации.

Цели и принципы стандартизации также отличаются от принципов технического регулирования. Стандарты – это не документ органа власти, а результат достижения консенсуса заинтересованных сторон. Отдельные законы о стандартизации имеют в своем законодательстве большинство стран. Опыт США, ФРГ, Китая, Японии и многих других стран свидетельствует, что во многих сферах деятельности, в том числе в сфере закупки и поставки продукции (товаров, работ, услуг) для государственных нужд, национальной безопасности, обеспечения безопасности труда и т.д., регулируемых стандартами (национальными, государственными, федеральными), интересы государства, производителей и потребителей продукции (работ и услуг), а также отдельных граждан диктуют необходимость применения этих стандартов на обязательной основе.

Правовым основанием для установления статуса обязательного применения вышеупомянутых стандартов в сферах, не подпадающих под действие ФЗ «О техническом регулировании», является ряд федеральных законов: ФЗ «Об обеспечении единства измерений», ФЗ «Об энергосбережении», ФЗ «О социальной защите инвалидов», ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения», ФЗ «Об охране атмосферного воздуха», ФЗ «Об основах охраны труда в РФ», ФЗ «О недрах» и др.

По сравнению с зарубежными странами, реформа технического регулирования в России проводится в ускоренном формате. Учесть все нюансы ее воздействия на стандартизацию было невозможно. Закон «О стандартизации» призван восполнить имеющиеся пробелы, учесть отрицательные тенденции в стандартизации, проявившиеся при реализации реформы технического регулирования, и реализовать стратегические интересы государства – обеспечить технологическое перевооружение, обороноспособность, исполнение государственного заказа, охрану окружающей среды, социальную защиту населения. Он позволяет продвинуть инновационные технологии и повысить энергоэффективность экономики и т.д.

При выведении стандартизации из-под действия ФЗ «О техническом регулировании» и эффективном применении государством этого инструмента социально-экономической, промышленной и торговой политики будет достигнут максимальный эффект.

В последнее время много говорят о необходимости создать реально функционирующие и экономически эффективные интеграционные образования – ЕврАзЭС, Таможенный союз, Единое экономическое пространство. При отсутствии осознанной технической политики сделать это невозможно. В процессе присоединения к ЕС восточноевропейских стран в рамках соответствующих межгосударственных программ было установлено одно из главных требований, обеспечивающее свободное обращение продукции в ЕС, – наличие в каждой из стран-кандидатов 80-процентного уровня гармонизации со стандартами ЕС.

Особое значение приобретает политика в области стандартизации с учетом необходимости развивать интеграционные процессы на просторах СНГ. В соответствии

с Соглашением о проведении согласованной политики в области стандартизации, метрологии и сертификации, подписанным 13 марта 1992 г., страны СНГ обязались проводить в области стандартизации, метрологии и сертификации согласованную политику. Благодаря этому на протяжении последних лет технические барьеры между странами СНГ практически не возникали или могли быть при необходимости урегулированы в рамках процедур Межгосударственного совета по стандартизации, метрологии и сертификации (МГС).

По сравнению со странами ЕС государства СНГ имеют огромное преимущество – это изданные на русском языке единые стандарты, внедренные промышленностью в рамках тесной экономической кооперации и обеспечивающие единое техническое и информационное пространство, что позволяет признавать результаты испытаний и сертификации продукции. Однако анализ законодательства стран СНГ показывает, что, несмотря на их стремление сблизить свои законодательства в области технического регулирования, существенные различия все еще остаются. В большинстве стран уже на законодательном уровне заложен европейский принцип презумпции соответствия требованиям технического регламента при условии соответствия требованиям определенных национальных стандартов и других норм, в том числе технических кодексов установившейся практики. При этом в течение последних 18 лет именно межгосударственные (региональные) стандарты продолжают обеспечивать экономическую интеграцию и свободное движение продукции на постсоветском пространстве. А известно, что повышение уровня гармонизации стандартов между странами на 10% увеличивает объем двусторонней торговли на 3%.

Несмотря на то, что ФЗ № 365 в России введено определение межгосударственного (регионального) стандарта, неопределенность и недосказанность в межгосударственной стандартизации осталась.

Процедуры разработки технических регламентов в странах СНГ также различны.

Отсутствие единой централизованной системы разработки технических регламентов в России уже сейчас приводит к многочисленному дублированию работ, пересечению областей действия будущих технических регламентов и предъявлению различных требований к одним и тем же объектам технического регулирования.

Можно найти много примеров существенных отличий в законодательстве стран СНГ в области технического регулирования. Каким же образом при различных законодательствах стран СНГ можно обеспечить свободное продвижение товаров, снижение барьеров в торговле, признание результатов оценки соответствия?

В ЕврАзЭС 24 марта 2005 г. принято Соглашение об основах гармонизации технических регламентов государств-членов ЕврАзЭС. В этом соглашении предусмотрена разработка единых технических регламентов в виде международных договоров. При существенных отличиях законодательств стран-участниц в области технического регулирования реализация этого соглашения на практике трудноосуществима. Реальным решением этой проблемы для 11 стран СНГ было бы применение межгосударственной модели технического регламента, которая применялась бы сторонами с учетом особенностей национальных законодательств, с использованием, прежде всего, межгосударственных стандартов как объединяющих факторов.

Есть и другой путь решения проблемы – принятие технических регламентов международными договорами, как это предусмотрено в ЕврАзЭС. Но такой способ возможен только при условии максимального сближения законодательств стран СНГ в области технического регулирования.

Говоря о реализации реформы технического регулирования, о снижении административного давления на предпринимателей, нельзя забывать о главной цели этой реформы – защите жизни и здоровья граждан. К сожалению, в погоне за количеством принятых ТР упускаются вопросы сертификации и декларирования продукции, аккредитации испытательных лабораторий и органов по сертификации. На протяжении последних лет государство практически самоустранилось от выполнения своей основной функции – защиты граждан от опасной, контрафактной и некачественной продукции и, прежде всего, такой социально значимой продукции, как пищевая.

Приказом ФТС России от 13 октября 2008 г. № 1276 внесены изменения в перечень документов и сведений, необходимых для таможенного оформления товаров в соответствии с выбранным таможенным режимом. Из перечня документов и сведений, необходимых для оформления, исключены сертификаты соответствия (одобрение типа) транспортного средства, а также сертификаты соответствия требованиям национальных стандартов для продукции (при наличии санитарно-эпидемиологического заключения).

Постановлением Правительства РФ от 1 декабря 2009 г. целый ряд социально значимых групп продукции (пищевая продукция, бытовая химия, посуда и т.д.) переведен под декларирование на основе собственных доказательств, с учетом того, что на эту продукцию выдается санитарно-эпидемиологическое заключение. Вместе с тем, учитывая определение санитарно-эпидемиологического заключения, очевидно, что оно подтверждает соответствие продукции только требованиям безопасности, причем далеко не всем, и не обеспечивает идентификацию продукции и подтверждение соответствия продукции всем требованиям безопасности, а также всем заявленным изготовителем свойствам, физико-химическим показателям, сырьевому составу. Единственным документом, устанавливающим и то, и другое, является сертификат соответствия, выданный независимым от изготовителя и потребителя органом по сертификации на основании испытаний, проведенных в независимой, технически компетентной испытательной лаборатории. После поступления продукции на потребительский рынок ее соответствие обязательным требованиям проверяется в рамках проведения государственного контроля (надзора).

Вместе с тем в связи с вступлением в действие в июне 2009 г. ФЗ № 294 государственный контроль (надзор) фактически свернут, так как одна плановая проверка раз в три года с предварительным уведомлением проверяемого не позволит обеспечить соблюдение изготовителем (поставщиком, продавцом) обязательных требований к продукции, установленных нормативными правовыми актами.

А ведь согласно государственному докладу «О санитарно-эпидемиологической обстановке в Российской Федерации в 2008 году», около 40% продуктов, реализуемых в России, по данным Роспотребнадзора, являются фальсифицированными!

Административная и уголовная ответственность изготовителя (поставщика, продавца) за несоблюдение обязательных требований минимальна. Штраф в 15–20 тыс. рублей, который накладывает Роспотребнадзор на российские сетевые компании, ими практически не ощущается. А, например, в США недостоверная информация на этикетке карается штрафом в размере 100 тыс. долларов или тремя годами тюрьмы. Реализация продукции без документов влечет за собой штраф в 250 тыс. долларов или пять лет тюремного заключения. Высокая мера ответственности предусмотрена и законодательством ЕС.

На государство, а не на виновника нарушений возлагается в соответствии с решением Конституционного суда РФ оплата испытаний, подтверждающих нарушение обязательных требований. В такой ситуации прибыль изготовителя (поставщика, продавца), полученная от реализации некачественной, контрафактной продукции, существенно превышает объемы возможных штрафных санкций.

Окончательный уход государства от возможности ориентировать потребительский рынок на защиту потребителя от контрафактной и некачественной пищевой продукции завершит массовый перевод пищевой продукции, товаров народного потребления под декларацию о соответствии на основании собственных доказательств. Но ведь на предприятиях среднего и мелкого бизнеса по производству пищевых продуктов и товаров потребительского ассортимента, как правило, отсутствуют испытательные лаборатории. Кто же будет осуществлять постоянный контроль качества и безопасности вырабатываемой продукции?

За рубежом ситуация принципиально другая. Практически все ведущие страны в последнее время усилили возможность влияния государства на обеспечение безопасности и качества пищевой продукции, в том числе поставляемой в страны по импорту. Широко внедряются стандарты по прослеживаемости пищевой продукции, проведению контроля и надзора на всех этапах производства пищевой продукции «от поля до прилавка», в том числе на территориях стран поставщиков.

Законодательство ЕС по организации и проведению официального контроля в области производства и реализации пищевой продукции (Постановление ЕС от 29 апреля 2004 г. № 882), имеет ряд принципиальных отличий от требований российского законодательства. Главное заключается в том, что в странах ЕС государственный контроль осуществляется не в сфере обращения, как это установлено нашим ФЗ «О техническом регулировании», а по всей цепочке товародвижения от поля до тарелки и носит предупредительный характер. Такой подход значительно сокращает риск появления небезопасных пищевых продуктов в торговой сети, существенно сокращает и число испытываемых образцов, и расходы, связанные с их испытаниями.

Таким образом, рассматривая общую ситуацию с обеспечением обязательств государства по защите прав потребителей на безопасную и качественную пищевую продукцию, можно констатировать, что в отсутствие контроля на границе, с учетом либерализации государственного контроля (надзора) на рынке, а также с учетом несовершенства российского законодательства по ответственности за выпуск опасной и недоброкачественной продукции, единственным реальным барьером на пути опасной продукции остается обязательная сертификация или декларация на основе

испытаний в независимой аккредитованной лаборатории. Так что отсутствие осознанной государственной потребительской политики – одна из основных причин создания такой сложной ситуации на потребительском рынке.

Подводя итоги прошедших десяти лет реформы технического регулирования, можно сделать следующие выводы: в условиях несистемного и непоследовательного проведения реформы и при отсутствии необходимой централизации и координации работ в авральном режиме будут появляться все новые «свежеиспеченные» технические регламенты, которые усугубят ситуацию на рынке и все больше разделят страны-участницы ЕврАзЭС и Таможенном союзе. Несмотря на проявленное на самом высшем уровне внимание к проблемам технического регулирования, проблемы не только остаются, но и умножаются.

Бывшие председатели Госстандарта России направили Президенту РФ письмо. В нем они, поддерживая идею необходимости реформирования системы технического регулирования, дают предложения по исправления сложившейся в этой сфере поистине отчаянной ситуации. По нашему убеждению, надо:

- инициировать отмену ФЗ;
- ускорить принятие Федерального закона «О стандартизации», проект которого прошел широкое обсуждение научно-технической общественностью;
- начать разработку законопроектов «Об оценке соответствия», «О государственном контроле и надзоре в системе технического регулирования»;
- создать на базе Ростехрегулирования государственный комитет по стандартизации, метрологии и техническому регулированию с прямым подчинением Правительству РФ.

И последнее. Я хотел бы обратиться к руководителям, отвечающим за реформирование системы технического регулирования: прекратите имитацию кипучей деятельности, вводящей в заблуждение Президента РФ! Эта имитация подрвет процесс модернизации страны и перевода ее экономики на инновационные рельсы и потому дорого обойдется России.

КАТЕГОРИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ, ОПАСНОСТЕЙ И РИСКОВ В ПРОБЛЕМАХ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

*Н.А. Махутов, чл.-корр. РАН,
председатель РГ РАН «Риск и безопасность»*

Поручением Президента Российской Федерации Российской академии наук было предложено подготовить прогноз социально-экономического и научно-технического развития нашей страны до 2030 г. с использованием критериев стратегических рисков [1]. В рамках деятельности Координационного совета РАН по прогнозированию при разработке такого прогноза и соответствующих прогнозных показателей было отмечено, что обобщающим критерием социально-экономического и научно-технологического развития приняты стратегические экономические риски, учитывающие неестественные и преждевременные потери жизней и другие основные неблагоприятные процессы и ущербы в социуме, природе и техносфере. В последние годы эти риски стали возрастать и по выполненным оценкам достигли величин 0,08-0,12 от внутреннего валового продукта. Это требует устойчивого прогнозного развития с ростом ВВП более 8-12% в год, что представляется малореализуемым в ближайшей перспективе.

Ориентация долгосрочного развития на обеспечение приемлемого уровня стратегических рисков, несомненно, сопряжена с внесением серьезных регулирующих начал в функционирование экономики и техносферы. Реализация этих прогнозов должна базироваться на фундаментальных междисциплинарных и межотраслевых исследованиях общих закономерностей развития человека, общества, государства и среды жизнедеятельности. Принципиально важной стороной таких разработок является введение в показатели прогнозного развития стратегических рисков, отражающих непрерывное расширение спектра угроз, вызовов и катастроф в течение прогнозного периода. Количественными критериями достижения этой цели приняты: стратегические индивидуальные риски неестественных, преждевременных и естественных потерь человеческих жизней, измеряемые отношением числа потерянных жизней в течение года к числу живущих, и стратегические экономические риски, учитывающие весь комплекс неблагоприятных процессов и ущербов в социуме, техносфере и природной среде и измеряемые отношением экономических потерь (ущербов) к внутреннему валовому продукту в год.

Указанные выше стратегические индивидуальные риски в нашей стране в настоящее время оказались в 15-20 раз выше, чем приемлемые риски, и в 2 раза выше, чем недопустимые риски для промышленно развитых стран. К концу прогнозного периода ставится задача снижения стратегических рисков неестественных и преждевременных потерь человеческих жизней в 8-10 раз. Стратегические экономические риски в нашей стране в 3-4 раза превосходят риски для передовых промышленно развитых стран. Основными источниками этих рисков стали экономические ущербы

от потерь человеческих жизней, деиндустриализация, социально-экономическое неравенство, невостребованность профессионализма и знаний, потери квалификации, деградация промышленного гражданского, оборонного и сельскохозяйственного потенциала. К концу прогнозного периода ставится задача о выходе на 3-4% рост внутреннего валового продукта, определенного с учетом рисков, что требует темпов роста ВВП в период до 2030 г. до уровня 10-15%.

Существуют различные подходы к прогнозированию развития страны. Один из таких подходов предполагает построение нескольких сценариев, включая оптимистический, реальный и пессимистический. Другой основан на определенных экспертных оценках – форсайт-методе. Подход по показателям рисков базируется на определении соответствующего показателя текущего состояния развития и определении необходимого (желаемого) его значения на заданный период времени, после чего по этим двум реперным точкам и следует делать требуемый прогноз. Такой подход назван «обратной задачей прогнозирования», и он может быть обоснован следующей логической последовательностью: знать – чтобы прогнозировать, прогнозировать – чтобы планировать, планировать – чтобы управлять, управлять – чтобы действовать, а действовать – чтобы жить! Если из этой комплексной последовательности изъять хотя бы одно звено, то конечная цель не будет достигнута.

Чтобы реализовать планомерное последовательное движение в направлении снижения стратегических рисков развития техногенной сферы во всем комплексе развития страны, следует, прежде всего, представить эту сферу, с одной стороны, как целостное образование, влияющее на жизнеобеспечение страны и на возможные риски возникновения на входящих в ее состав потенциально опасных объектах чрезвычайных ситуаций, а с другой – рассматривать такие отдельные объекты, как индивидуальные потенциальные источники опасности, способные повлиять на состояние техносферы в целом. В этой связи при анализе возможных техногенных, природно-техногенных, социально-природно-техногенных катастроф следует учитывать два важных фактора: класс аварий и катастроф и их последствий и тип аварийных ситуаций [2-5].

Аварии и катастрофы в зависимости от тяжести возможных последствий (ущербов) и наблюдаемой периодичности их возникновения могут быть разделены (рис. 1) на планетарные, глобальные, национальные, региональные, местные, объектовые и локальные [3, 4].

БАЗОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ РИСКОВ ЧС

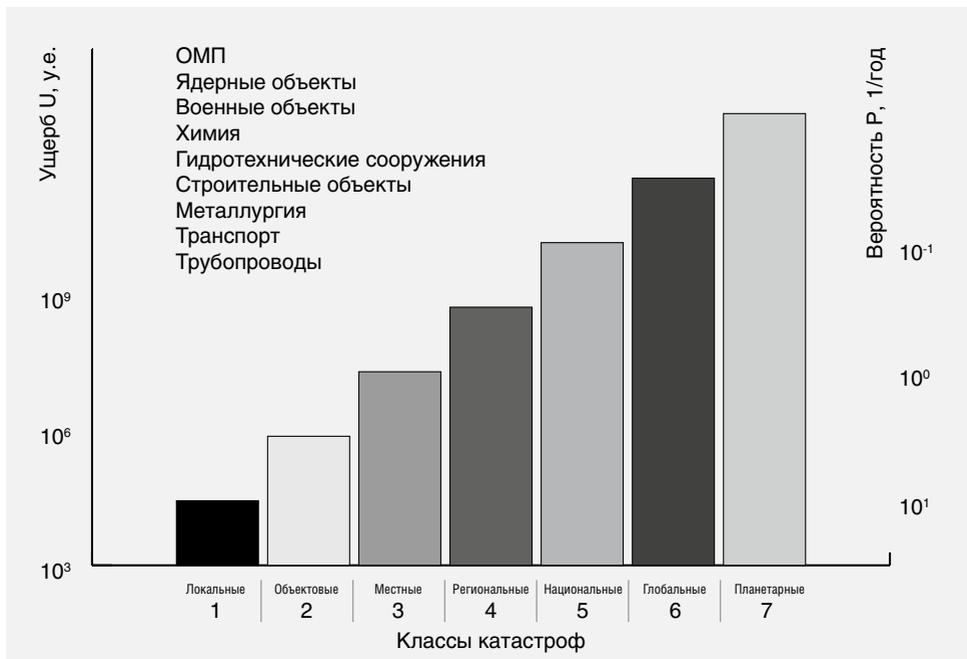


Рис. 1.

Первые из них создают тяжелые социально-экономические и экологические последствия для сопредельных стран, последние затрагивают промышленные и санитарно-защитные площади объектов. Аварийные ситуации по степени снижения их последствий были классифицированы как гипотетические, запроектные, проектные и режимные. Первые имеют минимальную вероятность возникновения, но наиболее тяжелые последствия, и создают максимальный риск; последние имеют большую вероятность возникновения при меньших и парируемых последствиях. При этом уровень постановки и решения задач диагностики и мониторинга для гипотетических и запроектных аварий и катастроф остается пока крайне низким [2, 5]. В соответствии с изложенным интегральные экономические риски, определяемые произведением единичных рисков на число эксплуатируемых объектов, оказываются сопоставимыми как для глобальных, так и для объектовых катастроф. Ущерб от единичных катастроф глобального и объектового масштаба отличаются на 8-10 порядков, риски – на 4-6 порядков, а интегральные ущербы – на 1-3 порядка при семи классах техногенных и природно-техногенных катастроф по рис. 1.

В связи с изложенным при постановке перед Ростехнадзором задачи по мониторингу рисков следует иметь в виду, что при ее решении прежде всего представляется необходимым анализ изменения рисков во времени, привязанных к возникающим ущербам, по параметру определенных классов (рис. 1) или категорий (рис. 2) аварийных и катастрофических ситуаций, которые возможны на объектах, подведомственных Ростехнадзору.



Рис. 2.

Следующим этапом в рассмотрении подходов к анализу рисков возникновения чрезвычайных ситуаций является этап применения федерального законодательства и ведомственных нормативов по безопасности эксплуатации оборудования техносферы и управлению ее обеспечением (рис. 3). Современное обоснование обеспеченности условий безопасной эксплуатации объектов техносферы базируется на требованиях Федеральных законов (ФЗ) о промышленной безопасности (ПБ) опасных производственных объектов, о техническом регулировании (ТР) объектов технического регулирования, критически и стратегически важных объектов инфраструктуры, о чрезвычайных ситуациях (ЧС). В наиболее законченной форме эти требования сформулированы в законе о техническом регулировании и их реализация будет осуществляться через соответствующие технические регламенты (ТР), национальные стандарты (НСТ) и своды правил (СП).

В соответствии с федеральным законодательством, с федеральной и отраслевой нормативной документацией, с федеральными, региональными и отраслевыми программами обеспечения безопасности и защищенности объектов техносферы на одно из первых мест выдвигаются задачи категорирования потенциально опасных объектов.

СТРУКТУРА И РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ НОРМИРОВАНИЯ

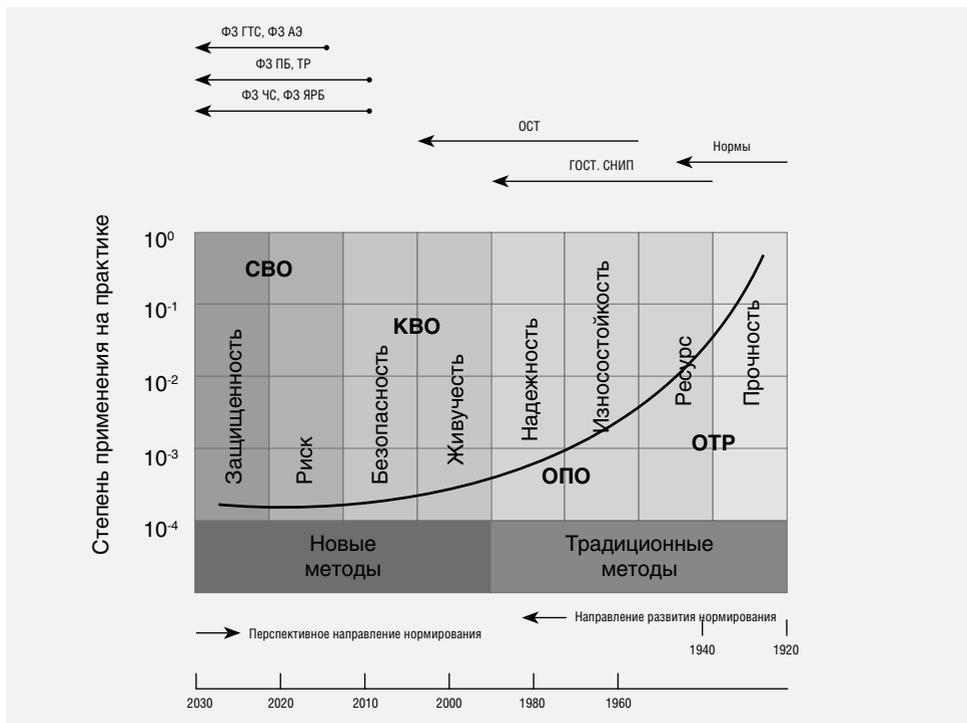


Рис. 3.

Как обозначено выше, по уровню потенциальной опасности, по требованиям законодательства и с учетом риска возникновения аварий и катастроф объекты техносферы могут быть разделены (рис. 2 и 3) на четыре основные категории, для которых предусмотрены соответствующие требования к безопасности:

- объекты технического регулирования (ОТР), безопасность эксплуатации которых обеспечивается по закону о техническом регулировании – их число измеряется миллионами и десятками миллионов;
- опасные производственные объекты (ОПО, безопасность эксплуатации которых обеспечивается по закону о промышленной безопасности – их число измеряется сотнями тысяч;
- критически важные объекты (КВО), безопасность эксплуатации которых обеспечивается по решению Совета Безопасности Российской Федерации – их число измеряется тысячами;
- стратегически важные объекты (СВО), безопасность функционирования ко-

торых влияет на состояние национальной безопасности страны – их число измеряется сотнями.

Основными задачами в сфере обеспечения безопасности объектов техносферы и, в первую очередь, объектов с предельно высокими показателями рисков являются [3]:

- формирование на основе исследований по социальным, естественным и техническим наукам фундаментальной базы анализа рисков $R(t)$ в трех основных сферах жизнедеятельности – социальной (N), природной (S) и техногенной (T), составляющих единую сложную социально-природно-техногенную систему «человек-природа-инфраструктура», функционирующую во времени t :

$$R(t)=F_R\{R_N(t), R_S(t), R_T(t)\}; \quad (1)$$

- построение обобщенной модели указанной сложной системы с определением роли ее основных компонентов N, S, T в величинах базовых параметров рисков $R(t)$ – вероятностей возникновения $P(t)$ неблагоприятных процессов и событий (опасностей, вызовов, угроз, кризисов, катастроф) и сопутствующих им ущербов $U(t)$:

$$R(t)=F_R\{P(t), U(t)\}; \quad (2)$$

$$P(t)=F_P\{P_N(t), P_S(t), P_T(t)\}; \quad (3)$$

$$U(t)=F_U\{U_N(t), U_S(t), U_T(t)\}; \quad (4)$$

- построение сценариев неблагоприятных событий в сложной системе и количественная оценка рисков $R(t)$ через параметры главных иницирующих и поражающих факторов – опасных энергий $E(t)$, веществ $W(t)$ и потоков информации $I(t)$:

$$R(t)=F_R\{E(t), W(t), I(t)\}. \quad (5)$$

На основе соотношений (1)-(5) разрабатываются основы категорирования чрезвычайных ситуаций, высокорисковых объектов и опасных процессов по величинам рисков $R(t)$.

Существо нормирования, регулирования и управления техногенной безопасностью по ее основным компонентам с использованием параметров рисков сводится [3, 4] к требованию непревышения величин формирующихся и реализующихся по выражениям (1)-(5) рисков $R(t)$ над величинами приемлемых рисков $[R(t)]$ на заданном временном интервале t :

$$R(t)\leq[R(t)]. \quad (6)$$

Величина $[R(t)]$ нормируется регулирующими органами с учетом уровня научных обоснований, отечественного и мирового опыта. Реализация требования (6) должна

осуществляться исходя из того, что определяющими рисками $R(t)$ являются две группы рисков:

- индивидуальные риски (1/год) потери жизни и здоровья человека от неблагоприятных процессов и явлений;
- экономические риски (руб./год) от неблагоприятных процессов и явлений, учитывающих уязвимость социальной (N), природной (S) и техногенной (T) сфер по выражениям (1)-(4).

В экономические риски $R(t)$ включаются и экономические ущербы от потери жизни и здоровья людей, от поражений окружающей природной среды и технических инфраструктур.

Научное обоснование величин приемлемых рисков $[R(t)]$ для процедуры их нормирования состоит в разработке методологии определения критических (предельных, недопустимых) рисков $R_c(t)$ и назначения запасов n_R по этим рискам в форме:

$$[R(t)] = \frac{R_c(t)}{n_R}. \quad (7)$$

Для количественной оценки величин рисков $R_c(t)$ могут использоваться приведенные выше выражения (1)-(5), а величины запасов n_R должны быть больше единицы ($n_R \geq 1$). Анализ условий (6)-(7) для современного состояния безопасности в Российской Федерации показывает, что они выполняются далеко не в полной мере. В связи с этим одной из важных задач должно стать исследование рисков $R_c(t)$ и запасов n_R в условиях принципиально новых реалий кризисных процессов в научно-технологическом развитии России. При этом нормирование запасов n_R станет предметом совместной деятельности как органов государственного управления и надзора, так и научных организаций федерального, регионального и отраслевого уровня.

Таким образом, за основу анализа условия безопасной эксплуатации объектов техносферы должны быть приняты [3] с одной стороны показатели (классы, категории) возможных чрезвычайных ситуаций, а с другой – показатели категорирования самих потенциально опасных объектов (рис. 2). Последние в соответствии с выражениями (1)-(4) могут быть представлены в виде количественных значений, определяемых из соотношения соответствующих относительных величин рисков для человеческих жизней, техносферы и окружающей среды:

$$\bar{R}(t) = \sqrt{\bar{R}_N^2 + \bar{R}_T^2 + \bar{R}_S^2}. \quad (8)$$

В определении соответствующих показателей категорирования опасных объектов по величинам рисков и управлении этими показателями должны участвовать для различных типов объектов соответствующие их подведомственности административные и надзорные органы, в том числе для объектов типа ОТР ими могут быть (см. рис. 2) сами промышленное предприятие (ПП) или саморегулируемые организации

(СРО), для объектов типа ОПО – местные органы исполнительной власти (МОИС) или региональные органы исполнительной власти (РОИВ), для объектов КВО и СВО ими являются Совет Безопасности Российской Федерации (СБ РФ), Российская академия наук (РАН), Министерство по чрезвычайным ситуациям (МЧС), Ростехнадзор (РТН), Федеральные органы исполнительной власти (ФОИВ).

В настоящее время в соответствии с законодательством в категорию опасных производственных объектов зачисляются объекты по различным, не только количественным, но и качественным показателям, например, по объему взрывоопасных веществ, выраженному в тоннах, и выраженной в киловаттах мощности энергопроизводства, причем без существенной градации по величинам для I-II групп опасности (единицы тонн и тысячи тонн для хранилищ взрывчатых веществ; единицы млн киловатт и млрд и более киловатт для энергопроизводств). Непосредственное использование таких разнородных параметров объектов для анализа их потенциальной опасности для населения и окружающей среды весьма затруднительно, а в ряде случаев и принципиально невозможно. И только показатели рисков с входящими в них характеристиками вероятности возникновения на конкретном объекте той или иной категории чрезвычайной ситуации (аварии или катастрофы) и возможных ущербов для всех присутствующих категорий субъектов (населения, окружающей среды и инфраструктуры обеспечения жизнедеятельности) способны универсально отразить реальный уровень потенциальной опасности, а управление этими показателями обеспечить эффективную защиту от чрезвычайных ситуаций. То есть каждый объект при использовании показателей рисков его эксплуатации может быть категорирован по единой системе и классифицирован по этому показателю с целью отнесения его к соответствующей категории опасности. Это отражено в количественных показателях на рис. 2 и в выражении (8).

Общая структура анализа и управления безопасностью потенциально опасных объектов по критериям рисков включает в себя [3, 4] классификацию типов аварийных и катастрофических ситуаций, определение класса аварий и катастроф по уровням возможных рисков и ущербов, а также характеристику типов потенциально опасных объектов (рис. 4 – центральная часть).

Для характеристики типов аварийных и катастрофических ситуаций и степени их защищенности при переходе от нормальных условий эксплуатации к аварийным принята следующая их классификация:

- отклонения от проектных условий эксплуатации (возникают при штатном функционировании потенциально опасных объектов, последствия от них предсказуемые, защищенность от них достаточная);
- проектные аварийные ситуации (возникают при выходе за пределы штатных режимов с предсказуемыми и приемлемыми последствиями, защищенность от них частичная);
- запроектные аварийные ситуации (возникают при необратимых повреждениях ответственных элементов с высокими ущербами и человеческими жертвами; степень защищенности от них недостаточная с необходимостью в последующем проведении восстановительных работ);

- гипотетические аварийные ситуации (могут возникать при непредсказанных заранее вариантах и сценариях развития с максимально возможными ущербами и жертвами; защищенность от них низкая и прямому восстановлению объекты не подлежат).

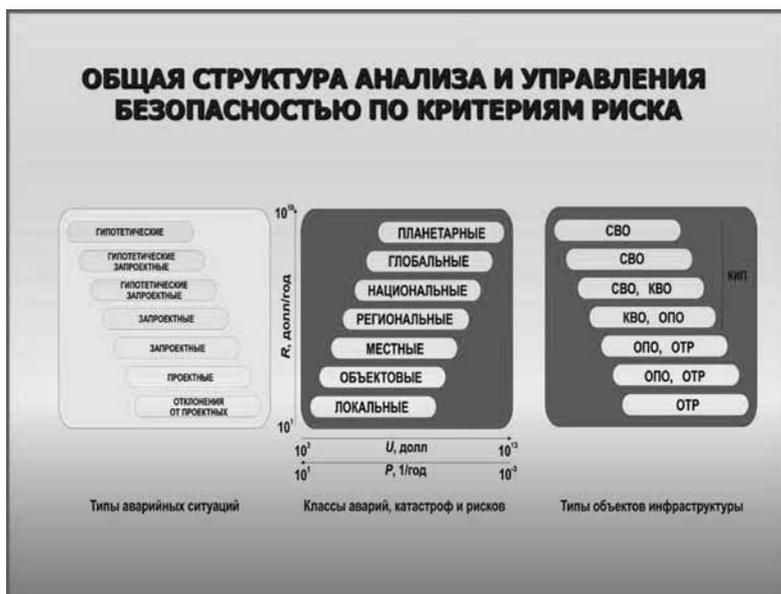


Рис. 4.

Классификация типов, объектов и инфраструктуры (рис. 4 – правая часть) оказывается увязанной с классами аварий, катастроф и рисков для возникающих аварийных и катастрофических ситуаций (по степени их тяжести и наносимым ущербам может быть выполнена по оценкам параметров вероятности их возникновения и уровням человеческих и материальных потерь). Так, самые тяжелые планетарные катастрофы наносят ущербы основным континентам планеты, а самые незначительные – ограниченной части объекта. К планетарным катастрофам можно отнести возможное столкновение Земли с крупными космическими объектами или мировой военный конфликт с применением ядерного, термоядерного, химического и бактериологического оружия массового поражения. К глобальным катастрофам следует отнести крупнейшие цунами, землетрясения, наводнения, аварии на ядерных объектах гражданского и военного назначения. В этом случае ущербы наносятся ряду государств. Национальные катастрофы возникают по тем же причинам, что и глобальные, но ущербы причиняются той стране, в которой они произошли. При региональных катастрофах ущербы наносятся определенной части (региону) страны. Для местных аварий и катастроф повреждения создаются на определенной местной территории, примыкающей к потенциально опасному объекту. Для объектовых и локальных чрезвычайных ситуаций возможные ущербы ограничиваются территорией самого объекта.

Обычные повседневные условия жизнедеятельности применительно к эксплуатации объектов техносферы предполагают, что они находятся или в штатных условиях работы, или в небольших отклонениях от проектных решений. Проектные чрезвычайные ситуации характеризуются, как правило, как объектовые и распространяются на опасные производственные объекты и объекты технического регулирования с умеренными уровнями рисков. Для проектных аварий можно в достаточной степени предусмотреть меры компенсации их последствий. При переходе к более тяжелым авариям регионального или местного уровня следует рассматривать категорию возможных запроектных аварий и катастроф. При их анализе исходят из того, что при проектировании конструкции в принципе должны предусматриваться такие условия, но защищенность от них в силу малой вероятности их проявления рассматривается на заниженном уровне, поскольку отсутствует прогноз конкретного сценария развития такой ситуации в силу влияния на него многофакторности воздействий. Такая ситуация применима как при эксплуатации опасных производственных объектов, так и тем более критически важных объектов. Однако при надлежащем отношении к защищенности опасных производственных объектов от аварий и катастроф проработка такого рода ситуаций должна выполняться в полном объеме и стать составной частью декларирования безопасности как их владельцами, так и административными органами. Гипотетические аварии типа падения космических объектов, например, на атомную электростанцию, не могут быть предотвращены, но последствия от таких гипотетических ситуаций должны быть проанализированы, а максимально возможный уровень защищенности от них обоснован и реализован.

Таким образом, можно заключить, что единого подхода к анализу всех категорий объектов, опасностей и систем защиты от чрезвычайных ситуаций пока не существует. Однако следует иметь в виду, что использование в этом направлении критериев риска позволяет использовать их в качестве универсальных параметров определения уровня опасности эксплуатации объектов техносферы и управлять разработкой и реализацией мероприятий по снижению этих уровней и смягчению последствий при их проявлении.

Библиографический список

1. Махутов Н.А., Кузык Б.Н., Абросимов Н.В. и др. Научные основы прогнозирования и прогнозные показатели социально-экономического и научно-технического развития России до 2030 года с использованием критериев стратегических рисков. Координационный совет РАН по прогнозированию. – М.: ИНЭС, 2011. – 136 с.
2. Махутов Н.А., Гаденин М.М. Техногенная безопасность: Диагностика и мониторинг состояния потенциально опасного оборудования и рисков его эксплуатации. Федеральный справочник: Информационно-аналитическое издание. Т. 26. – М.: НП «Центр стратегического партнерства», 2012. С. 307-314.
3. Махутов Н.А. Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования. – Новосибирск: Наука, 2008. – 528 с.
4. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты / под научным руководством чл.-корр. РАН Н.А. Махутова. – М.: МГОФ «Знание». Т. 1-40, 1998-2012.
5. Махутов Н.А., Гаденин М.М. Методы анализа безопасности в проблемах мониторинга рисков. Оценка и управление индустриальными рисками и промышленной безопасности: труды школы-семинара. Москва, 26-28 октября 2011 г. – Санкт-Петербург: СВЕН, 2012. С. 4-10.

ОСНОВЫ АНАЛИЗА РИСКОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ОБЪЕКТАХ ТЕХНОСФЕРЫ

Н.А. Махутов, чл.-корр. РАН,
председатель РГ РАН «Риск и безопасность»

Научно-методические вопросы создания и эксплуатации сложных и потенциально опасных объектов техносферы (ядерные реакторы, теплоэнергоустановки, гидротурбины, летательные аппараты, ракетно-космические системы, технологические комплексы) требуют введения новых критериев оценки исходной и остаточной прочности, ресурса, живучести и безопасности, которые характеризуют переход этих объектов от штатных ситуаций к нештатным, угрожающим объектам, персоналу, населению и окружающей среде, что должно рассматриваться как неприемлемое и недопустимое. При этом в качестве одной из важнейших становится проблема анализа ранних стадий повреждения и отказов по критериям статической и циклической прочности несущих элементов рассматриваемого оборудования, в том числе в чрезвычайно широком диапазоне чисел циклов нагружения – от 10^0 до 10^{12} и более [1-6].

1. Постановка проблемы

В число базовых вопросов обеспечения статической и циклической прочности, ресурса, живучести и безопасности объектов для всех стадий их жизненного цикла входят три главных:

- расчетно-экспериментальный анализ напряженно-деформированных состояний (σ, e) с учетом механических P^3 , термических Q_t^3 , аэрогидродинамических Q_{ah}^3 , электромагнитных Q_{em}^3 , радиационных и химических Q_r^3 воздействий. При этом локальные напряжения σ_{\max}^3 и деформации e_{\max}^3 зависят от эксплуатационного числа циклов нагружения N^3 , времени τ^3 и температуры t^3 :

$$\{\sigma_{\max}^3, e_{\max}^3\} = F_3 \{P^3, Q_t^3, Q_{ah}^3, Q_{em}^3, Q_r^3, N^3, \tau^3, t^3\}; \quad (1)$$

- анализ закономерностей циклического упругого и упругопластического деформирования в зонах и вне зон концентрации для варьируемых частот f_τ , амплитуд напряжений σ_a^3 и деформаций e_a^3 , температур t^3 и времени τ^3 :

$$\{\sigma_{\max}^3, e_{\max}^3\} = F_{in} \{f_\tau, (\sigma_a^3, e_a^3), t^3, \tau^3\}; \quad (2)$$

- анализ критериев и условий накопления повреждений d^3 , а также определения циклической долговечности N_c^3 , для стадий образования и развития трещин до возникновения отказов:

$$\{d^3, N_c^3\} = F_{23} \{f_\tau, (\sigma_a^3, e_a^3), l^3, \tau^3\} \quad (3)$$

Результаты экспериментальных и расчетных исследований на образцах, моделях и натуральных конструкциях дают возможность определить запасы по напряжениям n_σ , деформациям n_e , числу циклов n_N , времени n_τ и размеру дефектов (трещин) n_l :

$$\{n_\sigma, n_e, n_N, n_\tau, n_l\} = \left\{ \frac{\sigma_c}{\sigma_{\max}^3}, \frac{e_c}{e_{\max}^3}, \frac{N_c}{N^3}, \frac{\tau_c}{\tau^3}, \frac{l_c}{l^3} \right\} \quad (4)$$

где индекс «с» относится к критической (предельной) величине соответствующей характеристике прочности, долговечности и трещиностойкости, а индекс «э» – к соответствующим величинам при эксплуатации.

В рамках решения поставленных задач формирования научной базы анализа процессов деформирования, накопления повреждений, отказов и разрушений для обоснования прочности, ресурса, живучести и безопасности несущих элементов вновь создаваемых и эксплуатируемых объектов может быть предложена обобщенная диаграмма (рис. 1) для объектов высокой потенциальной опасности. Анализ прочности, ресурса и безопасности на основе данной диаграммы выполняется с привлечением соответствующих положений сопротивления материалов, теорий упругости, усталости, пластичности, ползучести, линейной и нелинейной механики разрушения, механики катастроф и теории рисков.

В соответствии с этой диаграммой анализируются параметры долговечности конструкций в пределах от 100 секунд до 80-100 лет, в условиях температур от -270 °С до 10 000 °С, при числах циклов N от 10^0 до 10^9 – 10^{10} , временном ресурсе τ от 10^{-2} до 10^6 часов, при размерах дефектов l от 10^{-2} до 10^3 мм. В такой анализ входят штатные, аварийные и катастрофические ситуации (проектные, запроектные и гипотетические). Научной основой анализа является получение прямой экспериментальной и расчетной информации по указанным выше теориям. При этом для штатных ситуаций достаточными оказываются традиционные нормы расчетов и проектирования, а для аварийных и катастрофических ситуаций требуются новые методы анализа и проектирования.

По мере перехода от штатных к аварийным и катастрофическим ситуациям расчеты по допускаемым напряжениям $[\sigma]$ оказываются недостаточно чувствительными к варьируемым параметрам (N , τ , l) в силу развития пластических деформаций и деформаций ползучести. Это требует перехода к расчетам в допускаемых деформациях $[e]=[\varepsilon]$.

Для различных типов объектов предусмотрены два уровня нормативов – для стадии проектирования и для стадии эксплуатации с научно обоснованным обеспечением исходной и остаточной прочности, ресурса, живучести и безопасности. На основе выражений (1)-(4) и параметров рис. 1 строятся обобщенные поверхности опасных и безопасных состояний (рис. 2).

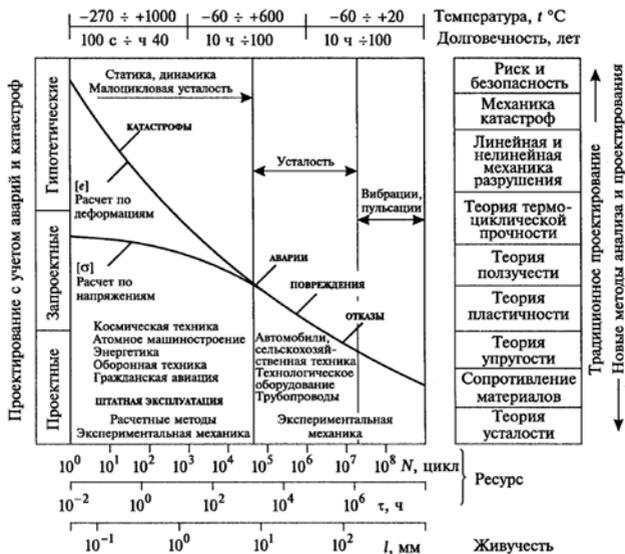


Рис. 1. Обобщенная диаграмма анализа прочности, ресурса, живучести и безопасности

В рамках традиционного направления проектирования и анализа условий эксплуатации изначально обеспечиваются группы нормативных требований по представленной на рис. 3 цепочке: прочность → жесткость → устойчивость → ресурс → надежность → живучесть → безопасность → риск → защищенность. При этом рас-



Рис. 2. Схема построения поверхностей предельных и допускаемых состояний при оценках прочности, ресурса и живучести

смастриваемая в настоящей работе область заштрихована. В настоящее время ставится научная и инженерная проблема о новой постановке решения указанных задач по этой цепочке в направлении VIII-I.



Рис. 3. Общая структура развития подходов к обеспечению работоспособности потенциально опасных объектов

Каждому из традиционных «I → VIII» и новых «VIII → I» этапов соответствует свой практический результат в исследованиях, проектировании, создании и эксплуатации объектов техносферы: «неразрушаемость → сохранение размеров и формы → долговечность → отказоустойчивость → трещиностойкость → безопасность → приемлемые риски → защищенность от аварий и катастроф». Указанная последовательность неблагоприятных событий, приводящих к катастрофе, может иметь различный вид (см. рис. 4 с заштрихованной анализируемой областью), характеризуемый увеличением во времени t соответствующих рисков $R(t)$.

Наличие потенциальной опасности в объекте не всегда сопровождается ее негативным воздействием на наиболее важные элементы. Для реализации опасности необходимо выполнение минимум трех условий: опасность реально действует (присутствует); объект находится в зоне действия опасности; объект не имеет достаточного уровня защищенности. В последнем случае должны применяться новые требования, критерии и методы повышения защищенности до заданного уровня.

При построении алгоритма анализа рисков $R(t)$ для обеспечения безопасности и защищенности от неблагоприятных событий должны учитываться следующие положения. Фаза инициирования повреждений, отказов, разрушений, аварий, катастроф и соответствующих им рисков $R(t)$ может представлять собой во времени t как краткосрочный, так и длительный вероятностный процесс, включающий в себя различные этапы отклонений от заданных режимов эксплуатации, накопления механических повреждений оборудования, отказов, а также нарушения контроля за качеством и состоянием оборудования и персонала.



Рис. 4. Алгоритм анализа опасных состояний объектов и соответствующих им рисков

Первая фаза накопления повреждений d с учетом выражений (1)-(3) приводит к отказам и частичным разрушениям с развитием множественных трещин в опасных зонах. Развитие магистральных трещин l заканчивается возникновением аварийной ситуации, которая может быть связана с начавшимися каскадными разрушениями и необратимыми отклонениями от условий нормальной эксплуатации и с рисками $R_d(\tau)$. Катастрофа с образованием критических дефектов l_c является заключительной стадией развития неблагоприятных ситуаций и характеризуется самыми высокими критическими (неприемлемыми) рисками $R(\tau)=R_c(\tau)$. По такому пути (традиционное направление) шло развитие самой техносферы и методов обеспечения работоспособности всех основных ее объектов.

На базе фундаментальных и прикладных исследований последних трех десятилетий по проблемам безопасности природно-техногенно-социальной сферы поставлена [1-4] новая задача об определении и обеспечении комплексной безопасности и защищенности критически важных объектов техносферы по критериям приемлемых и управляемых рисков:

$$R(\tau) = F_r \left\{ \sum [P_i(\tau) U_i(\tau)] \right\} \leq [R(\tau)] \tag{5}$$

где $[R(\tau)]$ – приемлемый (допустимый) риск;
 $P_i(\tau)$ – вероятность возникновения опасных ситуаций (повреждений, отказов, разрушений, аварий, катастроф);
 $U_i(\tau)$ – возможный ущерб от каждой из указанных ситуаций.

При такой постановке задачи только безопасность и защищенность с заданными уровнями рисков $R(\tau)$ и $[R(\tau)]$ дает основание к принятию (или непринятию) решений о допустимости реализации новых проектов или допустимости эксплуатации действующих потенциально опасных объектов инфраструктуры.

Ниже рассмотрены особенности анализа вероятностей накопления повреждений $P_n(\tau)$ и отказов $P_o(\tau)$, используемых для анализа рисков по выражению (5).

2. Методические основы анализа вероятностей отказов

Оценки риска $R(\tau)$ на начальных стадиях эксплуатации потенциально опасных объектов в соответствии с выражениями (1)-(3) и данными рис. 4 должны опираться на вероятностные методы определения повреждений и отказов. Нормативные документы (см., например, [7]-[12]) регламентируют по выражению (5) величины рисков $R_0(\tau)$, ограничивая вероятности отказов в зависимости от тяжести возможных последствий $U_0(\tau)$. Так, для отказов критических несущих элементов, приводящих к тяжелым аварийным или катастрофическим последствиям, величина $[P_0(\tau)]$ допускается в пределах не более $10^{-5} \div 10^{-6}$ аварий в год на объект высокого риска (типа атомной, тепловой или гидравлической электростанции). Для этих уникальных конструкций небольшой численности, измеряемой десятками или сотнями, такие значения вероятностей $[P_0(\tau)]$ могут рассматриваться пока как сравнительные. Однако учет дополнительной информации – например, характеристик разброса свойств материала, а не только минимальных значений – делает расчеты в вероятностной постановке более информативными, чем традиционные детерминированные [1, 4-6].

При выполнении детерминированных расчетов по выражениям (1)-(4) с точки зрения безопасности и рисков результаты обычно имеют относительный характер: качественно безопасность конструкции характеризуется набором коэффициентов запаса n по (4), которые сравниваются с нормативными значениями [4-6, 13]. Эти нормативные коэффициенты запаса учитывают накопленный опыт эксплуатации конструкций и выполнения расчетов и поэтому тесно связаны как с уровнем технологии в конкретной отрасли промышленности, так и с используемыми методами расчетов. Уточнение методов расчетов позволяет снижать коэффициенты запаса (так, например, использование только безмоментных решений теории оболочек в документе [12] компенсируется повышенными коэффициентами запаса по сравнению с рекомендованными в [13], где используются более точные решения, учитывающие краевые эффекты).

Для вероятностных расчетов рисков $R_0(\tau)$ можно построить аналогичную процедуру, указав допустимую вероятность отказа $[P_0(\tau)]$. При этом следует отметить следующие особенности такого подхода:

1. Часть гипотез, используемых в вероятностных расчетах несущих элементов потенциально опасных объектов, не может быть проверена с необходимой точностью и достоверностью (например, гипотеза о том, что закон распределения параметров прочности совпадает с выбранным – скажем, нормальным – в области малых вероятностей порядка $10^{-5} \div 10^{-6}$). Использование недоказуемых гипотез компенсируется в детерминированных расчетах коэффициентами запаса $n\sigma$. В вероятностных расчетах такая «компенсация» должна осуществляться за счет задания допустимых вероятностей $[P_0(\tau)]$, привязанных к методу расчета и набору гипотез. В существующих нормативных документах такой привязки пока нет.

2. Зависимость вычисляемой вероятности отказа $P_0(\tau)$ от принятых гипотез делает эту величину относительной применительно к величине риска $P_0(\tau)$ по выражению (5). В то же время в ряде нормативных документов пока задаются только абсолютные

величины $P_0(\tau)$, не отражающие социально-экономические ущербы $U_0(\tau)$ и, следовательно, риски $R_0(\tau)$. Поэтому в анализ необходимо вводить экономически обоснованные потери (ущерб) от возникающих отказов $U_0(\tau)$. При этом величины $U_0(\tau)$ также имеют вероятностную природу.

3. Для единичных высокоопасных объектов пока нет и в ближайшее время не будет достаточного исходного статистического материала для установления фактических и допускаемых вероятностей повреждений, отказов, разрушений, аварий и катастроф на основе частотного анализа имевших место чрезвычайных ситуаций.

С учетом этих особенностей на первых этапах количественного анализа безопасности и рисков предлагается ввести понятие предельной вероятности возникновения опасной ситуации, зависящей от методов расчета по выражениям (1)-(5). Поскольку эта вероятность оказывается не равной нормативной (заданной из социально-экономических ограничений допустимого риска без учета методов расчета), актуальной задачей становится определение такой предельной вероятности отказа.

При определении предельной вероятности можно использовать опыт эксплуатации конструкций, отражаемый существующими нормативными коэффициентами запаса прочности для детерминированных расчетов по выражению (4). Сопоставляя расчеты одних и тех же несущих элементов опасных объектов в детерминированной и вероятностной постановках, можно найти предельную вероятность, при которой объект окажется не опаснее существующих. Идею этого метода иллюстрирует рис. 5, на котором обозначено: n – коэффициент запаса прочности ($n=n\sigma$), найденный из детерминированного расчета, $[n]$ – нормативный запас ($[n]=n\sigma$), $p=P_0(\tau)$ – вероятность наступления опасного состояния (отказа), $[p]$ – искомая предельная вероятность ($[p]=[P_0(\tau)]$). При этом точками условно показаны результаты расчетов.

Применение подхода, показанного на рис. 5, на практике осложняется несколькими факторами: при выполнении детерминированных расчетов одних и тех же конструкций в ряде случаев допускается использование разных нормативных документов (например, [12] и [13] или [13] и [14]) с различными методиками расчета и различными допускаемыми запасами; в одном нормативном документе могут рассматриваться несколько предельных состояний – каждое со своим коэффициентом запаса – и т.д.

В качестве методического примера, иллюстрирующего предлагаемый подход, ниже рассмотрен равнопроходный сварной тройник паропровода высокого давления блока 200 МВт Южноуральской ГРЭС, соединяющий трубопроводы диаметром 400 и толщиной стенки 20 мм. Тройник изготовлен из стали 12Х1МФ и рассчитан на давление 2,16 МПа, температуру 545 °С; расчетный ресурс эксплуатации – 10 лет, число пусков – от 5 до 10 в год.

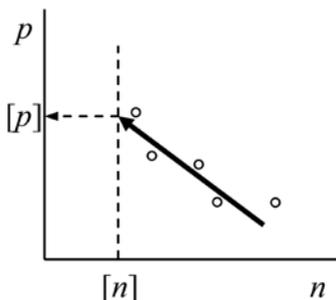


Рис. 5. Схема определения предельной вероятности разрушения

Расчет в детерминированной постановке выполнялся по Нормам [13]. Из списка предельных состояний, регламентируемых этим документом, рассматривались только два: кратковременное вязкое разрушение (от однократной перегрузки) и возникновение макротрещин при циклическом нагружении (циклы «пуск – останов»). Соответственно выполнялись расчеты на статическую прочность и длительную циклическую прочность с определением коэффициентов запаса по нагрузке и долговечности. В соответствии с рекомендациями Норм [13] в тройнике выделялись три расчетных сечения. При циклическом нагружении рассматривались только два момента времени τ , соответствующие наибольшим и наименьшим температурам t , переходные режимы полагались достаточно медленными и не влияющими на оценки прочности и долговечности.

При расчете в вероятностной постановке использовались те же формулы для вычисления напряжений, что и в детерминированном расчете, дополненные учетом характеристик разброса случайных величин: температуры, нагрузок и свойств материала. При этом постулировалось, что случайные величины распределены по нормальным законам.

Информация о характеристиках материала, приводимая в существующих справочниках, ориентирована на использование детерминированных подходов к расчетам. В ряде случаев для конкретных объектов приводятся средние значения прочностных характеристик для данной марки материала. В более общем случае нередко (см., например, [13, 15]) используется понятие «гарантированные минимальные свойства». Возможны разные интерпретации этого термина – например, «минимальные свойства, полученные в испытании партии образцов, регламентированной Нормами», или «значение, соответствующее определенному квантилю на функции распределения, полученной обработкой экспериментальных данных». Эти разные интерпретации приводят к численно отличающимся результатам расчетов. В области малых вероятностей эти отличия, как показано в [16], могут быть очень значительными.

На рис. 6 приведены данные [4, 6] статистических испытаний стали 15X2НМФА при комнатной температуре $t=20$ °С. При выборках порядка 20 образцов приемлемыми оказываются нормальное и логнормальное распределения.

В приведенных ниже расчетах полагалось, что гарантированные минимальные свойства m_σ соответствуют заданному уровню доверия, и, таким образом, отличаются от средних свойств M_σ на удвоенную ($n_\sigma=2$ для уровня доверия 95%) или утроенную ($n_\sigma=3$ для 99.7%) величину среднеквадратического отклонения s_σ (для постулированного нормального закона распределения свойств). Задавая по литературным данным коэффициент вариации свойств $v_\sigma=s_\sigma/M_\sigma$, легко получить оценки параметров закона распределения:

$$M_\sigma = \frac{m_\sigma}{1 - n_\sigma v_\sigma} \quad s_\sigma = v_\sigma M_\sigma. \quad (6)$$

В рассматриваемом примере, в соответствии с данными [15], принято $v_\sigma=0,1$.

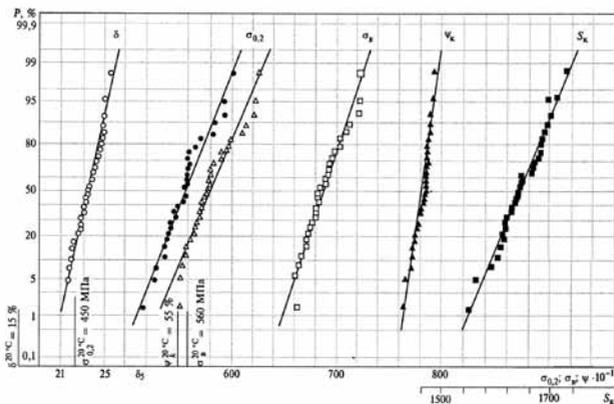


Рис. 6. Функции распределения основных механических свойств стали 15X2HMFA при комнатной температуре

Определение вероятностных характеристик нагрузок, входящих в выражение (1), технически сложнее определения свойств материала, поскольку требует непрерывного и длительного (для учета, например, сезонных колебаний нагрузки на ТЭЦ) автоматизированного мониторинга, и даже в этом случае вопрос о возможности маловероятных выбросов с высокими мгновенными нагрузками остается открытым. В данном методическом примере (с учетом отсутствия соответствующих данных) нагрузки полагались детерминированными. Учет случайного характера нагрузок (в дополнение к учитываемым разбросам механических характеристик) может быть сделан дополнительно.

Для реализации подхода, показанного на рис. 5, необходимы расчеты для некоторого, достаточно большого числа однотипных конструкций, в данном случае – для

ряда тройников в различных паропроводах. Разные пространственные схемы паропроводов, расположение и жесткость опор приводят к тому, что усилия в тройниках по разному зависят от температуры t и давления p в паропроводе. Для линейной задачи обобщенные силы и моменты Q_i в трех расчетных сечениях тройника связаны с давлением p и температурой t соотношением

$$Q_i(p, t) = \alpha_i + \beta_i t + \gamma_i p \quad i = 1 \dots 9, \quad (7)$$

где схема паропровода учитывается векторами α , β и γ , причем α описывает усилия в сечениях тройника от собственного веса паропровода. Наборы векторов, соответствующие разным паропроводам, генерировались случайным образом (метод Монте-Карло), и рассматривались только такие их сочетания, при которых выполняются детерминированные условия прочности $n \geq [n]$. Принимается, что этому условию отвечают начальные стадии повреждений d , приводящих к отказам.

При анализе прочности при однократных перегрузках как в детерминированной, так и в вероятностной постановке рассматривались два момента времени цикла τ : исходный, когда паропровод нагружен собственным весом, и рабочий – с максимальными значениями давления p и температуры t (1-й из этих режимов важен, поскольку пружинная подвеска паропровода оптимизирована под 2-й режим). В каждый момент времени τ , рассматривались условия прочности, записанные, в соответствии с [13], отдельно для мембранной составляющей напряжений и отдельно – для суммы мембранной и изгибной. Результаты расчетов представлены на рис. 7.

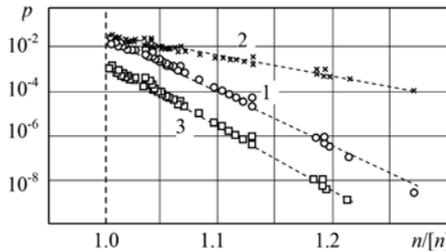


Рис. 7. Связь между вероятностью разрушения p и коэффициентом запаса n , однократное нагружение
 (1 - $m\sigma = M\sigma - 3s\sigma$, $s\sigma/M\sigma = 0.1$; 2 - $m\sigma = M\sigma - 3s\sigma$, $s\sigma/M\sigma = 0.2$; 3 - $m\sigma = M\sigma - 2s\sigma$, $s\sigma/M\sigma = 0.1$)

Связь между коэффициентом запаса и вероятностью отказа является здесь почти функциональной. При одном и том же определении понятия «гарантированные минимальные свойства» $m\sigma = M\sigma - 3s\sigma$ увеличение разбросов приводит к уменьшению наклона линии на графике без изменения значения вероятности $[P]$, соответствующей нормативному коэффициенту запаса $[n]$ (линии 1 и 2 на рис. 7). Изменение определения понятия «гарантированные минимальные свойства» изменяет значение $[P]$: при меньшей надежности «гарантированных свойств» приходится накладывать более жесткие требования на вероятность (линии 3 и 1).

3. Расчетная оценка величин предельной вероятности отказов

В соответствии с п.п. 1 и 2 возможность математически корректного вычисления малых рисков $[R_0(\tau)]$ и вероятностей $P_0(\tau)$ при практически достижимых объемах и достоверности исходной информации представляется пока проблематичной [17-19]. Противоречие между требованиями оценки безопасности по критериям рисков $R_0(\tau)$ в выражении (5), с одной стороны, и недостоверностью вычисляемых вероятностей – с другой, может быть преодолено подобно тому, как это делается в настоящее время при выполнении детерминированных расчетов, когда метод расчета содержит четко сформулированный набор гипотез, погрешности которых компенсируются коэффициентами запаса по выражению (4) – своими для каждого метода, как можно видеть, например, из сравнения [13] и [20]. Представляется, что и в случае вероятностных расчетов ситуация должна быть схожей: предельная расчетная вероятность должна быть связана с методом расчета. Эта вероятность не имеет частотной интерпретации, а является относительной характеристикой безопасности, поэтому такая предельная вероятность может численно и не совпадать с указанной выше допускаемой (порядка $10^{-5} \div 10^{-6}$).

Одним из возможных способов назначения предельной расчетной вероятности является сопоставление расчетов по разным методикам – вновь предлагаемым и уже апробированным. В соответствии с п. 2 в существующих детерминированных методах расчета такая апробация выражается в наличии проверенных практикой нормативных коэффициентов запаса, и назначаемая предельная вероятность разрушения должна обеспечивать ту же безопасность, что и коэффициент запаса. При этом учитываются как особенности методов расчета, так и разбросы характеристик материала и нагрузок, характерные для конкретных отраслей.

Рассмотрим один элемент конструкции, не учитывая его связи с другими элементами. Заключительный этап расчета на прочность сводится к сравнению двух групп величин: величин, характеризующих нагруженность по выражениям (1) и (2), и величин по выражениям (2)-(4), характеризующих сопротивление деформированию и прочность. Будем считать, что на заключительном этапе вероятностного расчета установлены или имеются законы распределения этих двух величин, по которым определяется вероятность отказа [21]. На практике эти законы известны лишь с определенной точностью [19], но усложнениями, связанными с этим, будем пренебрегать. Кроме того, приводимые ниже рассуждения справедливы, если для конструкции рассматривается только одно предельное состояние и один режим (способ) нагружения. Наличие различных предельных состояний и разнородных режимов эксплуатации (см., например, по [13]) не меняет общей идеи, но усложняет анализ повреждений по (3).

В число параметров закона распределения случайной величины обязательно должны входить параметры сдвига m и масштаба σ . В общем случае выражение для вероятности опасного состояния (отказа, разрушения, аварии) имеет вид [21]:

$$P = \int_{-\infty}^{\infty} f_l(x, m_l, \sigma_l, p_{l3}, \dots, p_{ln}) \int_{-\infty}^x f_s(y, m_s, \sigma_s, p_{s3}, \dots, p_{sk}) dy dx, \quad (8)$$

где $f_l(x, m_l, \sigma_l, p_{l3}, \dots, p_{ln})$ – функция плотности распределения нагрузки, с параметрами сдвига m_l и масштаба σ_l , а также другими параметрами распределения p_{l3}, \dots, p_{ln} , n – общее число параметров закона распределения нагрузки; $f_s(y, m_s, \sigma_s, p_{s3}, \dots, p_{sk})$ – функция плотности распределения прочности, с параметрами сдвига m_s и масштаба σ_s , а также другими параметрами распределения p_{s3}, \dots, p_{sk} , k – общее число параметров закона распределения прочностной характеристики. Параметры сдвига m и масштаба σ позволяют любой закон распределения записать в виде

$$f(x, m, \sigma, p_3, \dots, p_n) = \frac{1}{\sigma} g\left(\frac{x-m}{\sigma}, p_3, \dots, p_n\right). \quad (9)$$

Покажем, что вероятность разрушения (8) не зависит от абсолютных значений параметров $m_l, \sigma_l, m_s, \sigma_s$, а зависит только от их соотношений, для чего перепишем (8) с учетом (9):

$$P = \frac{1}{\sigma_l \sigma_s} \int_{-\infty}^{\infty} f_l\left(\frac{x-m_l}{\sigma_l}, p_{l3}, \dots, p_{ln}\right) \int_{-\infty}^x f_s\left(\frac{y-m_s}{\sigma_s}, p_{s3}, \dots, p_{sk}\right) dy dx. \quad (10)$$

Введем обозначения:

$$k_m = \frac{m_s}{m_l}; \quad k_l = \frac{\sigma_l}{m_l}; \quad k_s = \frac{\sigma_s}{m_l}. \quad (11)$$

Выражение (10) с учетом (11) принимает вид:

$$P = \frac{1}{m_l^2 k_m k_l k_s} \int_{-\infty}^{\infty} f_l\left(\frac{x-m_l}{m_l k_l}, p_{l3}, \dots, p_{ln}\right) \int_{-\infty}^x f_s\left(\frac{y-m_l k_m}{m_l k_m k_s}, p_{s3}, \dots, p_{sk}\right) dy dx. \quad (12)$$

Преобразуем (12) к виду:

$$P = \frac{1}{k_m k_l k_s} \int_{-\infty}^{\infty} f_l\left(\frac{\frac{x}{m_l} - 1}{k_l}, p_{l3}, \dots, p_{ln}\right) \int_{-\infty}^{\frac{x}{m_l}} f_s\left(\frac{\frac{y}{m_l} - k_m}{k_m k_s}, p_{s3}, \dots, p_{sk}\right) d\frac{y}{m_l} d\frac{x}{m_l}. \quad (13)$$

Сделав замену $\frac{x}{m_l} = \xi$ и $\frac{y}{m_s} = \eta$, окончательно получим выражение:

$$P = \frac{1}{k_m k_l k_s} \int_{-\infty}^{\infty} f_l \left(\frac{\xi - 1}{k_l}, p_{l3}, \dots, p_{ln} \right) \int_{-\infty}^{\xi} f_s \left(\frac{\eta - k_m}{k_m k_s}, p_{s3}, \dots, p_{sk} \right) d\eta d\xi. \quad (14)$$

Таким образом, в случае, когда f_l и f_s есть двухпараметрические распределения, вероятность разрушения определяется тремя переменными (11). В общем случае вероятность разрушения определяется $(n+k-1)$ переменными.

Детерминированные методики расчета на прочность при вычислении коэффициента запаса оперируют понятиями «минимальных свойств материала» и «максимальной нагрузки». Если свойства материала и нагрузки случайны и описываются соответствующими законами распределения, то понятия «минимальных свойств» и «максимальной нагрузки» нужно связать с параметрами законов распределения. Одним из способов является задание доверительного интервала. В приводимых далее рассуждениях рассматривается такой интервал, чья вероятности выхода случайной величины за его правую или левую границу одинаковы и равны p_{toler} . Легко видеть, что, например, для нормального распределения $p_{toler} = 1,5 \cdot 10^{-3}$ соответствует интервалу $[m - 3\sigma, m + 3\sigma]$. Таким образом, минимальные свойства материала и максимальные напряжения имеют смысл квантилей, которые можно представить в виде:

$$\sigma_{min} = m_s + A_s \sigma_s; \quad \sigma_{max} = m_l + A_l \sigma_l, \quad (15)$$

где A_s и A_l определяются из условий

$$\int_{-\infty}^{A_s} f_s(x, 0, 1, p_{s3}, \dots, p_{sk}) = P_{toler}; \quad \int_{A_l}^{\infty} f_l(x, 0, 1, p_{l3}, \dots, p_{ln}) = P_{toler}. \quad (16)$$

Учитывая (15), коэффициент запаса можно представить формулой:

$$n = k_m \frac{1 + A_s k_s}{1 + A_l k_l}. \quad (17)$$

Для получения выражения предельной расчетной вероятности отказа примем, что расчетный коэффициент запаса равен нормативному, далее из (17) выразим k_m и подставим в (14).

Если принять, что функции распределения нагрузки и характеристики прочности двухпараметрические, то предельная расчетная вероятность – функция двух переменных: k_p, k_s . Вид зависимости вероятности от этих переменных определяется двумя факторами, действующими в разные стороны. С одной стороны, увеличение коэффициентов вариации k_l и k_s приводит к утяжелению «хвостов» распределений. С другой стороны, при фиксированных квантилях (15), соответствующих постоянному (равному нормативному) коэффициенту запаса прочности, это увеличение ведет

к увеличению расстояния между максимумами распределений. Два действующих в разные стороны фактора приводят к тому, что зависимость расчетной вероятности от коэффициентов вариации оказывается немонотонной (рис. 8-10).

Для случая, когда закон распределения для нагрузки и для характеристики прочности нормальный, изолинии предельной расчетной вероятности отказа от коэффициентов вариации представлены на рис. 8, из которого можно видеть, что в рассмотренном диапазоне коэффициентов вариации свойств материала и нагрузок минимальная вероятность равна примерно 10^{-5} . Это означает, что требование не превышения вероятностью отказа значения 10^{-5} обеспечивает создание конструкций не опаснее, чем удовлетворяющие существующим детерминированным методикам расчета.

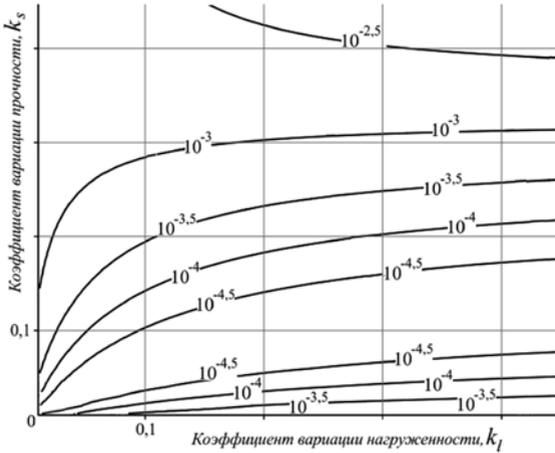


Рис. 8. Зависимость предельной расчетной вероятности отказа от коэффициентов вариации нагрузки (k_l) и прочности (k_s)

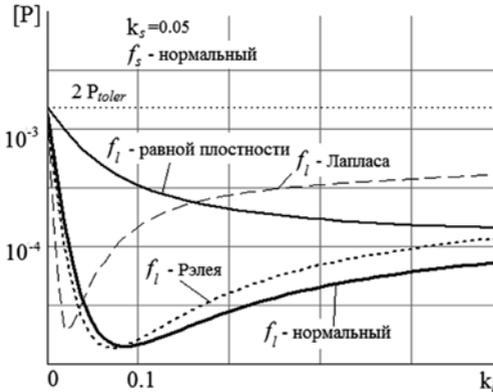


Рис. 9. Зависимость предельной расчетной вероятности от вида закона распределения нагрузки и коэффициента вариации нагрузки

При некоторых значениях коэффициентов вариации, требование $P \leq 10^{-5}$ может быть ослаблено, например, до $P \leq 10^{-3}$. Влияние коэффициента вариации характеристики прочности на предельную расчетную вероятность сильнее, чем коэффициента вариации нагрузки; такая «несимметрия» связана с несимметричностью формулы (8) относительно f_1 и f_s .

По рис. 9 и 10 можно качественно оценить влияние вида закона распределения нагрузки на предельную расчетную вероятность отказа. Качественный вид зависимости предельной расчетной вероятности отказа от функции распределения характеристики нагруженности не зависит.

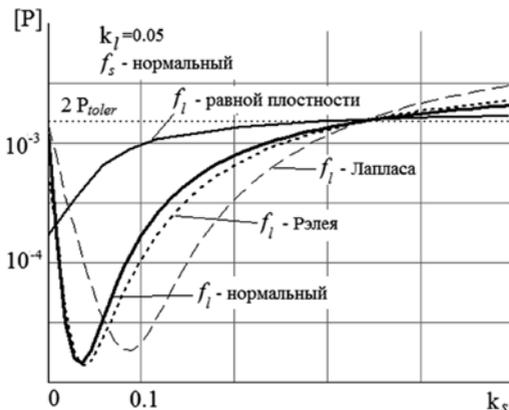


Рис. 10. Зависимость предельной расчетной вероятности от вида закона распределения нагрузки и коэффициента вариации прочности

Часто достоверно определить вид закона распределения затруднительно, поэтому предельная расчетная вероятность отказа может быть получена из нижней огибающей предельных расчетных вероятностей, определенных из различных сочетаний законов распределения (закон распределения прочности нормальный, нагруженности – нормальное распределение, распределение Рэлея, Лапласа и равной плотности). Область минимальных значений предельной расчетной вероятности значительно шире, чем показанная на рис. 8 для случая только одного – нормального – закона; но минимальное значение вероятности примерно то же. Таким образом, если закон распределения неизвестен, то расчетная вероятность отказа должна быть ограничена величиной 10^{-5} .

Выразив из (17) k_m через коэффициент запаса n и подставив в (14), можно получить зависимость вероятности разрушения от коэффициента запаса и коэффициентов вариации нагрузки и прочности. По рис. 11 можно оценить влияние коэффициентов вариации на скорость снижения вероятности отказа при увеличении коэффициента запаса. Видно, что повышение надежности при больших коэффициентах вариации прочности путем увеличения коэффициента запаса неэффективно.

Заключение

Таким образом, предлагаемый подход позволяет определить численные значения предельной расчетной вероятности отказа, при которой несущие элементы объектов различного назначения равноопасны рассчитанным по существующим детерминированным методикам. Предельная расчетная вероятность зависит от коэффициентов вариации характеристик механических свойств материала и нагрузок, а также от нормативного коэффициента запаса, заложенного в детерминированные методики расчета. В рассмотренных примерах при принятых нормативных запасах эта вероятность отказа лежит в диапазоне 10^{-3} – 10^{-5} . Значение предельной расчетной вероятности отказа зависит от вида законов распределения случайных величин, характеризующих прочность и действующие нагрузки. При отсутствии точной информации о виде закона может быть использована нижняя огибающая решений для разных законов.

Библиографический список

1. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты / под ред. чл.-корр. РАН Н.А. Махутова. – М.: МГОФ «Знание», 1998-2012. Т. 1-36.
2. Проблемы анализа риска. Научный журнал. – М.: «Деловой экспресс», 2005-2012.
3. Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. Научно-технический журнал. – М.: ВНИИ-ТИ, 2005-2009.
4. Махутов Н.А. Прочность и безопасность. Фундаментальные и прикладные исследования. – Новосибирск: «Наука», 2008. – 523 с.
5. Исследование напряжений и прочности ядерных реакторов. Серия из 9 монографий / под ред. Н.А. Махутова и М.М. Гаденина. – М.: Наука, 1987-2009.
6. Прочность при малоцикловом нагружении. Серия из 7 монографий / под ред. С.В. Серенсена, Н.А. Махутова и М.М. Гаденина. – М.: Наука, 1975-2006.
7. API 580 Risk-Based Inspection. – First edition, may 2002.
8. BS 7910. Guide on methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures.
9. ГОСТ Р 51344-99 Безопасность машин. Принципы оценки и определения риска. – М.: Госстандарт, 1999. С. 15.
10. ГОСТ Р 51901.1-2002 Анализ риска технологических систем. – М.: Госстандарт, 2003.
11. ГОСТ Р 51901-2002 Безопасность механизмов. – М.: Госстандарт, 2002.
12. РД 26-02-62-98. Расчет на прочность элементов сосудов и аппаратов установок подготовки нефти и газа – М.: ВНИИНЕФТЕМАШ, 1998.
13. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
14. РД 10-249-98. Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды. – СПб.: ДЕАН, 1999. – 398 с.
15. Марочник сталей и сплавов / Зубченко А.С. – М.: Машиностроение, 2003. – 782 с.
16. Чернявский А.О., Шадчин А.В. Оценка достоверности расчета малой вероятности разрушения для единичной конструкции // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2010. – № 4. – С. 118-123.
17. Махутов Н.А. Научные основы и задачи по формированию системы оценки рисков // Проблемы анализа риска. – Т. 1. – 2009. – № 3. – С. 82-91.
18. Белов П.Г. Социально-экономические аспекты. Нормирование риска // Стандарты и качество. – 2007. – № 1.

19. Чернявский А.О., Шадчин А.В. Оценка достоверности расчета малой вероятности разрушения для единичной конструкции // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2010. – № 4. – С. 118-123.
20. ГОСТ 14249-89 Сосуды и аппараты. Методы расчета на прочность. – М.: Государственный стандарт Союза ССР, 1990. – 59 с.
21. Теория расчета строительных конструкций на надежность / А.Р. Ржаницин. – М.: Стройиздат, 1978.

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА РИСКОВ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

*М.М. Гаденин, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник
Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва*

В рамках реализации научных разработок и развития концепции и стратегии обеспечения комплексной безопасности инженерной инфраструктуры должны быть выделены и исследованы угрозы в техногенной и природно-техногенной сферах и предусмотрены меры по снижению и управлению рисками возникновения чрезвычайных ситуаций, аварий и катастроф. Техногенные чрезвычайные ситуации, аварии и катастрофы характеризуются исключительно высокими градиентами усиления факторов, поражающих население, объекты и окружающую среду в моменты их возникновения и развития [1]. Времена прямого воздействия поражающих факторов могут измеряться как долями секунд, так и часами, а их негативные последствия могут проявляться многие годы. Важнейшей особенностью угроз возникновения чрезвычайных ситуаций, аварий и катастроф в природной и техногенной сферах является невозможность их предотвращения и обеспечения гарантированного уровня безопасности. Кроме того, чрезвычайные ситуации не знают национальных и государственных границ в силу трансграничности переносов поражающих факторов. Развитие фундаментальных научных, а также нормативных правовых и экономических основ решения проблем обеспечения безопасности является одной из целей государственной научно-технической политики в области обеспечения безопасности жизнедеятельности, определенных «Стратегией национальной безопасности Российской Федерации» [2] и принятых в ее развитие «Основах стратегического планирования в Российской Федерации» [3].

Федеральный закон «О техническом регулировании» требует обязательной оценки безопасности объектов технического регулирования (ОТР) по критериям рисков. Обеспечение защищенности критически (КВО) и стратегически (СВО) важных объектов от чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного и техногенного характера, а также от несанкционированных (в том числе и террористических) воздействий, на основе концепции стратегических рисков решением совместного заседания Совета Безопасности Российской Федерации и президиума Государственного совета Российской Федерации от 13 ноября 2003 г. выдвинуто в число важнейших государственных, региональных и отраслевых проблем безопасности [1-3].

Таким образом, количественное обоснование условий возникновения чрезвычайных ситуаций на критически и стратегически важных объектах инженерной инфраструктуры должно выполняться на основе концепции стратегических рисков и не только для нормальных условий эксплуатации, но и для экстремальных, обусловленных возможными разрушениями, взрывами, пожарами, выбросами радиоактивных и отравляющих веществ, землетрясениями, размывами стен и полотна, падениями воздушных и космических летательных аппаратов, несанкционированными воздействиями (в т.ч. диверсиями).

Обеспечение условий безопасной эксплуатации инженерной инфраструктуры неразрывно сопряжено с анализом условий возникновения потенциальных вызовов, опасностей, угроз и их поэтапной реализации. Под рисками R в теории безопасности понимаются такие сочетания вероятностей P возникновения неблагоприятных событий (опасных и кризисных явлений, катастрофических, аварийных и чрезвычайных ситуаций), с одной стороны, и математического ожидания ущербов U – с другой, которое определяет изменение уровня безопасности и систем защищенности человека, объектов инфраструктуры и среды обитания от угроз и опасностей внутреннего и внешнего характера – техногенных, природных, антропогенных [1, 4, 11-14]. Интегральные риски при этом определяются как произведение, сумма или интеграл:

$$R = PU = \sum_i P_i U_i = \int C(P)U(P)dP = \int C(U)P(U)dU, \quad (1)$$

где P_i , U_i – вероятности и ущербы от основных (дифференцированных) неблагоприятных событий; C – весовые функции.

Риски как междисциплинарная научная основа оценки комплексной безопасности базируются на закономерностях, методах, уравнениях и критериях, полученных в фундаментальных областях знаний – математике, физике, химии, механике, информатике, машиноведении, биологии, физиологии, геологии, геофизике, физике атмосферы и океана, географии, философии, социологии, психологии, экономике, правоведении [4, 5]. Обобщающими для анализа интегральных рисков являются развитые теории системного анализа, теории хаоса и порядка, теории управления, теории катастроф и построения защит, методы математического и имитационного моделирования, прогнозирования, математической статистики, методы и системы диагностики и мониторинга.

Интегральные стратегические риски (R_s) могут быть рассчитаны по выражению (1) как произведение, сумма или интеграл двух величин P_i и U_i – соответственно вероятностей и ущербов от отдельных основных неблагоприятных (опасных, кризисных, катастрофических) i -событий. В простейшем случае величины P_i оцениваются как частоты F (1/год) наступления неблагоприятных событий в год. Величины ущербов U_i связываются с типом неблагоприятного события и могут определяться большим числом параметров. При оценках рисков ущербы U_i могут оцениваться числами пострадавших людей N или экономическими потерями E (в рублях); тогда риски будут измеряться в величинах [1/год, руб/год]. По аналогии с общепринятыми кривыми типа « $F-N$ » (F – частота, N – число пострадавших) для рисков природно-техногенных катастроф можно в двойных логарифмических координатах построить (рис. 1) обобщенные кривые « P_s-U_s » и их допусаемых значений « $[P_s]$ - $[U_s]$ ».

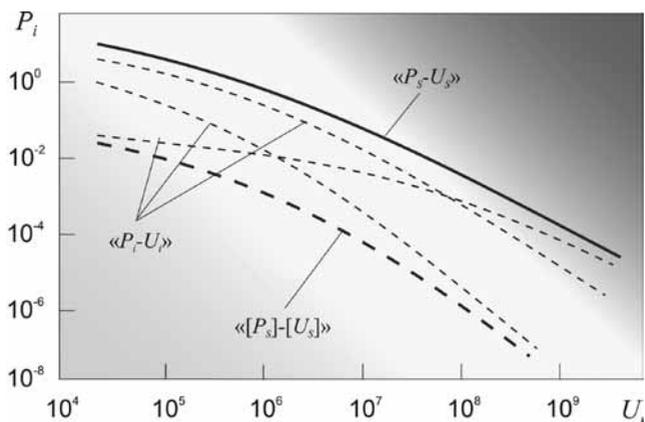


Рис. 1. Обобщенные кривые для оценки рисков по параметрам вероятностей и ущербов

Фундаментальным свойством интегральных и дифференциальных рисков является то, что росту ущербов U соответствует снижение вероятности P (частоты) их возникновения, и диапазон изменения у величины P больше (на 1-2 порядка), чем у величины U . Дифференцированные риски при их анализе и классификации связываются с источниками рисков и сферами жизнедеятельности людей, функционированием объектов инфраструктуры и состояниями природной среды.

Для объектов инженерной инфраструктуры категорий СВО, КВО и ОПО типы аварийных и катастрофических ситуаций и степень их защищенности при переходе от нормальных условий эксплуатации к аварийным можно охарактеризовать табл. 1 [4, 9, 10] и определить как:

- штатные ситуации при функционировании объектов в пределах, установленных нормами и правилами;
- режимные аварийные ситуации при отклонении от нормальных условий эксплуатации (возникают при штатном функционировании потенциально опасных объектов, последствия от них предсказуемые, защищенность от них достаточная);
- проектные аварийные ситуации (возникают при выходе за пределы штатных режимов с предсказуемыми и приемлемыми последствиями, защищенность от них частичная);
- запроектные аварийные ситуации (возникают при необратимых повреждениях ответственных элементов с высокими ущербами и человеческими жертвами и с необходимостью в последующем проведения восстановительных работ; степень защищенности от них недостаточная);
- гипотетические аварийные ситуации (могут возникать при непредсказанных заранее вариантах и сценариях развития с максимально возможными ущербами и жертвами; защищенность от них низкая и прямому восстановлению объекты не подлежат).

Таблица 1

Типы чрезвычайных (аварийных) ситуаций и степень защищенности от них объектов

№	Аварийные ситуации	Защищенность	Риски
1.	Нормальные условия эксплуатации	Повышенная	Управляемые
2.	Отклонения от нормальных условий (режимные ЧС)	Достаточная	Регулируемые
3.	Проектные аварии	Частичная	Анализируемые
4.	Запроектные аварии	Недостаточная	Повышенные
5.	Гипотетические аварии	Низкая	Высокие

При разработках методов и систем обеспечения защиты инженерных объектов от угроз природного, техногенного и террористического характера должны постулироваться названные выше аварийные ситуации и учитываться две базовые задачи:

- снижение рисков инициирующих воздействий и предупреждение возникновения чрезвычайных ситуаций;
- снижение рисков развития чрезвычайных ситуаций вследствие реализовавшихся угроз.

Для защиты объектов категорий СВО, КВО и ОПО от инициирующих воздействий и развивающихся чрезвычайных ситуаций природно-техногенного характера существуют [1, 4, 5, 8] следующие типы систем защиты и мониторинга (рис. 2), обеспечивающие условия их безопасной эксплуатации:

- жесткая защита 1 (защита, на преодоление которой необходимо затратить большое количество энергии);
- постоянно действующая функциональная защита 2 (защита, которая в случае аварии или выхода из режима нормальной эксплуатации элементов сложной технической системы способна взять на себя выполнение отдельных функций системы в течение ограниченного времени, либо предотвратить развитие аварии);
- естественная защита 3 (предусматривает использование пассивных природных явлений и процессов, направленных на прекращение аварии и снижение уровня поражающих факторов);
- комбинированная защита (объединяющая свойства жесткой, функциональной и естественной систем защиты).

При этом степень защищенности от анализируемых аварийных ситуаций всеми методами и риски их возникновения остаются различными (табл. 1).



Рис. 2. Типы и системы защиты и мониторинга от аварий и катастроф

Применительно к проблеме несанкционированных и террористических воздействий в дополнение к названным выше системам защиты добавляется специальная охранная защита 4, охватывающая сами высокорисковые объекты, их персонал и существующие защитные барьеры. В ее состав включаются соответствующие структуры, оснащенные системами наблюдения, оповещения и реагирования. В большинстве случаев снижение рисков возникновения чрезвычайных ситуаций может быть достигнуто путем использования комплекса всех указанных систем защиты [4, 5].

Если проводить анализ стратегических рисков чрезвычайных запроектных и гипотетических ситуаций природного и техногенного характера R_S , то для вероятности реализации стратегических системных угроз можно с использованием функционала F_{PS} записать:

$$P_S = F_{PS} \{P_N, P_T, P_O\}, \quad (2)$$

где P_N – вероятность возникновения неблагоприятного события, обусловленная человеческим фактором; P_T – вероятность, обусловленная состоянием объектов техносферы; P_O – вероятность, обусловленная воздействием окружающей среды. Важное значение при этом имеет то обстоятельство, что роль человеческого фактора в оценке R_S при изменении P_N определяется не только операторами и персоналом, их профессиональными и физиологическими качествами, но и лицами, принимающими решения на всех уровнях управления функционированием инфраструктуры. Вероятности P_T существенно зависят от технического состояния и уровня защищенности от аварий и катастроф рассматриваемых объектов. Эта защищенность определяется качеством их исходного и текущего состояния, степенью деградации на заданной стадии эксплуатации, уровнем диагностирования и мониторинга. Такое положение указывает на прямое взаимодействие параметров P_T и P_N с учетом базовых показателей надежности и безопасности объектов. Вероятности P_O зависят от проявления

опасных природных процессов, а также от состояния объектов и, следовательно, от P_T . Принятие в общем случае необоснованных (с точки зрения стратегических рисков) решений о размещении опасных объектов инфраструктуры в зонах концентрированного проживания населения делает параметр P_O зависящим и от P_N .

Ущерб U_S от реализации системных стратегических угроз в целом можно выразить через функционал F_{US} :

$$U_S = F_{US} \{U_N, U_T, U_O\}, \quad (3)$$

где U_N – ущербы, наносимые населению при воздействии первичных и вторичных поражающих факторов; U_T – ущербы, наносимые объектам техносферы; U_O – ущербы, наносимые окружающей среде. Как отмечалось выше, величины U_N , U_T и U_O могут измеряться как в естественных единицах (например, числом погибших людей, числом разрушенных объектов и площадью поврежденных территорий), так и в эквивалентах (например, в экономических показателях).

Анализ и обобщение многочисленных данных о чрезвычайных ситуациях позволили осуществить классификацию техногенных и природно-техногенных аварий и катастроф [1, 4, 5] по масштабам охваченных ими территорий и регионов, по числу жертв и пострадавших, по экономическому и экологическому ущербу в виде семи групп (типов, классов) – планетарные, глобальные, национальные, региональные, местные, объектовые и локальные катастрофы (рис. 3).

Самые тяжелые планетарные катастрофы могут нанести ущербы целым континентам планеты, а самые незначительные (локальные) – ограниченной части объекта. К планетарным катастрофам можно отнести возможное столкновение Земли с крупными космическими объектами или мировой военный конфликт с применением ядерного, термоядерного, химического и бактериологического оружия массового поражения. К глобальным катастрофам – крупнейшие цунами, землетрясения, наводнения, аварии на ядерных объектах гражданского и военного назначения. В этом случае ущербы наносятся ряду государств. Национальные катастрофы возникают по тем же причинам, что и глобальные, но ущербы причиняются той стране, в которой они произошли. При региональных катастрофах ущербы наносятся определенной части (региону) страны. Для местных и локальных аварий и катастроф повреждения создаются на определенной местной территории, примыкающей к потенциально опасному объекту. Для объектовых чрезвычайных ситуаций возможные ущербы ограничиваются территорией самого объекта.

В тех случаях, когда для объектов инженерной инфраструктуры определены и категорированы по рис. 3 системные стратегические риски \bar{R}_S (для населения \bar{R}_N , техносферы \bar{R}_T и окружающей среды \bar{R}_O), как

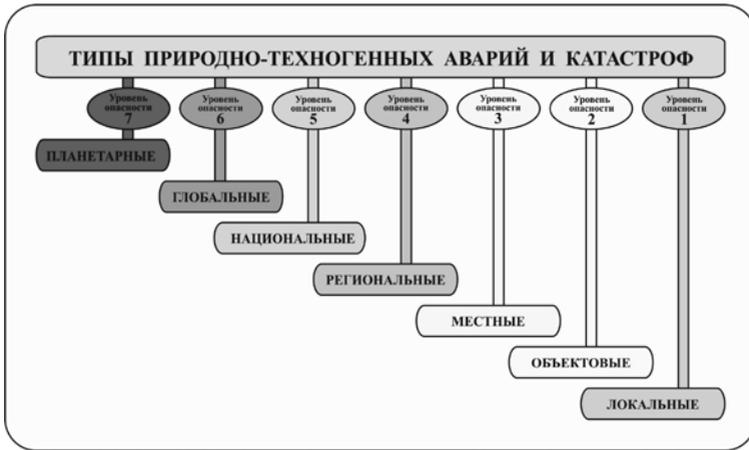


Рис. 3. Типы природно-техногенных аварий и катастроф

$$\bar{R}_S = \sqrt{\bar{R}_N^2 + \bar{R}_T^2 + \bar{R}_O^2}, \quad (4)$$

то трехмерная поверхность предельных состояний для таких объектов может быть построена в координатах этих составляющих системных рисков \bar{R}_S (рис. 4).

При этом, если на шкалах R_T , R_N и R_O отложить названные выше (по рис. 3) классы от 1 до 7 для аварий и катастроф по степени возрастания их тяжести (1 – локальные, 2 – объектовые, 3 – местные, 4 – региональные, 5 – национальные, 6 – глобальные, 7 – планетарные), то представляется возможной количественная оценка степени безопасности рассматриваемого объекта по критериям рисков, которая определяется радиусом-вектором в трехмерном пространстве « $R_T-R_N-R_O$ ».

Управление, регулирование и обеспечение безопасности объектов инженерной инфраструктуры по критериям системных рисков сводится [4, 5, 9, 10] к качественно- и количественному статистическому и детерминированному анализу на данном отрезке времени $\Delta\tau$ всех параметров уравнения (1) и осуществлению комплексных

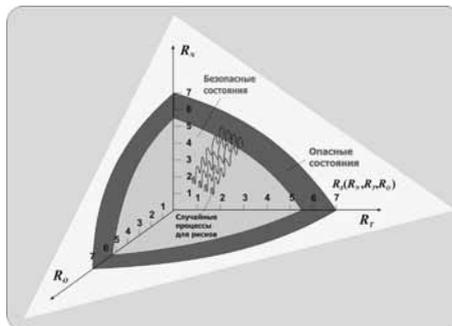


Рис. 4. Области опасных и безопасных состояний объектов техносферы по компонентам рисков

мероприятий по снижению стратегических рисков от фактических неприемлемых R_s до приемлемых (допустимых) уровней $[R_s]$:

$$R_s = P_s U_s \leq (1/n_s) \cdot [R_s] = (1/n_s) \cdot [P_s] \cdot [U_s] = F_Z(m_Z Z), \quad (5)$$

где n_s – коэффициент безопасности по стратегическим рискам; $[P_s]$, $[U_s]$ – приемлемые (допускаемые) вероятности и ущербы; Z – затраты на снижение рисков; m_Z – эффективность затрат ($1 \leq m_Z \leq 10$).

Безопасность по критериям рисков может считаться обеспеченной, если будет достигнуто неравенство $n_s \geq 1$. Для России в настоящее время по основным показателям системных рисков величины n_s крайне низки (не более $0,1 \div 0,5$). Отрезок времени $\Delta \tau$, для которого можно определять риски R_s , обычно принимается равным одному году ($\Delta \tau = 1$ год). В соответствии с выражением (5) управление и планирование с использованием критериальной базы, основанной на рисках, сводится к следующим основным задачам:

- развитию и использованию научных методов анализа рисков R_s и определяющих их основных параметров P_s и U_s ;
- принятию решений об уровне допускаемых величин $[R_s]$, $[P_s]$ и $[U_s]$ с оценкой величин запасов n_s ;
- научно обоснованному определению уровня затрат Z на снижение рисков с выбором и повышением эффективности затрат (m_Z).

При этом прогнозирование, мониторинг и предупреждение аварий и катастроф на объектах инженерной инфраструктуры следует ожидать более эффективными мероприятиями, чем ликвидация последствий ЧС. Величины Z при надлежащем обосновании мероприятий по снижению рисков могут быть значительно (в m_Z раз) ниже ущербов U_s , наносимых объектам в целом. Комплексное повышение безопасности объектов инженерной инфраструктуры должно осуществляться через комплексное повышение характеристик их прочности, ресурса, надежности и живучести. Одним из путей такого повышения является улучшение качества проектирования, изготовления, испытаний и эксплуатации. Это позволяет с учетом выражения (1) и рис. 1 снизить риски R возникновения аварийных и катастрофических ситуаций за счет снижения вероятности P и ущербов U от этих ситуаций. При этом анализ R , P и U по мере усложнения рассматриваемых объектов и увеличения тяжести аварий и катастроф требует более глубокой проработки.

При реализации мероприятий по повышению безопасности потенциально опасных объектов инженерной инфраструктуры в соответствии с рассматриваемыми выражениями следует понизить, в первую очередь, параметры P_T и U_T , характеризующие безопасное состояние непосредственно технических объектов и, соответственно, риски RT по выражениям (2)-(4). В свою очередь характеристики P_T и R_T в значительной степени связаны с человеческим фактором (P_{N^p} , U_{N^p} , R_{N^p}) и особыми воздействиями окружающей среды в зоне ЧС на техногенные объекты (P_O , U_O , R_O). Все указанные параметры в соответствии с выражением (4) и определяют системные риски RS и условие приемлемости рисков по выражению (5).

Управление рисками по критериям прочности, ресурса, надежности и живучести предопределяет необходимость обеспечения безопасности техногенных объектов через расчетные характеристики [4-9], входящие в уравнения (1)-(5). В первую очередь это относится к обеспечению качества конструкционных материалов наиболее повреждаемых элементов за счет широкого использования прогрессивных металлургических процессов их выплавки, термообработки, химикотермической, термомеханической обработки. Они позволяют обеспечить заданные качество, химический состав, структуру и механические свойства конструкционных материалов по базовым характеристикам прочности, живучести, ресурса и хладостойкости. Дополнительно к стандартным и нормативным требованиям к качеству конструкционных материалов по пределам прочности, текучести, выносливости и ударной вязкости добавляются требования к предельной пластичности и коэффициентам упрочнения в упругопластической области, критическим коэффициентам интенсивности напряжений и деформаций, зависящим от температуры. Чрезвычайно важной для циклической, малоцикловой, длительной коррозионной и низкотемпературной прочности оказывается роль концентрации напряжений, определяемой теоретическими и эффективными коэффициентами концентрации. Это требует повышенного внимания при механической обработке к зонам концентрации – отверстиям, выточкам, надрезам, резбам, галтелям, фаскам [4-9, 15-20].

Так как обычно процессы повреждения и разрушения металлических конструкций формируются в поверхностных слоях их деталей, то требования обеспечения безопасной эксплуатации распространяются на получение заданной микрогеометрии поверхностей, заданного уровня и знака остаточных поверхностных напряжений как в зонах концентрации, так и вне этих зон. В соответствии с этим при оценках прочности, ресурса и живучести используются критические значения характеристик локальных механических свойств. Особую роль в обеспечении ресурса и живучести имеет реализация дефектоскопического контроля, позволяющего оценивать состояние микро- и макродефектов в наиболее нагруженных зонах. При этом наибольшую потенциальную опасность имеют дефекты типа трещин; их параметры входят в расчетные уравнения ресурса, живучести и хладостойкости [4-9, 19, 20].

События последних лет показали, что акты несанкционированных воздействий (включая терроризм) начинают создавать новые риски, характеризующиеся существенными ущербами U_N и U_T . При этом все более обнаруживается фактор перерастания традиционного терроризма с покушениями на людей (взрывы, огнестрельные поражения) в технологический, когда террористические акты осуществляются с применением сложных технических объектов (в том числе автомобильных и авиационных) и против объектов техносферы. Структура технологического терроризма становится все более высокоорганизованной и высокотехнологичной (рис. 5). Такой технологический терроризм может приводить к резкому увеличению гибели людей – до 100-500 человек при одном акте и полному разрушению объектов, коммуникаций, инфраструктуры. По предварительным оценкам, общий ущерб U_S от террористических нападений может достигать $10^8 \div 10^9$ руб.

Важной особенностью рисков технологического терроризма является их прямая

связь с рисками R_s других чрезвычайных ситуаций техногенного характера. Разница между этими рисками заключается в инициирующих воздействиях и поражающих факторах. Вместе с тем следует отметить, что если при традиционном терроризме основное значение для ущербов U_N и U_T имеют первичные поражающие факторы, то при технологическом терроризме первичные поражающие факторы создают лишь 1-10% повреждений, а вторичные 90-99%.

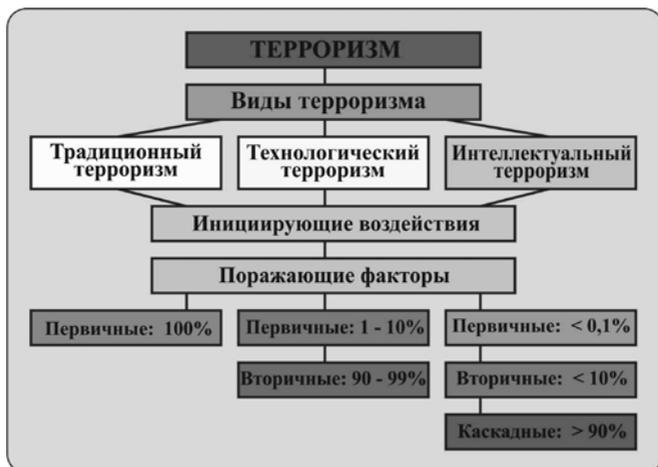


Рис. 5. Виды терроризма и поражающие факторы

Несомненную опасность в перспективе может представить новый вид терроризма – интеллектуальный. Его суть может состоять в том, что инициирующие воздействия для наиболее ответственных объектов техносферы могут переноситься на стадию их проектирования и создания. На стадии эксплуатации такие воздействия могут осуществляться несанкционированным доступом к системам управления и защиты соответствующих объектов высокой потенциальной опасности. В этом случае в цепочке поражающих факторов, кроме первичных и вторичных, появляются самые мощные – каскадные повреждения.

Как уже упоминалось, общая структура анализа рисков и безопасности сводится к тому, что строятся предельные поверхности опасных и безопасных состояний по трем их компонентам N , T , O . В развитие этого подхода модель существования поверхностей предельных состояний по составляющим стратегических рисков для населения R_N , объектов техносферы R_T и окружающей среды R_O (рис. 4) можно использовать также для их построения и по трем другим определяющим поражающим факторам аварийных и катастрофических процессов – опасному неконтролируемому высвобождению энергии E , выбросу химически, радиационно, биологически опасных веществ – W и образованию опасных или разрушению управляющих потоков информации I (рис. 6).

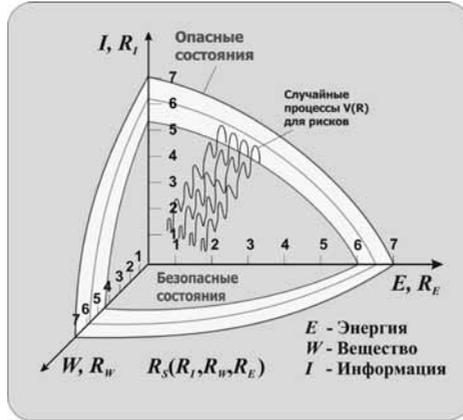


Рис. 6. Области опасных и безопасных состояний по параметрам инициирующих факторов и соответствующих им рисков

Достижение в этом случае опасного предельного состояния некоторым случайным рабочим процессом по времени его протекания будет определяться пересечением характеризующего этот процесс вектора его текущего состояния $V(R)$ с предельной поверхностью опасных состояний [4, 5]. В последнем случае в дополнение к рискам R_N, R_T и R_O параметры E, W, I можно трактовать также в величинах соответствующих рисков R_E, R_W, R_I (рис. 2). Достижение предельных опасных состояний по R_N, R_T и R_O или по R_E, R_W, R_I будет характеризоваться пересечением вектора текущего состояния по рискам R_S с предельной поверхностью опасных состояний, характеризующихся 1-7 типами (классами) чрезвычайных ситуаций по рис. 3.

$$\bar{R}_S = \sqrt{\bar{R}_N^2 + \bar{R}_T^2 + \bar{R}_O^2}, \quad \bar{R}_S = \sqrt{\bar{R}_E^2 + \bar{R}_W^2 + \bar{R}_I^2}. \quad (6)$$

Выражения (6) позволяют получить количественную основу для категорирования потенциальной опасности объектов техносферы. Это обстоятельство указывает на то, что в принятую систему декларирования и экспертизы безопасности по R_N, R_T и R_O требуется внести соответствующие дополнения в части учета названных выше определяющих параметров предельных состояний по составляющим R_E, R_W и R_I .

При анализе безопасности объектов инженерной инфраструктуры следует учитывать как упомянутые выше ущербы, так и серийность (число n) их потенциально опасных компонентов. Тогда, модифицировав выражение (1), риски R по охарактеризованным выше типам опасности объектов (от 1 до 7) можно оценить в виде

$$R = \sum_{i=1}^7 U_i (P_i \cdot n_i), \quad (7)$$

где U_i – ущерб от единичной аварии (катастрофы) объекта данного класса; P_i – вероятность возникновения аварии на данном объекте; n_i – число объектов в рассматриваемом классе.

Как отмечалось выше, наиболее часто структура анализа рисков иллюстрируется (рис. 1) так называемой зависимостью « $F-N$ » (где F – частота опасного события, N – количество повреждений различного вида, например летальных исходов). Если величины P_i и U_i определены для отрезка времени $\Delta t=1$ год, то величина U_i характеризует риск R_i . Связь между P_i , U_i и R_i в вероятностном аспекте для различных классов аварийных и катастрофических ситуаций показана на рис. 7.

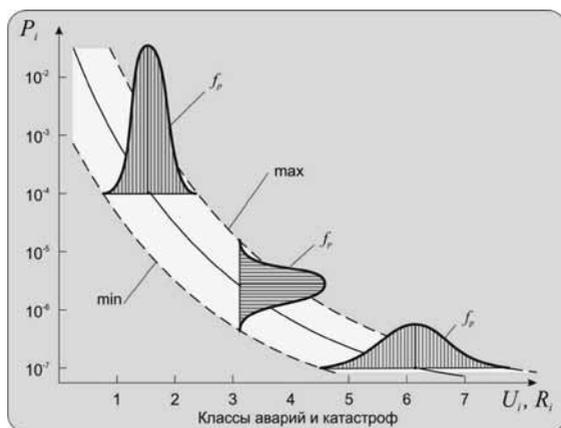


Рис. 7. Связь между вероятностями P , ущербами U и рисками R для различных классов аварийных и катастрофических ситуаций

При этом вариации между максимальными (max) и минимальными (min) расчетными величинами P , U , R увеличиваются по мере увеличения тяжести аварий и катастроф, а расширение функции плотности вероятности f_p делает решение задач оценки рисков крупных, тяжелых аварий и катастроф более сложными и неопределенными («тяжелые хвосты») в силу недостаточности исходной расчетной информации. Это относится в первую очередь к авариям и катастрофам на объектах категорий КВО и СВО.

Для крупносерийных и серийных объектов, состоящих из заданного числа n_i компонентов (агрегатов, узлов и деталей), на основе декомпозиции объекта с учетом длительного опыта их эксплуатации и анализа отказов, повреждений, разрушений, аварий и катастроф при определении рисков R_i через вероятности P_i используются статистические, вероятностные и логико-вероятностные методы. Наиболее часто для этих целей применяются способы построения матриц рисков, «деревьев событий» и «деревьев отказов» по постулируемым или оцениваемым сценариям развития аварийных ситуаций:

$$P_i = F_P(P_i)_N = F_P\{f_P(P_i)_n\}. \quad (8)$$

Ущерб $(U)_N$ могут быть оценены как для конечной стадии анализируемого сценария с вероятностью $(P)_N$, так и для промежуточных стадий с вероятностями $(P)_n$. Тогда:

$$(R_i)_N = F_R\{(P_i)_N, (U_i)_N\} = F_R\{(P_i)_n, (U_i)_n\}. \quad (9)$$

Такой подход к анализу рисков и безопасности уже нашел широкое применение в атомной, ракетно-космической, авиационной технике и начинает применяться в нефтегазовом и химическом комплексах [1, 4, 5, 21]. В целом риски возникновения чрезвычайных ситуаций на анализируемых объектах оказываются в сложном, разновременном взаимодействии с другими рисками в смежных инженерных комплексах жизнеобеспечения, делая проблему их анализа важной, перспективной и взаимосвязной.

При анализе и формировании общих определяющих соотношений и функционалов для параметров рисков по выражениям (1)-(9) требуется рассмотрение основных особенностей возникновения и реализации соответствующих рисков, включая:

- взаимодействие источников и причин возникновения возможных чрезвычайных ситуаций, аварий и катастроф природного, техногенного и антропогенного характера с увеличением рисков;
- выраженное изменение базовых параметров состояния и рисков по времени эксплуатации тоннеля с учетом экстремальных, сложных эксплуатационных динамических, климатических, температурных и сейсмических воздействий, а также проявления других опасных природных и природно-техногенных процессов;
- зависимость погрешностей оценки рисков от уровня контроля, диагностики и мониторинга состояния объектов инфраструктуры;
- изменение и снижение рисков за счет реализации комплексных мероприятий по модернизации объектов инфраструктуры.

В соответствии с изложенным интегральные экономические риски, определяемые произведением единичных рисков на число всех его компонентов, оказываются сопоставимыми как для глобальных, национальных и региональных, так и для объектовых аварий и катастроф по рис. 3, т.е. ущербы от единичных катастроф глобального и объектового масштаба отличаются на 8-10 порядков, риски – на 4-6 порядков, а интегральные ущербы на 1-3 порядка.

Накопленный опыт и дальнейшее развитие и использование рассмотренных выше методов анализа рисков применительно к сложным техническим системам основывается:

- на детальном изучении внешних воздействий на объекты и реакций объектов и их наиболее ответственных элементов на эти воздействия на базе определяемых уравнений;
- на математической теории катастроф и вероятностной теории рисков;

- на фундаментальных основах физики, химии и механики аварийных и катастрофических ситуаций;
- на теории предельных состояний, прочности и ресурса с учетом аварийных и катастрофических ситуаций;
- на теории жесткой, функциональной и комбинированной аварийной защиты объектов, операторов и персонала;
- на теории мониторинга и прогнозирования сценариев и последствий техногенных катастроф;
- на научных методах, технологиях и технике ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций техногенного характера.

При анализе безопасности КВО и СВО, как уже упоминалось выше, сформулированы пять состояний объектов в штатных и аварийных режимах: два для нормальных и близких к нормальным состояниям и три основных сценария и вида аварийных ситуаций – проектные, запроектные и гипотетические (см. табл. 1). В основе анализа безопасности объектов инженерной инфраструктуры с позиций их прочности и ресурса лежат такие параметры, как локальные напряжения σ и деформации e , связанные с внешними усилиями Q , реакциями R_Q , объектов на внешние воздействия, характеризующиеся числами циклов N , температурами t и временем τ эксплуатации:

$$\{\sigma, e\} = F_0\{Q, R_Q, N, t, \tau\}. \quad (10)$$

В зависимости от типа потенциально опасных объектов имеет место чрезвычайно широкая вариация этих параметров. Это приводит к тому, что сценарии и проектные аварийные ситуации, как правило, охватывают области исследования условий накопления повреждений классическими теориями сопротивления материалов, теории упругости, пластичности, ползучести, геофизики конструкционных материалов и грунтов [1, 4-6, 8, 15-20]. Расчетные и экспериментально определяемые напряжения и деформации при этом остаются на уровне предела упругости. При переходе к запроектным авариям анализируются нелинейные закономерности деформирования и разрушения – при этом напряжения становятся менее информативными параметрами, чем деформации. Повреждения от вибраций, динамических нагрузок и классической усталости переходят в повреждения от малоциклового усталости. Еще большее возрастание σ и e в элементах конструкций обуславливает переход к гипотетическим авариям и катастрофам. При этом теоретической основой анализа таких ситуаций является статическая и динамическая нелинейная механика разрушения.

Для представленных в табл. 1 аварийных ситуаций величины рисков растут по мере снижения уровня защищенности. Для штатных, нормальных условий риски могут быть определяемыми и управляемыми в соответствии с накопленным опытом научных и прикладных разработок. При отклонениях от нормальных ситуаций неопределенности в анализе рисков увеличиваются, хотя они остаются анализируемыми и регулируемые. При проектных авариях возможности анализа рисков сохраняются в достаточной степени. Для запроектных и гипотетических аварий риски оказывают-

ся повышенными и неприемлемо высокими. Это сопряжено с резким ростом величин ущербов даже при учете снижения вероятностей природно-техногенных катастроф.

С учетом анализа затронутых выше общих проблем техногенной, природно-техногенной и антропогенно-природно-техногенной безопасности, направлений и перспектив развития объектов инженерной инфраструктуры обеспечение должного уровня их прочности, ресурса и безопасности становится одним из актуальных направлений технического прогресса по мере непрерывного роста их рабочих параметров и повышения потенциальной опасности. При этом основными задачами перспективных разработок в области анализа рисков и безопасности становятся:

- фундаментальные исследования по механике деформирования и по механике катастроф, лежащие в основе создания критериев и методов решения проблем прочности, ресурса, живучести, риска и безопасности объектов с повышенной потенциальной опасностью возникновения аварийных и катастрофических ситуаций;
- прикладные исследования и разработки инженерных методик, алгоритмов, программ, моделей, стендов, аппаратуры для расчетно-экспериментального обоснования конструкторско-технологических решений при проектировании, создании, эксплуатации и выводе из эксплуатации действующих и принципиально новых высокорисковых объектов техносферы с применением комплексных критериев прочности, ресурса, живучести и безопасности.

Определяющие безопасность эксплуатации объектов инженерной инфраструктуры с позиций их прочности и ресурса параметры, такие как действующие механические напряжения и деформации и обуславливающие их внешние усилия и реакции на внешние воздействия, а также температуры, числа циклов и частоты нагружения и др., которые входят в рассмотренное выше выражение (10), имеют вероятностную природу. В связи с этим появляется возможность имитационного моделирования объекта, геометрических характеристик его несущих сечений, исходных и развивающихся дефектов, кинетики механических свойств конструкционных материалов, накапливаемых технологических и эксплуатационных повреждений, развития трещин, ведущих к разрушениям, авариям и катастрофам. Это дает возможность вычисления вероятности возникновения аварийных ситуаций (по табл. 1) как в отдельных компонентах n_i систем, так и в самих системах N_i с заданной степенью их уязвимости:

$$(P_i)_N = F_P \{(P_i)_n\} = F_P \{(\sigma_i, e_i), (Q_i, R_{Q_i}, N_i, t_i, \tau_i)\}. \quad (11)$$

При этом могут быть оценены ущербы для различных стадий развития аварийных ситуаций:

$$(U_i)_N = F_U \{(U_i)_n\} = F_U \{(\sigma_i, e_i), (Q_i, R_{Q_i}, N_i, t_i, \tau_i), C_i\}, \quad (12)$$

где C_i – характеристики исходной и остаточной стоимости компонентов рассматри-

ваемой системы, ремонтно-восстановительных работ на объекте и в поврежденной окружающей среде.

Система выражений (10)-(12) является базовой для оценки основных параметров рисков R_p , U_p , P_i по схеме рис. 7.

В практике обеспечения прочности, ресурса и живучести объектов техносферы сформировались общепринятые методы их анализа, нормирования и регулирования – они сводятся к тому, чтобы выполнить определяющие условия:

$$\{\sigma, e\} = F_Q \{Q, R_Q, N, t, \tau\} \leq \{[\sigma, e]\} = \frac{1}{\{n_\sigma, n_e\}} \{\sigma_c, e_c\}, \quad (13)$$

где $[\sigma, e]$ – допускаемые напряжения и деформации для опасной точки опасного сечения рассматриваемого компонента технической системы; $\{\sigma_c, e_c\}$ – критические (опасные, разрушающие) напряжения и деформации; $\{n_\sigma, n_e\}$ – запасы по напряжениям и деформациям ($n_\sigma \geq 1, n_e \geq 1$).

Критические напряжения σ_c и деформации e_c (так же, как и действующие в опасном сечении напряжения σ и деформации e) зависят от условий эксплуатационного нагружения и определяются по кривым усталости, хладостойкости, термоч прочности и длительной прочности – их зависимостям от чисел циклов N_c , температур t_c и времени τ_c . Тогда допускаемые условия эксплуатации определяются по выражению [1, 4-9, 15-20]:

$$(N, t, \tau) \leq \{[N, t, \tau]\} = \frac{1}{\{n_N, n_t, n_\tau\}} \cdot \{N_c, t_c, \tau_c\}, \quad (14)$$

где n_N, n_τ – запасы по долговечности (циклической и временной), определяющие ресурс; n_t – запасы по критическим температурам. Для реальных конструкций $\{n_N, n_\tau\} > \{n_\sigma, n_e\}$.

Если штатные или аварийные условия функционирования объектов характеризуются образованием и развитием трещин l , то на основе уравнений механики статического, циклического и длительного разрушения можно записать:

$$(l) = F \{Q, R_Q, N, t, \tau\} \leq [l] = \frac{1}{n_l} \{l_c(N, t, \tau)\}, \quad (15)$$

где $[l]$ – допускаемый дефект; n_l – запас по критическим размерам дефектов ($n_l \leq \{n_N, n_\tau\}$), определяющий живучесть конструкции.

При обеспечении прочности по выражению (13) это достигается конструктивными и технологическими мероприятиями по снижению величин $\{\sigma, e\}$ и повышением характеристик механических свойств конструкционных материалов $\{\sigma_c, e_c\}$.

При этом, как правило, накопление опыта проектирования, изготовления и эксплуатации рассматриваемых объектов делает возможным снижение запасов $\{n_\sigma, n_e\}$.

При обеспечении ресурса по (14) задача вновь сводится к снижению $\{\sigma, e\}$ и повышению сопротивления конструкционных материалов циклическому и длительному разрушению $\{N_C, t_C, \tau_C\}$.

Для обеспечения живучести по выражению (15) чрезвычайно важным является снижение исходной дефектности объектов ($l_0 \leq l$) и повышение трещиностойкости конструкционных материалов (l_C).

Большую научную и технологическую сложность представляет тот факт, что повышение прочности обычно сопровождается понижением ресурса и живучести. Это делает задачу нормирования и регулирования прочности, ресурса и живучести оптимизационной.

С учетом опыта нормирования и регулирования рисков и на базе комплексных разработок проблем обеспечения безопасности по аналогии с выражениями (13)-(15) для различных аварийных и катастрофических ситуаций (по табл. 1) с использованием выражения (1) можно записать:

$$R = F_R \{P, U\} \leq [R] = \frac{1}{n_R} \{R_C\}, \quad (16)$$

где $[R]$ – допускаемый риск; R_C – предельный (критический) риск; n_R – запас по параметрам риска. С учетом изложенного для удовлетворения условия обеспечения безопасности рассматриваемого объекта необходимо обеспечение комплекса запасов, ведущих к запасам по рискам:

$$\{n_\sigma, n_e\} \leq \{n_N, n_t, n_\tau, n_e\} \leq \{n_R\}. \quad (17)$$

Современное проектирование, создание и эксплуатация по существующим нормативно-техническим документам пока базируются на ограниченном числе запасов (n_σ и иногда n_N).

Для использования изложенной методологии обеспечения безопасной эксплуатации инженерных объектов на основе концепции управления рисками возникновения чрезвычайных ситуаций их инфраструктура, как комплексная высокорисковая техническая система, должна быть декомпозирована на соответствующие потенциально опасные элементы, и тогда анализ рисков или возможных чрезвычайных ситуаций будет выполняться в двух вариантах. При первом варианте сам объект должен быть рассмотрен в целом, как сложная техническая система. При втором варианте должны быть рассмотрены с этих же позиций его основные базовые компоненты. В обоих этих случаях вопросы технического регулирования должны быть основаны на анализе потенциально опасных рисков как для объекта в целом, так и для его компонентов. При этом сами величины рисков должны быть увязаны с возможностью возникновения чрезвычайных ситуаций различного масштаба, начиная от национальных, ре-

гиональных и кончая местными и объектовыми. Другим элементом в обеспечении безопасной эксплуатации по требованиям закона «О техническом регулировании» является требование о комплексном рассмотрении содержащихся в этом законе различных видов опасностей и безопасности (механической, химической, пожарной, радиационной, электромагнитной и др.).

Таким образом, при комплексном анализе вероятностей P и рисков R на основе выражений (1)-(17) должны фигурировать три источника возникновения аварийных и катастрофических состояний – природная среда, в которой расположен рассматриваемый объект, его непосредственные технические компоненты, а также обслуживающие его операторы и персонал. В анализе рисков потребуются считаться с тем, что указанные три источника возможного возникновения чрезвычайных ситуаций являются также объектами анализа ущербов U , создаваемых иницирующими и поражающими факторами. Ущерб U и риски R могут создаваться для окружающей природной среды, для человека и для инженерных систем. Эти ущербы в значительной степени связаны с уязвимостью каждого из указанных элементов и при анализе условий обеспечения безопасной эксплуатации должна быть заранее задана определенная степень этой уязвимости – катастрофические последствия с уничтожением объектов природной среды, технических систем и людей или с нанесением им частичных повреждений.

Из сказанного следует, что для обеспечения безопасности функционирования объектов (в первую очередь, КВО и СВО) инженерной инфраструктуры, наряду с намеченными и реализуемыми инженерно-техническими мероприятиями необходима разработка новых методов оценки рисков с учетом технического состояния сложных инженерно-технических и природных компонентов. При этом в качестве базовых параметров рисков R могут быть выбраны интегральные экономические риски, характеризующие ущербы от потери жизней и здоровья человека (оператора, персонала, пассажиров), от разрушений и повреждений инфраструктуры тоннеля и от негативных воздействий на природную среду. Описание и построение модели реальной системы штатных, нештатных, аварийных и катастрофических ситуаций с использованием концепции управления риском R их возникновения и развития применительно к условиям эксплуатации конкретного оборудования следует считать основой комплексного системного подхода к определению его исходных R , допускаемых $[R]$ и предельных R_c значений по выражению (17).

Для технических систем и их объектов, состоящих из определенного числа компонентов (агрегатов, узлов и деталей), на основе принципа декомпозиции объекта и с учетом длительного опыта их эксплуатации, анализа отказов, повреждений, разрушений, аварий и катастроф при анализе рисков через характеристики вероятности должны использоваться статистические, вероятностные и логико-вероятностные методы. Как наиболее перспективные на первом этапе для этих целей следует применять способы построения матриц рисков, «деревьев событий» и «деревьев отказов» по постулируемым или оцениваемым сценариям развития аварийных ситуаций. Управление, регулирование и обеспечение защищенности технических и природных систем по критериям рисков должно сводиться к количественному статистическому

и детерминированному анализу всех опасных процессов по выражениям (11)-(15) на определенном отрезке времени τ параметра вероятности P возникновения аварий или катастроф и математическое ожидание ущерба U от них, а также осуществлению комплексных мероприятий по снижению рисков R от неприемлемых R_c до приемлемых (допустимых) $[R]$ уровней по выражению (16) с учетом выражения (17).

Понятие безопасности применительно к высокорисковым инженерным объектам, которыми, как правило, являются критически и стратегически важные объекты, согласно федеральному законодательству и решениям Совета Безопасности Российской Федерации рассматривается, как свойство не наносить ущербов национальной безопасности, включая ущербы объектам самого объекта, а также окружающей природной среде и людям (операторам, персоналу и населению). В качестве базового параметра безопасности в этом случае выдвигается требование по величинам интегральных экономических рисков R , R_c и $[R]$. Эти риски подлежат прямому расчетно-экспериментальному определению и последующему их нормированию, регулированию и контролю. В общем случае риски тяжелых катастроф национального и регионального масштабов должны быть увязаны с экстремальными и штатными воздействиями на элементы рассматриваемого объекта и объекта в целом:

- опасных природных процессов (землетрясения, оползни, проникновение воды, наличие геологических разломов, радиация, низкие климатические температуры);
- опасных механических воздействий (вибрационная нагруженность, накопление эксплуатационных повреждений различного характера, в том числе усталостных, коррозионных, износных, деструкции, старения и деградации свойств конструкционных материалов);
- непосредственных действий человека (человеческий фактор), которые могут носить различный характер (ошибки операторов и обслуживающего персонала, умышленные несанкционированные действия, направленные на создание чрезвычайной ситуации того или иного характера, террористические и диверсионные акты).

В целом путями решения фундаментальной проблемы анализа и обеспечения безопасности техносферы могут явиться разработки обобщенных моделей сложных технических систем с учетом их взаимодействия с окружающей инфраструктурой, на основе которых может быть выполнен анализ соответствующих сценариев возникновения и развития аварий и катастроф. Такие модели характеризуются многоуровневой структурой, затрагивающей как крупномасштабные планетарные, глобальные и национальные, так и региональные, местные, объектовые и локальные аспекты безопасности. Информационным источником для анализа условий возникновения ЧС по указанным моделям являются адекватные данные многоуровневого комплексного мониторинга рассматриваемых объектов, в связи с чем одной из важных научных задач в проблеме обеспечения безопасности является развитие методов и создание систем комплексных диагностики и мониторинга как штатно функционирующих, так и находящихся в аварийных ситуациях и поврежденных состояниях технических систем и окружающей инфраструктуры [8, 9, 20-26]. В качестве одной из ведущих

в этом направлении стоит задача использования всего комплекса получаемых от многоуровневой диагностической системы параметров для комплексного анализа и мониторинга рисков с целью обеспечения условий безопасной эксплуатации критически и стратегически важных объектов при соблюдении требований к приемлемым уровням эксплуатационных рисков и к защите этих объектов от тяжелых катастроф, что составляет суть перехода на новый уровень управления безопасностью, отвечающий Стратегии национальной безопасности России [1-3].

Библиографический список

1. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Т. 1-40. – М.: МГФ «Знание», 1998-2012.
2. Стратегия национальной безопасности Российской Федерации до 2020 г. Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 12 мая 2009 г. № 537.
3. Об Основах стратегического планирования в Российской Федерации. Утверждены Указом Президента Российской Федерации от 12 мая 2009 года № 536.
4. Махутов Н.А. Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования. – Новосибирск: Наука, 2008. – 528 с.
5. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. В двух частях. – Новосибирск: Наука. 2005. Часть 1: Критерии прочности и ресурса. – 494 с. Часть 2: Обоснование ресурса и безопасности. – 610 с.
6. Гаденин М.М. Характеристики механических свойств материалов в анализе условий достижения предельных состояний // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2012. – Т. 78. – № 2. – С. 58-63.
7. Гаденин М.М. Оценка прочности, ресурса и живучести несущих элементов конструкций в эксплуатационных условиях нагружения. Труды IV Всероссийской конференции «Безопасность и живучесть технических систем». 9-13 октября 2012 г., Красноярск. Том 1. – Красноярск: Ин-т физики им. Л.В. Киренского СО РАН, 2012. С. 20-24.
8. Махутов Н.А., Гаденин М.М. Техническая диагностика остаточного ресурса и безопасности: учебное пособие / под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Издательский дом «Спектр», 2011. – 187 с. (Диагностика безопасности).
9. Махутов Н.А., Гаденин М.М. Техногенная безопасность: Диагностика и мониторинг состояния потенциально опасного оборудования и рисков его эксплуатации. Федеральный справочник: Информационно-аналитическое издание. Т. 26. – М.: НП «Центр стратегического партнерства», 2012. С. 307-314.
10. Махутов Н.А., Гаденин М.М., Чернявский А.О. Шатов М.М. Анализ рисков отказов при функционировании потенциально опасных объектов // Проблемы анализа риска. – 2012. – Т. 9. – № 3. – С. 8-21.
11. Елохин А.Н. Анализ и управление риском. Теория и практика. – М.: Лукойл, 2000. – 186 с.
12. Владимиров В.А., Воробьев Ю.Л., Махутов Н.А. и др. Управление риском: риск, устойчивое развитие, синергетика. – М.: Наука, 2000. – 430 с.
13. Лепихин А.М., Махутов Н.А., Москвичев В.В., Черняев А.П. Вероятностный риск-анализ конструкций технических систем. – Новосибирск: Наука, 2003. – 173 с.
14. Махутов Н.А., Гаденин М.М. Стратегические риски в техногенной сфере. Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – М.: ВИНТИ. – № 4. – 2003. – С. 10-20.
15. Исследования прочности при малоцикловом нагружении. Серия из 8 книг / под ред. С.В. Серенсена, Н.А. Махутова, М.М. Гаденина. – М.: Наука, 1975-2006.
16. Исследования напряжений и прочности ядерных реакторов. Серия из 9 книг / под ред. Н.А. Маху-

- това, М.М. Гаденина. – М.: Наука, 1987-2009.
17. Махутов Н.А., Рачук В.С., Гаденин М.М. и др. Прочность и ресурс ЖРД. – М.: Наука, 2011. – 525 с. (Исследования напряжений и прочности ракетных двигателей).
 18. Махутов Н.А., Гаденин М.М. Процессы деформирования и разрушения в экстремальных предельных состояниях // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4 (4). – С. 1615–1617.
 19. Махутов Н.А., Лыглаев А.В., Большаков А.М. Метод оценки хладостойкости // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2011. – Т. 77. – № 1. – С. 49-53.
 20. Махутов Н.А., Лыглаев А.В., Большаков А.М. Хладостойкость. Метод инженерной оценки. – Новосибирск: Из-во СО РАН, 2011. – 195 с.
 21. Махутов Н.А., Гаденин М.М. Диагностика и мониторинг состояния и рисков нефтехимического оборудования в обеспечение техногенной безопасности. Материалы V Научно-практической конференции «Промышленная безопасность на опасных производственных объектах». – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2011. С. 19-34.
 22. Махутов Н.А. Диагностика материалов и состояния конструкций в задачах мониторинга рисков // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2011. – Т. 77. – № 12. – С. 3-4.
 23. Гаденин М.М. Структура многоуровневого мониторинга параметров безопасности техносферы и окружающей среды // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2012. – № 1. – С. 93-102.
 24. Махутов Н.А., Гаденин М.М. Комплексный контроль: Диагностика материалов и конструкций на разных стадиях их жизненного цикла // ТехНАДЗОР. – 2011. – № 5. – С. 46-48.
 25. Махутов Н.А., Гаденин М.М. Диагностика и мониторинг состояния потенциально опасного оборудования и рисков его эксплуатации в обеспечение техногенной безопасности. Федеральный справочник: Информационно-аналитическое издание. Т. 26. – М.: Центр стратегического партнерства, 2012. С. 439-446.
 26. Махутов Н.А., Гаденин М.М. Методы анализа безопасности в проблемах мониторинга рисков. Оценка и управление индустриальными рисками и промышленной безопасности: труды школы-семинара. Москва, 26-28 октября 2011 г. – СПб.: СВЕИ, 2012. С. 4-10.

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АНАЛИЗА РИСКА АВАРИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*А.М. Лепехин, д.т.н., Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука»
КНЦ СО РАН, г. Красноярск*

А.П. Черняев, к.т.н. НПО «СибЭРА», г. Красноярск

В настоящее время одной из наиболее актуальных задач обеспечения безопасности технических систем становится задача анализа риска. Это связано с двумя обстоятельствами. Во-первых, становится насущной практическая потребность в количественном измерении существующих и перспективных техногенных угроз. Во-вторых, теоретические исследования проблемы риска привели к созданию методологической основы, достаточной для проведения количественных оценок указанных угроз [1-3]. Тем не менее, как показывает анализ, при проведении оценок риска аварий объектов и технических устройств различного назначения приходится сталкиваться со значительными методическими сложностями. Фундаментальные методические сложности уже были рассмотрены в [4]. В данной работе остановимся на некоторых практических аспектах оценки риска.

Опасные объекты представляют собой сложные технические системы с многосвязной иерархической структурой. Как правило, эти объекты содержат большое число технических устройств, различающихся по функциональному назначению, конструктивному исполнению, используемым конструкционным материалам. В большинстве случаев источники аварий этих устройств формируются за счет накопления повреждений в структуре конструкционных материалов. Эти повреждения затем приводят к разрушениям конструкций, авариям технических устройств и объекта в целом. Исходя из этого, при анализе риска следует принимать во внимание процессы на различных системных уровнях: мегауровне (объект), метауровне (техническое устройство), макроуровне (конструкция) и микроуровне (материал). Для каждого уровня имеют место специфические показатели защищенности от разрушений, аварий и катастроф (таблица 1). Эти показатели задаются рядом нормативно-правовых и нормативных документов. Помимо этого, защищенность объекта от аварий обеспечивается организационно-распорядительными документами, регламентирующими деятельность обслуживающего персонала.

Иерархия показателей и нормативного обеспечения безопасности технических систем

Уровень иерархии системы	Показатели защищенности	Нормативно-технические документы	Организационно-распорядительные документы
Мегауровень (объект)	Функция безопасности $S(t)$. Риск $R(t)$	ФЗ 116 Технические регламенты РД 03-418-01	Технологические регламенты
Метауровень (техническое устройство)	Функция риска (вероятность аварии) $Pf(t) = \Phi\{Pi(t)\}$	Правила безопасности. Нормы проектирования	Должностные инструкции. Правила проведения диагностирования
Макроуровень (конструкция)	Средний ресурс Tcp . Интенсивность отказа λ . Вероятность отказа $Pi(t)$	Нормы расчетов прочности и ресурса	Должностные инструкции. Правила проведения контроля
Микроуровень (материал, область разрушения)	Критические напряжения. Характеристики механики разрушения	Теории прочности. Механика разрушения	-

Еще более сложная иерархия возникает при анализе опасных процессов, формирующих аварии. Здесь приходится анализировать процессы на уровне объекта, конструкции технического устройства, материала, структуры материала (таблица 2).

Иерархические уровни моделирования опасных процессов

Уровень иерархии системы	Масштабы размеров и времени, м, сек	Элемент уровня	Параметры	Программные пакеты
Объектовый	$10^1 - 10^4$ $10^1 - 10^9$	Технический объект	Связи элементов и потоков вещества, нагрузки, воздействия	GPSS, SIMULINK
Конструкционный	$10^1 - 10^2$ $10^1 - 10^9$	Конструкция	Нагрузки, воздействия, перемещения, деформации	ANSYS, LS-DYNA, KOSMOS

Таблица 2 (продолжение)

Уровень иерархии системы	Масштабы размеров и времени, м, сек	Элемент уровня	Параметры	Программные пакеты
Элементный (сплошная среда)	$10^{-1} - 10^1$ $10^1 - 10^8$	Элемент конструкции	Напряжения, деформации	ANSYS, LS-DYNA, KOSMOS, NASTRAN
Область разрушения (сплошная среда)	$10^{-2} - 10^{-1}$ $10^{-1} - 10^7$	Локальный объем элемента	Напряжения, деформации, характеристики механики разрушения	ANSYS, LS-DYNA, NASTRAN
Структурный (гетерогенная структура)	$10^{-6} - 10^{-2}$ $10^{-1} - 10^5$	Блок зерен	Микронапряжения, микродеформации	Специальные программы
Молекулярный	$10^{-9} - 10^{-6}$ $10^{-3} - 10^3$	Зерно, кристалл	Кинетические коэффициенты	Специальные программы

Существенно различными оказываются параметры и средства моделирования этих процессов. Очевидно, что эти многоуровневые процессы должны находить адекватное отражения в анализе риска. Представляется маловероятным возможность охвата этих процессов в одной модели или одной процедуре анализа риска. Более конструктивным подходом можно считать осуществление разложения риска на компоненты, отражающие иерархию структуры системы. Наиболее подходящим для этих целей можно полагать риск-разложение в следующей форме [5]:

$$R_{\Sigma} \rightarrow \{R_i\} \rightarrow \{R_{ij}\} \rightarrow \{R_{ijk}\}, \quad (1)$$

где R_{Σ} – системный (объектовый) риск;

R_i – субсистемный риск;

R_{ij} – конструкционный риск;

R_{ijk} – критериальный риск.

Компоненты верхнего уровня данного разложения должны содержать «стоимостную» оценку потерь. Компоненты нижнего уровня могут определяться в форме вероятностей событий.

Согласно этому разложению для оценки интегрального риска аварии сложного объекта требуется нетривиальное нелинейное преобразование оценок показателей риска на нижних иерархических уровнях. При этом следует принимать во внимание различные механизмы катастроф сложных систем (ветвящиеся или каскадные катастрофы) (рис. 1).

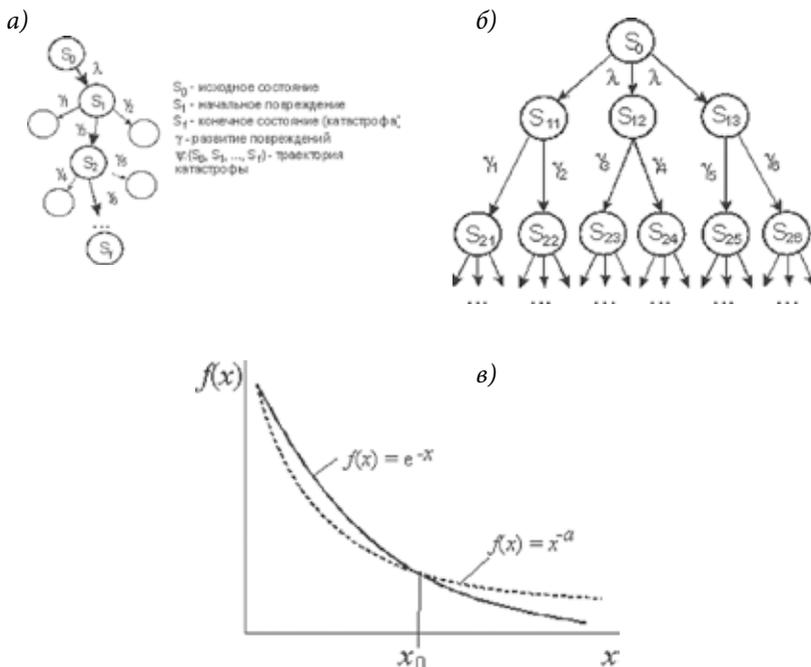


Рис. 1. Схемы ветвящейся (а) и каскадной (б) катастроф и их функции риска (в)

Поскольку механизм катастрофы заранее неизвестен, и разные модели будут давать разные оценки риска, риск следует оценивать в интервальной форме:

$$e^{-x} \leq R_{\Sigma} \leq x^{-a}. \quad (2)$$

В этом случае фактическая оценка риска точно не определена, но она будет находиться внутри указанной вилки.

Для относительно простых по структуре объектов и технических устройств вполне применимы стандартные технологии анализа риска: метод построения деревьев отказов и исходов, метод логических вероятностей и др. [3]. В ряде случаев эти методы применяются и к анализу риска разрушения конструкций. Недостаток этих методов заключается в том, что они требуют задавать вероятности исходных событий (разрушений отдельных элементов конструкций). Обычно эти вероятности задаются на основе обобщенных статистических данных, слабо отражающих специфические условия нагружения конкретной конструкции и особенности истории накопления повреждений.

По нашему мнению, более адекватным подходом для оценки конструкционного риска является расчет на основе вероятностных моделей механики разрушения [5]. В этом случае учитывается специфика нагрузок и воздействий, напряженно-деформи-

рованного состояния конструкций, состояния и свойств конструкционных материалов. Наиболее простой в расчетах можно считать модель «нагрузка – прочность». По этой модели функция риска (вероятность разрушения) определяется в форме:

$$R_f = 1 - \operatorname{erf} \left\{ -\frac{(m_1 - m_2)^2}{2(s_1^2 + s_2^2)} \right\} = 1 - \operatorname{erf} \left\{ -\frac{n - 1}{\sqrt{V_1^2 n^2 + V_2^2}} \right\}, \quad (3)$$

где n – коэффициент запаса;

m_1, m_2, s_1, s_2 – средние значения и среднеквадратические отклонения критических и действующих напряжений в рассматриваемой конструкции;
 V_1, V_2 – коэффициенты вариаций критических и действующих напряжений.

Для высокоответственных конструкций, обладающих высокой надежностью, более адекватной является пуассоновская модель отказов. Для этой модели функция риска вычисляется в следующей форме [5]:

$$P_f(V, k) = 1 - \exp \left\{ -\sum_{i=1}^k \int \mu_i(l_c) \frac{dV}{V_0} \right\}. \quad (4)$$

Параметр V_0 имеет смысл эталонного объема, для которого определяется математическое ожидание $\mu(l_c)$ числа дефектов критических размеров. Математическое ожидание $\mu(l_c)$ имеет следующий вид:

$$\mu(l_c) = \mu \int_0^{\infty} f(l_c) \left[\int_{l_c}^{\infty} f(l) dl \right] dl_c. \quad (5)$$

Интегральная часть формулы (5) представляет собой вероятностный фильтр вида $P\{l \geq l_c\}$, который «прореживает» ансамбль дефектов в конструкции. С использованием выражения (5) для хрупких разрушений получаем:

$$\mu(l_c) = \mu \int_0^{\infty} \frac{\beta_c}{\theta_c} \left(\frac{l_c}{\theta_c} \right)^{\beta_c - 1} \times \exp \left\{ -\left(\frac{l_c}{\theta_c} \right)^{\beta_c} \right\} \times \exp \left\{ -\left(\frac{l_c}{\theta} \right)^{\beta} \right\} dl_c. \quad (6)$$

Для квазихрупких разрушений имеем следующее выражение:

$$\mu(l_c) = \mu \int_0^{\infty} \frac{\alpha^k}{\Gamma(k)} \mathcal{N}_c^{k-1} \exp \{ -\alpha l_c^\gamma \} \times \exp \left\{ -\left(\frac{l_c}{\theta} \right)^{\beta} \right\} dl_c. \quad (7)$$

Для вязких разрушений:

$$\mu(l_c) = \mu \int_0^{\infty} \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{l_c - m}{s}\right)^2\right\} \times \exp\left\{-\left(\frac{l_c}{\theta}\right)^\beta\right\} dl_c. \quad (8)$$

Дальнейшее углубление моделей можно провести в части учета особенностей роста трещин при случайном нагружении. В частности, использование модели выбросов случайных процессов позволяет получить следующее выражение для функции риска:

$$P_f(K_c, l, t) = 1 - \int_l \int_{K_c} f(l)f(K) \left[1 - \exp\left\{-\frac{K_c^2}{2\pi S^2 l(t)}\right\}\right]. \quad (9)$$

Рассмотрим некоторые практические аспекты оценки риска разрушения конструкций. В качестве примера используем случай разрушения воздушного ресивера с разбросом осколков на 40-50 м. В результате разрушения были повреждены соседние ресиверы, разрушена кирпичная стена здания компрессорной подстанции, повреждены опоры ЛЭП (рис. 2).

а)



б)



Рис. 3. Общий вид разрушенного объекта (а)
и источник разрушения – непровар в сварном соединении (б)

Сосуд изготовлен в 1966 г. и принят в эксплуатацию на Назаровской ГРЭС в 1968 г. Сосуд был установлен на открытом воздухе и подвергался воздействию внешних климатических температур, характерных для г. Назарово. Сосуд нагружен внутренним рабочим давлением 4 МПа (40 атм.). Другие нагрузки и воздействия в документации не отмечены. Согласно паспорту основные элементы сосуда (обечайки, днища) изготовлены из стали 16ГС. Горловина люка изготовлена из стали 20. Рекомендуемый

диапазон применения стали 16ГС: $-40\text{ }^{\circ}\text{C} - +475\text{ }^{\circ}\text{C}$. Допускаемые напряжения для материала сосуда (сталь 16ГС, $R_{0,2} = 325\text{ МПа}$, $R_m = 450\text{ МПа}$ по ГОСТ 19281-89):

$$[\sigma] = \min \left\{ \frac{R_{0,2}}{n_{0,2}}; \frac{R_m}{n_m} \right\} = \min \left\{ \frac{325}{1,5}; \frac{450}{2,5} \right\} = 180\text{ МПа.} \quad (10)$$

Номинальные напряжения в обечайке сосуда при заданном рабочем давлении:

$$\sigma = \frac{P(D + s_{min})}{2\varphi s_{min}} = \frac{4 \times (1200 + 20,5)}{2 \times 0,8 \times 20,5} \approx 150\text{ МПа.} \quad (11)$$

Коэффициент концентрации напряжений в зоне сварного соединения обечайки с горловиной люка (с учетом непровара):

$$\alpha_{\sigma} = 4,0. \quad (12)$$

Коэффициент деформационного упрочнения металла:

$$m = 0,75 \frac{\lg \left[\frac{R_m}{R_{0,2}} (1 + 1,4Z) \right]}{\lg \left[(10^5 \ln \left(\frac{1}{1-Z} \right)) / (200 + 0,5R_{0,2}) \right]} = 0,16. \quad (13)$$

Эффективный коэффициент концентрации напряжений (с учетом непровара):

$$K_{\sigma} = \alpha_{\sigma}^{\frac{2m}{1+m}} \left(\frac{\sigma_H}{R_{0,2}} \right)^{\frac{m-1}{1+m}} = 2,54. \quad (14)$$

Максимальные локальные напряжения в зоне инициации разрушения (в зоне непровара) $\sigma_i = \sigma_H \times K_{\sigma} = 381\text{ МПа}$.

Расчет риска проведем по двум схемам: по классической методике построения деревьев событий и на основе формулы (3). В первом случае структурная схема была представлена двумя составными событиями разрушения: разрушением соединений обечайки и днища (сварные соединения 1 категории) с интенсивностью $\lambda = 7,03 \times 10^{-7}\text{ год}^{-1}$; разрушением соединений патрубков и люка (сварные соединения второй категории) с интенсивностью $\lambda = 5,12 \times 10^{-6}\text{ год}^{-1}$. Во втором случае расчет проводился по номинальным и максимальным напряжениям. Результаты расчета показали следующее. Вероятность разрушения по структурной схеме при наработке 40 лет составила $P_f = 1,16 \times 10^{-3}$. Вероятности разрушения на основе модели «нагрузка-прочность» получились следующими: по номинальным напряжениям $P_f = 7,0 \times 10^{-2}$, по максимальным напряжениям $P_f = 3,2 \times 10^{-1}$. Как видим, полученные оценки отличаются друг от друга на один порядок. Оценка по максимальным напряжениям вполне согласуется

с фактом разрушения объекта. Следовательно, модель «нагрузка-прочность» может использоваться при анализе риска разрушений конструкций.

В качестве заключения можно отметить следующее. Анализ риска опасных объектов представляет собой сложную научно-техническую задачу, для решения которой необходим иерархический мультиобъектный анализ. Мультиобъектный анализ должен включать иерархически соподчиненные модели риска – статистические, логические, вероятностные. Анализ риска следует начинать с нижнего уровня – с оценок вероятностей разрушения конструкций. Такие оценки могут проводиться как дополнение классических расчетов прочности при проведении экспертизы безопасности технических устройств различного назначения. Имеющиеся вероятностные модели механики разрушения позволяют выполнять такие расчеты для большинства конструкций без требований дополнительной статистической информации. Для широкого проведения расчетов вероятностей разрушений необходима систематизация данных о фактических коэффициентах запаса прочности и вариациях напряжений и характеристик механических свойств конструкционных материалов.

Библиографический список

1. Perrow Ch. Normal Accidents: Living with High-Risk Technologies, N.Y.: Basic Books, 386 pp., 1999.
2. Henley E., Kumamoto H. Probabilistic risk assessment and management for engineers and Scientists. IEEE PRESS, 1996. – 597 p.
3. Шубин В.С. Рюмин Ю.А. Надежность оборудования химических и нефтеперерабатывающих производств. – М.: Химия, 2006. – 359 с.
4. Lepikhin A. A Critical Look at Risk Analysis of Disasters. Risk Analysis VII & Brownfields V. WITpress, 2010, PI-59–PI-67pp.
5. Лепихин А.М., Махутов Н.А., Москвичев В.В., Черняев А.П. Вероятностный риск-анализ конструкций технических систем. – Новосибирск: Наука, 2003. – 174 с.

СТАНДАРТЫ ООО «ИНТЕРЮНИС» В ОБЛАСТИ АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ, УПРАВЛЕНИЯ И МОНИТОРИНГА РИСКОВ

В.Г. Харебов, В.И. Эльманович, В.С. Едигаров, Т.А. Сурина, ООО «ИНТЕРЮНИС»

В настоящее время в России происходит смена парадигмы обеспечения промышленной безопасности опасных производственных объектов (ОПО). В июле прошлого года на заседании Президиума Правительства Российской Федерации была одобрена «Концепция совершенствования государственной политики в области обеспечения промышленной безопасности с учетом необходимости стимулирования инновационной деятельности предприятий на период до 2020 года».

Современная методология обеспечения промышленной безопасности опасных производственных объектов

В Федеральном законе «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21 июля 1997 г. №116-ФЗ промышленная безопасность опасных производственных объектов определяется как состояние защищенности жизненно важных интересов личности и общества от аварий на опасных производственных объектах и последствий указанных аварий (Концепция абсолютной безопасности). Эта концепция заложена в проектах технологических установок, введенных в эксплуатацию в XX в., в «Положении о планово-предупредительном ремонте технологического оборудования предприятий нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности» ППР-77 (1977), в сводах правил на проектирование и эксплуатацию технологического оборудования. Отличительная черта Концепции абсолютной безопасности состояла в совпадении мер по обеспечению надежности и безопасности. В Евросоюзе после аварии на химзаводе Севезо (Италия, 1976) и в СССР на Чернобыльской АЭС (1986) теории надежности и безопасности разошлись, поскольку методы теории надежности стали технически неэффективными и экономически нецелесообразными при решении задач обеспечения безопасности. Стало ясно, что сколь бы ни были дорогостоящими технические системы, направленные на повышение надежности, абсолютной безопасности обеспечить не удастся, а возможные повреждения технологического оборудования и связанный с ними риск для имущества компании, здоровья и жизни персонала следует снижать не повышением надежности и так высоконадежных систем, а путем совершенствования технологий защиты. Концепция абсолютной безопасности, признанная в свое время многообещающей и очевидной, была отвергнута в ходе построения и развития систем обеспечения безопасности.

В принятом уже в XXI в. Федеральном законе «О техническом регулировании» от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ безопасность определяется как состояние, при котором отсутствует недопустимый риск (концепция приемлемого риска).

Современные технологии обеспечения безопасности основаны на Анализе и Мониторинге Риска.

23 августа 2012 г. Россия стала 156 членом Всемирной торговой организации – ВТО (World Trade Organization – WTO). Это потребует гармонизации Российских технических норм и регламентов с признанными в США и Евросоюзе: Risk-Based Inspection – RBI, Reliability-centered maintenance – RCM, Root Cause Failure Analysis – RCFA и т.п.

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:

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

где P – вероятность (частота) реализации 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 – вероятности (P) негативного события:

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

Существо нормирования, регулирования и управления обеспечением безопасностью с использованием рисков сводится к требованию не превышения величин формирующихся и реализуемых рисков $R = f(P, C)$ по выражениям (1), (2) величин приемлемых рисков $[R]$:

$$R = f(P, C) \leq [R]. \quad (3)$$

Если получаемые оценки риска выше уровня приемлемого риска, разрабатывается перечень мероприятий по снижению риска до приемлемого уровня.

Формулы (1)-(3) имеют не практическое, а методологическое значение, т.к. для сложных производственно-технологических систем (ПТС) вид функции $f(P, C)$ 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:

$$R = P \times C. \quad (4)$$

Концепция инспекции на базе оценки риска – ИБОР (Risk-Based Inspection – RBI).

В концепции ИБОР выделяют некоторую область приемлемого риска (см. рис. 1) и разрабатывают Перечень корректирующих и мониторинговых мероприятий, обеспечивающих функционирование опасного производственного объекта (ОПО) в области приемлемого риска. Базовая концепция снижения рисков при ИБОР приведена на рис. 2. Методические принципы ИБОР показаны на рис. 3-7.

Основные опасности связаны с разгерметизацией или полным разрушением оборудования и трубопроводов. Угрозами будем считать те опасности, от которых нет адекватных систем защиты. Современные технологии обеспечения безопасности основаны на Анализе и Мониторинге Риска, на представлении о том, что какими бы ни были дорогостоящими технические системы, направленные на повышение надежности, абсолютной безопасности обеспечить не удастся, а возможные повреждения технологического оборудования и связанный с ними риск для имущества компании, здоровья и жизни персонала следует снижать не повышением надежности и так высоконадежных систем, а путем совершенствования технологий защиты.

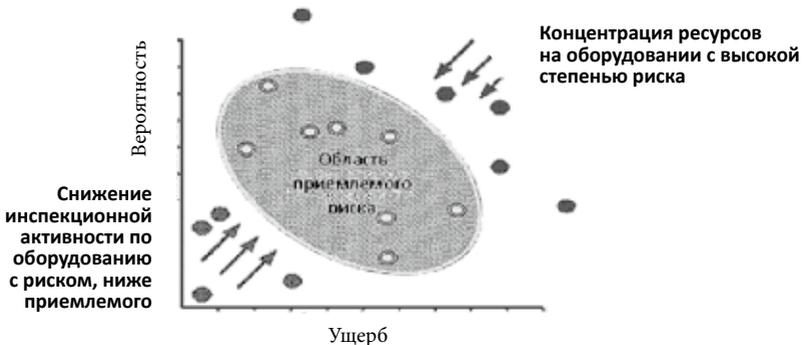


Рис. 1. Управление риском эксплуатации ОПО за счет перераспределения ресурсов на технические устройства повышенного риска



Рис. 2. Базовая концепция снижения риска эксплуатации ОПО за счет оптимизации процесса технического освидетельствования, ремонта и диагностики

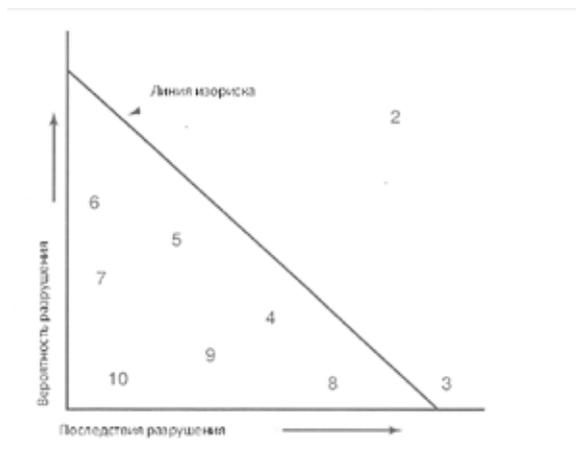


Рис. 3. Двухмерный аспект анализа риска

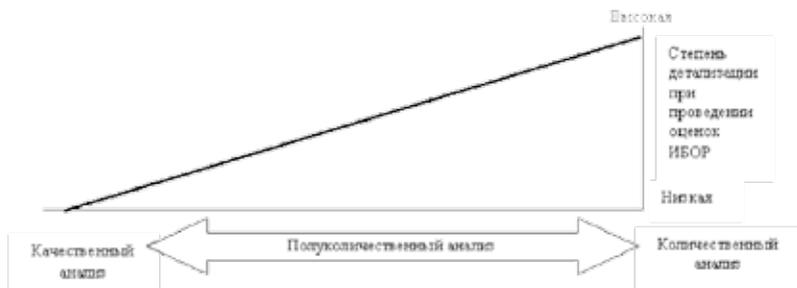


Рис. 4. Континуум типов анализа в процедурах ИБОР

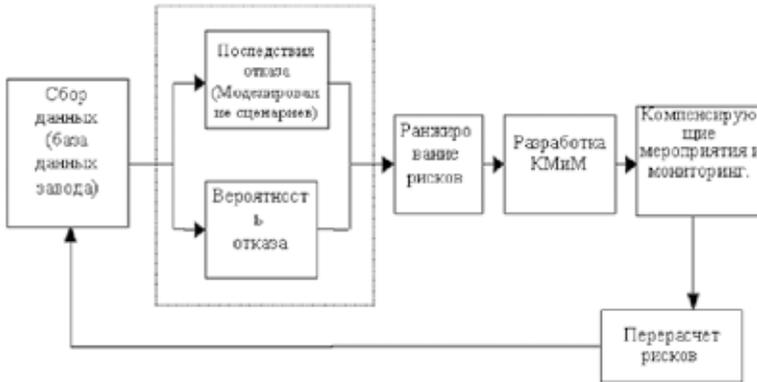


Рис. 5. Блок-схема проведения оценок ИБОР

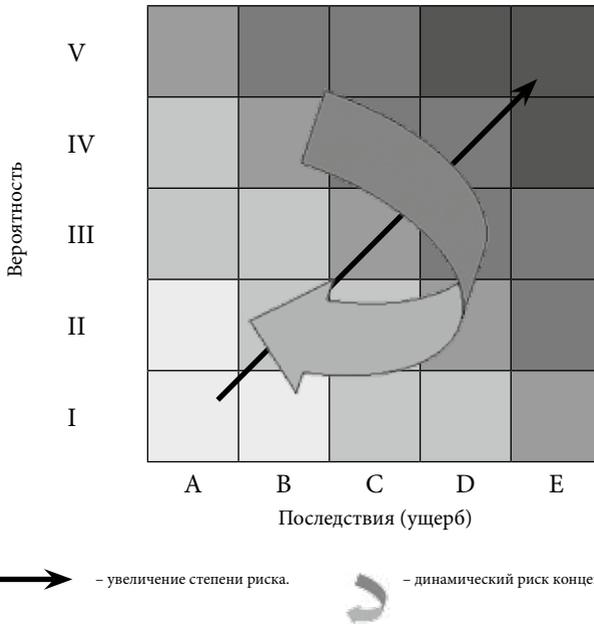


Рис. 6. Динамическая матрица риска ИБОР

Производственно-технологическая система (ПТС) в процессе производства неизбежно порождает негативные события (деградацию технических устройств, ошибки персонала, нарушения технологического процесса). Задача Службы управления промышленной безопасностью (СУПБ) состоит в предотвращении возникновения и опасного развития негативных событий:

1. Нарушения в состоянии и функционировании элементов ПТС и СУПБ увеличивают риск эксплуатации ОПО.
2. Для предприятия, эксплуатирующего ОПО, совокупность вероятных сценариев развития негативных событий и их исходов образует дискретное конечное множество.
3. В наиболее неблагоприятном случае развитие негативных событий при эксплуатации ПТС происходит поэтапно, в следующей последовательности (см. рис. 1):
 - I. Деградация, развитие скрытых дефектов в технических устройствах, ошибки персонала при эксплуатации, техническом обслуживании, ремонтах, вмешательство посторонних лиц и др.
 - II. Отказы оборудования, нештатные ситуации, инциденты.
 - III. Возникновение аварий, проявление поражающих факторов.
 - IV. Развитие аварии.
 - V. Нарастание ущерба от аварии.
4. Развитие негативных событий может достигнуть любого этапа только после прохождения его через предыдущие этапы.
5. Отмеченное положение в большей степени отражает причинно-следственные связи, логику в развитии событий, чем хронологическую последовательность. Так, начало этапов III, IV, V может быть разделено секундами, а дальнейшее их осуществление протекать параллельно.
6. Развитие любого негативного события при его переходе на каждый следующий этап сопровождается существенным возрастанием потерь (издержек).
7. В СУПБ должно быть предусмотрено эшелонирование защиты от возникновения и развития негативных событий посредством создания следующих уровней защиты (барьеров) на границах между указанными этапами развития негативных событий:

I-й уровень защиты. Система правил, норм, регламентов, организационных и технических решений, мероприятий, направленных на обеспечение безотказной эксплуатации ПТС, предупреждение отказов оборудования, нештатных ситуаций и инцидентов:

- предупреждение, выявление деградации технических устройств и развития скрытых дефектов, контроль и поддержание оборудования в удовлетворительном техническом состоянии;
- предотвращение ошибок персонала при эксплуатации, техническом обслуживании, ремонте оборудования; обеспечение необходимой квалификации персонала и дисциплины труда, охраны опасных объектов.

Функция I-го уровня защиты – предотвращение отказов оборудования, нештатных ситуаций, террористических актов и инцидентов. Поток негативных событий на этом уровне связан преимущественно с деградацией оборудования, неквалифицированными действиями персонала, нарушениями технологической дисциплины, внешними причинами. Затраты по поддержанию I-го уровня защиты состоят из затрат на ремонт, замену изношенного оборудования, проведение технических освиде-

тельствований, экспертиз промышленной безопасности, повышение квалификации персонала, охрану территории ОПО и др.

Особенностью данного уровня защиты СУПБ является непрерывный режим его работы, обусловленный соответствующим характером потока негативных событий.

II-й уровень защиты. Система правил, норм, регламентов, организационных и технических решений, мероприятий, направленных на предупреждение возникновения аварийных ситуаций на уровне «А» при отказах оборудования, нештатных ситуациях и инцидентах.

Функция данного уровня – предотвращение аварий и проявления опасных факторов. Поток негативных событий для данного уровня состоит из отказов, нештатных ситуаций, инцидентов, возникающих в результате сбоев первого уровня защиты. Потери от одного среднестатистического негативного события на этом уровне существенно возрастают из-за внеплановых простоев технических устройств и затрат на ликвидацию инцидентов.

III-й уровень защиты. Система правил, норм, регламентов, организационных и технических решений, мероприятий, направленных на локализацию аварий и предупреждение аварийных ситуаций на уровне «Б».

Функция данного уровня – предотвращение развития аварий и распространения опасных факторов за пределы технологического блока (установки), на которых они возникли. Поток негативных событий для данного уровня состоит из аварий, возникающих в результате сбоев II-го уровня защиты. Потери от одного среднестатистического негативного события на этом уровне существенно возрастают из-за разрушений технических устройств, зданий, сооружений и увеличенного времени простоев технологического оборудования.

К этому уровню следует относить элементы СУПБ, определяющие мероприятия непосредственно в пределах зоны возникновения аварии, содержание и порядок управления находящимися там объектами и персоналом.

IV-й уровень защиты. Система правил, норм, регламентов, организационных и технических решений, мероприятий, направленных на предупреждение аварийных ситуаций на уровне «В».

Функция данного уровня – предотвращение нарастания ущербов от аварий и распространения опасных факторов. Поток негативных событий для данного уровня состоит из развивающихся, нелокализованных аварий, происходящих в результате сбоев III-го уровня защиты. Потери от одного среднестатистического негативного события на этом уровне существенно возрастают из-за увеличения размеров зон действия поражающих факторов, масштабов разрушений и других последствий.

К этому уровню следует относить элементы СУПБ, определяющие мероприятия за пределами зоны возникновения аварии, содержание и порядок управления объектами и персоналом, которые могут подвергнуться опасности в связи с возможным развитием аварии за границу зоны ее возникновения.

I-й уровень защиты образует часть СУПБ, осуществляющую снижение вероятности (частоты) инцидентов.

II-й уровень защиты образует часть СУПБ, осуществляющую снижение ущерба от инцидентов и вероятности (частоты) аварийных ситуаций уровня «А».

Следующие два уровня образуют часть СУПБ, осуществляющую снижение размера ущерба от аварий уровней «Б» и «В».

Вероятность (частота) отказа уровня защиты равна вероятности (частоте) события, состоящего в отказе одного из множества элементов, составляющих этот уровень.

Вероятность (относительная частота) последовательного отказа нескольких уровней подряд при развитии одной цепи событий равна произведению вероятностей (относительных частот) отказа этих уровней.

При прохождении через каждый уровень защиты поток негативных событий сокращается пропорционально относительной частоте отказов данного уровня.

Из рис. 7 видно, что при увеличении ремонтного цикла потребуется внедрение специальных мероприятий: дополнительных технических мероприятий на I-м уровне защиты и дополнительных организационных мероприятий на II-м уровне защиты.

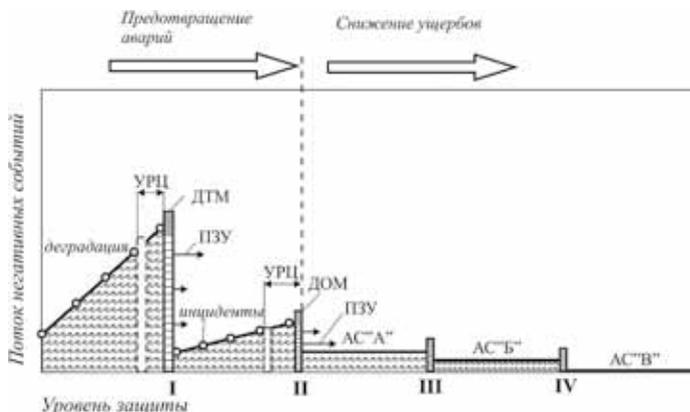


Рис. 7. Обеспечение адекватной защиты от потока негативных событий

ДТМ – дополнительные технические мероприятия.

ДОМ – дополнительные организационные мероприятия.

АС «А» – аварийная ситуация на уровне «А» по РД 09-536 «Методические указания о порядке разработки плана локализации и ликвидации аварийных ситуаций (ПЛАС) на химико-технологических объектах»¹.

1 На уровне «А» аварийная ситуация характеризуется развитием в пределах одного блока объекта (цеха, установки, производственного участка), являющегося структурным подразделением организации;

на уровне «Б» аварийная ситуация характеризуется переходом за пределы одного блока объекта (цеха, установки, производственного участка) и развитием ее в пределах организации;

на уровне «В» аварийная ситуация характеризуется развитием и выходом за пределы территории организации, возможностью воздействия поражающих факторов на население близлежащих населенных пунктов и другие организации (объекты), а также окружающую среду.

АС «Б» – аварийная ситуация на уровне «Б».

АС «В» – аварийная ситуация на уровне «В».

УРЦ – увеличение ремонтного цикла (с 2-х до 5-ти лет).

ПЗУ – пробой защитного уровня.

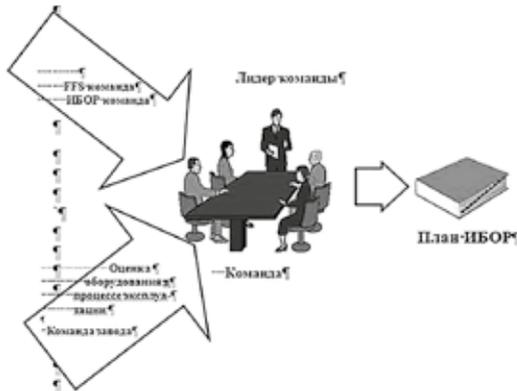


Рис. 8. Интегрированная Фитнес-команда

Общие требования к составу Фитнес-команды:

1. Лидер команды.

Должен принимать участие на всех этапах работы ИБОР.

Отвечает за:

- правильность сбора данных;
- корректность сделанных допущений и их документирование;
- подбор персонала;
- корректность всех выполненных оценок;
- подготовку отчета о работе Фитнес-команды;
- состав и содержание «Комплекса мероприятий по техническому освидетельствованию, ремонту и диагностике, обеспечивающих оптимизацию рисков на опасных производственных объектах»;
- структуру и содержание авторского надзора за выполнением мероприятий.

2. Супервайзер команды.

Должен принимать участие на всех этапах работы ИБОР.

Отвечает за:

- координацию работ и контроль исполнения;
- отсутствие срывов в плане-графике выполнения работ;
- привлечение (при необходимости) субподрядчиков;
- исключение работников из команды и привлечение дополнительных специалистов.

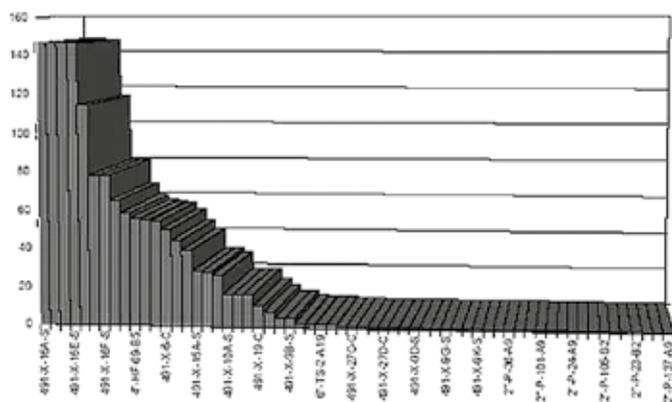
3. Персонал команды (специалисты по обследованию оборудования, металловеды, прочнисты, коррозионисты, специалисты по процессам и аппаратам, специалисты по оценке рисков, менеджмент Заказчика, службы безопасности, персонал технологических установок).

Работники группы 3 могут быть использованы эпизодически в качестве консультантов.

Результаты ИБОР и ранжирование оборудования по рискам

Результатом проведения ИБОР является:

- ранжирование технологических установок (технологических блоков) и отдельных единиц оборудования по эксплуатационным рискам;
- назначение объема, методов и периодичности работ по контролю технического состояния и ремонту оборудования в зависимости от риска его эксплуатации;
- разработка компенсирующих мероприятий и мониторинга, обеспечивающих бесперебойную, безопасную, безаварийную эксплуатацию оборудования в межремонтный период.



Состав комплекса СТО IU2-2011 Инспекция на базе оценки риска:

1. СТО IU2.01-2011 Основные положения, определение терминов, обозначения и сокращения.
2. СТО IU2.02-2011 Методическое руководство по проведению Инспекции на базе оценки риска.
3. СТО IU2.03-2011 Идентификация, приоритезация и управление рисками, оценка эффективности и результативности затрат на обеспечение промышленной безопасности объектов с отступлениями от правил и норм промышленной безопасности в химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности.
4. СТО IU2.04-2012 Моделирование сценариев и оценка риска эксплуатации технологического оборудования с вынужденными отступлениями от норм и правил промышленной безопасности.

Состав комплекса СТО IU1-2011 Мониторинг технического состояния технологического оборудования в химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности:

1. СТО IU1.01-2011 Основные положения, определение терминов, обозначения и сокращения. Методические основы разработки.
2. СТО IU1.02-2011 Механизмы повреждения технологического оборудования в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности.
3. СТО IU1.03-2011 Методическое пособие по определению доминирующих механизмов повреждения.
4. СТО IU1.04-2011 Алгоритм выбора методов и средств мониторинга повреждений технологического оборудования.

Состав комплекса СТО IU3-2012 Технический аудит организационно-технической готовности технологических установок нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий к переводу на увеличенные межремонтные пробеги.

Состав комплекса СТО IU4-2012 Оценка пригодности к эксплуатации оборудования с учетом типов дефектов и действующих механизмов повреждения:

1. СТО IU4.01-2012 Основные положения, определение терминов, обозначения и сокращения.
2. СТО IU4.02-2012 Методология и структура комплекса стандартов СТО IU4-2012.
3. СТО IU4.03-2012 Оценка пригодности к эксплуатации оборудования после пожара.
4. СТО IU4.04-2012 Оценка пригодности к эксплуатации оборудования при общем коррозионном/эрозионном износе.
5. СТО IU4.05-2012 Оценка пригодности к эксплуатации оборудования с локальными потерями металла.
6. СТО IU4.06-2012 Оценка пригодности к эксплуатации оборудования при питтинговой коррозии.

7. СТО ИУ4.07-2012 Оценка пригодности к эксплуатации оборудования, подверженного сероводородной коррозии.
8. СТО ИУ4.08-2012 Оценка пригодности к эксплуатации оборудования с местными нарушениями геометрической формы.
9. СТО ИУ4.09-2012 Оценка пригодности к эксплуатации оборудования с трещиноподобными дефектами.
10. СТО ИУ4.10-2012 Оценка пригодности к эксплуатации оборудования, эксплуатирующегося в условиях ползучести.
11. СТО ИУ4.11-2012 Оценка пригодности к эксплуатации оборудования с расслоениями металла.

Выводы:

1. Проведен анализ концепций обеспечения промышленной безопасности опасных производственных объектов.
2. Показана, что современная концепция обеспечения безопасности, основанная на Анализе и Мониторинге Риска, может быть адекватно реализована на основе методологии Инспекции на базе оценки риска – ИБОР (Risk-Based Inspection – RBI).
3. Дано описание комплекса стандартов ООО «ИНТЕРЮНИС», последовательно реализующих процедуры ИБОР:
 - Руководство по проведению Инспекции на базе оценки риска.
 - Механизмы повреждения технологического оборудования в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности.
 - Оценка пригодности к эксплуатации оборудования с учетом типов дефектов и действующих механизмов повреждения.

ОЦЕНКА РИСКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА

*В.Н. Костюков, А.П. Науменко, Ан.В. Костюков,
Научно-производственный центр «Динамика», г. Омск*

Современная эксплуатация оборудования объектов производственно-транспортного комплекса (ОПТК) немыслима без использования специальных систем мониторинга технического состояния. В настоящее время объекты производственно-транспортного комплекса (ОПТК) различают по степени влияния на безопасность, экономику и экологию страны: объекты технического регулирования (ОТР), опасные производственные объекты (ОПО), критически важные объекты (КВО), стратегически важные объекты (СВО) [1, 2]. Понятно, что для мониторинга технического состояния этих объектов должны использоваться системы различных классов. Принципы построения систем мониторинга изложены в [3, 4] и отражены в стандартах [10-15]. Системы мониторинга (СМ) должны обеспечивать получение информации о состоянии оборудования (объекта мониторинга) в необходимом количестве и качестве для обеспечения наблюдаемости его технического состояния. По результатам наблюдения СМ должны заблаговременно вырабатывать управляющие воздействия, которые обеспечивают необходимый запас устойчивости технологической системы, качество ее функционирования, создают необходимый запас ее техногенной, экологической и экономической безопасности [17]. Такие системы составляют основу автоматизированных систем управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатацией оборудования в реальном времени в рамках всего предприятия – АСУБЭР [3].

Для реализации автоматизированных систем управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатацией оборудования необходимо построение СМ с использованием ряда принципов и следующих наиболее важных свойств и характеристик [11, 13]:

1. Количество и вид используемых методов неразрушающего контроля (МНК).
2. Тип экспертной системы.
3. Объем выявляемых неисправностей.
4. Величина статической ошибки распознавания состояния оборудования.
5. Величина динамической ошибки распознавания состояния оборудования.
6. Величина риска пропуска внезапного отказа.
7. Число измерительных каналов системы.
8. Способ опроса датчиков.
9. Архитектура системы.
10. Тип используемого анализатора сигналов.
11. Тип индикатора состояния.
12. Наличие и уровень диагностической сети.
13. Тип управления.

Эти факторы положены в основу классификации систем, предлагаемых производителями для внедрения на критических ОПТК, с целью определения классов оборудо-

дования на которых они могут быть полезны. Совокупность этих взаимосвязанных факторов, определяет суть каждой конкретной системы и не допускает произвольных вариаций. Внутри каждого фактора выделяется несколько уровней, оцениваемых в баллах от 2 до 4 (табл. 1).

По количеству и виду используемых МНК различают комплексные системы, использующие набор различных МНК – $R_1=1$, и специализированные системы, использующие один из МНК – $R_1=2$.

По типу экспертной системы различают: системы поддержки принятия решений (ЭСППР) – $R_2=1$; диагностические (ЭСД) – $R_2=2$; системы индикации состояния (СИС) – $R_2=3$. Системы индикации состояния осуществляют только определение технического состояния объекта, без указаний на вид неисправности. Диагностические системы наряду с определением технического состояния должны определять одну или несколько причин (вид) неисправного состояния объекта. Экспертные системы поддержки принятия решений включают свойства диагностических систем и должны автоматически выдавать целеуказующие предписания персоналу для предотвращения опасного состояния объекта и приведения его в нормальное состояние.

По объему выявляемых неисправностей различают: системы широкого класса [5], выявляющие неисправности различных узлов агрегата, а также неисправности в его работе по технологической схеме установки – $R_3=1$; системы узкого класса, выявляющие неисправности только одного узла агрегата – $R_3=2$, например подшипника.

Статическая ошибка распознавания есть пропуск своевременного распознавания опасного состояния оборудования, вызванный тем, что неисправное состояние оборудования система воспринимает (диагностирует) как исправное. По вероятности ошибки статического распознавания различают: системы низкой ошибки ($< 5\%$) – $R_4=1$; системы средней ошибки ($5...30\%$) – $R_4=2$; системы высокой ошибки ($> 30\%$) – $R_4=3$.

Классификация по динамической ошибке распознавания аналогична классификации по статической ошибке, но здесь под ошибкой понимают пропуск своевременного распознавания опасного состояния оборудования, вызванный тем, что период мониторинга (диагностирования) соизмерим с интервалом развития неисправности от момента ее обнаружения до предельного состояния оборудования. Период мониторинга может достигать нескольких секунд у стационарных систем и нескольких дней и даже лет у переносных систем. Следует отметить, что быстродействие систем мониторинга должно быть существенно выше скорости развития дефектов защищаемого оборудования. Для оценки общей ошибки систем мониторинга вводится понятие риска пропуска опасного состояния оборудования – совокупность статической, динамической ошибок и ошибки из-за влияния человеческого фактора, обусловленного несвоевременным выполнением персоналом предписаний системы мониторинга по устранению обнаруженного системой опасного состояния оборудования. По величине риска также различают: системы низкой ошибки ($< 5\%$) – $R_6=1$; системы средней ошибки ($5...30\%$) – $R_6=2$; системы высокой ошибки ($> 30\%$) – $R_6=3$. Важными факторами классификации являются параметры архитектуры систем. Здесь устанавливается разделение по числу измерительных каналов системы

[многоканальные ($R_7=1$), одноканальные ($R_7=2$)], по способу опроса датчиков [универсальные параллельно-последовательные ($R_8=1$), параллельные ($R_8=2$), последовательные ($R_8=3$)], по архитектуре [распределенные ($R_9=1$), сосредоточенные ($R_9=2$)]. Последовательные системы осуществляют поочередное измерение сигналов и их обработку. Последовательные измерения могут проводиться как автоматически, так и человеком-оператором (переносные системы). Параллельные системы осуществляют одновременное измерение сигналов и их последующую обработку. Универсальные (параллельно-последовательные) системы имеют смешанную структуру: устанавливаются группы каналов, внутри группы каналы измеряются последовательно, и затем осуществляется параллельная обработка выходных сигналов групп и/или наоборот. Вся аппаратура сосредоточенной системы (за исключением датчиков) размещается в одном месте. Аппаратура распределенной системы может размещаться непосредственно в близости или на объекте мониторинга.

По типу используемого анализатора сигналов различают векторные ($R_{10}=1$) и скалярные ($R_{10}=2$) системы. В скалярных системах результатом работы анализатора сигналов являются скалярные числа (общий уровень вибрации, температура и т.д.). Векторные системы в результате обработки информации наряду со скалярными значениями должны выдавать одномерные и многомерные массивы, производить спектральную, корреляционную и др. математическую обработку.

По типу индикатора состояния объекта мониторинга различают комплексные ($R_{11}=1$), многоуровневые ($R_{11}=2$) и простые ($R_{11}=3$) системы. Простые индикаторы состояния имеют только функцию отображения состояния объекта. Многоуровневые индикаторы состояния наряду с отображением состояния объекта должны иметь функции отображения состояний и параметров различных его составных частей. Комплексные индикаторы состояния включают в себя функции многоуровневых индикаторов и должны отображать: даты пуска/останова систем и агрегатов, их наработки, прогноз остаточного ресурса, а также выводят информацию по следующим каналам: звуковой вывод, печать протоколов, передача данных по сети (публикация на Web-сервере).

По наличию и уровню диагностической сети различают следующие группы систем: автоматическая диагностическая сеть ($R_{12}=1$); ручная диагностическая сеть, интегрированная с переносными системами ($R_{12}=2$); ручная диагностическая сеть ($R_{12}=3$); отсутствие диагностической сети ($R_{12}=4$). Автоматическая диагностическая сеть должна обеспечивать автоматическое представление на компьютерах удаленных пользователей полной информации о состоянии оборудования при одном обращении к сети, полученной как автоматическими стационарными системами, так и переносными (персональными) системами.

По типу управления системы разделяются на автоматические ($R_{13}=1$), автоматизированные ($R_{13}=2$) и ручные ($R_{13}=3$). Ручные системы выполняют большинство функций мониторинга под управлением человека-оператора. Автоматизированные системы должны выполнять основные функции мониторинга автоматически, а вспомогательные – под управлением человека-оператора. Автоматические системы мониторинга должны выполнять все функции мониторинга автоматически. Человек в

автоматических системах может использоваться как звено управления для выдачи управляющих воздействий на объект.

Класс системы определяют по выражению:

$$K = \text{int}(1 + \log_A(\prod R_i)), \quad (1)$$

где K – комплексный показатель, определяющий класс системы;

$\prod R_i$ – произведение баллов, соответствующих свойствам системы;

int – целая часть числа;

A – основание логарифма, определяется критичностью ОПТК, например для ОТР и ОПО $A=10$ [11]; для КВО предлагается $A=3$ или $A=e$ ($e = 2,718\dots$ основание натуральных логарифмов), для СВО рекомендуется $A=2$. В этом случае уже при величине произведения $\prod R_i$ равном 3 или 2, класс СМ равен 2.

Кстати, в [18] основание логарифма не указано именно из соображений последующей классификации систем для разных категорий ответственности объектов.

В таблице 1 приведены примеры расчета класса систем для различных конфигураций аппаратных и программных средств. Уменьшение основания A логарифма до 3 и далее до 2 существенно повышает требования к СМ, разрешая применять для СВО системы с наилучшими параметрами, для которых все показатели равны единице.

Для каждого класса системы устанавливаются границы применения при оснащении ОПТК [11, 13] в соответствии с риском пропуска отказов. Классификация оборудования основана на матрице риска [6, 10], учитывающей вероятность возникновения отказа и его экономические, экологические и техногенные последствия.

Таблица 1

Примеры расчета класса систем

№	Вид классификации	Параметры классификации	Номер системы						
			1	2	3	4	5	6	7
1	По количеству и виду МНК	Комплексные, специализированные (1, 2)	1	1	1	1	1	1	2
2	По типу экспертной системы	ЭСППР, ЭСД, СИС (1, 2, 3)	1	1	1	1	2	2	3
3	По объему неисправностей	Широкого класса, узкого (1, 2)	1	1	1	1	2	2	2
4	По статической ошибке	Низкой, средней, высокой (1, 2, 3)	1	1	1	1	1	1	1
5	По динамической ошибке	Низкой, средней, высокой (1, 2, 3)	1	1	1	1	1	2	3
6	По риску пропуска внезапного отказа	Низкий, средний, высокий (1, 2, 3)	1	2	3	2	2	3	3
7	По числу измерительных каналов	Многоканальные, одноканальные (1, 2)	1	1	1	1	1	1	2
8	По способу опроса датчиков	Универсальные, параллельные, последовательные (1, 2, 3)	1	1	1	1	1	2	3

9	По архитектуре	Распределенные, сосредоточенные (1, 2)	1	1	1	1	1	1	2
10	По типу анализатора сигналов	Векторный, скалярный (1, 2)	1	1	1	1	1	1	1
11	По типу индикатора состояния	Комплексные, многоуровневые, простые (1, 2, 3)	1	1	1	1	2	2	1
12	По наличию диагностической сети	Автоматические, ручные, нет (1, 2, 3, 4)	1	1	1	2	2	2	1
13	По типу управления	Автоматические, автоматизированные, ручные (1, 2, 3)	1	1	1	1	1	2	2
14		Произведение ПР _i	1	2	3	4	32	384	2592
15	ОТР	Log ₁₀ (ПР _i)=Lg(ПР _i)	0	0,3	0,5	0,6	1,5	2,6	3,4
16		Класс (K)	1	1	1	1	2	3	4
17	ОПО	Log ₆ (ПР _i)=Lg(ПР _i)/0,77	0	0,4	0,6	0,8	1,9	3,4	4,4
18		Класс (K)	1	1	1	1	2	4	5
19	КВО	Ln(ПР _i)= Lg(ПР _i)/0,43	0	0,7	1,1	1,4	3,5	5,6	7,9
20		Класс (K)	1	1	2	2	4	6	8
21	СВО	Log ₃ (ПР _i)= Lg(ПР _i)/0,3	0	1	1,6	2	5	8,6	11
22		Класс (K)	1	2	2	3	6	9	12

Системы мониторинга 1 класса применяются для комплексного мониторинга всей технологической установки, включая объекты первой, второй и третьей категорий с возможностью автоматической блокировки опасных агрегатов и обеспечивают безопасную ресурсосберегающую эксплуатацию оборудования по фактическому техническому состоянию.

Системы 2 класса применяются для мониторинга оборудования второй и третьей категорий с возможностью автоматической блокировки опасных агрегатов и обеспечивают безопасную ресурсосберегающую эксплуатацию оборудования по фактическому техническому состоянию.

Системы 3 класса применяются для мониторинга оборудования третьей категории по фактическому техническому состоянию.

Системы 4-го и более низких классов носят вспомогательный характер.

Зависимость коэффициента увеличения временного интервала $k_T = T_r/T_Q$ между внезапными необнаруженными отказами агрегатов при внедрении СМ – T_r и до внедрения СМ – T_Q от суммарной ошибки СМ η определяется по формуле [4, 7]:

$$k_T = \frac{1}{\eta - 1}. \quad (2)$$

Например, для $\eta = 4\%$ коэффициент увеличения наработки между внезапными необнаруженными отказами агрегатов $k_T = 24$ раза, что объясняет существенное увеличение техногенной, экономической и экологической безопасности при внедрении систем мониторинга. Даже при суммарной ошибке мониторинга в 30% выигрыш составляет не менее двух раз.

Наиболее сложной проблемой, как показывает практика, является уменьшение риска пропуска опасного состояния оборудования r , представляющего собой совокупность ошибок СДМ – η и человеческого фактора (ЧФ) h . В свою очередь ошибка СМ η является суммой статической S , динамической d ошибок:

$$r = 1 - (1 - S)(1 - d)(1 - h), \quad (3)$$

а приближенная оценка при $(S, r, h) < 0,1$ может быть получена по формулам:

$$\eta \cong S + d, \quad r \cong \eta + h \cong S + d + h. \quad (3.1)$$

Надо отметить, что ошибка из-за влияния ЧФ аналогична динамической ошибке, поскольку увеличивает интервал запаздывания адекватной реакции персонала на предупреждения СМ. Опасное состояние оборудования может быть предотвращено персоналом, если предупреждения СДМ доводятся неукоснительно, без задержек, независимо от его воли и желаний, а иногда, если необходимо, то и принудительно через управляющее воздействие руководителя более высокого уровня управления. Именно для этого СДМ должны содержать встроенную автоматическую экспертную систему поддержки принятия решений о техническом состоянии объекта и дальнейшем управлении ($R_2=1$), выявлять широкий класс неисправностей ($R_3=1$), быть автоматическими ($R_{13}=1$), обладать комплексным индикатором состояния с речевым предупреждением ($R_{11}=1$) и автоматической диагностической сетью ($R_{12}=1$), представляющей руководству объективную картину технического состояния оборудования в реальном времени. Без выполнения этих условий иметь приемлемый риск ($r < 5\%$) невозможно. На уменьшение ошибок пропуска отказов направлены и другие показатели классификации. При синтезе любой системы мониторинга для распознавания технического состояния объекта важнейшим является выбор показателя, достижение которым некоторого критического значения позволяет считать, что объект перешел из одного состояния в другое. При этом не важно, что это за показатель (диагностический признак) – векторный или скалярный, измеряемый в каких-либо шкалах или вычисляемый, непрерывный или дискретный, оцениваемый экспертами в баллах и т.п. Важно, достигает он или нет критического значения [19]. Так обстоит дело в случае статического распознавания, характеризующегося статической ошибкой S – вероятностью пропуска опасного состояния объекта, когда фактор времени не является существенным. Иначе обстоит дело, когда осуществляют мониторинг состояния объекта, которое меняется во времени. В этом случае наличие статической ошибки распознавания приводит к неопределенности определения момента перехода объекта в неблагоприятное состояние, которая добавляется к неопределенности, обусловленной дискретным характером наблюдения (мониторинга), называемой ошибкой динамического распознавания d . Соответственно, увеличивается и риск пропуска опасного состояния r .

Вероятность ошибки динамического распознавания опасного состояния оборудования (динамическая ошибка) определяется вероятностью своевременного по-

крытия интервалом мониторинга τ моментов наступления состояний «Требуется принять меры» t_T и «Недопустимо» t_H на интервале развития неисправности T_H и равно отношению интервала мониторинга τ к интервалу развития неисправности T_H [18]: $d = \tau/T_H$. Наличие статической ошибки s приводит к запаздыванию момента обнаружения состояния ТПМ на интервал $\tau_T = tT_S - t_T$, а состояния НДП на интервал $\tau_H = t_{HS} - t_H$. Фактически динамическая ошибка d увеличивается на величину запаздывания, вызванную наличием статической ошибки – d_s . При наличии статической ошибки S динамическая ошибка резко возрастает вследствие запаздывания момента времени правильного распознавания состояния ТПМ t_{TS} и НДП t_{HS} на интервалы τ_T и τ_H соответственно:

$$d_O = d + d_S; \quad d_S = d_{ST} + d_{SH}; \quad d_{ST} = \frac{\tau_T}{T_H}; \quad d_{SH} = \frac{\tau_H}{T_H} \quad (4)$$

Рассмотрим два примера наиболее типичных трендов (траекторий деградации состояния) [4].

Можно показать, что для линейной траектории деградации технического состояния $Y = k \times t$ динамические ошибки определяются выражениями:

$$d_{STL} = \frac{S}{1-S} \times \frac{1}{G-1}; \quad d_{SHL} = \frac{S}{1-S} \times \frac{G}{G-1}, \quad d_{SL} = \frac{S}{1-S} \times \frac{G+1}{G-1}, \quad (5)$$

где S – вероятность ошибки статического распознавания, G – отношение уровня диагностического признака «Останов» при достижении состояния «Недопустимо» (НДП) к уровню диагностического признака «Предупреждение» при достижении состояния «Требуется принять меры» (ТПМ), d_{STL} – увеличение динамической ошибки определения состояния ТПМ при линейном тренде, d_{SHL} – увеличение динамической ошибки определения состояния НДП при линейном тренде, d_{SL} – увеличение суммарной динамической ошибки при линейном тренде.

Выражения (5) показывают, что при линейном тренде деградации состояния объекта увеличение динамической ошибки определения состояния НДП в G раз больше, чем увеличение динамической ошибки определения состояния ТПМ:

$$d_{SHL} = G \times d_{STL}. \quad (6)$$

Для трендов экспоненциального типа $Y = A \times \exp(\alpha \times t)$, $Y' = \alpha \times A \times \exp(\alpha \times t)$. Увеличение динамической ошибки определения состояния ТПМ d_{STE} и НДП d_{SHE} оказываются равны между собой d_{SHE} :

$$d_{STE} = d_{SHE} = d_{STE} = \frac{S}{1-S} \times \frac{\sqrt{G}}{G-1}. \quad (7)$$

Увеличение суммарной динамической ошибки при экспоненциальном тренде d_{SE} :

$$d_{SE} = \frac{S}{1-S} \times \frac{2\sqrt{G}}{G-1} \quad (8)$$

В таблице 2 приведены значения дополнительных динамических погрешностей для линейных и экспоненциальных трендов при крайних значениях $G=1,25$ и $2,5$, наиболее часто встречающихся в стандартах [8, 9, 12, 14] в процентах от интервала развития неисправностей T_H от состояния ТПМ до состояния НДП. При $G=1,25$ дополнительная динамическая ошибка d_s более чем в 9 раз превышает статическую.

Таблица 2

Значения дополнительных динамических погрешностей для линейных и экспоненциальных трендов при крайних значениях G в процентах от интервала T_H развития неисправностей от состояния ТПМ до состояния НДП

Статическая ошибка, S, %	1		4		6		10	
	1,25	2,5	1,25	2,5	1,25	2,5	1,25	2,5
Экспоненциальный тренд, дополнительная динамическая ошибка оценки момента НДП, d_{SHE} , %	4,5	1,1	18,6	4,4	28,6	6,7	49,7	11,6
Линейный тренд, дополнительная динамическая ошибка оценки момента НДП, d_{SHL} , %	5	1,65	20,8	6,9	31,9	10,6	55	18,3
Экспоненциальный тренд, общая дополнительная динамическая ошибка, d_{SE} , %	8,9	2,1	37,2	8,8	57,1	13,5	98,4	23,2
Линейный тренд, общая дополнительная динамическая ошибка, d_{SL} , %	8,9	2,3	37,5	9,7	57,5	14,9	99	25,7

Наиболее сильно статическая ошибка распознавания увеличивает дополнительную динамическую ошибку при минимальном коэффициенте $G=Y_H/Y=1,25$ для линейного тренда d_{SHL} . Уже при статической ошибке $S=1\%$ (уровень фактора $R_4=1$) дополнительная динамическая ошибка оценки состояния НДП $d_{SHL}>5\%$. Учитывая выражение для риска пропуска опасного состояния (3) последний также оказывается заведомо больше 5%. То есть по этим факторам: $R_5 \geq 2$ и $R_6 \geq 2$ $PR_i \geq 4$ при прочих факторах, равных 1, и класс СМ для ОПО равен 1, для КВО – 2, а для СВО – 3. Если $S=6\%$ ($R_4=2$), общая динамическая ошибка для трендов обоих типов при $G=1,25$ превышает 30%. Учитывая выражение для риска пропуска опасного состояния (3), последний также оказывается заведомо больше 30%. То есть по этим факторам: $R_4=2$, $R_5=3$ и $R_6=3$ $PR_i \geq 18$ и класс СМ для ОПО равен 2, для КВО – 3, а для СВО – 5. Такую СДМ мож-

но применять для оборудования 2-й категории ОПО и не рекомендуется применять для оборудования КВО и СВО!

Результаты приведенного исследования позволили:

- установить существенное влияние ошибки статического распознавания на величину ошибки динамического распознавания и риск пропуска отказа системой мониторинга;
- получить уравнение связи между статической и динамической ошибками, инвариантное к природе рассматриваемых процессов и диагностических признаков;
- получить численные оценки увеличения динамической ошибки для линейных и экспоненциальных трендов деградации технического состояния объектов, инвариантных к их природе;
- повысить точность оценки класса СМ для ОПТК и модернизировать критерий классификации СМ применительно к КВО и СВО;
- показать пути совершенствования СМ для объектов разной степени ответственности на основе модернизированного критерия классификации;
- показать, что внедрение СДМ целесообразно даже при большом риске пропуска отказа, так, при $r \leq 30\%$ увеличение времени безаварийной работы ОПО составляет не менее 2 раз.

Библиографический список

1. Махутов Н.А., Гаденин М.М. Нормирование параметров прочности и риска в обеспечении техногенной безопасности // Химическая техника. – 2011. – № 1. – С. 12-13.
2. Костюков В.Н. Мониторинг состояния и рисков эксплуатации оборудования в реальном времени – основа промышленной безопасности // В.Н. Костюков, Н.А. Махутов, А.В. Костюков. В сб.: Федеральный справочник: т. 26. – М.: НП «Центр стратегического партнерства», 2012. – 496 с.
3. Костюков В.Н., Бойченко С.Н., Костюков А.В. Автоматизированные системы управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатацией оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств (АСУ БЭР КОМПАКС®). – М.: Машиностроение. 1999. – 163 с.
4. Костюков В.Н. Мониторинг безопасности производства. – М.: Машиностроение. 2002. – 224 с.
5. Костюков В.Н., Науменко А.П. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин: учебное пособие. Рекомендовано УМО вузов РФ по образованию в области приборостроения для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки 2001100 – «Приборостроение». – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. – 360 с.
6. Костюков А.В., Костюков В.Н. Повышение операционной эффективности предприятий на основе мониторинга в реальном времени. – М.: Машиностроение, 2009. – 192 с.
7. Костюков В.Н., Костюков Ал.В., Костюков Ан.В. Повышение эффективности производства на основе внедрения автоматических систем диагностики и мониторинга состояния машин КОМПАКС // Химическая техника. – 2002. – № 2. – С. 16-22.
8. ГОСТ Р ИСО 10816-1-97. Вибрация. Оценка состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Общие требования.
9. ГОСТ Р ИСО 10816-3-99. Вибрация. Оценка состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Ч. 3. Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт и номинальной скоростью от 120 до 15000 мин-1.

10. ГОСТ Р 53563-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Порядок организации. – М.: СТАНДАРТИНФОРМ. – 2010. – 8 с.
11. ГОСТ Р 53564-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Требования к системам мониторинга. – М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2010. – 20 с.
12. ГОСТ Р 53565-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Вибрация центробежных насосных и компрессорных агрегатов. – М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2010. – 8 с.
13. СА 03-002-05. Системы мониторинга агрегатов опасных производственных объектов. Общие технические требования: стандарт ассоциации «Ростехэкспертиза», ассоциации нефтехимиков и нефтепереработчиков и НПС РИСКОМ / Колл. авт. – М.: Химическая техника, 2005. – 42 с. (Согласован Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору РФ письмом № 11-16/219 от 1 февраля 2005 г.).
14. СА 03-001-05. Центробежные насосные и компрессорные агрегаты опасных производств. Эксплуатационные нормы вибрации: стандарт ассоциации «Ростехэкспертиза», ассоциации нефтехимиков и нефтепереработчиков и НПС РИСКОМ / Колл. авт. – М.: Химическая техника, 2005. – 24 с. (Согласован Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору РФ письмом № 11-16/219 от 1 февраля 2005 г.).
15. СТО-03-002-08. Мониторинг оборудования опасных производств. Порядок организации: сб. стандартов НПС РИСКОМ // Мониторинг оборудования опасных производств. Стандарт организации / Колл. авт. – М., 2008. С. 25-63.
16. СТО 03-003-08. Мониторинг опасных производств. Термины и определения: сб. стандартов НПС РИСКОМ // Мониторинг оборудования опасных производств. Стандарт организации / Колл. авт. М., 2008. С. 5-24.
17. Костюков В.Н. Комплексный мониторинг технологических объектов опасных производств. / В.Н. Костюков, С.Н. Бойченко, А.П. Науменко, Е.В. Тарасов // Контроль и диагностика. – 2008. – № 12. – С. 8-18.
18. Сборник задач по теории вероятностей, математической статистике и теории случайных функций / под ред. А.А. Свешникова. – М.: Наука, 1970. – 656 с.
19. Загоруйко Н.Г. Методы распознавания и их применение. – М.: Советское радио, 1972. – 206 с.

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА И РИСКА НА ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ (ОПО) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСПРЕСС-МЕТОДОВ НК

А.А. Дубов, Ал.А. Дубов,
ООО «Энергодиагностика», г. Москва

Среди основных научно-технических проблем оценки ресурса оборудования следует выделить следующие:

- отсутствие научно-обоснованной концепции технической диагностики и определения ресурса;
- недостаточная эффективность традиционных методов и средств неразрушающего контроля (НК) при ранней диагностике усталостных повреждений и исследовании структурно-механических свойств металла;
- недостаточная эффективность существующих методик поверочного расчета на прочность из-за отсутствия фактических структурно-механических свойств металла по всем элементам и узлам оборудования;
- отсутствие в широкой практике эффективных средств и методов НК, позволяющих выполнить 100-процентное обследование оборудования с целью оценки напряженно-деформированного состояния и индивидуального ресурса каждого узла и агрегата в целом.

Выполнение 100-процентного обследования оборудования с использованием традиционных методов НК (ультразвуковой, магнитный, вихретоковый и др.) связано не только с высоким уровнем затрат, но является малоэффективным из-за их непригодности к выявлению усталостных повреждений на раннем этапе их развития.

Основным параметром, характеризующим состояние металла оборудования, работающего в условиях циклических нагрузок, как правило, предлагается считать трещиностойкость. Необходимо помнить, что это условная характеристика материала, которая определяется отношением текущей (фактической в данное время, в данных условиях) скорости роста трещины к критической скорости для данного материала. Однако определяется эта характеристика на образцах, и перенос результатов лабораторных испытаний на реальные условия эксплуатации не дает объективной оценки работоспособности оборудования.

Можно ли сделать оценку скорости роста трещин и выявить зоны их развития в реальных условиях непосредственно на оборудовании?

Известно, что основная цель 100-процентного обследования – выявить потенциально опасные зоны концентрации напряжений (ЗКН), в которых происходит развитие повреждений из-за коррозии, усталости и ползучести. Именно для решения этой задачи предлагается использовать метод магнитной памяти металла (МПМ), основное назначение которого – выявление ЗКН на основе экспресс-контроля всей поверхности оборудования. При этом никаких подготовительных работ не требуется.

ЗКН – это не только заранее известные области, где особенности конструкции создают различные условия для распределения напряжений, создаваемых внешней рабочей нагрузкой, но и случайно расположенные области, где в силу начальной неоднородности структуры металла в сочетании с нерасчетными дополнительными рабочими нагрузками возникли большие деформации.

В работе [1] рассмотрена физическая сущность усталостной поврежденности металла и предложена модель развития этого процесса, открывающего возможность количественной оценки состояния материала при использовании метода магнитной памяти металла.

Основным диагностическим параметром по методу МПМ является градиент магнитного поля рассеяния H_p (dH_p/dx) или коэффициент интенсивности изменения этого поля ($K_{ин}$), фиксируемого при сканировании датчиком специализированного магнитометра вдоль поверхности оборудования. Установлено, что именно этот диагностический параметр в силу магнитомеханического эффекта напрямую отображает энергетическое состояние поверхностных и глубинных слоев металла в ЗКН. При этом, максимальное значение градиента поля, определяемое на поверхности металла с точностью до миллиметра, соответствует источнику возникновения трещины. В области наиболее интенсивного процесса деформирования и, в конечном итоге, разрушения доменная структура претерпевает значительные изменения. Размеры доменов, направления которых совпадают с направлением скольжения, достигают критических размеров. В итоге домен с максимальным размером «раскалывается» – образуется микротрещина. Именно это состояние металла в ЗКН предлагается считать предельным при контроле оборудования методом МПМ.

В лабораторных исследованиях на образцах при статических и циклических нагрузках было получено энергетическое соотношение между магнитными и механическими параметрами:

$$m = \frac{K_{ин}^{np}}{K_{ин}^{cp}} \cong \left(\frac{\sigma_B}{\sigma_T} \right)^2, \quad (1)$$

где $K_{ин}^{cp}$ и $K_{ин}^{np}$ – значения градиента магнитного поля, фиксируемые в ЗКН на образце, или непосредственно на оборудовании, соответственно при достижении условного предела текучести и условного предела прочности σ_B .

На рис. 1 представлен график изменения градиента поля $K_{ин}$ в зависимости от числа циклов нагрузки при испытании трубного образца $\varnothing 108 \times 4$ мм (сталь 20) на растяжение с максимальной амплитудой напряжений 276 МПа и частотой 10 Гц. Полученный график характеризует четыре фазы усталостного разрушения металла образца в ЗКН, образовавшейся в первые 1000 циклов приложения нагрузки:

I фаза – подготовительная, заключающаяся в перераспределении продольных неоднородностей деформации, выстраивающихся в создавшихся условиях в «удобную» для металла последовательность. Процесс в этой фазе характеризуется сравнительно высокой скоростью и продолжается сравнительно недолго – $1 \div 1,5\%$ от предельного количества циклов;

II фаза – основная накопительная, характеризуется медленным развитием процесса и продолжается сравнительно долго;

III фаза – наблюдается интенсивное развитие пластической деформации, приводящее к возникновению в ЗКН микротрещин (стадия упрочнения перед разрушением);

IV фаза – период развития микротрещины в макротрещину, вплоть до разрушения образца.

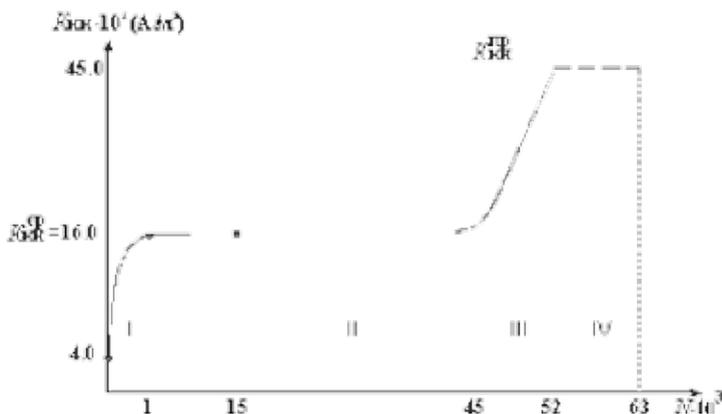


Рис. 1. Изменение градиента поля в ЗКН образца № 6 в зависимости

Представленные результаты экспериментальных исследований на трубчатом образце и результаты исследований, приведенные в работе [2], свидетельствуют о возможности использования метода магнитной памяти металла при оценке ресурса реального оборудования.

Соотношение (1) неоднократно подтверждалось непосредственно на оборудовании при обследовании методом МПМ [3]. В соответствии с результатами расчетных исследований, представленных в работе [1], магнитный параметр $K_{ин}$ характеризует плотность магнитной энергии w_m , обусловленной механической энергией деформации от силового воздействия w_c :

$$K_{ин} \sim W_m \sim W_c, \quad (2)$$

где E – модуль упругости, $W_c = \frac{\sigma \cdot \varepsilon}{2} = \frac{\sigma^2}{2E}$, σ , ε – соответственно, силовая и деформационная составляющие механической энергии.

Из соотношения (2) следует: чем больше силовая энергия w_c расходуется на деформацию (при этом уменьшаясь!), тем больше выделяется магнитной энергии w_m , которая дает увеличение измеряемого магнитного параметра $K_{ин}$.

Сравнивая состояние образца при экспериментальных исследованиях по магнитному параметру $K_{ин}$ при достижении им предела текучести σ_y по отношению к состоянию этого же образца при достижении предела прочности σ_b , получаем:

$$m = \frac{K_{ин}^B}{K_{ин}^T} \approx \left(\frac{\sigma_B}{\sigma_T} \right)^2. \quad (3)$$

Энергетическое соотношение (3), полученное в расчетных исследованиях, подтверждает соотношение (1), полученное в экспериментальных исследованиях. Более подробно на физическом уровне соотношение (3) рассмотрено в работе [4].

Используя полученные соотношения (1) и (3) между магнитными и механическими показателями деформационного упрочнения, предлагается на практике выполнять оценку ресурса оборудования в ЗКН на основании измеренных показателей $K_{ин}$ и фактической наработки данного узла на дату контроля T_{ϕ} .

Если известны предельные значения $K_{ин}^{np}$, соответствующие моменту образования микротрещины в ЗКН для однотипных узлов оборудования (определяется по результатам измерений на практике), фактическое максимальное значение $K_{ин}^{\phi}$, измеренное в ЗКН данного узла, и фактическая наработка данного узла T_{ϕ} на дату контроля, то можно рассчитать предельное время эксплуатации T_{np} этого узла следующим образом:

$$T_{np} = \frac{K_{ин}^{np}}{K_{ин}^{\phi}} \times T_{\phi}, \quad (4)$$

где $K_{ин}^{np}$ известно из лабораторных или промышленных исследований, а если не известно, то $K_{ин}^{np}$ определяется из соотношения (1) на основе измеренного значения $K_{ин}^{cp}$ и известных механических характеристик σ_T и σ_B .

Таким образом, остаточный ресурс контролируемого узла с ЗКН составит:

$$T_{рес} = T_{np} - T_{\phi}. \quad (5)$$

Предлагаемый способ определения предельного состояния металла в ЗКН и оценки ресурса оборудования основан на принятом допущении линейной зависимости во времени процесса накопления пластической деформации и усталости металла.

На момент контроля магнитный параметр $K_{ин}^{\phi}$ характеризует фактическое энергетическое состояние металла в ЗКН. При этом не важно, каким образом (по какой зависимости от параметров нагрузки) было достигнуто данное энергетическое состояние. Металл в ЗКН с течением времени как бы дискретно переходит из одного энергетического состояния в другое. Если нам удастся зафиксировать значения $K_{ин}^{\phi}$ в разные периоды времени (T), то мы получим линейную зависимость $K_{ин}^{\phi} = f(T)$ по фиксированным моментам (точкам) различного энергетического состояния металла в ЗКН. Учитывая, что магнитный параметр $K_{ин}$ отображает изменение остаточной деформации в ЗКН, то, соответственно, в этой зоне справедлив линейный закон суммирования (накопления) пластической деформации (упрочнения).

В настоящее время ООО «Энергодиагностика» в результате большого опыта обследования трубопроводов и различного оборудования располагает количественны-

ми значениями $K_{ин}$, характеризующими предельное состояние металла по условиям прочности и начальное развитие микро- и макротрещин. Разработаны методические указания по оценке ресурса оборудования на основе измеренных параметров магнитной памяти металла. В работе [5] рассмотрены примеры оценки ресурса. Обработка результатов контроля оборудования методом МПМ осуществляется по программе «ММП-Система». Расчетная оценка степени близости металла в ЗКН к предельному состоянию и расчет остаточного ресурса выполняется по программе «МПМ-Ресурс».

На рис. 2 представлена структурная схема определения остаточного ресурса оборудования с использованием метода МПМ. Принципиальным отличием такого подхода к оценке ресурса является выполнение 100-процентного обследования объекта контроля (ОК) с выявлением всех потенциально опасных ЗКН – источников возникновения повреждений при дальнейшей эксплуатации оборудования.

В 2008 г. опубликован ГОСТ Р 53006-2008 «Оценка ресурса потенциально опасных объектов на основе экспресс-методов. Общие требования». Данный стандарт разработан специалистами ООО «Энергодиагностика» и ТК-132 Росстандарта.

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.

Следует отметить, что развитие идеологии метода АЭ с использованием аналогичного энергетического соотношения (3), полученного в методе МПМ, даст возможность качественно изменить статус этого давно известного метода, переведя его из метода дефектоскопии в методы энергодиагностические.

Важным отличием предлагаемого ГОСТ Р 53006 по сравнению с РД 09-102-95, который был разработан ранее по этой теме, является следующее:

- более конкретно определены роль и задачи современных методов технической диагностики – 100-процентное обследование и выявление зон концентрации напряжений (ЗКН), определяющих надежность и остаточный ресурс оборудования и конструкций. Эти задачи отвечают рекомендациям, изложенным в ГОСТ Р 52330-2005 [6];
- в качестве основных критериев предельного состояния металла предлагается использовать фактические энергетические характеристики, которые можно определить методами МПМ, АЭ и тепловым методом;
- учтены требования Ростехнадзора к экспертному обследованию оборудования и Федерального закона «О техническом регулировании»;
- скорректирована структурная схема определения остаточного ресурса с акцентом на современные экспресс-методы технической диагностики;
- 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.

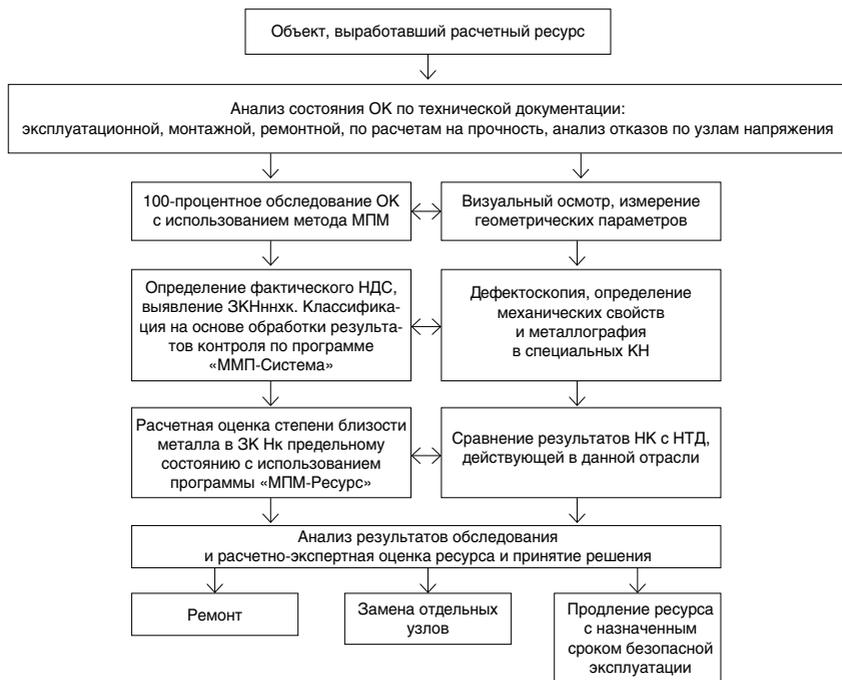


Рис. 2. Структурная схема определения остаточного ресурса оборудования с использованием метода МПМ

При реализации предлагаемого ГОСТ Р 53006-2008 представляется возможным в большинстве случаев без выполнения сложных поверочных расчетов на прочность делать экспертную оценку ресурса на основе комплексного обследования оборудования (рис. 2) и назначать срок безопасной эксплуатации.

На основе рекомендаций предлагаемого стандарта для конкретного оборудования возможна разработка методик оценки риска с учетом спецификации особенностей и требований к ОК, существующих в данной отрасли промышленности. При этом оценка риска становится более конкретной, так как на основе 100-процентного обследования оборудования становятся известными зоны потенциальных повреждений и степень их опасности для развития аварий.

Например, на современной тепловой электростанции (ТЭС) повреждение котельной трубы, расположенной внутри топки котла, приводит к аварийному останову этого котла с простоем в ремонте не более 2-3 суток. Расчет экономического ущерба от аварийного простоя котла в течение 2-3 суток не представляет проблемы, и такая методика расчета имеется на большинстве современных ТЭС. Если же повреждение происходит на паропроводе, соединяющем одновременно несколько энергетических котлов (ТЭС с поперечными связями), то расчет экономического ущерба (оценка риска) представляет уже значительно более сложную задачу, так как повреждение паропровода, как правило, вызывает одновременный аварийный останов сразу не-

скольких котлов ТЭС. В отдельных случаях разрыв паропровода и развитие аварии может привести к останову всей электростанции (посадка ТЭС на «0»). Таким образом, ранняя диагностика зон потенциальных повреждений на ОПО имеет большое значение и при оценке рисков.

Библиографический список

1. Власов В.Т., Дубов А.А. Физические основы метода магнитной памяти металла. – М.: ЗАО «ТИССО», 2004. – 424 с.
2. Махутов Н.А., Дубов А.А., Денисов А.С. Исследование статических и циклических деформаций с использованием метода магнитной памяти металла // Заводская лаборатория. – 2008. – № 3. – С. 42-47.
3. Дубов А.А. Оценка ресурса энергооборудования с использованием метода магнитной памяти металла // Энергетик. – 2006. – № 11.
4. Власов В.Т., Дубов А.А. Физическая теория процесса «деформация-разрушение». – М.: ЗАО «ТИССО», 2007. – 517 с.
5. Дубов А.А., Дубов Ал.Ан., Колокольников С.М. Метод магнитной памяти металла и приборы контроля: учебное пособие. – 5-е издание. – М.: ИД «Спектр», 2012. – 394 с.
6. ГОСТ Р 52330-2005. Контроль неразрушающий. Контроль напряженно-деформированного состояния объектов промышленности и транспорта. Общие требования.

РСМС – ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ ОБОРУДОВАНИЯ НА БАЗЕ ОЦЕНКИ РИСКОВ

В.Р. Ржевкин, А.Б. Самохвалов, ООО «ДИАПАК»

Постоянно ужесточающиеся требования обеспечения безопасной эксплуатации нефтехимических производств заставляют руководство нефтяных компаний совершенствовать технологию производства и систему управления. На российских нефтехимических предприятиях основным звеном, определяющим экономичность технологического процесса и уровень управления производством, является система планово-предупредительного ремонта (ППР), которая в настоящее время вошла в противоречие с современными технологиями и системами управления производством.

Начиная с 80-х гг., создаются, внедряются и совершенствуются методы и программные продукты, способные на базе определенных данных определить текущее техническое состояние оборудования и прогнозировать его безаварийную эксплуатацию на гораздо более длительные периоды, чем предписано текущими правилами, определяющими фиксированные интервалы ППР.

На сегодняшний день наиболее эффективной является Программа, позволяющая определить состояние оборудования и прогнозировать срок его безаварийной эксплуатации на основе оценок риска (методология RBI (Risk Based Inspection)). В общем случае риск является произведением вероятности отказа конкретного оборудования на последствия, которые могут наступить в результате данного отказа. Последствия определяются в денежном эквиваленте как стоимость неполученной продукции плюс затраты на ликвидацию самой аварии и ее последствий. Чтобы оценить возможный риск, Программа рассчитывает множество параметров оборудования, в том числе минимально возможную толщину стенки оборудования при данном режиме работы, скорости коррозии в различных местах оборудования, их статистику, прогнозирует срок вывода из эксплуатации по различным сценариям и на базе результатов этих расчетов помещает каждую единицу оборудования в матрицу риска. В матрице риска все оборудование технологической установки группируется по нескольким уровням риска: каждый уровень, для наглядности, имеет отличительный цвет. На матрице риска проведена заранее определенная линия, которая соответствует предельно возможному риску. Для каждой единицы оборудования риск возрастает со временем, и время достижения значения текущего риска уровня предельного риска дает обязательную дату проведения обследования.

Снизить риск конкретного оборудования можно уменьшением вероятности отказа оборудования.

Программа дает рекомендации, за счет каких мероприятий можно понизить степень риска и насколько; если соответствующие мероприятия будут выполнены и

их результаты введены в Программу, оборудование в матрице риска автоматически перемещается в зону более низкого риска, и время следующего обследования вычисляется заново.

Пользователь имеет возможность составлять планы обследований на основе результатов прошлых обследований.

Таким образом, Программа дает возможность избежать ненужных остановок для исполнения графика ППР и преждевременной ревизии заведомо неповрежденного оборудования, определить самое опасное, с точки зрения возможного разрушения, оборудование, и даже его самые опасные места, что позволяет, в свою очередь, во время обследования инспектировать не все подряд, а только то, что представляет действительную опасность, что значительно сократит объем инспектирования, а следовательно, время простоя и затраты.

На территории РФ внедрением программы PCMS (Plant Condition Management System) занимается ООО ДИАПАК – эксклюзивный представитель группы компаний MISTRAS. В настоящее время эта программа внедрена на одном из заводов ЛУКОЙЛ (есть договоренность о внедрении на остальных 9-и заводах), проводится внедрение на Московском нефтеперерабатывающем заводе (ГазпромНефть).

III

**III МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ**

«Акустическая эмиссия.

Роль метода в системах

комплексного мониторинга технического

состояния опасных

производственных объектов»

ОБЗОР МАТЕРИАЛОВ КОНФЕРЕНЦИИ ЕВРОПЕЙСКОЙ РАБОЧЕЙ ГРУППЫ ПО АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ EWGAE 2012

В.А. Барат, Д.А. Терентьев

1. Введение

Стремительное развитие методов исследований, основанных на применении акустической эмиссии, привели к созданию в 1972 г. Европейской рабочей группы по акустической эмиссии (EWGAE). В настоящее время EWGAE насчитывает несколько сотен участников и объединяет ведущих ученых, специализирующихся в области акустической эмиссии (АЭ). Заседания рабочей группы проходят раз в два года в формате конференций, на которых представляется, как правило, более сотни докладов. Материалы конференции выпускаются в виде сборника в печатном или электронном виде.

Темы конференции соответствуют основным направлениям развития метода АЭ, таким как идентификация процессов разрушения, решение обратных задач АЭ, создание прецизионных локационных схем, контроль композиционных материалов, разработка систем промышленного АЭ-мониторинга.

2. Обзор докладов

Поскольку рассмотреть все доклады, представленные на конференции, в рамках одной статьи не представляется возможным, для обзора были выбраны доклады, содержащие фундаментальные исследования в области АЭ, а также доклады, описывающие новые технологии АЭ-контроля или интересные промышленные применения метода.

2.1. А. Поллок, П. Ю, П. Циль, США

Описание процесса акустической эмиссии при циклическом нагружении образца из стали А572

Доклад посвящен исследованию АЭ при разрушении прямоугольного образца из стали А572. Описан эксперимент, заключающийся в циклическом нагружении образца размерами 300 x 300 x 22 мм со скоростью 2 цикла в секунду. Эксперимент продолжался в течение трех суток от начала образования усталостной трещины вплоть до полного разрушения образца. Процессы, происходящие в образце, фиксировались при помощи визуального контроля, при этом также регистрировались сигналы акустической эмиссии.

Основной акцент в данном исследовании был сделан на идентификации различных процессов, происходящих в образце. При совместном анализе АЭ-данных и кривой нагружения образца авторами были выделены акустические сигналы, характеризующие два различных процесса – непосредственно рост трещины и трение

ее берегов. Было показано, что рост трещины характеризуют высокочастотные, высокоамплитудные сигналы, регистрирующиеся при максимальной механической нагрузке, при разгрузке образца наблюдаются более низкочастотные сигналы повторяющейся формы, соответствующие трению берегов трещины.

Также в докладе был предложен способ обнаружения трещины, основанный на применении активного акустического метода, в котором один из преобразователей акустической эмиссии используется в режиме излучения, другой – в режиме приема. О росте и раскрытии трещины авторы доклада предлагают судить по увеличению времени распространения излученного импульса.

2.2. 3. Преворовский, Й. Крофта, М. Халда, З. Фаров, В. Кус, Чехия

Современный подход к локализации и идентификации источников акустической эмиссии

Тема доклада – решение обратных задач в области акустической эмиссии. Профессором Преворовским был представлен обзор перспективных методов классификации, идентификации и локализации источников АЭ. Центральной темой доклада было представление нового метода решения обратных задач – метода «обратного распространения акустического сигнала» (time reversal acoustic). Метод предполагает аппаратное решение проблемы, сигналы акустической эмиссии регистрируются первичными преобразователями, а затем вторично излучаются в контролируемый объект «в обратном времени» с изменением фазы на 180° . В соответствии с представленными в докладе доказательствами вторично излученные сигналы локализируются в точке расположения источника акустической эмиссии. Причем результат их суперпозиции восстанавливает функцию источника акустической эмиссии. В докладе приводятся результаты экспериментального исследования, подтверждающие работоспособность предложенного метода.

2.3. Э. Верстринг, М. Вефер, Бельгия

Предварительный результат применения оптоволоконного датчика для акустико-эмиссионного контроля кирпичной кладки

Применение оптоволоконных датчиков для АЭ-контроля является актуальной задачей. Оптическое волокно обладает большей помехозащищенностью по сравнению с обычным коаксиальным кабелем, а расположение нескольких датчиков на одном оптоволоконном кабеле повышает технологичность АЭ-контроля протяженных объектов.

В докладе представлены результаты применения оптоволоконного датчика для контроля арочных конструкций. В работе использовался оптоволоконный поляриметрический датчик, основанный на явлении двойного лучепреломления. Так как при распространении волн акустической эмиссии меняются условия поляризации лазерного излучения внутри оптического волокна, возникает явление двойного лучепреломления, фиксация которого приводит к появлению на выходе датчика напряжения пропорционального исходному акустическому сигналу.

Необходимость применения оптоволоконных датчиков для контроля арочных конструкций авторы объясняют высоким коэффициентом затухания акустического сигнала в объектах из кирпичной кладки, при применении оптоволоконного кабеля протяженность зоны контроля увеличивается.

В докладе приводится сравнение чувствительности оптоволоконного датчика и стандартного для АЭ-контроля пьезоэлектрического преобразователя. Приводятся результаты испытания арочных конструкций на разрушение, в процессе которых акустико-эмиссионный контроль проводился совместно как оптоволоконными датчиками, так и пьезоэлектрическими преобразователями. В ряде экспериментов чувствительность оптоволоконных датчиков была существенно выше, чем у пьезоэлектрических преобразователей. Авторы отмечают, что характеристики поляриметрических датчиков в большой степени зависят от технологии их монтажа и качества применяемых при монтаже материалов.

2.4. С. Будано, А. Льюцци, Р. Пианкальдини, Д. Джунта, Италия

Мониторинг повреждений нефтяных и газовых труб методом акустической эмиссии

В докладе представлены результаты экспериментального исследования АЭ-мониторинга подземных трубопроводов. Эксперимент проводился в полевых условиях на трубопроводе диаметром 1240 мм длиной около 200 м, расположенном под землей на глубине около метра. На экспериментальном трубопроводе было искусственно выполнено несколько дефектов типа «вмятина». Циклическое нагружение трубопровода соответствовало реальным эксплуатационным нагрузкам, при этом на вмятинах, являющихся концентраторами механического напряжения, образовывались трещины. В ходе эксперимента, проводившегося в режиме мониторинга, все трещины были выявлены и с высокой точностью локализованы.

В докладе особое внимание было уделено аппаратному обеспечению эксперимента, были рассмотрены конструктивные решения, обеспечивающие герметизацию датчиков и предварительных усилителей для их безопасной подземной эксплуатации.

2.5. А. Лемер, М. бен Тахар, Ф. Фуше, А. Месинель, П. Реколи, Ф. Чжан, Франция

MACSIM: Совместный проект по проектированию, разработке и проверке программного комплекса для моделирования АЭ-контроля

Проект MACSIM был анонсирован французским Национальным агентством научных исследований с целью проектирования, разработки и проверки инструмента моделирования процессов, происходящих при АЭ-контроле. Рабочую группу составили эксперты-практики АЭ, специалисты из различных областей моделирования (механика разрушения, динамика упругих сред) и разработчики программного обеспечения. Инструмент для моделирования АЭ должен был учитывать различные явления: акустическое излучение развивающейся трещины, распространение волн в виде нормальных или поверхностных волн и их прием сетью датчиков. Эти явления имеют место в различных масштабах: микроскопический масштаб подходит для опи-

сания развития трещины и генерации волн, масштаб контролируемой конструкции (сосуд или труба) подходит для описания распространения волн, масштаб датчика подходит для описания приема упругих волн. Представленный инструмент моделирования окажет помощь практикам АЭ как при разработке новых методов, так и при улучшении диагностики, поскольку он облегчит проведение многопараметрических исследований. Такие исследования оказались очень полезными для других методов неразрушающего контроля. Все это, по мнению авторов доклада, может привести к появлению новых парадигм интерпретации АЭ-сигналов и повышению надежности методов АЭ-диагностирования.

2.6. П. Челисниг, Австрия

АЭ-мониторинг на транспорте

Усталостные трещины и коррозионные повреждения являются причинами разрушения конструкции всех типов грузового транспорта – судов, автоцистерн, железнодорожных цистерн. Для предотвращения аварий периодически должна проводиться экспертиза промышленной безопасности транспорта. Рутинная процедура технического освидетельствования не всегда позволяет выявлять дефекты на ранних стадиях развития, что приводило к огромным утечкам нефти или взрывам.

В докладе предложена концепция непрерывного АЭ-мониторинга, позволяющая обнаруживать активную коррозию и усталостные трещины транспортных объектов. Особенностью эксплуатации данных систем является высокий уровень шумов, возникающих при движении транспорта. Для борьбы с шумами были разработаны дополнительные системы анализа данных, повышающие помехоустойчивость систем мониторинга.

2.7. В. Абду, Н. Балодимос, Б. Ройбен, Великобритания

АЭ в дизельных двигателях. Модель временных рядов для процесса впрыска

АЭ является чрезвычайно полезным инструментом для мониторинга дизельных двигателей, т.к. ряд явлений, происходящих внутри двигателя, сопровождается АЭ. Одной из основных проблем в области мониторинга двигателей является множественность источников. Эта проблема лишь частично облегчается в случае достаточно больших двигателей, где цилиндры физически отделены друг от друга. В данной работе авторы исследовали АЭ, генерируемую во время впрыска дизельного топлива. Предварительный анализ показал, что имеются АЭ-сигналы, идентифицируемые во время впрыска в дизельном двигателе. Энергия и длительность импульсов коррелируют с частотой вращения коленчатого вала как на инжекторном устройстве, так и на работающем двигателе. Авторы считают, что необходимо провести большую работу по изучению взаимосвязи между графиком давления топлива и структурой АЭ в инжекторном устройстве. Это должно помочь сформировать модель временного ряда АЭ-сигналов инжектора, что позволит использовать АЭ как средство дозирования топлива, поступающего в двигатель с каждым впрыском.

2.8. Дж. МакКропи, Р. Пуллин, М. Пирсон, М. Итон, К. Физерстон, К. Холфорд, Великобритания

Влияние разрешения сетки на локацию источников АЭ в композитном материале GLARE

В работе исследуется применимость АЭ для точного определения координат повреждений в композитном материале GLARE, который в последние годы находит все более широкое использование в самолетостроении. Координаты мест слома карандаша на образце размером 1200x700 мм из указанного материала определялись при помощи обычного метода, основанного на разностях времен прихода, а также при помощи нового подхода – временного картирования. Кроме того, был выполнен анализ влияния плотности сетки при временном картировании на точность локации источника АЭ. Сравнение результатов двух методик показало небольшое превосходство временного картирования с использованием сетки с ячейкой не более 30 мм над традиционным методом локации. Также было выявлено, что скорость волны S0 в панели в среднем равна 4836 м/с и не зависит от направления распространения, несмотря на композитный состав панели.

2.9. К. Ито, Х. Курики, С. Курода, М. Эноки, Япония

Детектирование событий АЭ в условиях высокого уровня шума при помощи непрерывной записи сигнала и метода множественного порога

Описан новый метод обнаружения АЭ-событий во время процесса плазменного напыления керамических покрытий. Известно, что трещины в покрытии могут влиять на его надежность. Устройство напыления является источником периодически возникающего шума высокой амплитуды, что затрудняет обнаружение АЭ-событий при использовании одного фиксированного уровня порога. Поэтому при наличии колебаний уровня шума было решено использовать предложенный авторами метод множественных порогов. Непрерывная запись сигнала позволила использовать гибкую и мощную функцию шумоподавления, а также реализовать одновременное использование нескольких порогов для обнаружения событий АЭ. Это позволило отслеживать колебания уровня шума во время динамического процесса производства. В результате удалось успешно обнаруживать АЭ-события во время плазменного напыления.

СИГНАЛЫ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ. МОДЕЛИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ

В.И. Иванов, ОАО НТЦ ПБ

Метод акустической эмиссии (АЭ) является информационной технологией [1]. Информация переносится сигналом. Поэтому мы рассмотрим разнообразные сигналы АЭ в максимально широком представлении понятия сигнала.

В общем представлении «сигнал является функцией, которая передает информацию о поведении или признаках некоторого явления» (wiki/information). Сигнал в физике – любое количество, показывающее изменение во времени или в пространстве (таком как изображение), которое предоставляет информацию о состоянии физической системы. А в технике сигнал – материальное воплощение сообщения о каком-либо событии, явлении. Состояния объекта либо команды управления, оповещения и т.д. [2]. В радио- и электротехнике понятие сигнал определяется следующим образом: «сигнал – физическая величина, которая изменяется во времени и пространстве и содержит информацию об источнике».

Проблемы выяснения природы сигналов интересовали множество исследователей в различных областях, поэтому определений понятия сигнала достаточно много. В области АЭ сигнал определяем как «Стохастическая физическая величина акустической природы, содержащая информацию об источнике АЭ» [3].

Сигналы любого вида и природы несут информацию об источнике сигнала и о канале распространения сигнала.

При внимательном рассмотрении можно увидеть, что имеется множество проблем в области АЭ, которые не получили еще окончательного разрешения. Среди них проблемы, связанные с АЭ-сигналами, являются одними из наиболее важных. Пора по серьезному начать изучение понятия «Сигнал АЭ». В представленном ма-

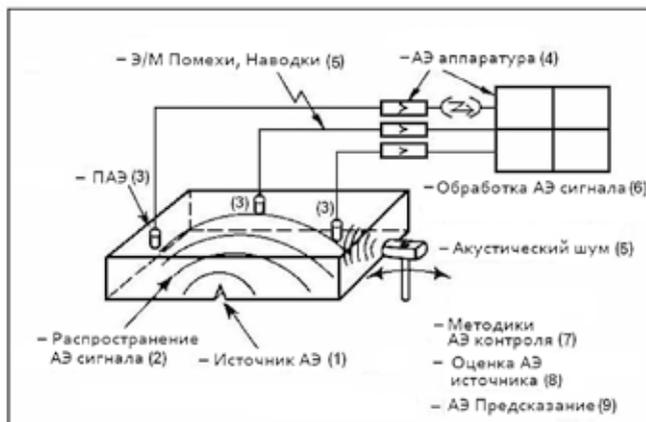


Рис. 1. Представление областей исследования проблемы сигналов АЭ

териале делается попытка возродить интерес к этой фундаментальной проблеме. Увлечшись по нужде применением метода АЭ в промышленности, большинство специалистов отошло от понимания необходимости и потребности дальнейшего развития представлений в этой области, начиная от фундаментальных моделей и заканчивая принятием решения о судьбе промышленного объекта по параметрам сигналов АЭ.

В методе АЭ сигнал является комплексным иерархическим понятием, которое описывается весьма разнородными и разнообразными моделями. Диапазон решаемых задач простирается от описания микроскопических (квантовых) объектов до составления АЭ-портретов макроскопических, производственных технических устройств. При этом по параметрам сигнала АЭ необходимо принимать ответственные решения, которые связаны с большим риском.

В статье воспроизведен краткий обзор и анализ всего спектра моделей АЭ-сигналов, начиная от квантомеханических и заканчивая АЭ-образом диагностируемого объекта, отображаемого в параметрах сигнала АЭ [4]. Для условий контроля технических устройств проведено краткое описание интерпретаций АЭ-сигналов. Приведены подходы к оценке (качественной и количественной) текущего состояния объектов и прогнозирования сроков безопасной эксплуатации промышленных объектов с использованием параметров АЭ-сигналов.

В области АЭ можно сформировать иерархию моделей сигналов АЭ, которую в обобщенном виде следует представить в виде Глобальной модели АЭ-сигнала, включающей следующие разделы:

- I. Элементарный импульс АЭ.
- II. Единичный импульс АЭ.
- III. Полный сигнал АЭ: непрерывная, дискретная АЭ.
- IV. Глобальная модель АЭ = Образ источника АЭ и его история.
- V. АЭ-портрет объекта.

В схематичном виде глобальная модель, включающая иерархию сигналов АЭ, представлена на рис. 2.

Логично начать обзор сигналов с микроскопических моделей сигналов АЭ. Квантомеханические описания динамических процессов в твердом теле не используются в практике АЭ-диагностирования (АЭД), но изучение этих моделей необходимо для более полного понимания природы АЭ. То же самое можно сказать о нано- и микроскопических моделях. Но уже мезо- и макроскопические модели сигнала АЭ, а тем более модели, связанные с механикой разрушения и ее современной модификацией в виде вероятностной механики разрушения (ВМР), должны стать основополагающими в развитии понимания и понятия «сигнал АЭ» в технических объектах.

Динамические процессы в твердом теле сопровождаются АЭ во всем диапазоне размеров. При разрушении единичной атомной связи (рис. 3) на разрушение затрачивается энергия E_D . Релаксация единичных атомных связей, высвобождая энергию E_R , приводит к формированию элементарного импульса АЭ, названного «ФРАК-ТОН». Нарастающее смещение атомов по цепочкам влево и вправо формирует мезо- и макроскопические импульсы АЭ.

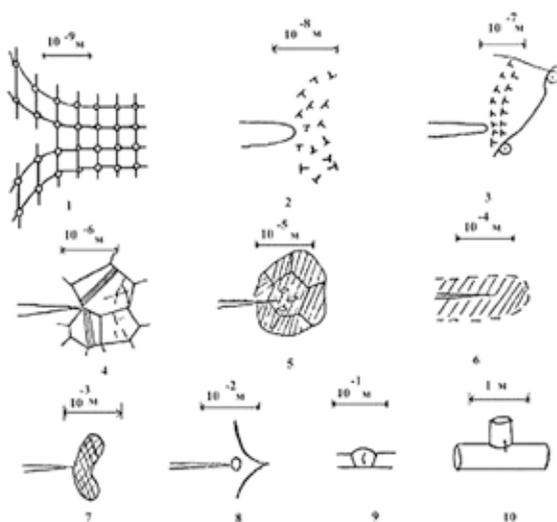


Рис. 2. Схема иерархии сигналов АЭ

На уровне цепочки атомов возможно использование фоновонного механизма с использованием концепции акад. Журкова С.Н. [5]. Схематический пример приведен на рис. 4, где вверху приведена цепочка атомов при 0 °К, ниже – цепочка атомов при 20 °С, еще ниже – цепочка при нагружении силой F , а затем развитие во времени процесса термофлуктуационного разрыва цепочки, полученное численным моделированием в Ленинградском Физтехе.

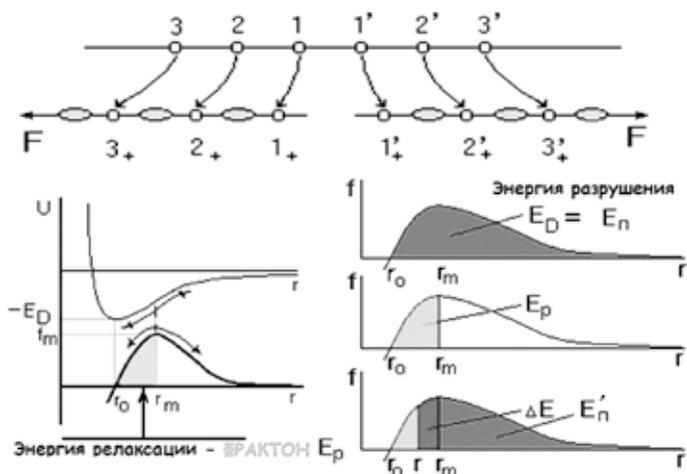


Рис. 3. Разрушение единичной атомной связи. Понятие «ФРАКТОН»

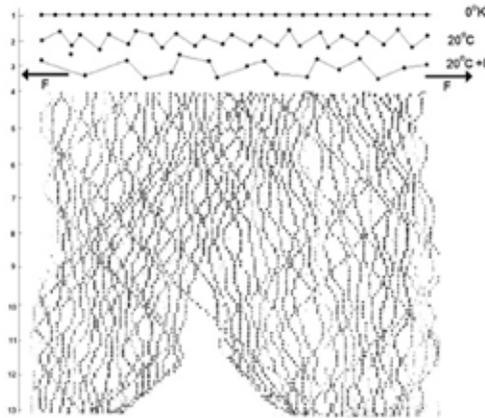


Рис. 4. Схема разрушения цепочки атомов

На рис. 5 приведена схема формирования импульсов АЭ в двумерной решетке твердого тела. Разрушение цепочки атомов 1 (рис. 5б) в виде продольного возмущения передается на верхнюю и нижнюю цепочки в виде продольной волны L, в виде поперечного возмущения, порождающего рэлеевскую волну R (влево от места разрыва) и сдвиговую волну S (вправо). Сдвиговая волна, воздействуя на цепочку 5, приводит к ее разрыву и дальнейшему распространению разрушения. Разрушение формируется с отходом рэлеевской волны от очага, откуда следует, что предельная скорость распространения трещины релаксации не превышает скорости рэлеевской волны.

Распространение разрушения происходит вдоль плоскости St и заканчивается на границе G при условии невозможности дальнейшего распространения. Формируется поверхность разрушения Sf (рис. 6).

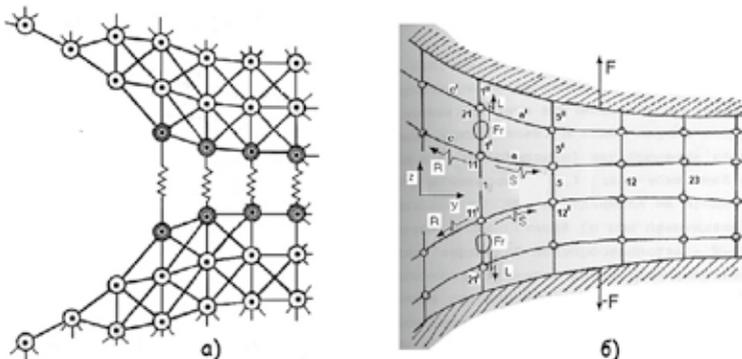


Рис. 5. Распространение разрушения в двумерной решетке и формирование волн в твердом теле

Энергия импульса АЭ, излученного из объема V, расположенного над (и под) площадкой разрушения (объем пирамиды, опирающейся на площадку Sf радиусом a), пропорциональна упругой энергии релаксации. Связь амплитуды смещения частиц

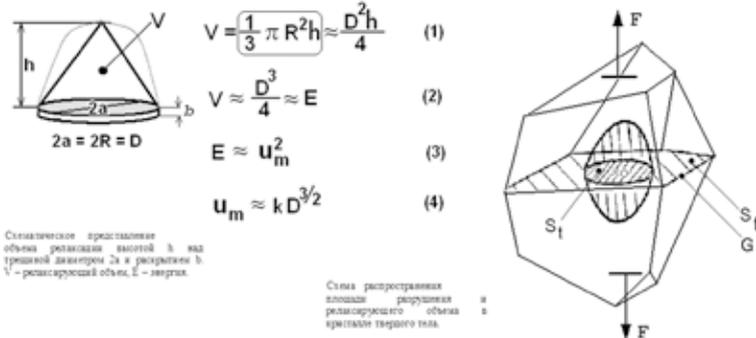


Рис. 6. Распространение разрушения вдоль плоскости St с прекращением на границе G

среды (сигнал АЭ) с диаметром площадки разрушения D дана выражением (4) на рис. 6. Оценка предельной чувствительности АЭ-аппаратуры, проведенная с учетом полученного выражения и с учетом собственных тепловых шумов (оценка выполнена в 1983 г.), составляет ~1 мкм² [1].

Импульсы АЭ, излученные из некоторого объема, имеют формы, приведенные на рис. 7 и рис. 8. Формы импульсов на рис. 7 получены теоретически для случая излучения сферической полостью в твердом теле, к поверхности которой приложена сила в виде ступенчатой функции. Выражения получены в работах А.С. Садовского, Л.А. Маслова и В.М. Баранова (в разное время, ссылки можно найти в [1]).

И для теоретической формы импульса АЭ (рис. 7) и для феноменологического рассуждения (рис. 8) характерно, что вблизи источника АЭ имеем постоянную составляющую, которая уменьшается по мере удаления от источника.

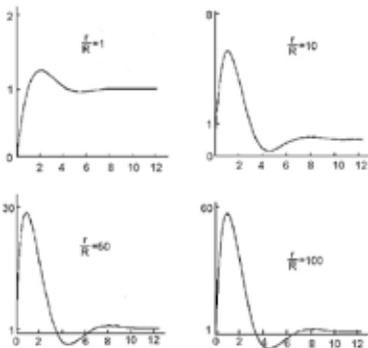


Рис. 7. Теоретическая форма импульса АЭ, излученного сферическим источником

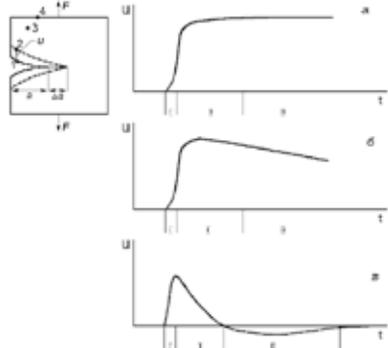


Рис. 8. Форма импульса АЭ от скачка трещины (феноменологическая модель)

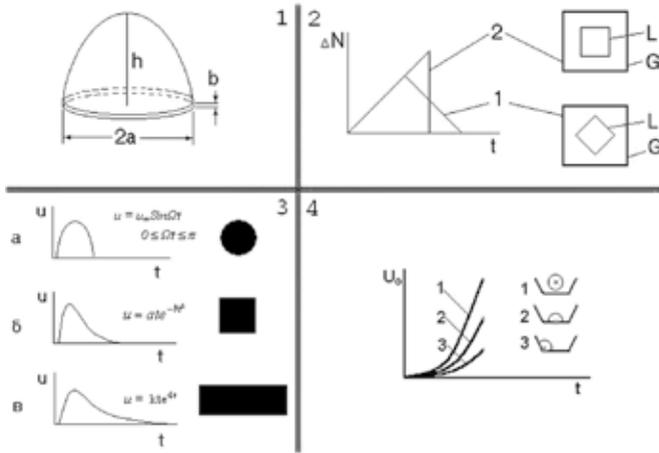


Рис. 9. Формы импульсов АЭ для различных форм площадок разрушений и ситуаций формирования импульсов

На рис. 9 и рис. 10 приведены формы единичных импульсов АЭ, которые получены как теоретически, так и в экспериментах для разных форм площадок разрушения и разных положений областей начала разрушения относительно границ зон остановки разрушения.

На рис. 11 приведены модели типичных структур материалов и условные фронты распространения трещин: А-А – начальное положение фронта разрушения, Б-Б – конечное положение фронта после скачка трещины. Разнообразие структур порождает разнообразие форм единичных импульсов.

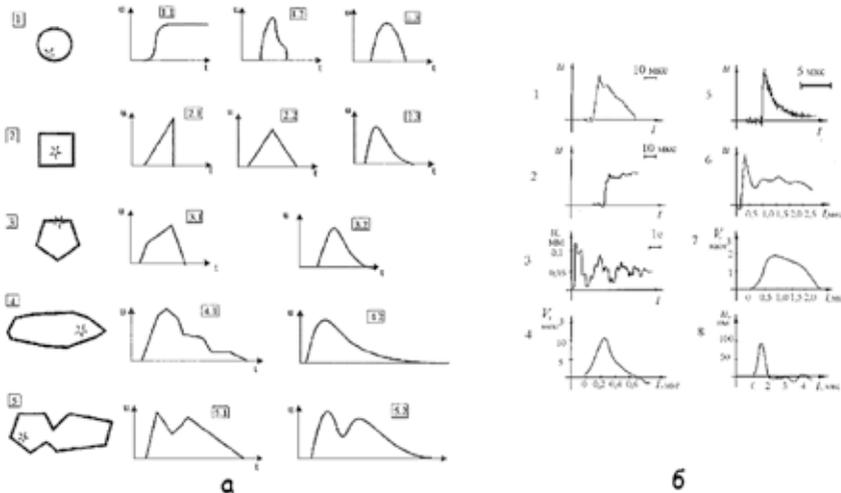


Рис. 10. Формы импульсов АЭ для случаев: а) – теоретический расчет, б) – получены в экспериментах

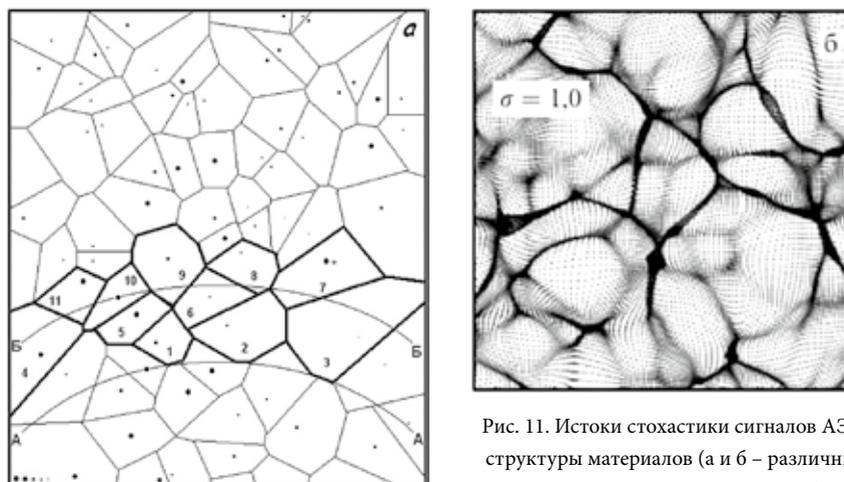


Рис. 11. Истоки стохастики сигналов АЭ – сложность структуры материалов (а и б – различные пространственные структуры)

После прохождения фронтом трещины из начального положения А-А в положение Б-Б (рис. 11а) произойдет разрушение 11 зерен и, соответственно, излучение 11 импульсов АЭ, формы которых могут соответствовать формам на рис. 10. Импульсы могут слиться или быть разделенными во времени.

На рис. 12 представлены записи сигналов АЭ, полученных при подрастании трещины в стеклянной пластине.

Прием сигналов осуществлялся широкополосными преобразователями, расположенными на противоположной стороне пластины под различными углами относительно ориентации трещины. Следует отметить большое разнообразие форм принятых импульсов.

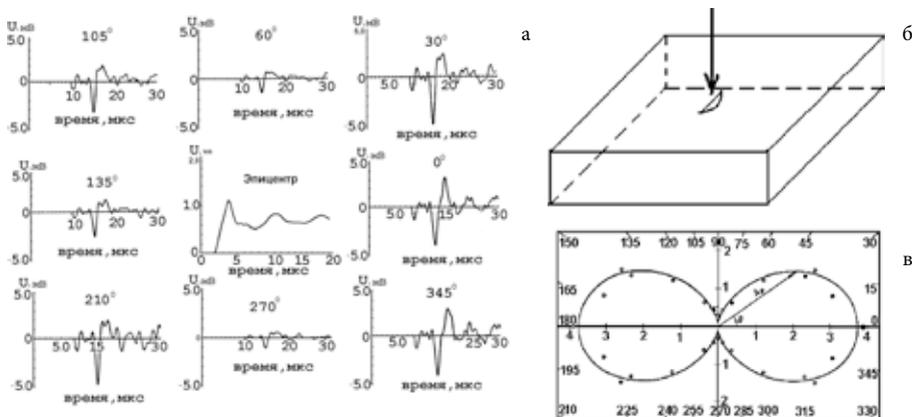


Рис. 12. Формы сигналов АЭ (а) от источника в виде трещины в пластине (б); в – диаграмма направленности излучения трещиной упругой волны

Сложность расшифровки сигналов АЭ видна из рис. 13.

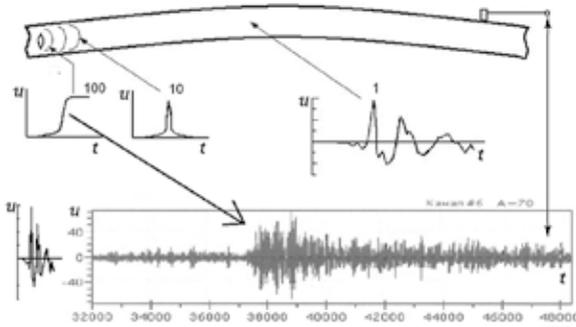


Рис. 13. Схема трансформации формы импульса АЭ при прохождении акустико-электронного канала

На рис. 13 приведена схема трансформации формы импульса АЭ при прохождении акустико-электронного канала. Хорошо видно, что исходный сигнал вблизи источника АЭ, имеющий ступенчатую форму, превращается в сложный мультиимпульсный радиоимпульсный сигнал на выходе пьезопреобразователя АЭ.

На рис. 14 приведены сигналы АЭ от одного источника, принятые разными преобразователями в решетке из четырех ПАЭ.

Наблюдая форму сигналов на выходе ПАЭ, можно заключить, что обратная задача восстановления сигнала в источнике – некорректна, да и прямая, по-видимому, тоже. Сложность ситуации вынудила ввести понятие устойчивости параметров АЭ, а последующий анализ привел к выводу, что наиболее устойчивыми являются следу-

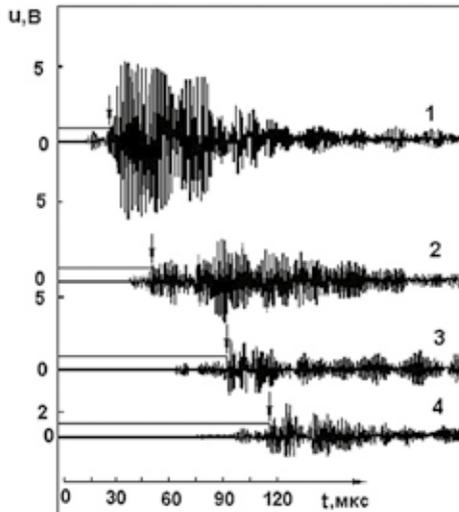


Рис. 14. Запись импульса АЭ решеткой из 4-х ПАЭ

ющие параметры: энергия, амплитуда, формы зависимости суммы импульсов суммарного счета от параметра нагружения (времени, числа циклов нагружения, усилия, давления) [1].

Ниже приведены записи сигналов АЭ в процессе настройки каналов (использовался источник Су-Нильсена) и натуральные сигналы, полученные при испытаниях объектов.

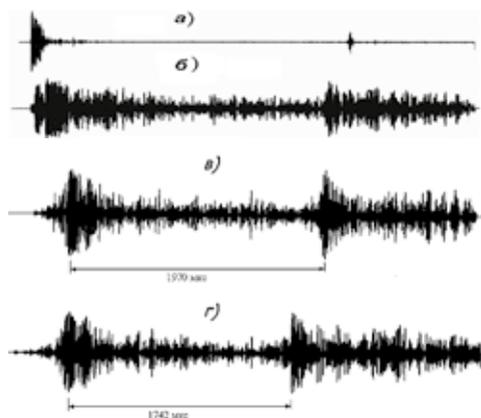


Рис. 15. Формы импульсов от источника Су-Нильсена на пустом сосуде при разных расстояниях между источником и приемником АЭ

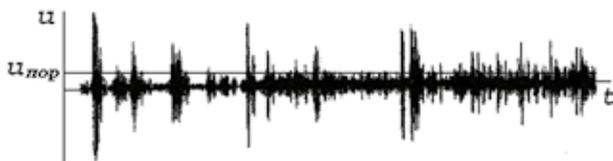


Рис. 16. Импульсная АЭ при испытании сосуда давления

Весьма важную информацию несет импульсная характеристика (ИХ) системы ПАЭ-испытательный образец. На рис. 17 представлены реакции системы ПАЭ – испытательные изгибные призматические образцы размерами 20 x 40 x 200 мм³, изготовленные из: а) алюминиевого сплава АМГ-5, б) стали 15Х2НМФА, в) аустенитной стали 12Х18Н10Т.

Колебательная система образец-ПАЭ возбуждалась источником Су-Нильсена. Можно отметить существенную разницу сигналов, которую необходимо учитывать при исследовании процессов деформации и разрушения в лабораторных условиях и последующего переноса результатов на производственный объект.

Аустенитная сталь имеет большее поглощение ультразвука, чем перлитная, и тем более, чем алюминиевый сплав. Это проявляется в более быстром спаде процесса реверберации. Показаны части сигналов длительностью 2 мс.

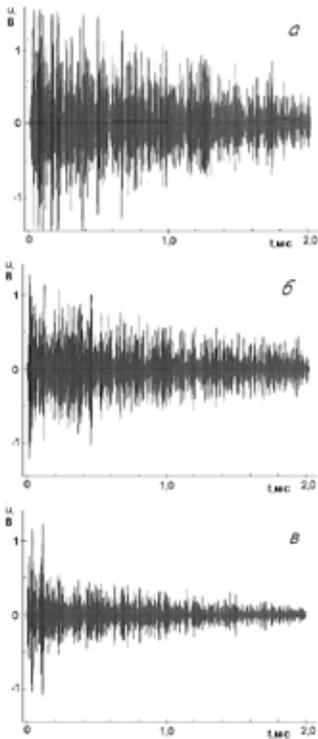


Рис. 17. Импульсные характеристики системы:
изгибный испытательный образец – ПАЭ

Кроме того, можно отметить различие амплитуд принятых импульсов при размещении ПАЭ на образцах из разных материалов. Это связано с различной степенью акустического согласования ПАЭ-образец из-за различия импедансов.

Для объекта толщиной 80 мм электроакустический канал имеет принципиально другую ИХ (рис. 18). Из рис. 18 следует, что ИХ дает большую информацию, чем АЧХ.

При лабораторных либо производственных испытаниях необходимо учитывать различие АЭ-свойств контролируемых материалов. На рис. 19 приведены зависимости эффективного значения АЭ-сигналов и активности от деформации. Можно отметить, что при схожих диаграммах нагружения АЭ-параметры для алюминия и кадмия существенно различаются.

На рис. 20 (справа) представлены зависимости скорости счета АЭ \dot{N} и кривых нагружения (усилия P и механического напряжения σ) от времени t и деформации ϵ при растяжении образцов из различных материалов: а – сталь 22NiMoCr3 [146], б – α -Fe, в – монокристаллы молибдена $M_0(100)$, г – сталь 3. Слева представлена зависимость скорости счета АЭ – \dot{N} от деформации ϵ и кривая нагружения $\sigma(\epsilon)$ для алюминиевого сплава 7075-T6.

При рассмотрении реверберации в образце из АМГ-5 можно отметить существенно большую длительность процесса, чем для образцов из других материалов. Длительность спада процесса до уровня 0,5 от максимальной амплитуды составляет $1,5 \div 2,0$ мс. При этом число выбросов через этот уровень составило порядка $60 \div 100$. Т.е. коэффициент увеличения (размножения) составляет порядка $60 \div 100$. Это означает, что при срабатывании единичного источника АЭ в образце, соответствующего одному событию или акту АЭ, прибор регистрирует около 100 выбросов, превышающих уровень 0,5 от максимального значения сигнала. Для порога, установленного на уровне $5 \div 10$ мкВ, число выбросов может составить до 104.

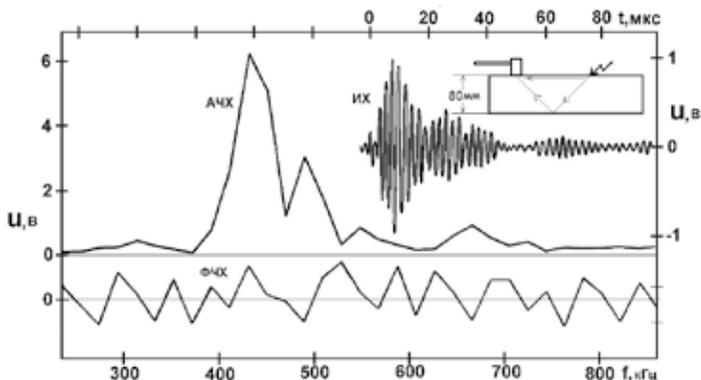


Рис. 18. Система характеристик акустико-электронного канала (ИХ, АЧХ, ФЧХ). Канал представляет собой участок сосуда толщиной 80 мм с установленным на нем ПАЭ

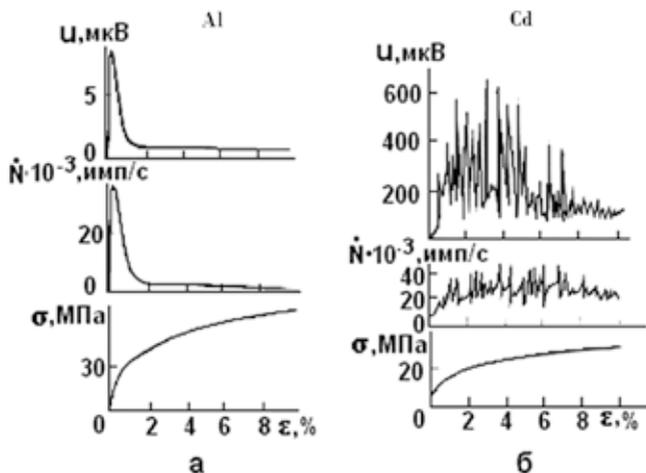


Рис. 19. Зависимости эффективного значения и активности АЭ от деформации для гладких образцов на растяжение из алюминия (а) и кадмия (б). Скорость деформации образцов составляла $2 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$

Существенное влияние на параметры сигналов АЭ оказывает температура испытываемых материалов. Для стали при температурах выше 500°C отмечается большое уменьшение энергии АЭ (рис. 21). Этот факт следует учитывать при выполнении контроля и исследования процессов деформации и разрушения.

На рис. 22 представлены обобщенные зависимости суммарной эмиссии N от нагрузки P для разного класса материалов: а) хрупкий материал, б) пластичный материал, в) конструкционный материал без концентраторов, г) конструкционный материал с концентраторами. Отсюда следует, что при контроле производственных объектов следует учитывать АЭ-свойства материалов и их НДС.

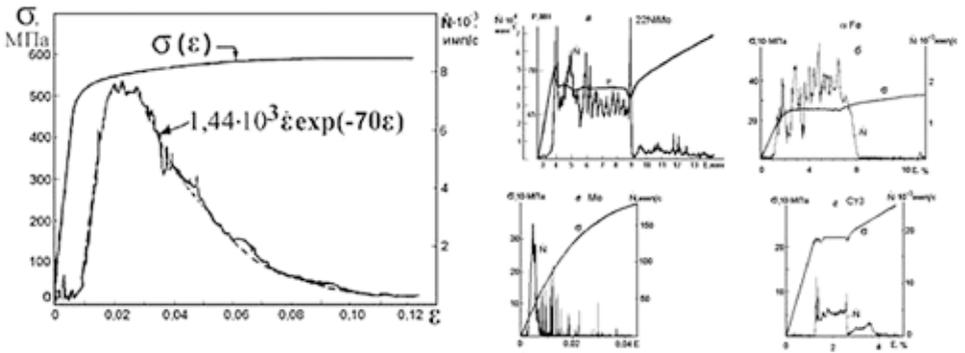


Рис. 20. Зависимости параметров АЭ от параметров нагружения для различных конструкционных материалов

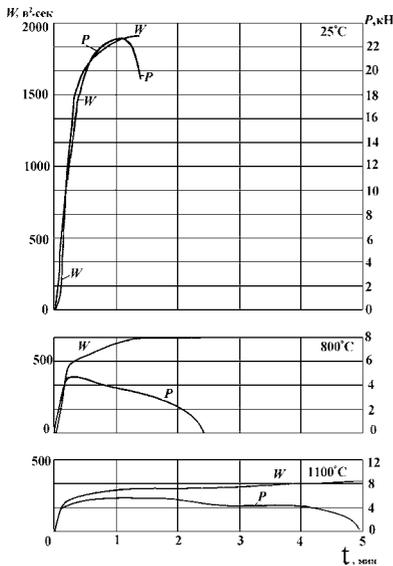


Рис. 21. Влияние температуры материала на параметры АЭ

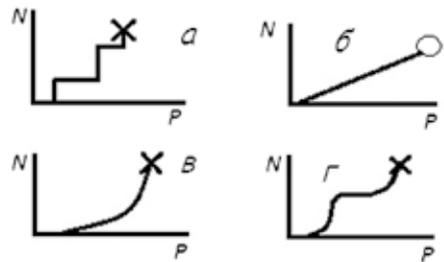


Рис. 22. Зависимости N от нагрузки P для разного класса материалов

Механические свойства материалов влияют на все АЭ-параметры. Это можно видеть на примере амплитудного распределения. На рис. 23 представлено амплитудное распределение АЭ-импульсов для стали 15Х2НМФА.

На рис. 24 приведены характерные виды амплитудных распределений для материалов разного класса вязкости.

Исследование АЭ при росте усталостной трещины (рис. 25) выявило эффект регистрации импульса АЭ в определенные моменты, когда нагрузка достигает опреде-

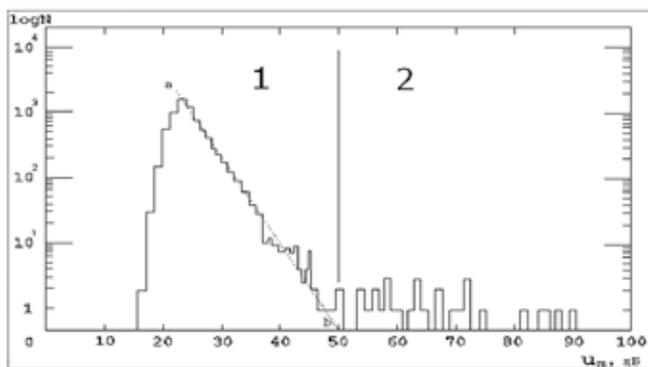


Рис. 23. Амплитудное распределение импульсов АЭ для корпусной стали 15Х2НМФА

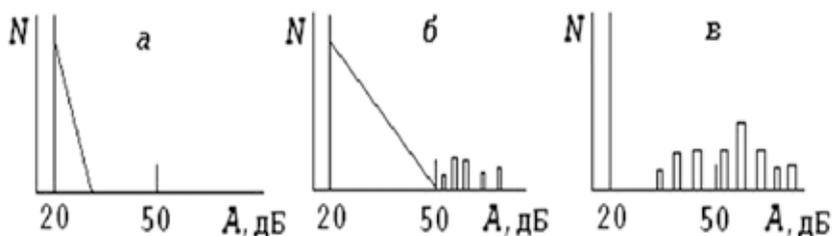


Рис. 24. а – амплитудное распределение для малопрочного, вязкого материала (например, сталь 3, сплав АМЦ и подобные материалы); б – амплитудное распределение для конструкционного прочного материала (например, для стали, используемой в корпусах сосудов высокого давления); в – амплитудное распределение для хрупких материалов

ленного значения. На рис. 25 слева эти моменты распределены в области нагрузки ~ 550 атм. Оценки показывают, что нагрузка, при которой регистрируется АЭ-импульс, соответствует пороговому значению коэффициента интенсивности напряжений – K_{th} .

Анализ роста усталостной трещины в стенке трубы показал, что усталостная трещина подрастает на разных этапах различными участками фронта трещины (рис. 26).

Наиболее важной проблемой при использовании метода АЭ в промышленности является прогнозирование наступления предельного состояния объекта по значению параметров АЭ. Для этого необходимо выявить характерные этапы в жизни объекта и выявление этих этапов по значению параметров АЭ и их зависимостей от параметра нагружения (времени, числа циклов, давления и т.д.). На рис. 27 представлены зависимость суммарной АЭ от параметра нагружения и оценка вероятности разрушения для разных этапов жизни объекта.

Можно отметить по крайней мере 5 этапов в зависимости суммарной АЭ от параметра нагружения (в данном случае – число циклов). В таблице в левой части рисунка приведены экспертные оценки вероятности разрушения для каждого этапа. Однако наиболее достоверными являются оценки приближающегося разрушения на 5-м этапе, соответствующем катастрофически активному источнику АЭ.

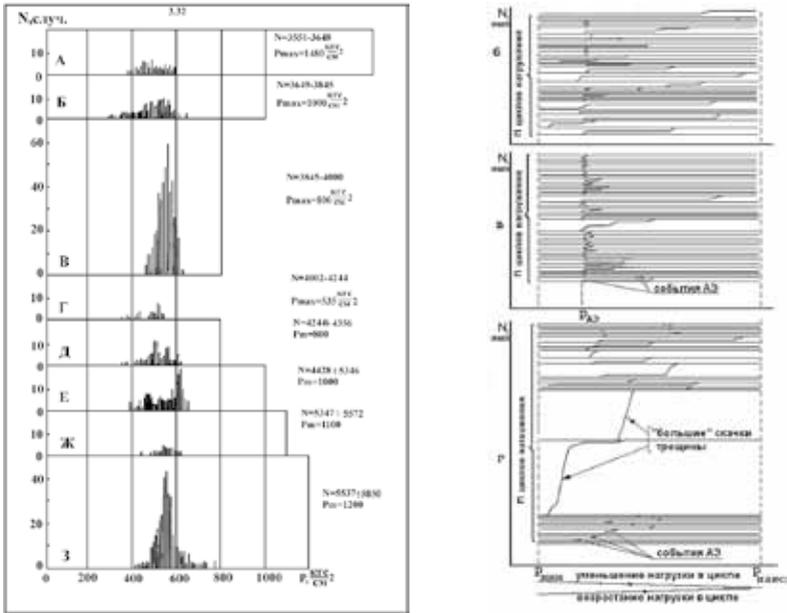


Рис. 25. Слева – распределение импульсов АЭ по нагрузке; справа – моменты регистрации импульсов АЭ на этапе возрастания нагрузки

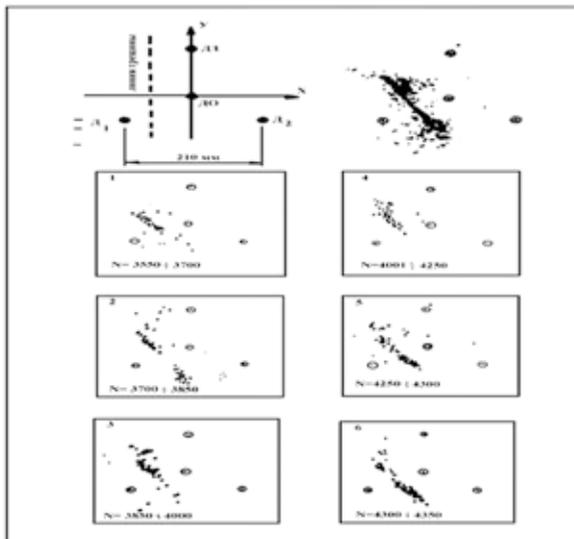


Рис. 26. Картина роста усталостной трещины в стенке трубы на разных этапах. Вверху слева приведены положения решетки преобразователей АЭ (Д0-Д3) и исходного надреза (пунктир). Вверху справа – картина источников АЭ относительно решетки ПАЭ

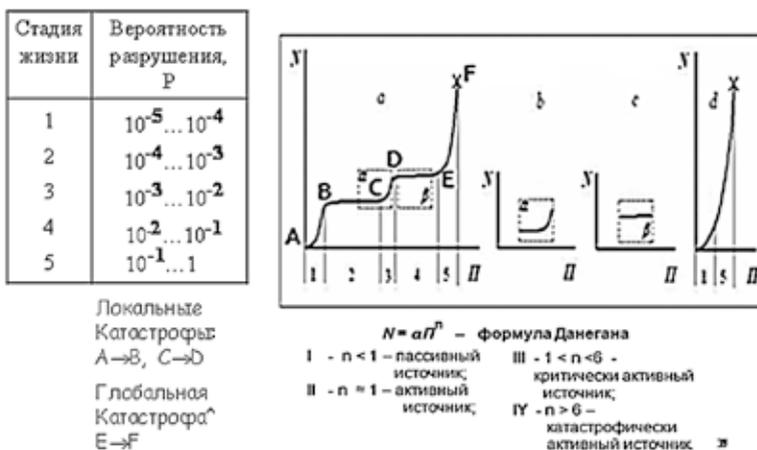


Рис. 27. Вероятности разрушения (таблица слева) и соответствующие стадии жизни объекта (зависимости суммарной АЭ по стадиям нагружения 1-5)

Следует отметить, что при оценке достоверности АЭ-контроля возможны ошибочные решения на разных этапах нагружения и оценки опасности источников АЭ. На участках А-В и С-Д возможна «перебраковка», а на участках D-С и D-Е – «недобраковка».

На рис. 28 представлена схема представления обобщенной зависимости суммарной АЭ от параметра нагружения, аналогичная зависимости на рис. 27. Затенение символизирует трудность предсказания.

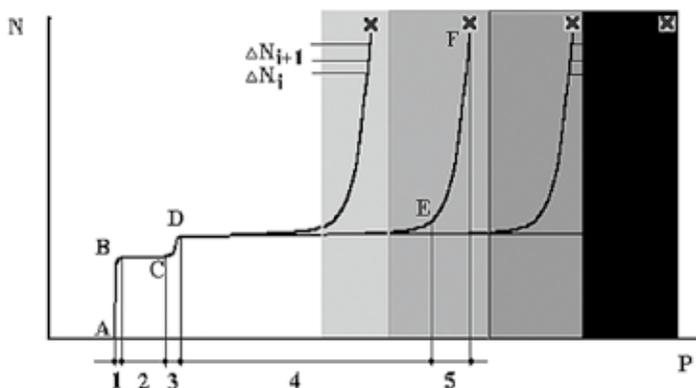


Рис. 28. Обобщенная зависимость суммарной АЭ от параметра нагружения с указанием характерных этапов 1-5

На рис. 29 приведено развитие процессов разрушения во времени при постоянной нагрузке.

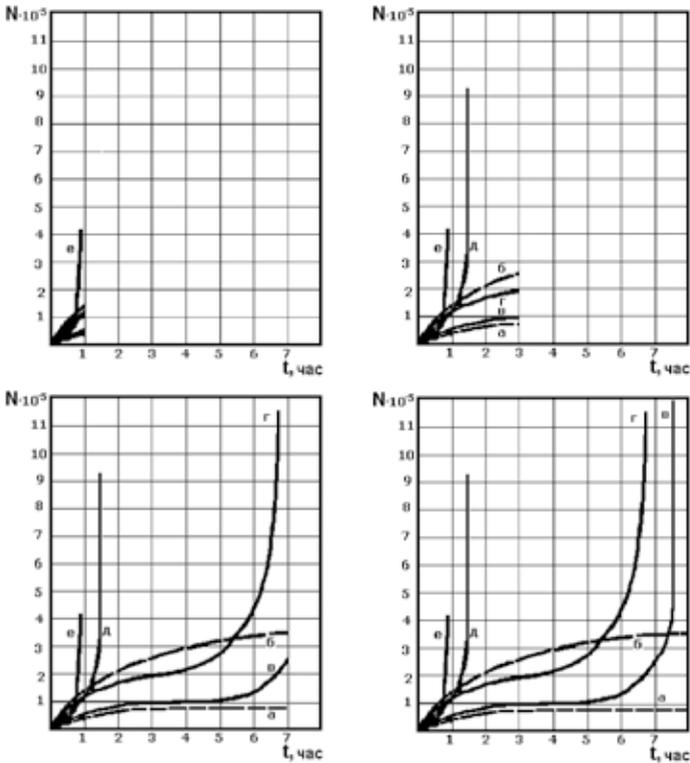


Рис. 29. Развитие процесса разрушения объектов а-е с различными величинами дефектов. Представлены 4 этапа нагружения от 1) до 4)

На рис. 30 представлено доказательство Данегана (цитируется по [1]) о связи параметров АЭ (суммарного счета) с основным параметром механики разрушения, содержащим информацию о степени опасности трещины, – коэффициентом интенсивности напряжений. Данная зависимость содержит информацию о связи суммарного счета с размером трещины.

На рис. 31 и рис. 32 представлены результаты испытаний сосудов давления. Распределение индикаций источников АЭ представляют собой АЭ-портреты объектов контроля и несут информацию как о развивающихся дефектах, так и о качестве фильтрации сигналов-помех. На рис. 31 хорошо видно рассеяние индикаций, которые в процессе постобработки должны быть отсеяны. Однако при этом могут быть отсеяны и полезные сигналы.

Выше были рассмотрены сигналы АЭ, порожденные в твердом теле. Эти сигналы, как правило, по своей природе являются импульсными сигналами, а сам процесс АЭ –

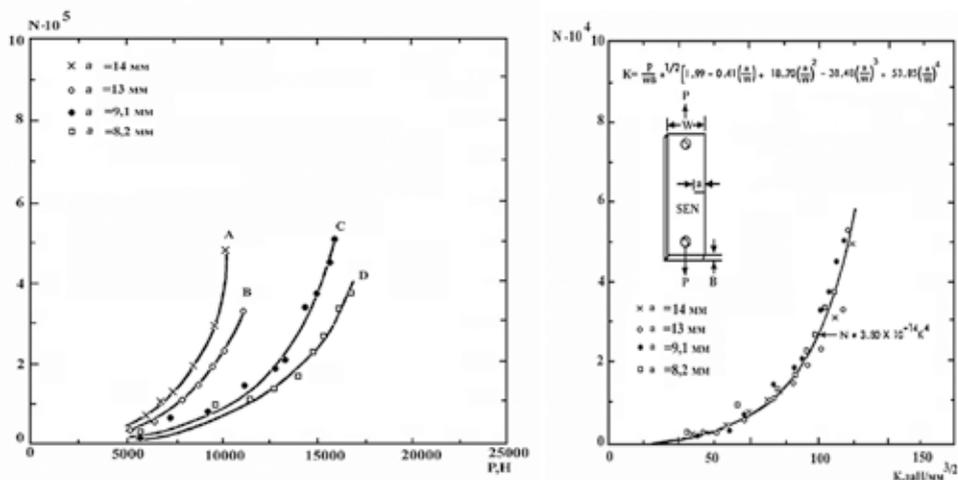


Рис. 30. Зависимость суммарного счета от нагрузки для объектов с разными размерами дефектов (слева) и эти же зависимости от вязкости разрушения (справа)

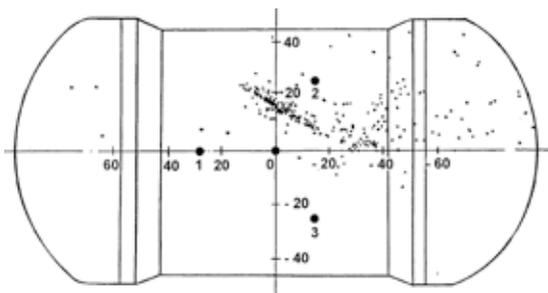


Рис. 31. Распределение индикаций АЭ в контуре сосуда. Концентрация индикаций сигнализирует о наличии развивающегося дефекта

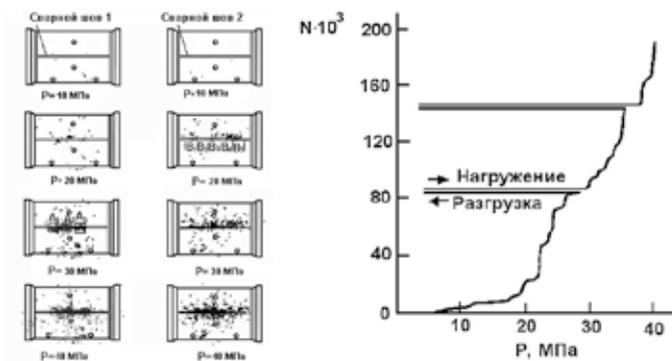


Рис. 32. Распределение источников АЭ по контуру контролируемого сосуда с двух сторон этого сосуда и зависимость суммарного счета в зависимости от возрастающего давления

стохастический импульсный процесс. Эти импульсы в большинстве практических случаев регистрируются раздельно. Реже они сливаются, и требуются усилия для их разделения. Непрерывная АЭ в промышленных объектах имеет место в случаях протечки. Поскольку это отдельные случаи, они требуют самостоятельного рассмотрения. Поэтому приведем только вид непрерывной АЭ (рис. 33).



Рис. 33. Непрерывная АЭ-запись при различных скоростях развертки

В заключение приведем список параметров АЭ (очевидно, не полный), в котором наиболее часто используемые на практике параметры выделены другим цветом.

Параметры АЭ, используемые в практике АЭ-диагностирования.

№ п/п	Наименование	Обозначение	Тип	Вид	Класс
1	2	3	4	5	6
1	Максимальное значение сигнала АЭ (амплитуда)	u_m	Простой	Измеряемый	Первичный
2	Среднеквадратическое значение сигнала	\bar{U}	Простой	Измеряемый, Вычисл.	Первичный
3	Средняя мощность сигнала АЭ	W	Простой	Измеряемый, Вычисл.	Первичный
4	Энергия сигнала АЭ	E	Простой	Вычисляемый	Первичный
5	Энергетический параметр (E' или MARSE)	E', MARSE	Простой	Вычисляемый	Первичный
6	Длительность импульса	t_i	Простой	Измеряемый	Первичный
7	Длительность переднего фронта импульса	t_ϕ	Простой	Измеряемый	Первичный
8	Разница во времени прихода импульсов	Δt	Простой	Измеряемый	Первичный
9	Число импульсов АЭ	N_Σ	Простой	Измеряемый	Первичный
10	Суммарный счет АЭ	N	Простой	Измеряемый	Первичный
11	Активность АЭ	\dot{N}_Σ	Простой	Измеряемый, Вычисл.	Первичный

12	Скорость счета АЭ	\dot{N}	Простой	Измеряемый, Вычисл.	Первичный
13	Интервал между импульсами	ΔT	Простой	Измеряемый	Первичный
14	Сумма амплитуд	Σu_m	Простой	Вычисляемый	Первичный
15	Амплитудное распределение	$A(u_m)$	Компл.	Вычисл., Измеряемый	Вторичный, Перв.
16	Коэффициент корреляции процесса	$K_{AЭ}$	Компл.	Вычисляемый	Вторичный
17	Спектральная плотность мощности	S_w	Компл.	Вычисляемый	Вторичный
18	Параметры вейвлет-преобразования	K_c	Компл.	Вычисляемый	Вторичный
19	Параметры разложения в ряд Уолша, Хаара		Компл.	Вычисляемый	Вторичный
20	Кепстр		Компл.	Вычисляемый	Вторичный
21	Коэффициент динамики развития процесса	n	Компл.	Вычисляемый	Вторичный
22	Корреляц. между Амплитуда-интервалами	Имп.	Компл.	Вычисляемый	Вторичный
23	Степень кластеризации	ρ	Компл.	Вычисляемый	Вторичный
24	Тип волны	L, S, R, Лэмб	Простой	Измеряемый	Первичный
25	Время когерентности		Простой	Вычисляемый	Первичный
26	Длина когерентности		Простой	Вычисляемый	Первичный
27	Корреляция Капистрано		Компл.	Измеряемый	Первичный
28	Параметры вейвлет-преобразования		Компл.	Измеряемый	Первичный

Вне этого краткого обзора из-за недостатка места осталось еще много интересных проблем. Например, обработка сигналов АЭ, выделение сигналов АЭ из шумов и помех и ряд других важных задач, которые могут быть предметом отдельного рассмотрения. Относительно выделения сигнала из шума в оправдание метода АЭ можно сказать, что и все другие методы НК до сих пор работают при отношении сигнал/шум, существенно превышающем 1. Вывод метода АЭ на более высокий этаж развития, когда полезный сигнал, уровень которого сравним с уровнем шумов, можно выделить, обработать, оценить параметры и принять ответственное решение, является весьма важной проблемой, требующей разрешения. Но самое главное – это определить (оценить?) степень опасности источника АЭ по принятым сигналам в каждый момент времени.

Библиографический список

1. Иванов В.И., Власов И.Э. Метод акустической эмиссии. Неразрушающий контроль: Справочник; В 7 т / под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 7. Кн. 1. – М.: Машиностроение. 2005. – 340 с.
2. Политехнический словарь / под ред. акад. И.И. Артоболевского. – М.: Советская энциклопедия, 1976. – 608 с.
3. ГОСТ Р 55044-2012. Техническая диагностика. АКУСТИКО-ЭМИССИОННАЯ ДИАГНОСТИКА. Термины, определения и обозначения.
4. Иванов В.И. Развитие акустико-эмиссионных методов и средств технической диагностики корпусных объектов на основе изучения процессов формирования сигналов при деформации и разрушении металлов. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – М.: ЦНИИТМАШ, 1990. – 612 с.
5. Кусов А.А. Фононная модель разрушения напряженной атомной цепочки // ФТТ. – 1979. – Т. 21. – Вып. № 10. – С. 3095-3099.

СИСТЕМЫ КОМПЛЕКСНОГО ДИАГНОСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

В.А. Шаповрев, Ю.С. Попков, ООО «ИНТЕРЮНИС»

Доклад посвящен алгоритму построения мониторинговых систем опасных производственных и гражданских объектов. Выделена роль метода акустической эмиссии в данных системах мониторинга. Описываются типы и варианты использования датчиков различного типа.

Основными видами деятельности компании «ИНТЕРЮНИС» на протяжении 25 лет являются производство приборов акустико-эмиссионного контроля серии «A-Line 32D», проведение работ по технической диагностике, неразрушающему контролю и экспертизе промышленной безопасности, создание и внедрение систем комплексного диагностического мониторинга (СКДМ) опасных производственных объектов, анализ и мониторинг рисков, а также научно-исследовательская деятельность.

Стоит отметить, что направление по созданию и внедрению систем комплексного диагностического мониторинга, по сути, аккумулирует в себе все остальные виды деятельности Компании, нацеленные на обеспечение промышленной безопасности.

Определяющими признаками необходимости применения систем комплексного диагностического мониторинга опасных производственных объектов, прежде всего, являются техногенные аварии и разрушения конструкций, приводящие к значительным материальным и экологическим потерям, человеческим жертвам.

Другие немаловажные факторы внедрения СКДМ:

- доступ для осуществления периодического осмотра и контроля конструкции отсутствует или затруднен (такие объекты, как днища резервуаров, тоннели, переходы трубопроводов через авто- и жд/дороги);
- значительный объем подготовительных работ и работ по периодическому контролю на объекте требует частичной или полной остановки объекта (реакторы нефтепереработки, колонны химических производств, РВС, изотермические резервуары) и сооружения вспомогательных конструкций для проведения контроля;
- конструкция обладает низкой эксплуатационной живучестью, другими словами, в конструкции имеется допустимый дефект, но с критическими размерами.

При внедрении систем комплексного диагностического мониторинга на них возлагаются задачи по своевременному обнаружению развивающихся дефектов, определению участков повышенной напряженности конструкции, на которых появление дефектов наиболее вероятно, сбору и хранению данных, прогнозированию изменения технического состояния оборудования по времени.

При разработке и производстве систем комплексного диагностического мониторинга ООО «ИНТЕРЮНИС» придерживается следующего алгоритма. В первую очередь проводится анализ проектной и эксплуатационной документации, опреде-

ляются факторы, влияющие или могущие повлиять на повреждаемость конструкций. Затем выявляются потенциально опасные зоны или участки, на которых прогнозируется появление дефектов, определяются виды этих дефектов, характерных для данного типа конструкций. Далее происходит выбор методов и средств неразрушающего контроля, применение которых оптимально для решения задач мониторинга, определяются первичные датчики и другие чувствительные элементы системы. После чего разрабатывается и изготавливается аппаратная часть комплекса.

Аппаратная часть СКДМ представляет собой распределенную систему сбора и обработки диагностических данных и состоит из трех основных частей: измерительной, вычислительной и исполнительной (рис. 1).

Измерительная часть включает в себя многофункциональные измерительные модули с набором различных диагностических и параметрических датчиков.

Вычислительная часть реализуется в промежуточных и центральной вычислительной станции.

Исполнительная часть включает в себя функции управления внешним исполнительным оборудованием (если это необходимо).

Наполнение, т.е. методы и средства, каждой составляющей варьируется в зависимости от объекта контроля и поставленных задач мониторинга.

Базовым методом в СКДМ могут быть использованы преобразователи акустической эмиссии как высокочастотные для контроля металлических конструкций, так и низкочастотные для контроля бетонных, железобетонных сооружений.

Вибродатчики используются при наличии динамического оборудования или когда одним из факторов, влияющих на повреждаемость, является вибрация. Датчики измерения НДС, тензодатчики используются для измерения деформаций в металли-



Рис. 1. Функциональная схема СКДМ

ческих и бетонных элементах конструкций и локализации мест концентрации аномальных напряжений в реальном масштабе времени. В состав системы могут входить инклинометры (датчики угла наклона), которые используются для измерения величин наклона отдельных элементов конструкции в реальном режиме времени с целью сравнения их с допустимыми проектными величинами. Также для контроля дополнительных параметров в СКДМ могут входить метеостанция, гидрологическая станция, которые используются для сбора дополнительной мониторинговой информации об условиях окружающей среды, в которых эксплуатируется объект.

Основным звеном в аппаратной части СКДМ является многофункциональный модуль сбора параметров (ММСП), который используется для подключения датчиков и преобразователей различных типов, дальнейшей оцифровки параметров сигналов, поступивших с первичных преобразователей, и для передачи данных по линии связи на центральную информационно-вычислительную станцию. Устанавливается ММСП непосредственно на контролируемых элементах конструкции.

Программное обеспечение СКДМ имеет стандартный интерфейс, обеспечивающий простоту и легкость настройки системы. Имеется возможность адаптировать ПО под любой тип конструкции. Программное обеспечение решает следующие задачи:

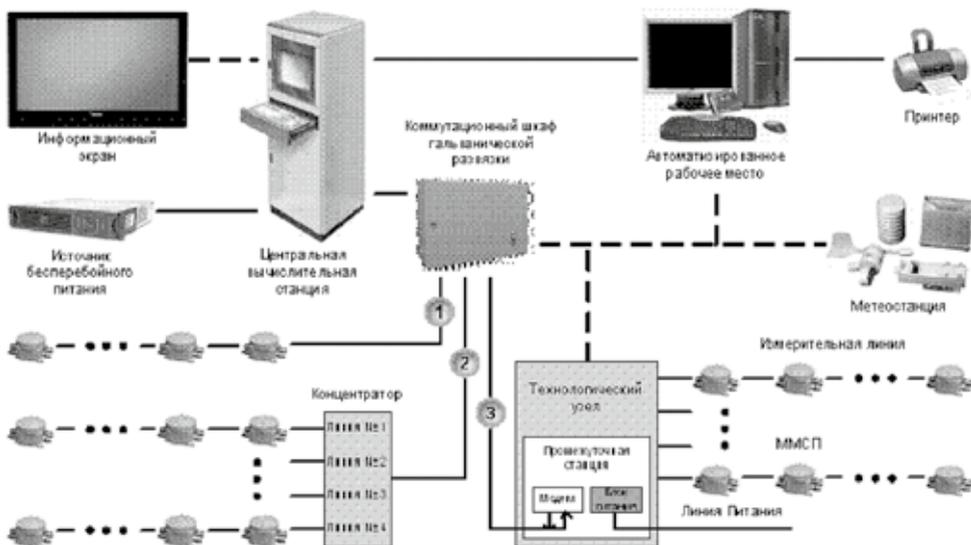


Рис. 2. Структурная схема СКДМ

- Прием и обработка информации, поступающей от аппаратной части системы КДМ в центральную вычислительную станцию.
- Автоматическое сохранение первичных данных и результатов анализа при помощи специализированного устройства записи с возможностью их прочтения

для дополнительной обработки на удаленном терминале.

- Визуализация поступающей информации и результатов ее анализа, отображение текущего состояния объектов на дисплее центральной вычислительной станции и информационном экране.
- Выдача тревожных звуковых сообщений, световой индикации и рекомендаций по действиям персонала в случае наступления нештатных ситуаций той или иной степени опасности. Подача управляющих сигналов на исполнительное оборудование.
- Обобщенный взаимный многофакторный анализ полученных диагностических данных с целью определения текущего технического состояния объектов и выявления тенденций в их поведении.

Блок принятия решений СКДМ о возможности дальнейшей эксплуатации объекта при обнаружении различных дефектов создается на базе физической модели повреждения конструкции под действием нагрузок и дополнительных факторов в процессе эксплуатации. В конечном итоге делается прогноз технического состояния объекта, на основе которого могут вырабатываться следующие решения:

1. Продолжать эксплуатацию с заданными рабочими параметрами.
2. Произвести дополнительное обследование дефектной зоны.
3. Следить за развитием дефекта. Быть готовым к аварийной остановке объекта.
4. Понизить рабочие параметры (давление или температуру).
5. Произвести аварийную остановку объекта.

Примерами реализации СКДМ ООО «ИНТЕРЮНИС» являются системы мониторинга, установленные на большие изотермические резервуары, на реакторы нефтепереработки, аппараты колонного типа химического производства, на автомобильный мост через реку, на высотные здания.

МЕТОД АЭ В ПРАКТИКЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Аннагурт Аннагурдов, Туркменистан

В настоящее время в мире большими темпами строятся новые производственные мощности. Большая часть их относится к нефтегазовому сектору. Требования к качеству строящихся объектов с каждым годом становятся строже из-за использования в конструкциях новых материалов, технологий и т.д. Все это требует нового подхода к диагностике и нового мышления. Имеется также действующее старое оборудование, безопасность которого требует особого внимания, с точки зрения технической диагностики оно является очень интересным. Однако и в диагностике нового оборудования встречаются интересные случаи. В мире для определения технического состояния и ресурса объектов используются различные виды неразрушающего контроля, и среди них акустико-эмиссионный контроль занимает достойное место. При качественном проведении АЭ-контроля результаты данного метода с большой вероятностью совпадают с результатами других видов НК, иногда даже превосходят их в достоверности. АЭ-метод благодаря своей интегральности позволяет экономить время, объем работы и средства, повышает эффективность нахождения активных дефектов, локализует места дефекты и определяет границы активных зон, позволяет классифицировать дефекты по степени активности.

Все ниже упомянутые работы проведены в газовой промышленности, и все выводы относятся к газовому сектору. С точки зрения промышленной безопасности на основе анализа и мониторинга рисков на практике часто встречаются:

- допустимые дефекты при монтаже оборудования и трубопроводов, особенно корневые, такие как непровар корня шва. Этот вид дефекта часто наблюдается в сварных стыках газопроводов и представляют наибольшую угрозу для целостности тела трубопроводов шлейфовых и коллекторных линий. Механизм образования: в месте нахождения дефекта под влиянием сырого потока газа образуется завихрение, с течением времени происходит эрозивный износ шва и появляется свищ. Такие дефекты не сложно обнаружить методом акустической эмиссии, они часто квалифицируются как источники 2 и 3 класса с амплитудой 40-55 дБ. По результатам ультразвукового контроля не допустимый и допустимый дефект. В случае плавного эрозивного износа сварного шва ультразвуковой метод не может выявить дефект. В таких случаях неоценимую информацию можно получить методом толщинометрии после соответствующей подготовки поверхности.

**Объект № 1 (условное обозначение).
Участок газопровода $\varnothing 1020 \times 24$ с коррозионным участком
и дефектом корня шва**

№	Результаты АЭ			Результаты УЗД	
	Координата, м	Средняя амплитуда, дБ	Классификация по АЭ	Заключение по УЗД	Тип дефекта
1	13,25	45	II	Недопустимый дефект	Корродированный участок площадью 12 дм ² (остаточная толщина 6 мм)
2	27,5	44	II	Допустимый дефект	Непровар корня шва
3	76,70	50	III	Недопустимый дефект	Микротрещины

Допустимые дефекты сварного шва при сборке сосуда давления четко регистрируются методом АЭ.

**Объект № 2 (условное обозначение).
Данные, полученные в ходе АЭ-контроля нового сварного
шва сосуда, работающего под давлением, совпадают
с данными рентгеновского контроля**

№	Результаты АЭ			Результаты рентгеновского контроля	
	Координата, м	Средняя амплитуда, дБ	Классификация по АЭ	По результатам рентгеновского контроля вид дефекта	Заключение по рентгеновскому контролю
1	7,82	51	II	Скопление пор	Допустимый
2	10,15	50	I	Пора	Допустимый
3	12,08	49	I	Пора	Допустимый

- Расслоение в теле металла. При проведении АЭ-контроля сепаратора с толщиной стенки 90 мм обнаружены многочисленные локализованные источники, которые были квалифицированы как источники I и II класса с амплитудой 44-50 дБ. Для подтверждения проведено дополнительное диагностирование этих

мест ультразвуковым контролем. Исследования показали, что в местах локализации АЭ явилась результатом параллельного расслоения цилиндрической обечайки с выходом в ближайший сварной шов. С нашей стороны рекомендована остановка сепаратора и замена дефектной обечайки. Данный сепаратор эксплуатировался в течение 6 лет, и дефект имел заводское происхождение. Ежегодный ультразвуковой контроль свидетельствует об остановке развития обнаруженного расслоения.

Дефекты типа расслоения, кроме заводского происхождения, часто встречаются в трубопроводах, где есть напряженные участки и отсутствует ЭХЗ.

Приложение 3

Объект № 3 (условное обозначение). Расслоение в обечайке сосуда, работающего под давлением

№	Результаты АЭ			Результаты УЗД	
	Координата, м	Средняя амплитуда, дБ	Классификация по АЭ	Заключение по УЗД	Тип дефекта
1	x=2,01; y=6,02	47	I	12-14 мм	Расслоение в обечайке
2	x=2,7; y=4,92	46	II		
3	x=2,76; y=6,19	44	I		
4	x=3,78; y=6,7	48	I		
5	x=3,93; y=5,6	46	II		
6	x=4,72; y=4,3	47	I		
7	x=5,00; y=6,15	45	I		
8	x=5,17; y=3,66	47	I		
9	x=5,34; y=3,56	46	II		
10	x=5,64; y=4,51	44	I		
11	x=5,95; y=5,92	45	II		
12	x=6,17; y=5,94	49	I		
13	x=7,12; y=3,33	46	I		
14	x=7,46; y=2,35	47	I		

- Коррозионный износ – часто встречается в виде язвенной, ручейковой и питтинговой коррозии оборудования и трубопроводов. Метод АЭ позволяет локализовать такие дефекты и определить приблизительные границы поврежденных участков. Встречаемая в практике язвенная коррозия – это скопление нескольких АЭ-источников I и II класса по границам с амплитудой около 43-50 дБ, питтинговая коррозия – это множественные слабые источники АЭ I и II класса по сплошной площади или разбросанным площадкам с амплитудой 40-45 дБ.

Объект № 4 (условное обозначение).**Сосуд, работающий под давлением, с корродированным участком**

№	Результаты АЭ			Результаты УЗД	
	Координата, м	Средняя амплитуда, дБ	Классификация по АЭ	Заключение по УЗД	Тип дефекта
1	X=0,15; Y=1,33	61	II		Сплошная коррозия участка обечайки
2	X=0,75; Y=1,70	52	II		
3	X=1,2; Y=1,8	54	II		
4	X=1,72; Y=1,51	47	II		
5	X=1,66; Y=1,64	43	I		
6	X=4,12; Y=1,45	44	I		
7	X=5,69; Y=1,81	49	I		
8	X=8,8; Y=1,63	53	II		

- Наводороживание металла и сварного шва – в основном встречаются в металлах и сварных швах, работающих в сероводородосодержащей среде. Наводороживание металла часто приводит к растрескиванию сварного шва и околошовной зоны. При проведении сварочных работ в таких металлах ухудшается их свариваемость. В трубопроводах, где произошло водородное растрескивание сварного шва, были проведены исследования методом АЭ, локализованы места акустической активности, после ремонта того же шва, через некоторое время (1-2 месяца), снова возникает растрескивание шва. При этом только замена катушки может на некоторое время решить проблему. Получить более подробную информацию позволяет только структурный анализ (металловедение).

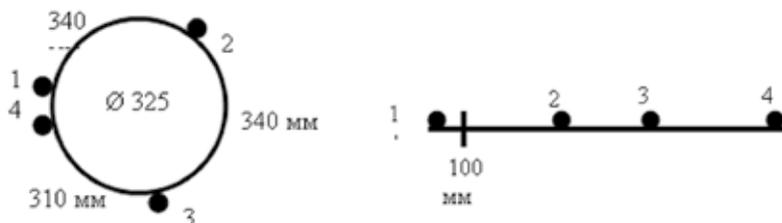


Рис. 1. Схема расположения АЭ-датчиков по отношению к месту ремонта

**Объект № 5 (условное обозначение).
АЭ-контроль в сварных швах****Локации на сварном шве**

№	Координата, м	Средняя амплитуда, дБ	Классификация по АЭ
1	0,05	40	I
2	0,15	45	II
3	0,30	42	II
4	0,40	42	II
5	0,55	45	III

Проведенные работы показывают, что АЭ-метод эффективен в пределах соблюдения ПБ 03-593-03:

- подземные трубопроводы – практика применения акустической эмиссии в подземных трубопроводах показала, что преобразователи АЭ необходимо установить в пределах «слышимости» датчиков, это приблизительно 20-22 м друг от друга. Трубопроводы диаметром до 720 мм можно эффективно контролировать как линейный объект, 720 мм и выше лучше контролировать как цилиндрический объект. АЭ-контроль эффективен там, где затруднено проведение внутритрубной дефектоскопии: УППГ, внутризаводское оборудование, ГРС и т.д.;
- агрегаты для капитального ремонта скважин – контроль в статических испытаниях на грузоподъемность передвижных агрегатов с использованием АЭ предупреждает опасность статического испытания, выявляет слабые узлы, уменьшает объем контроля по дефектоскопии, сводит к минимуму использования тарированного груза, позволяет проведение испытания в полевых условиях на самом месторождении, позволяет определить грузоподъемность агрегата;

**Объект № 6 (условное обозначение).
Вышка для капитального ремонта скважин**

№	Результаты АЭ			Результаты визуального осмотра
	Координата, м	Средняя амплитуда, дБ	Классификация по АЭ	Тип дефекта
1	2,60	53	I	Дефектов не обнаружено
2	6,50	50	I	Дефектов не обнаружено
3	13,35	55	II	Ослабление болтового соединения
4	15,5	48	I	Дефектов не обнаружено
5	32,5	52	II	Небольшой деформированный участок поперечного суппорта
6	33,92	59	II	Места расположения кронблока. Видимых дефектов не обнаружено

- по проведенным исследованиям в устьях скважины и шлейфовых линиях, когда скорость газа достигает 10-12 м/сек, эрозивный износ превосходит коррозионный износ металла труб. Этот результат подтверждается также и ультразвуковой толщинометрией [1];
- АЭ-контроль слабо выявляет релаксационные процессы, вязкое ламинарное течение среды, места потения резервуаров, незначительные течи, места равномерной коррозии и т.д.;
- АЭ-контроль выявляет активные дефекты, такие как течи турбулентного характера (всевозможные пропуски, негерметичности сосудов давления и т.д.), места турбулентного движения, соприкасающиеся с объектом контроля, трещиноподобные дефекты, напряженные участки и т.д.;
- гидро- и пневмоиспытания – сопровождение АЭ-контролем гидро- и пневмоиспытаний объекта позволяет выявлять развивающиеся дефекты сварного шва и основного металла, уменьшает и локализует зону контроля для других видов неразрушающего контроля, способствует классификации по степени опасности;
- объекты с дефектами II класса по АЭ-контролю, но допустимые по показателям других видов НК, работают в течение 6-8 лет. Все эти показатели свидетельствуют о чувствительности и надежности метода АЭ. Основным его недостатком являются жесткие требования к проведению испытания [2].

Все вышеуказанные примеры частично описывают преимущества и роль АЭ в практике неразрушающего контроля и технической диагностики. АЭ-контроль незаменим при проведении пневмо- и гидроиспытаний объектов, определении технического состояния объектов, уменьшения объема контроля и локализации мест развивающихся дефектов. По нашему мнению, необходимо ввести в нормативные документы обязательное применение АЭ-метода в ходе приемо-сдаточных испытаний, периодических пневмо- и гидроиспытаниях и диагностических работах на объектах наравне с обязательными неразрушающими видами контроля, где он технически и экономически целесообразен.

Группой АЭ-диагностики в объектах добычи газа, точнее, в узлах первичной подготовки газа (УППГ) и на заводе очистки газа, кроме обычно предполагаемых мест, выявлены и постоянно находятся под наблюдением наиболее слабые узлы. Благодаря постоянному контролю объектов со стороны группы АЭ в течение 12 лет у заказчика уменьшилось до минимума образование свищей, аварийные и внеплановые остановки. Планово проводятся диагностические работы и оценка дефектов, а заказчик планомерно устраняет дефектные участки.

Для уменьшения производственного риска необходимо уменьшить роль человеческого фактора, внедрить достижение научно-технического прогресса в производство. Необходимо дальнейшее развитие нормативно-технической базы документов (НТД), выполнение требований НТД, постоянное слежение за техническим состоянием оборудования с помощью экологических, технологических и технических приборов, моделировать техническое состояние оборудования, прогнозировать специальными программами экологическое и техническое состояние объекта, чтобы производственные факторы определенно были связаны с техническим состоянием объекта. В мире существует множество приборов для оценки технического состояния. Все их необходимо систематизировать, использовать на объекте наравне с эксплуатационными приборами, собрать статистические данные с дальнейшей обработкой. Это поможет предупреждать и анализировать критические и аварийные ситуации, заблаговременно планировать ремонтные работы.

Библиографический список

1. Протоколы по толщинометрии, проведенной в устьях скважин, шлейфов и коллекторах, 2003-2012 гг.
2. ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. 2003 г.

ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ

С.В. Каменский, Е.С. Трофимов, ОАО «Оргэнергогаз»

Опыт диагностических обследований технологических трубопроводов КС показал наличие существенных проблем, связанных с необходимостью выполнения больших объемов диагностических и ремонтных работ. Как результат мы имеем запаздывание по выполнению капитального ремонта технологических трубопроводов, чреватое повышением риска аварий на КС. Помощь в решении этой проблемы могло бы оказать применение АЭК в качестве экспресс-метода диагностирования.

Возможности метода АЭ делают его незаменимым при диагностировании изношенных технологических трубопроводов КС. И хотя методические разработки АЭК на газопроводах появились еще в конце 1990-х и с тех пор не актуализировались. В СТО Газпром 2-2.3-328-2009 применение АЭК носит рекомендательный характер. При этом подходы к проведению АЭ-контроля и возможности АЭ-систем претерпели серьезные изменения.

Проведение АЭК на протяженном участке газопровода связано с большим комплексом подготовительных работ и чувствительно к отклонению от намеченных условий контроля. Поэтому важно тщательно прорабатывать порядок действий на всех этапах контроля.

В связи с очень сложной природой распространения сигналов АЭ в реальной конструкции трубопровода процесс обработки результатов АЭК является нетривиальной задачей и не может быть заменен автоматизированными процедурами. Даже без учета влияния изоляции, сварных швов, ответвлений трубопровода правильная идентификация сигнала АЭ и локализация его источника требует высокой подготовки специалистов, выполняющих контроль. Существенное влияние на определение координат источника оказывает дисперсия акустических волн.

Применение АЭК при продлении сроков эксплуатации типового оборудования КС (сосуды, АВО) позволило сократить объем диагностических работ и удешевить процедуры диагностирования. Использование АЭК на трубопроводах требует более ответственного подхода со стороны экспертных организаций.

Заявка на разработку методики АЭК технологических трубопроводов КС в Перспективный план НИОКР ОАО «Газпром» на 2012-2015 гг. В целом задачей методики должна стать унификация существующих подходов к технологии проведения акустико-эмиссионного контроля технологических трубопроводов КС.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ОЦЕНКЕ ПРИГОДНОСТИ К ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПОСЛЕ ПОЖАРА

*В.Г. Харебов, В.И. Эльманович, В.С. Едигаров, Т.А. Сурина, О.Н. Алфутова,
ООО «ИНТЕРЮНИС»*

Реалии XXI в. приводят нас к пониманию, что в современных условиях достижение абсолютной безопасности невозможно и Человечеству придется жить в мире, далеком от нулевых рисков. И нам надо учиться в таком мире жить: нормативно, организационно, технологически и психологически.

В докладе рассмотрены методы оценки пригодности к эксплуатации технологического оборудования химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности после аварий, сопровождающихся взрывами и пожарами.

В результате аварии (взрыва и последующего пожара) оборудование получает повреждения вследствие воздействия ударной волны, огня, конвективного теплового потока и воды, использованной при пожаротушении. При оценке пригодности к эксплуатации (ПКЭ) такого оборудования (определение возможности, условий и сроков дальнейшей эксплуатации) мы имеем дело с неординарной экспертизой промышленной безопасности. В России отсутствуют нормативные и методические документы по проведению экспертизы после взрыва-пожара. В группе компаний «ИНТЕРЮНИС» разработан стандарт СТО ИУ4.02-2012 «Оценка пригодности к эксплуатации оборудования после пожара» [1].

В соответствии с СТО ИУ4.02-2012 предусмотрено пошаговое выполнение работ по оценке ПКЭ оборудования после пожара.

Шаг 1. Сбор исходных данных.

Для определения степени поражения технологического оборудования и оценки его пригодности к эксплуатации необходимо:

- смоделировать сценарий развития аварии;
- установить источник воспламенения и эпицентр пожара;
- установить стадию технологического процесса, на которой произошло воспламенение (пуск, остановка, нормальные условия эксплуатации, отклонения от нормальных условий эксплуатации);
- установить, когда и как было обнаружено возгорание, время прибытия пожарной бригады (от времени обнаружения возгорания);
- восстановить (по показаниям приборов в операторной, опросу эксплуатационного персонала, персонала пожарной команды, фото- и видеозаписям) сценарий развития аварии;
- определить продолжительность пожара, направление и скорость ветра во время пожара;

- провести анализ технологии тушения пожара (жидкость, используемую при пожаротушении, направление тушения пожара, точки на местности, с которых производился контроль тушения пожара);
- установить условия срабатывания устройств КИПиА;
- отобразить план и профиль расположения оборудования с указанием источника воспламенения и направления ветра.

Шаг 2. Моделирование сценария развития событий при аварии.

Количественная оценка последствий аварийных выбросов газовой смеси (ГВС) при разрушении (разгерметизации) выполняется по Методикам Ростехнадзора РД 03-26-2007 и РД 03-409-01. Компьютерное моделирование развития аварии проводится с использованием Программного комплекса ТОКСИ+Risk [2].

На основании сведений из Акта расследования аварии, просмотра фото- и видеозаписей в компьютерной модели используют следующий сценарий поэтапного развития аварии:

Этап 1. Разгерметизация оборудования.

Этап 2. Образование и распространение облака газовой смеси (ГВС).

Этап 3. Воспламенение облака ГВС от источника воспламенения.

Этап 4. Распространение волны горения от источника воспламенения к источнику выброса.

Этап 5. Взрыв ГВС.

Этап 6. Пожар (первичное возгорание).

Этап 7. Вторичные очаги горения.

При выполнении расчетов необходимые количественные характеристики (физико-химические свойства и количество опасных веществ, участвующих в аварии и т.п.) используют данные из Декларации промышленной безопасности предприятия.

При моделировании распространения облака ГВС (Этап 2) используют модель из РД 03-26-2007 [3] «Разгерметизация емкости с газом»: образование аварийного отверстия в стенке емкости и последующее истечение газа в окружающую среду (рис. 1).

Расчеты распространения опасных веществ в атмосфере основаны на физико-математической модели рассеяния «тяжелого» газа.

Модель «тяжелого» газа учитывает следующие процессы:

- движение облака в переменной по высоте скорости ветра;
- гравитационное растекание;
- рассеяние облака в вертикальном направлении за счет атмосферной турбулентности (подмешивание воздуха в облако);
- рассеяние облака в горизонтальном направлении за счет подмешивания воздуха в облако, происходящего как за счет атмосферной турбулентности, так и за счет гравитационного растекания;
- нагрев или охлаждение облака за счет подмешивания воздуха.

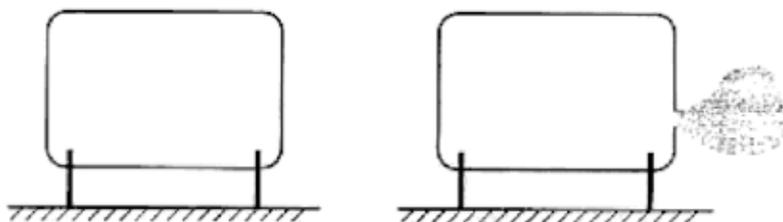


Рис. 1. Разгерметизация емкости с газом

При определении размеров зон, где возможно горение (или детонация) газовой смеси (далее – ГВС), предполагается, что горение (или детонация) может быть инициировано в областях со средней концентрацией от 0,5 нижнего концентрационного предела воспламенения (далее – НКПВ) до верхнего концентрационного предела воспламенения (далее – ВКПВ).

В соответствии с [3] выполнены количественные расчеты:

- размеров зон дрейфа пожаровзрывоопасных облаков, в пределах которых сохраняется способность к воспламенению;
- размеров зон распространения пламени (пожара-вспышки) или детонации, области продуктов сгорания;
- количества опасного вещества в облаке, ограниченном концентрационными пределами воспламенения.

Пример оценки концентрационных пределов воспламенения при распространении облака ГВС приведен на рис. 2.

При моделировании последствий взрыва ГВС используют алгоритм расчета последствий взрыва ГВС, приведенный в РД 03-409-01 [4] (рис. 3).

На рис. 4 показаны зоны вероятных повреждений оборудования, зданий и сооружений ударной волной от взрыва ГВС.

При моделировании факела горения при пожаре используют модель из ГОСТ Р 12.3.047-98 [5].

На рис. 5 показано воздействие факела горения на технологическое оборудование.

Шаг 3. Определение зон поражения при пожаре.

В соответствии с СТО ИУ4.02-2012 для определения степени термического влияния на объекты/элементы были выделены шесть Зон поражения оборудования (I-VI) при пожаре:

Зона I. Воздействия пламени не было. Температура оборудования не превышала расчетной.

Зона II. Воздействие дыма и воды, использованной при пожаротушении (температура оборудования не превысила 70 °С).

Зона III. Незначительное воздействие огня (температура оборудования в пределах 70 °С-200 °С).

Зона IV. Воздействие огня средней интенсивности (температура оборудования в пределах 200 °С-430 °С).

Зона V. Сильное воздействие огня (температура оборудования в пределах 430 °С-730 °С).

Зона VI. Очень сильное воздействие огня (температура оборудования свыше 730 °С).

Отнесение оборудования к конкретной зоне поражения определяется температурой и временем воздействия.

Примеры плана и профиля технологической установки с указанием зон поражения приведены на рис. 6, 7. На рис. 8 показаны зоны поражения колонного оборудования.

При выделении Зон поражения используют температурные индикаторы (признаки).

Шаг 4. Методики оценки и критерии пригодности.

Оценочные уровни

В соответствии с СТО ИУ4.02-2012 при проведении оценок пригодности к эксплуатации объектов/элементов, поврежденных во время пожара, используют три оценочных уровня (рис. 9).

На 1-м оценочном уровне выполняют:

- отбраковку оборудования по визуальному осмотру (разрушение технических устройств, разрушение и обгорание теплоизоляции);
- типовое обследование оставшегося оборудования и оценку его соответствия действующим нормам и правилам.

На 2-м оценочном уровне:

Проводят измерение отклонения сосуда от вертикальности и прямолинейности его вертикального профиля для определения местоположения и размеров возможных местных нарушений геометрической формы (МНГФ): вмятин, выпучин, гофров.



Рис. 2. Распространение облака ГВС по показаниям камер видеонаблюдения и расчетные концентрационные пределы воспламенения

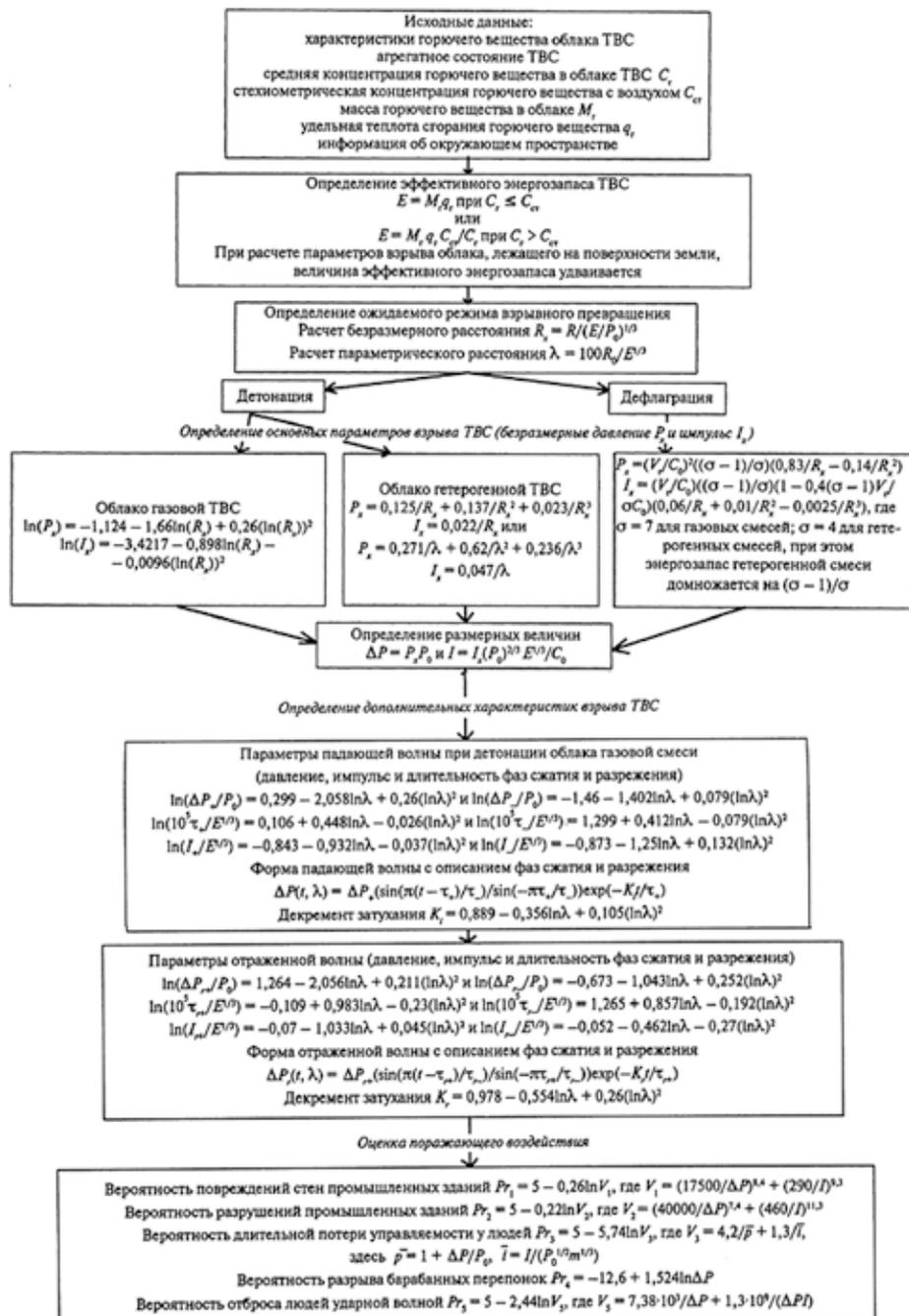


Рис. 3. Алгоритм расчета последствий аварийных взрывов ГВС

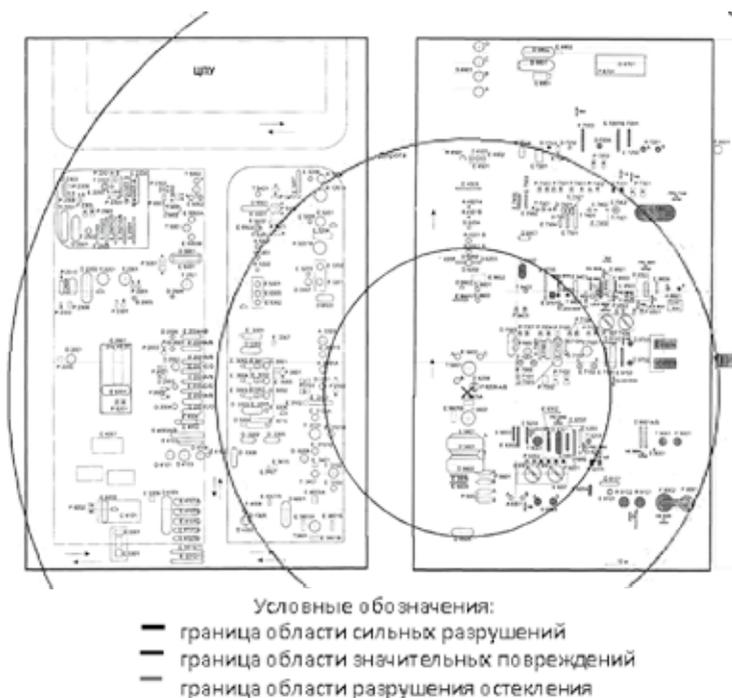


Рис. 4. Зоны вероятных повреждений оборудования, зданий и сооружений ударной волной от взрыва ГВС

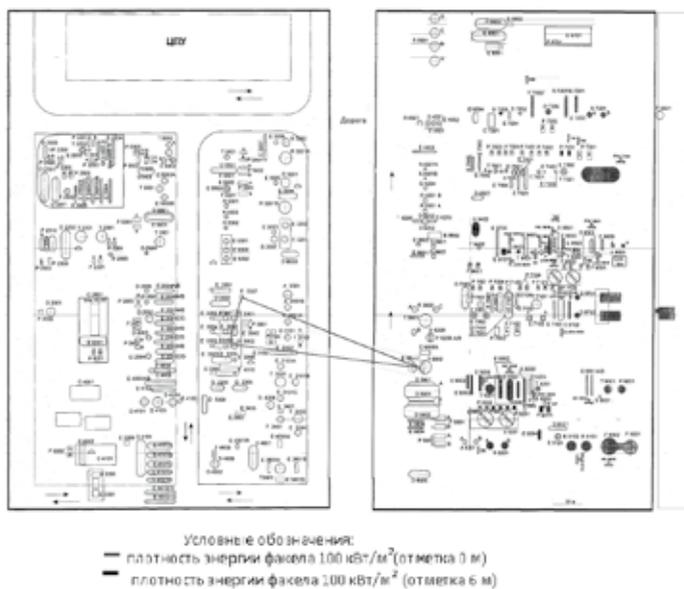


Рис. 5. Воздействие факела горения на технологическое оборудование

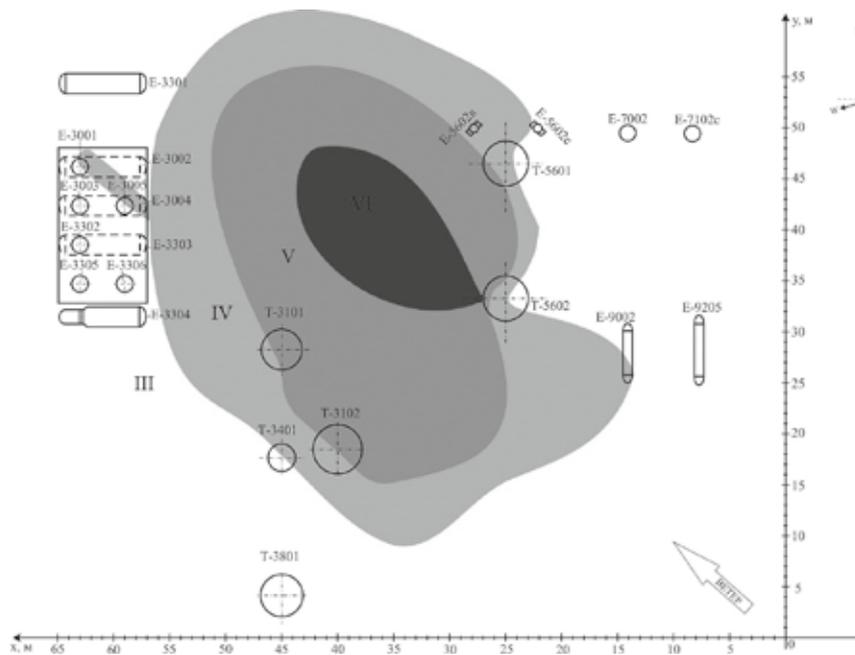


Рис. 6. План технологической установки с указанием зон поражения оборудования

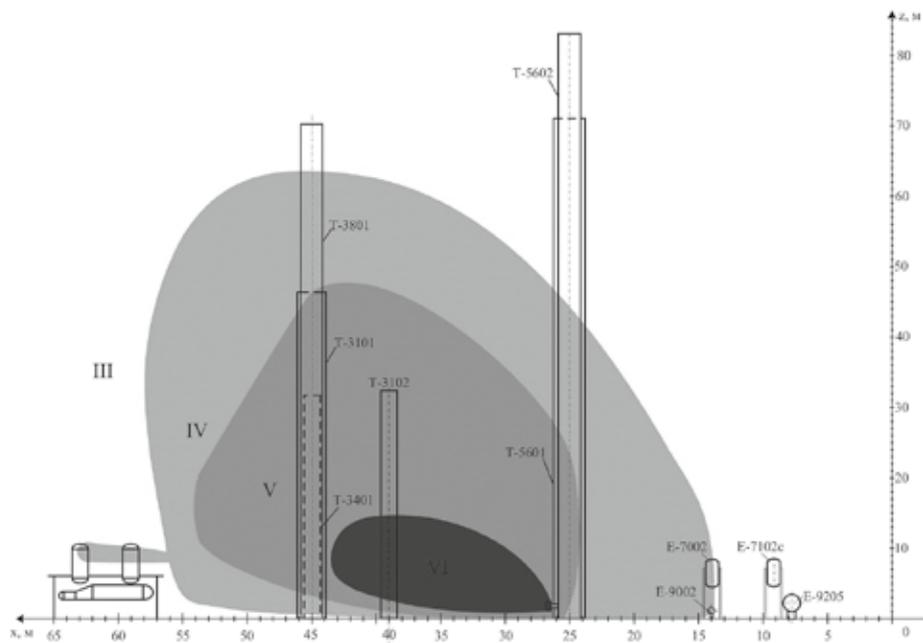


Рис. 7. Профиль технологической установки с указанием зон поражения оборудования

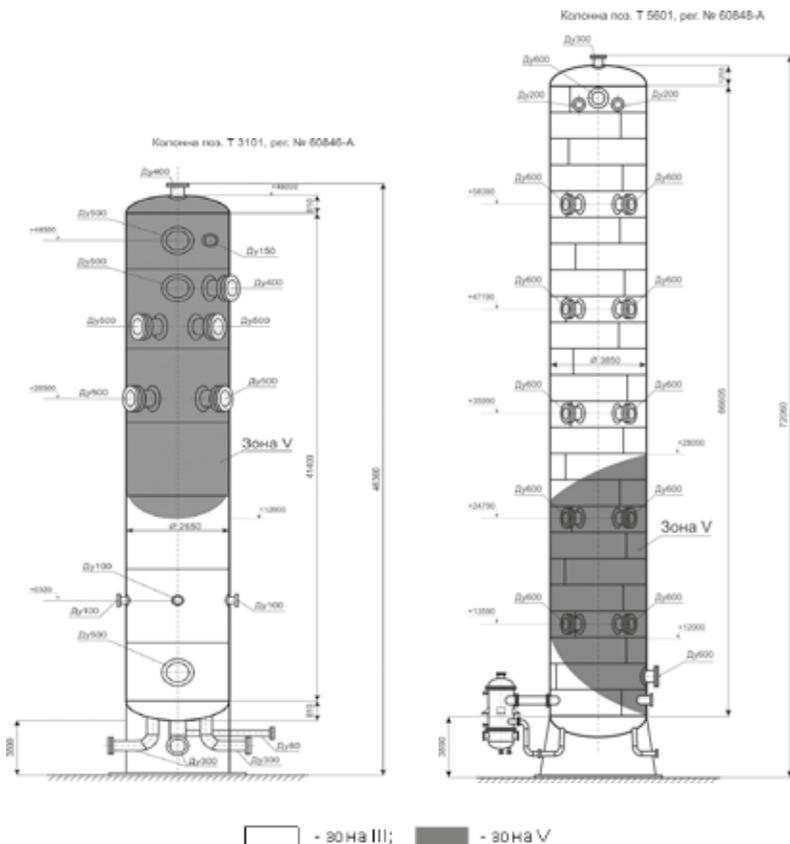


Рис. 8. Зоны поражения колонного оборудования в результате пожара

Расчет на прочность колонн и другие расчеты по действующим НТД (ГОСТ Р 52857.1-2007 - 52857.12-2007, РД 03-421 [6, 7]).

Для оборудования, расположенного в зонах III-V, измеряют твердость основного металла, металла шва и зон термического влияния сварки. Причем для теплоизолированного оборудования бывает, как правило, достаточно измерить твердость нетеплоизолированных элементов (фланцев, крышек люков-лазов, патрубков штуцеров).

Замеры твердости металла нетеплоизолированного оборудования проводят для основных несущих элементов корпуса: обечаек, днища и сварных соединений (продольных и кольцевых).

При значениях твердости ниже нормативных, указанных в СТО-СА-03-004-2009 [8], допускается проводить перерасчет допустимого давления (отбраковочной толщины стенки) с учетом фактических механических свойств металла. При получении завышенных значений твердости рекомендуется выполнить местную термическую обработку.

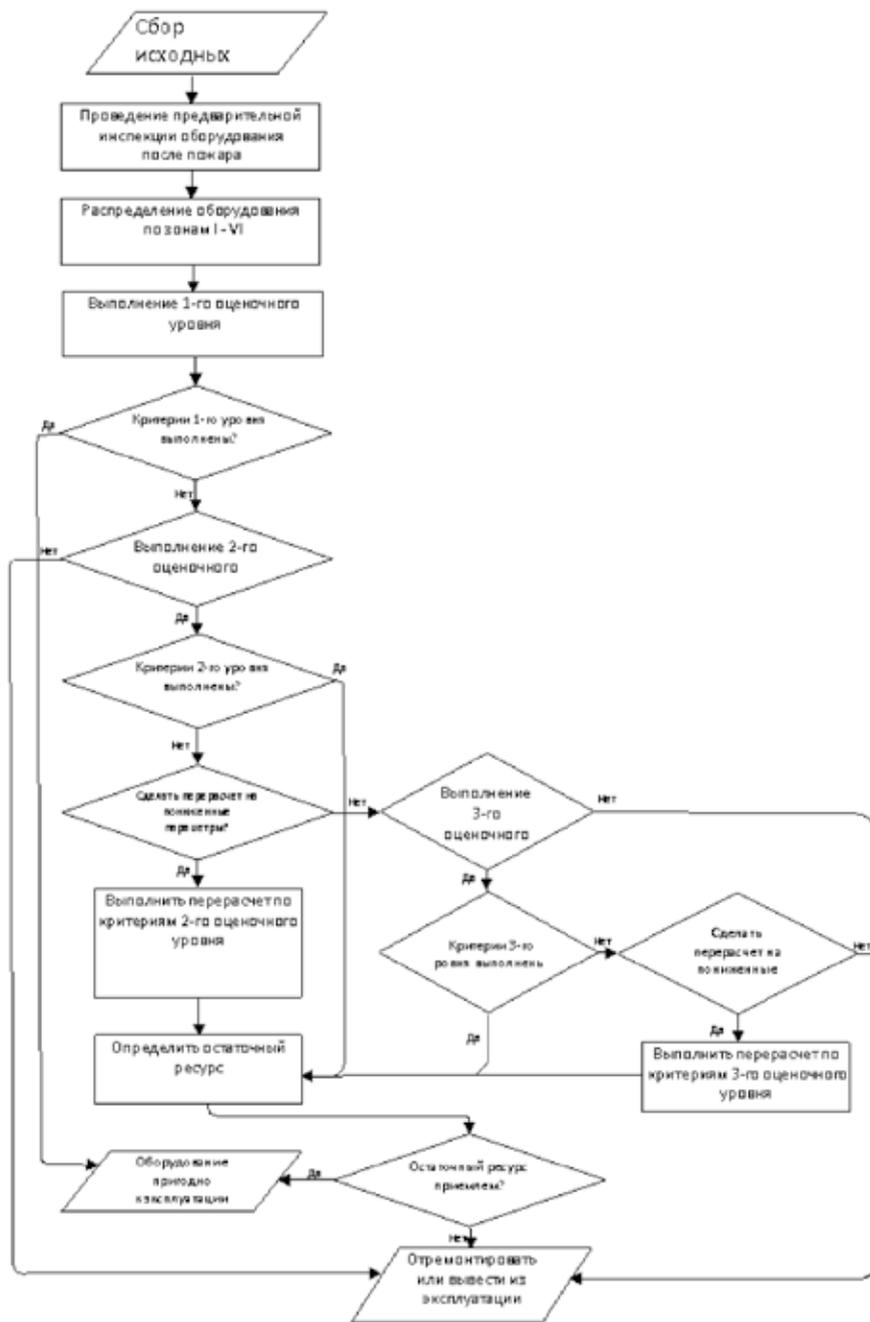


Рис. 9. Блок-схема проведения оценки пригодности оборудования к эксплуатации после пожара

Фактические значения временного сопротивления и предела текучести определяют с помощью переносных твердомеров по ГОСТ 22761-77 и ГОСТ 22762-77.

Расчет на прочность выполняют с учетом деградации физико-механических свойств металла при пожаре.

Допускаемые напряжения для объектов/элементов, подвергшихся термическому воздействию при пожаре, определяют по формуле:

$$[\sigma] = \min \left\{ [\sigma]_{ГОСТ}; \frac{\sigma_T^\phi}{n_T}; \frac{\sigma_B^\phi}{n_B} \right\} \quad (1)$$

где $[\sigma]_{ГОСТ}$ – допускаемые напряжения по Р 52857.1-2007;

σ_T^ϕ – предел текучести, определенный по результатам замера твердости;

σ_B^ϕ – предел прочности (временное сопротивление), определенный по результатам замера твердости;

$n_T = 1,5$ – коэффициент запаса прочности по пределу текучести;

$n_B = 2,4$ – коэффициент запаса прочности по пределу прочности (временному сопротивлению).

В соответствии с РД 03-418 [9], п. 4.2.6 в качестве критерия приемлемости риска эксплуатации оборудования, подвергшегося вследствие пожара воздействию ударной волны и теплового потока, выбирают условие выполнения дополнительных требований безопасности.

Шаг 5. Оценка и мониторинг остаточных напряжений в колонном оборудовании после неконтролируемого теплового воздействия.

При пожаре произошло неконтролируемое тепловое воздействие, при котором общий нагрев корпуса колонн сопровождался локальным перегревом стенки. Локальные перегревы приводят к возникновению неоднородного и нестационарного температурного поля в корпусе колонны и, как следствие, – к возникновению неоднородного напряженно-деформированного состояния (НДС) в стенке.

Расчетная схема температурного поля для кругового пятна локального перегрева показана на рис. 10. Расчетная схема определения напряжения приведена на рис. 11.

Напряжения в тонкостенной обечайке, нагруженной внутренним давлением, возникающие при наличии локального перегрева, можно условно разделить на НДС «большого пятна» и НДС «малого пятна».

Для пятна локального перегрева «малого» размера:

$$\left(\frac{A}{2} \leq 2,5\sqrt{R \cdot S} \right) \quad (2)$$

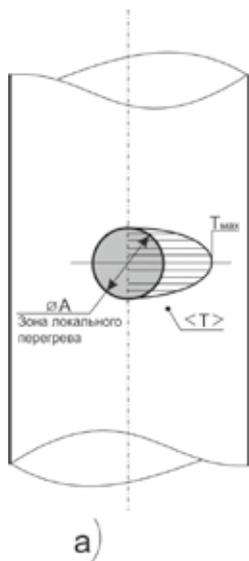


Рис. 10. Расчетное поле температур

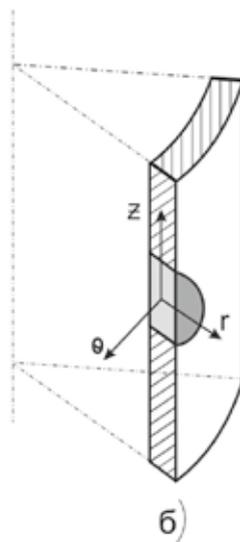


Рис. 11. Расчетная схема определения напряжений при термосиловом нагружении тонкостенной оболочки

в корпусе действуют напряжения от температурного градиента по толщине стенки корпуса $\sigma^t \Delta S$ и от градиента в осевом направлении $\sigma^t \Delta L$.

Температурные напряжения от температурного градиента по толщине стенки корпуса:

$$\sigma'_{\Delta S z} = \sigma'_{\Delta S \theta} = \pm \frac{\alpha \cdot E \cdot \text{grad} T \cdot S}{2 \cdot (1 - \nu)}, \text{ МПа.} \quad (1)$$

Температурные напряжения от температурного градиента в осевом направлении
В центре пятна перегрева:

$$\sigma'_{\Delta Lz} = 0, \quad (2)$$

$$\sigma'_{\Delta L\theta} = -\frac{E \cdot \alpha \cdot a}{\beta^2}, \quad (3)$$

За пределами пятна перегрева:

$$\sigma'_{\Delta Lz} = \pm \frac{6M^*}{S^2}, \quad (4)$$

$$\sigma'_{\Delta L\theta} = v\sigma'_{\Delta Lz}, \quad (5)$$

$$M^* = -2 \cdot W_{II} \cdot \alpha \cdot R \cdot a, \quad (6)$$

$$W_{II} = \frac{E \cdot S^3}{12(1-\nu^2)}, \quad (7)$$

$$\beta = \frac{\sqrt[4]{3(1-\nu^2)}}{\sqrt{R \cdot S}}, \quad (8)$$

$$a = \frac{4 \cdot \Delta T_L}{A^2}, \quad (9)$$

где ΔT_L – максимальный перепад температур в зоне перегрева в осевом направлении;
A – диаметр пятна перегрева.

$$\text{grad}T = \frac{\Delta T_S}{S}. \quad (10)$$

Температурные напряжения от температурного градиента в окружном направлении

Для пятна «большого» размера:

$$\left(\frac{A}{2} > 2,5\sqrt{R \cdot S} \right)$$

в корпусе возникают дополнительные напряжения от температурного градиента в окружном направлении $\sigma'_{\Delta D}$.

$$\sigma'_{\Delta Dz} = \pm \frac{1-\nu}{2} \cdot \alpha \cdot E \cdot \Delta t_D \quad (11)$$

$$\sigma'_{\Delta D\theta} = 0 \quad (12)$$

Температурные напряжения от квазистатического температурного градиента

При тушении пожара водой и охлаждении колонн во избежание их обрушения дополнительные температурные напряжения от квазистатического изменения температуры стенки корпуса:

$$\sigma'_{V_t} = \pm 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot s^2 \cdot V_t \quad (13)$$

где V_t – скорость изменения температуры стенки, °C/мин.

Расчет суммарных термосиловых напряжений в стенке сосуда

Центр пятна перегрева («горячая» зона)

Наружная поверхность

Окружные напряжения:

$$\sigma^{\theta r'} = \frac{p \cdot D}{2S} + |\sigma'_{\Delta S\theta}| - |\sigma'_{\Delta L\theta}| \pm |\sigma'_{V_t}| \quad (14)$$

Осевые напряжения:

$$\sigma^z r' = \frac{p \cdot D}{4S} + |\sigma'_{\Delta Sz}| - |\sigma'_{\Delta Dz}| \pm |\sigma'_{V_t}| \quad (15)$$

Внутренняя поверхность

Окружные напряжения:

$$\sigma^{\theta r'} = \frac{p \cdot D}{2S} - |\sigma'_{\Delta S\theta}| - |\sigma'_{\Delta L\theta}| \pm |\sigma'_{V_t}| \quad (16)$$

Осевые напряжения:

$$\sigma^z r' = \frac{p \cdot D}{4S} - |\sigma'_{\Delta S\theta}| - |\sigma'_{\Delta Dz}| \pm |\sigma'_{V_t}| \quad (17)$$

В формулах (14)-(17) величина $|\sigma'_{V_t}|$ берется со знаком «плюс» для случая охлаждения водой при тушении пожара пятна перегрева, со знаком «минус» – для случая быстрого нагрева корпуса в процессе пожара.

За пределами пятна перегрева («холодная» зона)

Наружная поверхность

Окружные напряжения:

$$\sigma^{\theta X} = \frac{p \cdot D}{2S} + |\sigma'_{\Delta L\theta}| \quad (18)$$

Осевые напряжения:

$$\sigma_z^{aX} = \frac{p \cdot D}{4S} + |\sigma_{\Delta D_z}^t| \quad (19)$$

Внутренняя поверхность

Окружные напряжения:

$$\sigma_{\theta}^{aX} = \frac{p \cdot D}{2S} + |\sigma_{\Delta L_{\theta}}^t| \quad (20)$$

Осевые напряжения:

$$\sigma_z^{aX} = \frac{p \cdot D}{4S} + |\sigma_{\Delta D_z}^t| \quad (21)$$

Дополнительные осевые напряжения $|\sigma_{\Delta D_z}^t|$ действуют только для пятна перегрева «большого» размера.

Эквивалентные напряжения определяют по формулам ПНАЭ Г-7-002:

$$\sigma_{\ominus} = \sqrt{\sigma_{\theta}^2 + \sigma_z^2 - \sigma_{\theta} \cdot \sigma_z} \quad (22)$$

Графики зависимости эквивалентных напряжений в корпусе колонны от температуры при локальном перегреве стенки 150 °С для различных комбинаций размера пятна перегрева, охлаждения водой при тушении пожара пятна перегрева и быстром нагреве корпуса приведены на рис. 12-13.

«МАЛОЕ ПЯТНО»

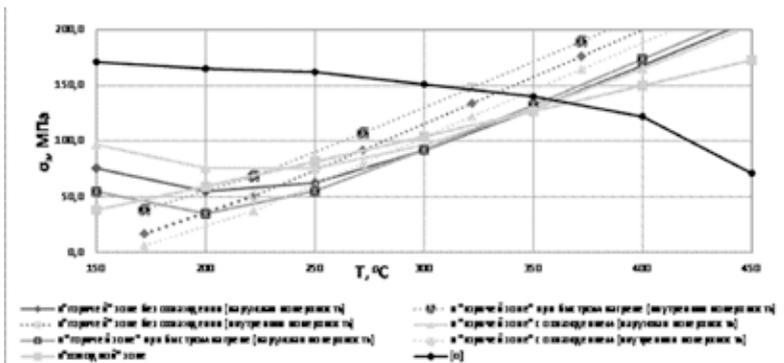


Рис. 12. Зависимость эквивалентных напряжений в корпусе колонны от температуры локального перегрева стенки (диаметр пятна перегрева 1000 мм)

«БОЛЬШОЕ ПЯТНО»

После ликвидации аварии и охлаждения колонны происходит охлаждение колонн с образованием самоуравновешенного поля остаточных напряжений.

Для оценки влияния на возможность и условия эксплуатации колонн проведена классификация напряжений. При классификации использована предложенная API 579-1/ASME FFS-1 Диаграмма Хоппера (рис. 14).

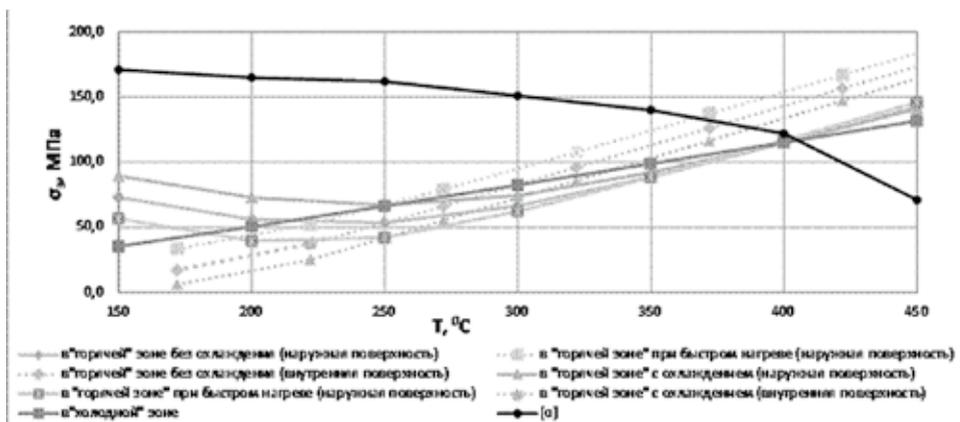


Рис. 13. Зависимость эквивалентных напряжений в корпусе колонны от температуры локального перегрева стенки (диаметр пятна перегрева 6000 мм)

В качестве критериев пригодности к эксплуатации в API 579-1/ASME FFS-1 [10] принято предотвращение:

- «пластического коллапса», т.е. образования в стенке аппарата пластического шарнира;
- циклического накопления пластических деформаций.

Условия пригодности к эксплуатации по API 579-1/ASME FFS-1 приведены в таблице 1.

Таблица 1

Условия пригодности к эксплуатации по API 579-1/ASME FFS-1

Категории напряжений	Ограничения по допускаемым напряжениям	Ограничения по пределу текучести
Общие мембранные 1-го рода, σ_m	$[\sigma]$	$2/3 \cdot \sigma_T$
Местные мембранные 1-го рода, σ_L	$1,5 \cdot [\sigma]$	σ_T

Общие мембранные плюс изгибные 1-го рода, ($\sigma_L + \sigma_n$)	1,5·[σ]	σ_T
Напряжения 1-го рода плюс 2-го рода ($\sigma_L + \sigma_n + \sigma_g$)	3·[σ]	2· σ_T

Напряжения 1-го рода			Напряжения 2-го рода (мембранные плюс изгибные)	Пиковые в зонах концентрации
Общие мембранные	Местные мембранные	Изгибные		

При пожаре происходит неконтролируемое тепловое воздействие, при котором общий нагрев корпуса оборудования сопровождается локальным перегревом стенки. Локальные перегревы приводят к возникновению неоднородного и нестационарного температурного поля в корпусе колонны и, как следствие, – к возникновению неоднородного напряженно-деформированного состояния (НДС) в стенке.

Под действием локальных перегревов при пожаре возможна активизация следующих механизмов повреждения (МП) оборудования:

МП1 – образование термических трещин;

МП2 – возникновение самоуравновешенного поля остаточных напряжений, зон локальной пластики;

МП3 – циклическое накопление пластических деформаций в процессе пуска-остановки (вторичная пластика).

Рассмотрим особенности оценки указанных механизмов повреждения методом акустической эмиссии.

Для оценки и мониторинга повреждений по механизму МП1 применяют акустико-эмиссионный контроль по схеме применения 1 из ПБ 03-593-03 [11].

При оценке и мониторинге повреждений по механизму МП3 возникновение в корпусе колонны вторичной пластики при пусках-остановках выявляется акустико-эмиссионным контролем (ПБ 03-593-03, схема применения 3).

В соответствии с российскими нормативными документами распределение остаточных напряжений по механизму МП2 можно определить методом магнитной памяти металла (ММП) (ГОСТ Р 52005-2003, ГОСТ Р 52081-2003 [12, 13]).

Периодический контроль акустико-эмиссионным и методом магнитной памяти металла вносятся в перечень мониторинговых мероприятий по обеспечению безопасной эксплуатации оборудования в процессе эксплуатации.

Выводы:

1. Рассмотрены методики и технологии Стандарта группы компаний «ИНТЕРЮНИС» по оценке пригодности к эксплуатации оборудования после пожара (СТО ИУ4.02-2012).
2. Рассмотрены применения метода акустической эмиссии для оценки и мониторинга повреждений, возникающих при взрыве и пожаре на технологических установках.

<p>Постоянные по поперечному сечению напряжения. Не учитываются напряжения в соединении элементов конструкции (обечайки с днищем, конусом и т.п.) и концентрация напряжений у трещиноподобных дефектов. Возникают только вследствие механических нагрузок</p>	<p>Постоянные по поперечному сечению напряжения. Учитываются напряжения в соединении элементов конструкции (обечайки с днищем, конусом и т.п.). Не учитывается концентрация напряжений у трещиноподобных дефектов. Возникают только вследствие механических нагрузок</p>	<p>Линейно изменяются в поперечном сечении пропорционально расстоянию от нейтральной поверхности оболочки. Не учитываются напряжения в соединении элементов конструкции (обечайки с днищем, конусом и т.п.) и концентрация напряжений у трещиноподобных дефектов. Возникают только вследствие механических нагрузок</p>	<p>Самоуравновешенные напряжения, возникающие из условия непрерывности перемещений. Возникают вследствие механических нагрузок или от разности температурных расширений элементов. Не учитывается концентрация напряжений у трещиноподобных дефектов</p>	<p>Максимальные напряжения в зонах концентрации у ТПД Температурные напряжения в зонах концентрации у ТПД. Вызывают усталостное разрушение. Не приводят к разрушению при статических нагрузках</p>
<p>σ_m</p>	<p>σ_L</p>	<p>σ_n</p>	<p>σ_g</p>	<p>σ_f</p>

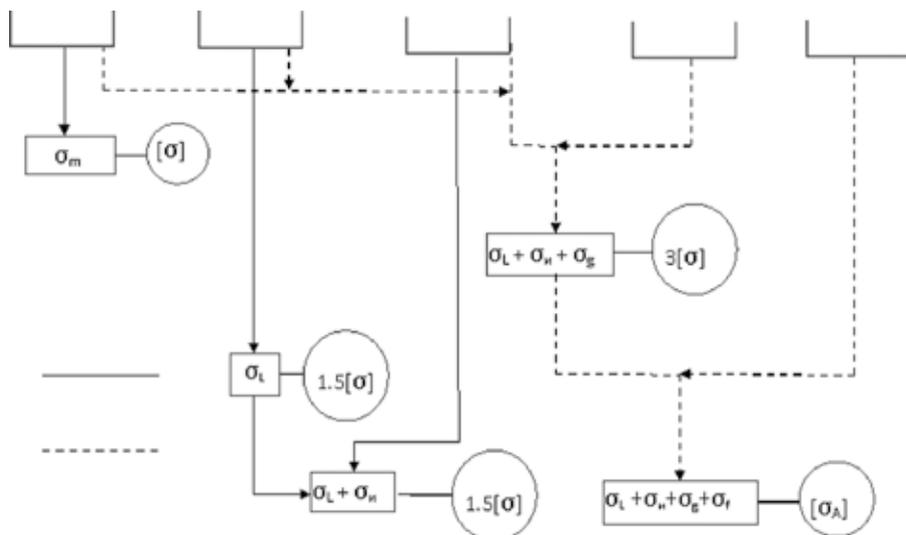


Рис. 14. Категории напряжений в сосудах, работающих под давлением (Диаграмма Хоппера)

Библиографический список

1. СТО ИУ4.02-2012 «Оценка пригодности к эксплуатации оборудования после пожара».
2. Программный комплекс ТОКСИ+Risk 2.0 для оценки риска и расчета последствий аварий на производственных объектах. 2011.
3. РД 03-26-2007 Методические указания по оценке последствий аварийных выбросов опасных веществ. Утверждены приказом Ростехнадзора от 14.12.2007 № 859.
4. РД 03-409-01 Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей.
5. ГОСТ Р 12.3.047-98 Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля.
6. ГОСТ Р 52857.1-2007 - 52857.12-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.
7. РД 03-421-01 Методические указания по проведению диагностирования технического состояния и определению остаточного срока службы сосудов и аппаратов.
8. СТО-СА-03-004-2009 Трубчатые печи, резервуары, сосуды и аппараты нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств. Требование к техническому надзору, ревизии и отбраковке. Волгоград, ВНИКТИнефтехимоборудование, 2010.
9. РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов.
10. API 579-1/ASME FFS-1. Fitness-For-Service - 2007. USA Standard.
11. ПБ 03-593-03 Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов.
12. ГОСТ Р 52005-2003. Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Общие требования.
13. ГОСТ Р 52081-2003. Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Термины и определения.

МЕТОД АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ПРОЦЕДУРАХ RISK-BASED INSPECTION РЕЗЕРВУАРНЫХ ПАРКОВ

В.И. Эльманович, ООО «ИНТЕРЮНИС» А.Л. Колбин, ООО «Диагностика и анализ риска»

С начала XXI в. в большинстве стран Евросоюза, Латинской Америки и США объем, методы и периодичность инспекций (контроля технического состояния) технических устройств на потенциально опасных производственных объектах проводят по Процедурам Risk-Based Inspection – RBI (Инспекция на Базе Оценки Риска – ИБОР).

Технологии RBI изложены в документах Американского нефтяного института:

- API RP 580 01-Nov-2009. Risk-Based Inspection, Second Edition.
- API RP 581. 01-Sep-2008. Risk-Based Inspection Technology, Second Edition.

Методология RBI подробно обсуждалась в предыдущем докладе. Базовые принципы RBI технических устройств на опасных производственных объектах (ОПО) показаны на рис. 1, 2.

Контроль методом акустической эмиссии (АЭ) днищ резервуаров проводился рамках выполнения работ по «Методике эксплуатационной надежности и практики мирового уровня в области технического обслуживания на терминалах хранения и распределения № 1 (рис. 3) и № 2 (рис. 4).

Целью АЭ-контроля является контроль целостности днища резервуара, выявление развивающихся дефектов в основном металле и сварных соединениях листов днища, регистрация активных коррозионных процессов в днище, ранжирование резервуаров для выдачи рекомендаций по периодичности инспекций резервуара. АЭ-контроль является составной частью работ по Risk-Based Inspection резервуаров.

Базовая концепция снижения рисков при ИБОР

Вообще говоря, когда мы используем термин «метод АЭ», речь, как правило, идет об одном из методов неразрушающего контроля. Посмотрим на проблему шире. Акустическая эмиссия как физическое явление связана 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. 5.

Приложение 1. Применение АЭ при неразрушающем контроле (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.

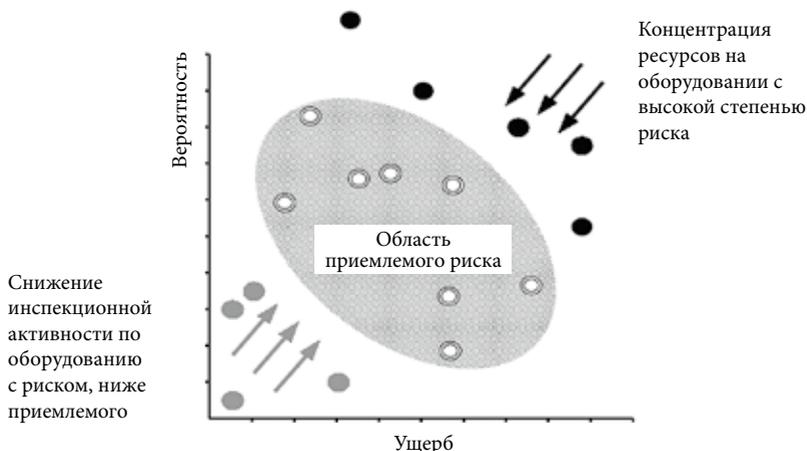


Рис. 1. Управление риском эксплуатации (ОПО) за счет перераспределения ресурсов на технические устройства повышенного риска

Казалось бы, Приложение 2 по смыслу тождественно Приложению 1, однако это не так. Термин «оценка пригодности к эксплуатации» (оценка ПКЭ) 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

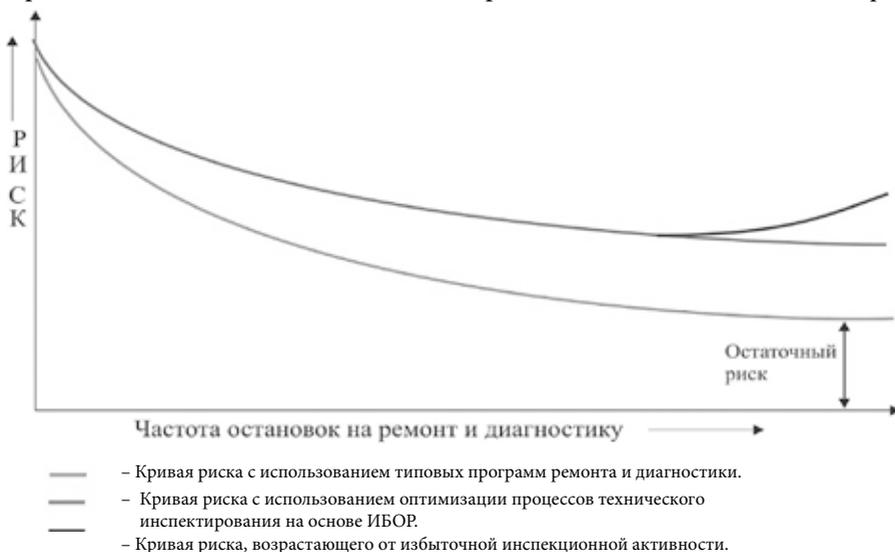


Рис. 2. Базовая концепция снижения риска эксплуатации опасного производственного объекта (ОПО) за счет оптимизации процесса технического освидетельствования, ремонта и диагностики



Рис. 3. Резервуарный парк № 1



Рис. 4. Резервуарный парк № 2

и повреждения. Система ПКЭ – это не «годен/негоден» Системы НК, а определение допустимых 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. В этом кругу говорят не о допустимых дефектах или допустимых 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.

Работы по RBI резервуарных парков включают:

1. Сбор исходных данных.
2. Определение возможных механизмов повреждения и видов разрушения.
3. Идентификацию опасностей (угроз).
4. Анализ уязвимости (уровней защиты).
5. Оценку риска возможной аварии.
6. Инспекцию резервуаров, включающую:
 - неразрушающий контроль стенок и кровли без освобождения от продукта;
 - акустико-эмиссионный контроль днищ;
 - измерение электросопротивления грунтов под днищами.
7. Ранжирование резервуаров по результатам инспекции.
8. Разработку компенсирующих мероприятий и мониторинга, обеспечивающих поддержание риска на приемлемом уровне.

По результатам АЭ-контроля проведены:

1. Градация (grading) локализованных источников АЭ по EN 15856:2010.
2. Классификация (classification) локализованных источников АЭ (по EN 14584:2005).

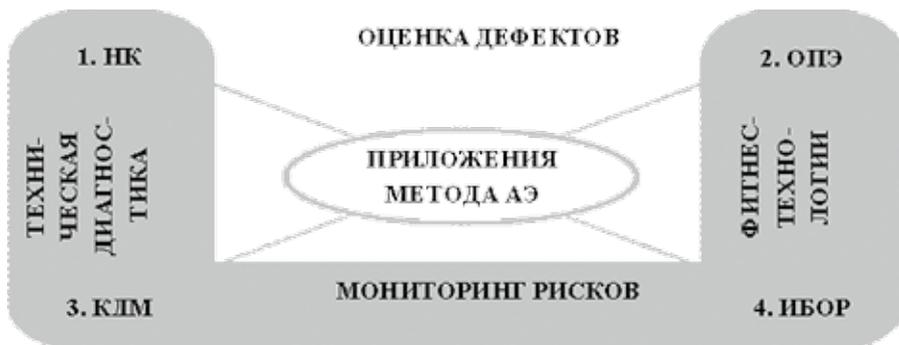


Рис. 5. Приложения метода АЭ в области обеспечения промышленной безопасности ОПО

Градацию источников АЭ по EN 15856:2010 проводили по количеству локализованных импульсов АЭ/час, их активности и интенсивности.

Grade A. No AE source found. Источники АЭ не локализованы.

Для источников grade A устанавливается максимально допустимый интервал между инспекциями (10 лет).

Grade B. Minor active AE source found. Локализованы низкоэнергетические импульсы АЭ (AE hits), активные источники АЭ (зоны концентрации более 10 имп./источник) не выявлены.

Для источников grade B в зависимости от уровня их активности и интенсивности назначается повторный АЭ-контроль через 4 или 5 лет.

Grade C. Active AE source found. Локализованы низкоэнергетические импульсы АЭ. Выявлены активные источники АЭ (зоны концентрации более 10 имп./источник).

Для источников grade C в зависимости от уровня их активности и интенсивности назначается повторный АЭ-контроль через 1, 2 или 3 года.

Grade D. Severe AE sources are found. Локализованы высокоэнергетические источники АЭ. Выявлены активные источники АЭ (зоны концентрации более 10 имп./источник). Наблюдается рост активности и/или интенсивности АЭ или непрерывная АЭ.

При локализации источников grade D рекомендовано выведение резервуара из эксплуатации, его опорожнение, зачистка, дегазация и проведение внутренней инспекции с использованием регламентируемых методов неразрушающего контроля (НК): визуальная инспекция днища, вакуумирование сварных швов, ультразвуковой (УЗК), радиационным, магнитным (МПД), проникающими веществами и другими, предусмотренными нормативно-техническими документами.

Класс источника АЭ определяли по амплитудному критерию EN 14854:

Источник 1-го класса – пассивный источник (minor source).

Источник 2-го класса – активный источник (active source).

Источник 3-го класса – очень активный источник (very active source).

На рис. 6 приведена схема расстановки датчиков АЭ и зондов для измерения электросопротивления, на рис. 7 – зоны локализации источников АЭ и зоны с максимальной концентрацией нефти.

На рис. 8 приведен график нагружения при контроле целостности днища резервуара.

Ранжирование резервуаров проведено по 2-м параметрам: Grade источника АЭ и Класс источника АЭ (рис. 9 и 10).

В таблице 1 приведены результаты ранжирования резервуаров. Графическое представление Плана RBI приведено на рис. 11.

Выводы:

1. Приведены технологии применения метода акустической эмиссии при контроле технического состояния днищ резервуаров и выявлении зон с повышенной коррозионной активностью.
2. Проведено ранжирование по риску резервуаров на 2-х терминалах хранения и распределения нефтепродуктов.
3. Показана эффективность применения метода АЭ в Программах Инспекции на базе оценки риска резервуарных парков.

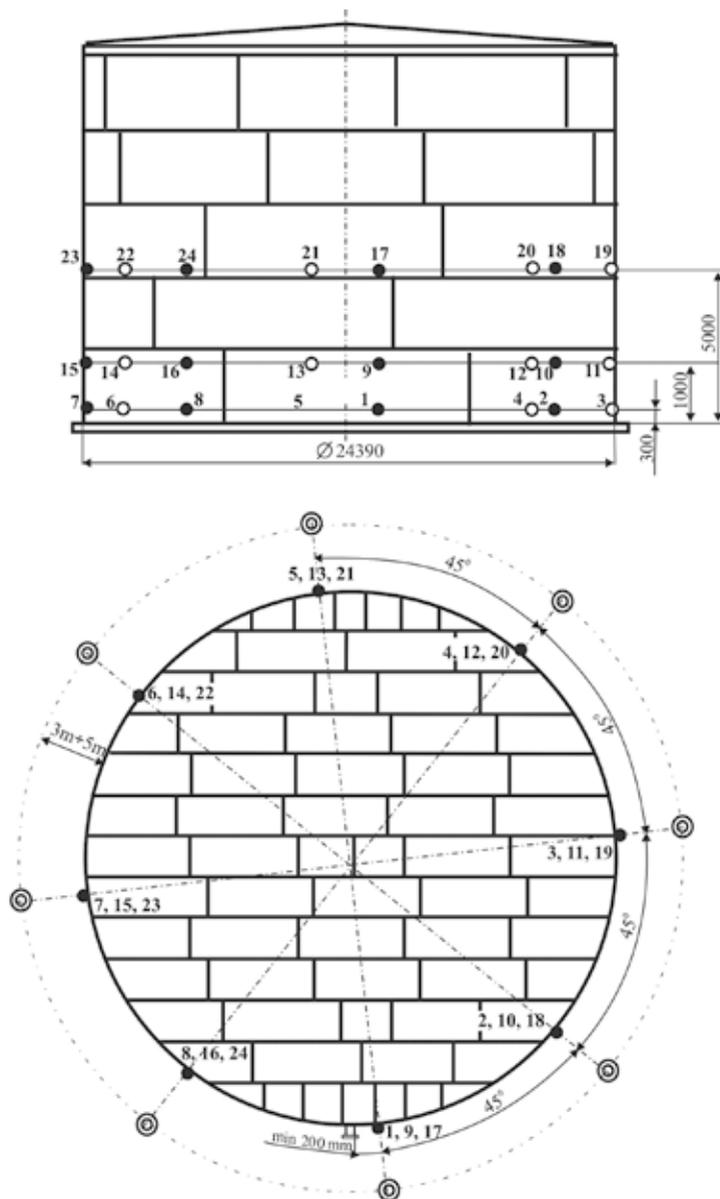


Рис. 6

- - места расположения датчиков с невидимой стороны резервуара;
 - - места расположения датчиков с видимой стороны резервуара;
 - ⊗ - места расположения зондов;
- № 1-24 номера устанавливаемых датчиков.

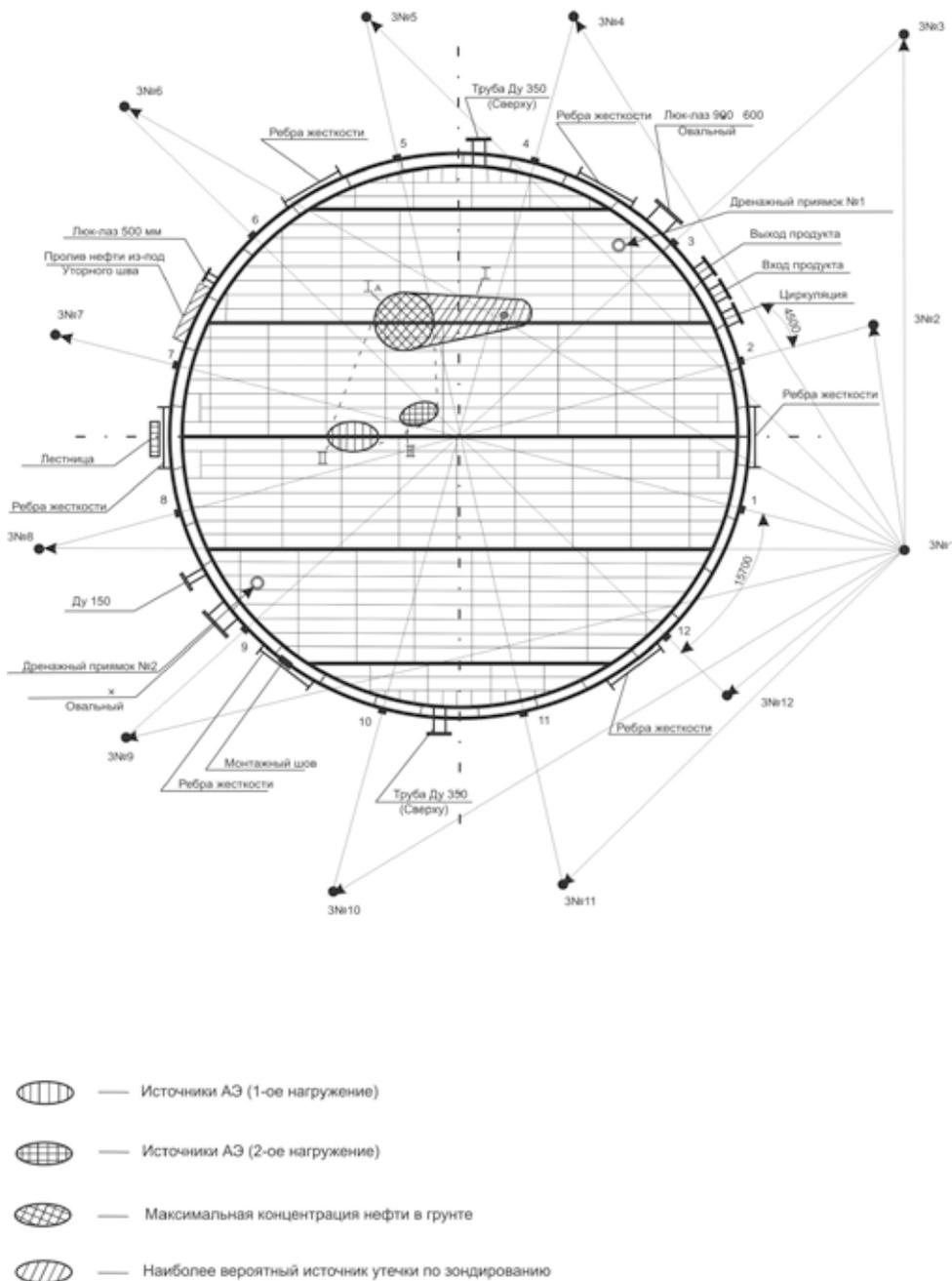


Рис. 7. Локализация источников АЭ и зон максимальной концентрации нефти

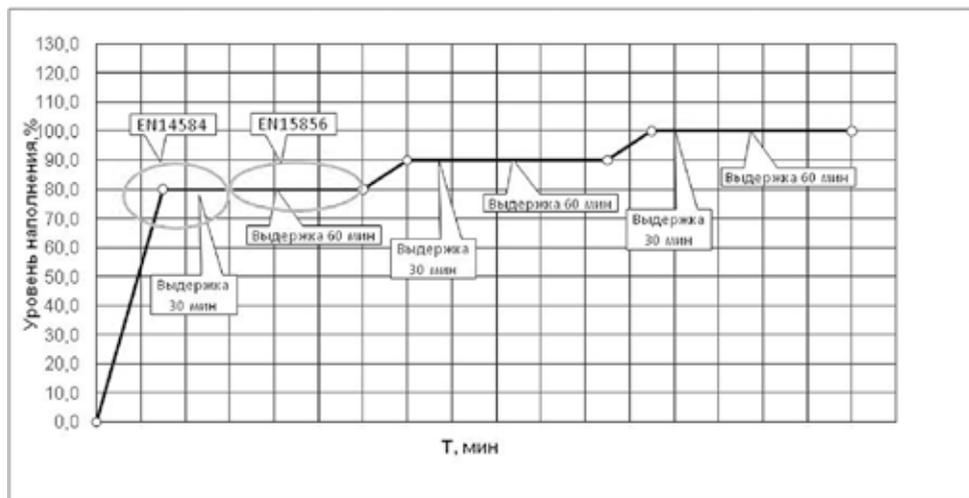


Рис. 8. График нагружения при контроле целостности днища резервуара

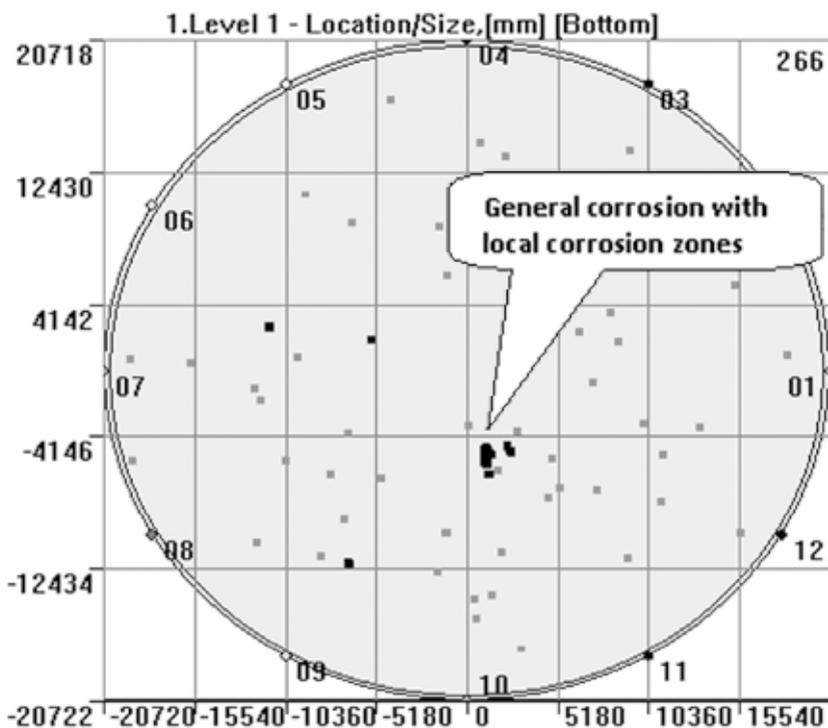


Рис. 9. Источники АЭ с локализацией EN 15856 при контроле резервуара TV-5, терминал № 2

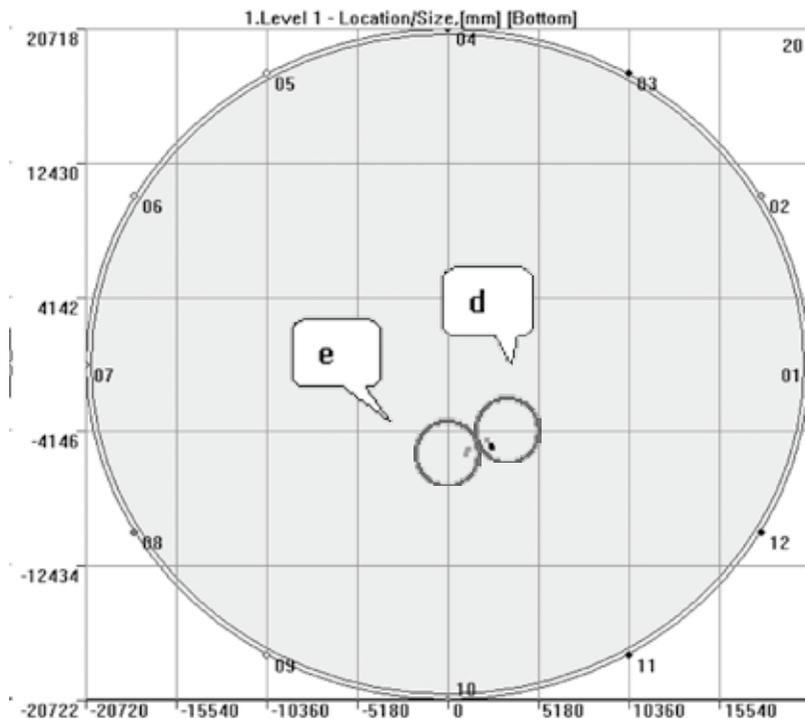


Рис. 10. Локализация и классификация по EN 14584 источников АЭ при контроле резервуара TV-5, терминал № 2

Результаты ранжирования резервуаров

№№ г/п	TAR	Объект	Grade источника АЭ по EN 18356	Grade источника АЭ в Баллах	Класс источника АЭ по EN 14584	Оценка состояния дна	Оценка состояния в Баллах Grade к	Рекомендации
1	Терминал №2	TV-5	C	3	2	C-2	6,0	Через 2 года эксплуатации провести внутреннюю Инспекцию с освобождением резервуара от продукта
2	Терминал №2	TV-16	C	3	2	C-2	6,0	Через 2 года эксплуатации провести внутреннюю Инспекцию с освобождением резервуара от продукта
3	Терминал №1	TV-2	C	3	1	C-1	3,0	Повторный АЭ контроль через 3 года
4	Терминал №2	TV-7	C	3	1	C-1	3,0	Повторный АЭ контроль через 3 года
5	Терминал №2	TV-15	C	3	1	C-1	3,0	Повторный АЭ контроль через 3 года
6	Терминал №1	TV-3	B	2	1	B-1	2,0	Повторный АЭ контроль через 5 лет
7	Терминал №2	TV-11	B	2	1	B-1	2,0	Повторный АЭ контроль через 5 лет
8	Терминал №2	TV-12	B	2	1	B-1	2,0	Повторный АЭ контроль через 5 лет
9	Терминал №2	TV-17	B	2	1	B-1	2,0	Повторный АЭ контроль через 5 лет
10	Терминал №2	TV-19	B	2	1	B	2,0	Повторный АЭ контроль через 5 лет
11	Терминал №2	TV-4	A	1	1	A-1	1,0	Повторная Инспекция через 10 лет



Рис. 11. Графическое представление Плана RBI

НОВЫЙ ПОРТАТИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ НК «UNISCOPE»

В.А. Барат, С.В. Елизаров, ООО «ИНТЕРЮНИС»

25-летний опыт разработки средств неразрушающего контроля и применения различных методов технического диагностирования позволил компании «ИНТЕРЮНИС» в 2012 г. выпустить принципиально новый универсальный инструмент НК под названием «UNISCOPE». Прибор имеет два широкополосных аналоговых входа для подключения различных чувствительных элементов и два универсальных входа для подключения внешних цифровых регистрирующих блоков. В базовом варианте «UNISCOPE» представляет собой 2-канальный прибор регистрации АЭ-импульсов, с возможностью линейной локации источников. По желанию заказчика функционал прибора может быть дополнен средствами измерения НДС, течеискания и виброметрии.

Общий вид и характеристики

Представленный ниже универсальный инструмент является новейшей разработкой компании, призванной удовлетворить самые широкие потребности специалистов НК. На данный момент на базе единой аппаратной платформы прибор объединяет в себе 2-канальную АЭ-систему с передовыми характеристиками, акустический течеискатель, тензоизмеритель и виброметр. Кроме того, в разработке находятся дополнительные функции «UNISCOPE», которые в перспективе позволят использовать его как ультразвуковой толщиномер, генератор тестовых электрических и ультразвуковых импульсов, интегральный толщиномер, корреляционный течеискатель и вихретоковый дефектоскоп. Подобная универсальность достигается за счет использования различных внешних измерительных блоков, подключаемых к базовому вычислительному устройству, оснащеному многофункциональным ПО с современным дружелюбным интерфейсом.

На рис. 1 приведен общий вид прибора с расположением органов управления и разъемов для подключения внешних блоков и датчиков. Прибор выполнен в переносном моноблочном конструктиве, на лицевой стороне размещена клавиатура, с помощью которой осуществляется управление. Для визуализации информации прибор оснащен цветным ЖК-дисплеем со светодиодной подсветкой, защищенным прозрачной пластиной от механических и климатических воздействий. С боковой стороны прибора расположены выключатель электропитания, два разъема для подключения источников аналоговых сигналов, два разъема для подключения внешних цифровых блоков и отсек интерфейсных разъемов, содержащий, в частности, разъем для подзарядки аккумуляторных батарей.

Отличительными особенностями «UNISCOPE» являются (см. также таблицу 1):

- малый вес и оптимальная эргономика для работы в полевых условиях;
- надежная защита от неблагоприятных внешних воздействий;
- возможность эксплуатации при отрицательных температурах;

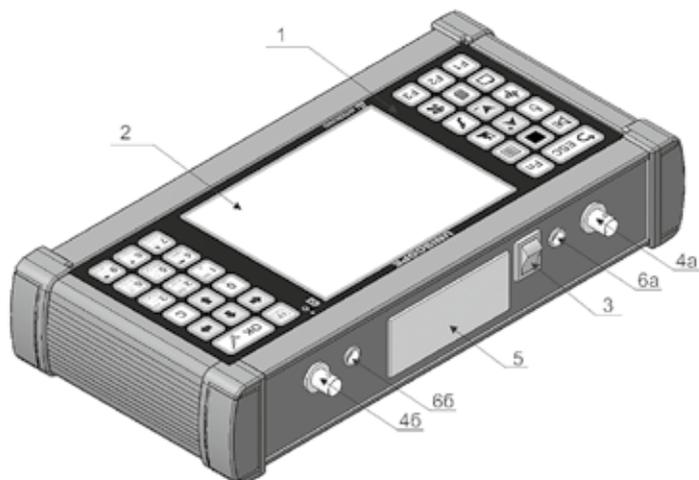


Рис. 1. Общий вид прибора

(1 – клавиатура; 2 – дисплей; 3 – кнопка «ВКЛ/ВЫКЛ»; 4а – разъем канала № 1 регистрации аналоговых сигналов; 4б – разъем канала № 2 регистрации аналоговых сигналов; 5 – заглушка отсека интерфейсных разъемов; 6а – разъем цифрового канала № 1; 6б – разъем цифрового канала № 2)

- высокий современный уровень аппаратного и программного обеспечения;
- хранение больших объемов данных на легкодоступных носителях информации;
- продолжительное время работы от двух встроенных аккумуляторов.

Таблица 1

Общие технические характеристики «UNISCOPE»

Габаритные размеры	300x170x60 мм
Масса базового блока	2,6 кг
Защита от внешних воздействий	IP65
Диапазон рабочих температур	От -20 до +40 °С
Поддерживаемые интерфейсы	Карты памяти SD, Ethernet, USB
Дисплей	TFT LED, 5,7", 640x480 точек, 262 144 цветов
Время работы в автономном режиме	8 часов

Описание основных режимов работы

В режиме АЭ-измерений «UNISCOPE» предназначен для неразрушающего контроля без вывода из эксплуатации промысловых и технологических трубопроводов, переходов и перемычек, запорной арматуры и регуляторов давления, сосудов и баллонов, грузоподъемных механизмов, объектов железнодорожного транспорта, железобетонных конструкций и другого промышленного оборудования с возможностью линейной локализации и оперативной оценки степени опасности источников АЭ.

Основные характеристики аналогового канала регистрации АЭ приведены в таблице 2. Кроме того, для улучшения качества выделения полезного сигнала на фоне шумов различного рода предусмотрено применение прогружаемых цифровых частотных фильтров и предварительной аппаратной фильтрации входных данных по параметрам АЭ-импульсов. Параллельно с регистрацией АЭ по двум аналоговым каналам реализована возможность записи параметрических данных и по двум цифровым каналам в едином масштабе времени для повышения качества анализа диагностической информации.

Таблица 2

Основные характеристики аналогового канала регистрации АЭ

Диапазон рабочих частот	0,5 Гц ÷ 1 МГц
Варианты переключаемых частотных диапазонов	0,5 Гц ÷ 30 кГц, 1 кГц ÷ 100 кГц, 30 кГц ÷ 1 МГц
Варианты длин подключаемых кабельных линий	10 м/50 м
Разрядность АЦП	16 бит
Максимальная частота преобразования АЦП	20 МГц
Размер буфера записи осциллограммы по каждому каналу	8 Мб
Синхронность работы аналоговых и входов	±1 мкс
Напряжение питания преусилителя	5 В

Накапливаемые в ходе регистрации данные визуализируются в графическом и текстовом представлении с помощью многостраничного оконного Windows-подобного интерфейса подобно тому, как это выполняется в ПО серии A-Line для многоканальных комплексов АЭ (рис. 2).

В режиме течеискания «UNISCOPE» позволяет выявлять и количественно оценивать величины протечек запорной арматуры различного типа и назначения, рабочего давления и диаметра для жидкой и газообразной рабочей среды. Функция течеискания реализована на базе каналов регистрации АЭ-импульсов. Методическое обеспечение выполнено на основе множественной линейной регрессии зависимостей вели-

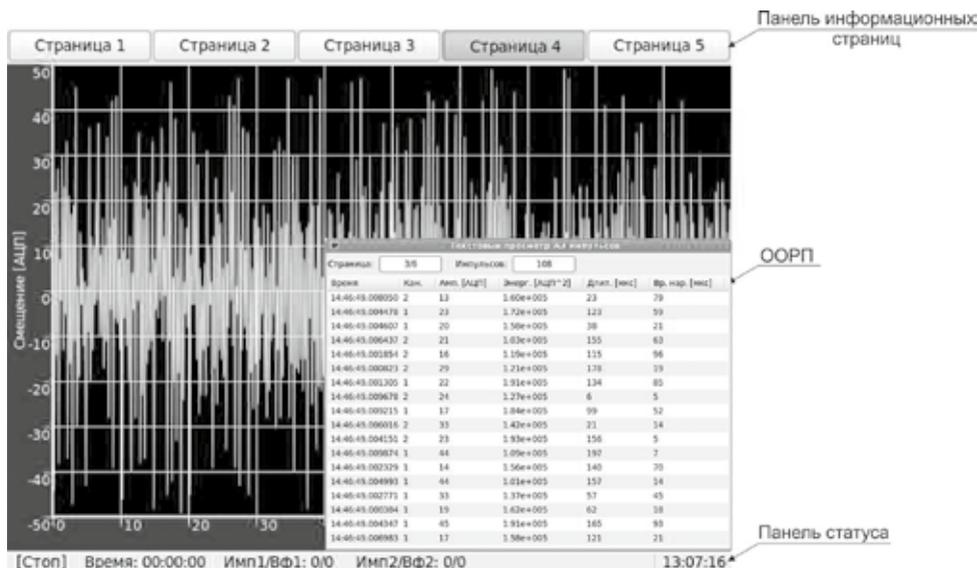


Рис. 2. Пример отображения АЭ данных в графическом и текстовом представлении

чин утечек от характеристик зафиксированного АЭ-излучения (рис. 3). Характерная форма течевых сигналов автоматически распознается и анализируется программным обеспечением с простым и интуитивно понятным интерфейсом (рис. 4). Результатом анализа данных является определение класса герметичности экземпляра арматуры и выдача рекомендаций по ее дальнейшей эксплуатации на основе оценки величины утечки. Характеристики работы «UNISCOPE» в режиме течеисчисления приведены в таблице 3.

Таблица 3

Основные характеристики режима течеисчисления

Минимальная величина обнаруживаемой утечки в затворе арматуры	1 л/мин
Необходимый минимальный перепад давления	0,3 МПа
Диапазон значений проходного диаметра контролируемой арматуры	50 мм ÷ 1000 мм
Средняя погрешность измерения величины утечки	20 %
Время контроля единицы арматуры	Менее 15 мин

В режиме тензометрии «UNISCOPE» проводит измерение НДС объекта в реальном масштабе времени. Важной особенностью работы в этом режиме является возможность его использовать совместно с АЭ-измерениями для параметрического сопровождения контроля посредством наблюдения за изменением величины и



Рис. 3. Схема методического обеспечения акустического течеискания



Рис. 4. Интерфейс ПО течеискания

характера нагружения. Для реализации данного режима необходимо подключение внешнего блока параметрических измерений, характеристики которого приведены в таблице 4, к одному из цифровых входов «UNISCOPE».

Основные характеристики внешнего блока параметрических измерений

Количество универсальных измерительных каналов	2
Переключаемые режимы работы универсальных измерительных каналов: - токовая петля; - измерение напряжения	Активная/пассивная $\pm 1 \text{ В} / \pm 10 \text{ В}$
Погрешность измерения универсального канала	0,2 %
Выдаваемое напряжение для питания внешних устройств и датчиков	12 В/24 В
Количество каналов измерения температуры	1
Погрешность измерения температуры	$\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$
Напряжение питания блока	5 В
Максимальная потребляемая блоком мощность	0,5 Вт

В режиме виброметрии «UNISCOPE» осуществляет оценку уровня вибрации в стандартных полосах частот по мгновенным и средним величинам по двум каналам независимо. Вибродатчик со встроенным усилителем подключается к аналоговому входу «UNISCOPE». Прибор обеспечивает запись временного сигнала в режиме осциллографа. При этом доступно проведение как широкополосного, так и узкополосного спектрального и статистического анализа вибрации по результатам периодических измерений. Пример скриншота ПО виброметрии приведен на рис. 5.

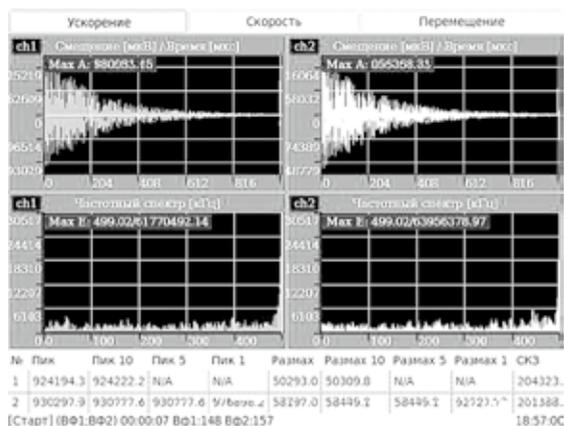


Рис. 5. Пример отображения вибрационных характеристик

Соответствие «UNISCOPE» требованиям безопасности и качества продукции подтверждено сертификатом ГОСТ Р и разрешением Ростехнадзора РФ на применение на опасных производственных объектах.

ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ С ДЕФЕКТАМИ

В.Г. Харебов, А.Н. Мисейко, ООО «ИНТЕРЮНИС», А.С. Ушаков, ЗАО «РНПК»

В условиях современной экономики устойчивость предприятия на рынке, его рентабельность и конкурентоспособность напрямую зависят от эффективности управления основными производственными фондами, включающими в себя технологическое оборудование, здания, сооружения и т.п. Наиболее перспективный путь повышения эффективности управления основными производственными фондами предприятия заключается в переходе к их обслуживанию и ремонту по фактическому техническому состоянию. Данный подход имеет очевидные преимущества перед стратегией обслуживания и ремонта на основе жестко заданных сроков (стратегией планово-предупредительных ремонтов). Он позволяет увеличить прибыль за счет сокращения простоев оборудования и оптимизации его межремонтных пробегов, снизить затраты на превентивный ремонт еще работоспособного оборудования, обеспечивает гибкое распределение внутренних ресурсов предприятия, стимулирует поиск и внедрение инновационных технологий обслуживания и ремонта. Все это в конечном счете ведет к снижению себестоимости выпускаемой продукции и повышению конкурентоспособности предприятия.

Однако переход к обслуживанию и ремонту по фактическому техническому состоянию предполагает колоссальную ответственность самого предприятия в вопросе обеспечения надежной и безопасной эксплуатации оборудования. Реализация данной стратегии невозможна без четкой организации системы постоянного сбора и анализа информации о текущем техническом состоянии технологического оборудования, что, в свою очередь, накладывает определенные требования на способы, методы и средства получения подобной информации.

Нефтяная компания «ТНК-ВР», являясь одной из самых передовых российских компаний, активно реализует стратегию обслуживания и ремонта по фактическому техническому состоянию на основе оптимизации межремонтных пробегов технологического оборудования. Для этого в подразделениях «ТНК-ВР» организуется система сбора и анализа оперативной информации о текущем техническом состоянии оборудования, которая предусматривает выполнение следующих видов контроля:

- постоянный контроль (мониторинг) наиболее ответственного технологического оборудования;
- периодический контроль менее ответственного технологического оборудования;
- входной контроль материалов, применяемых для монтажа и ремонта оборудования;

- контроль оборудования после проведения ремонта;
- административный контроль полноты и правильности действий персонала, ответственного за эксплуатацию и ремонт технологического оборудования.

Важнейшая роль в вышеуказанной системе отводится мониторингу технического состояния ответственного технологического оборудования в процессе эксплуатации, который призван решать следующие задачи:

- обнаруживать в процессе эксплуатации дефекты, представляющие опасность для целостности и работоспособности оборудования;
- определять местоположение, тип и характер обнаруженных дефектов;
- оценивать степень опасности обнаруженных дефектов;
- наблюдать за динамикой развития обнаруженных дефектов и прогнозировать момент перехода оборудования в предельное состояние;
- предупреждать эксплуатационный персонал о достижении предельного состояния оборудования и своевременно предотвращать аварийные ситуации путем выработки управляющих воздействий.

Для решения вышеперечисленных задач применяются системы комплексного диагностического мониторинга (КДМ), в структуре которых можно выделить измерительную, вычислительную и исполнительную части. (Наполнение, т.е. методы и средства каждой из частей, может варьироваться в зависимости от параметров технологического оборудования и условий мониторинга.) Измерительная часть представлена модулями сбора и обработки данных, получающими информацию с диагностических и параметрических датчиков. К диагностическим датчикам относятся преобразователи акустической эмиссии (ПАЭ), датчики вибрации, деформации, скорости коррозии, линейных перемещений, акселерометры, инклинометры и т.п. Параметрические датчики, как правило, представляют собой датчики давления, температуры, уровня и т.п., а также датчики осадков, направления и силы ветра. Вычислительная часть состоит из центральной вычислительной станции, устанавливаемой, как правило, в центральном пункте управления технологическим процессом, а также из промежуточных вычислительных станций. К исполнительной части относится запорно-регулирующая арматура (клапаны, задвижки, заслонки и т.п.), позволяющая управлять режимом работы технологического оборудования. Обобщенная функциональная схема типовой системы КДМ технического состояния оборудования приведена на рис. 1.

На рис. 2 приведена обобщенная структурная схема типовой системы КДМ технического состояния оборудования. На этом рисунке цифрами указаны различные варианты построения систем КДМ: 1 – для близко расположенного оборудования; 2 – для группы близко расположенных единиц технологического оборудования; 3 – для протяженного (крупногабаритного) оборудования или оборудования, находящегося на значительном удалении друг от друга и центральной вычислительной станции.

Говоря о роли мониторинга в системе получения оперативной информации о текущем техническом состоянии технологического оборудования, следует отметить, что особое значение имеет мониторинг технологического оборудования с недопустимыми дефектами, вынужденно эксплуатируемого по причине неремонтопригод-



Рис. 1. Обобщенная функциональная схема типовой системы КДМ технического состояния оборудования

ности или невозможности замены в кратчайшие сроки, а также оборудования, фактические параметры эксплуатации которого превышают проектные значения. Риск отказов такого оборудования несоизмеримо выше, а оценка его состояния должна решаться исключительно на высоком уровне на основе оперативной и достоверной информации.

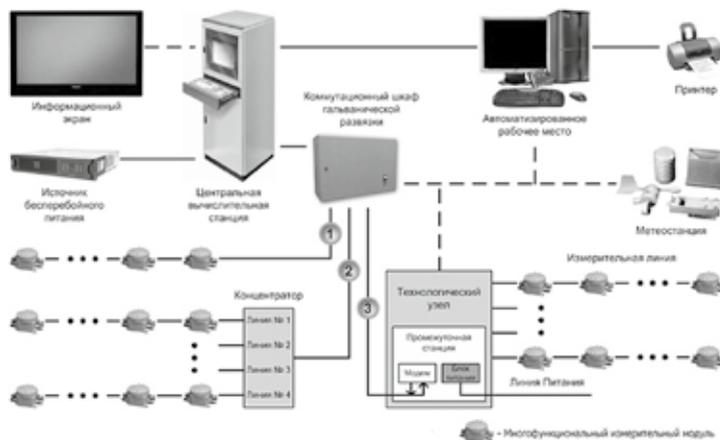
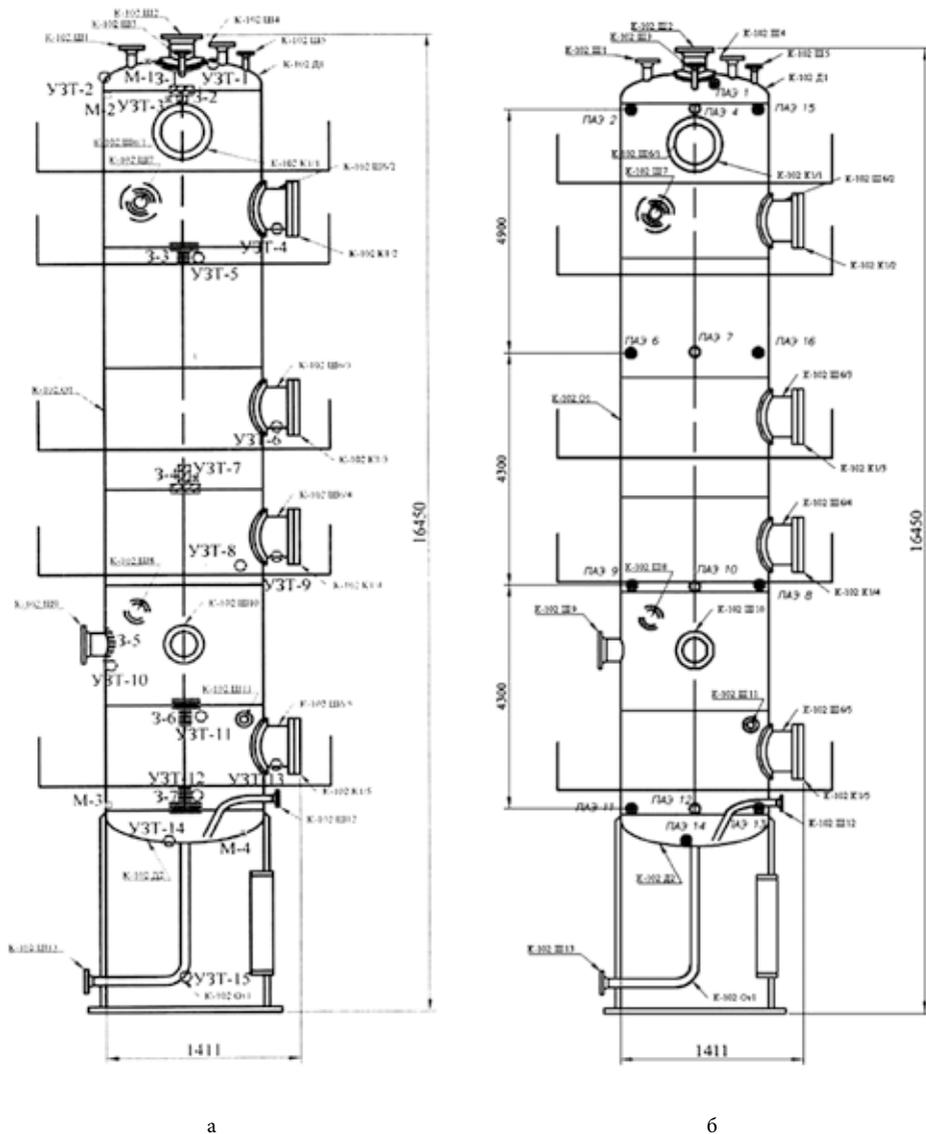


Рис. 2. Обобщенная структурная схема типовой системы КДМ технического состояния оборудования (с различными вариантами построения)

Компания «ТНК-ВР», в лице ее перерабатывающего подразделения ЗАО «Рязанская нефтеперерабатывающая компания», имеет успешный опыт организации мониторинга технического состояния проблемного нефтеперерабатывающего оборудования в рамках реализации стратегии перехода на обслуживание и ремонт по фактическому техническому состоянию на основе оптимизации межремонтных пробегов. В частности, с помощью ООО «ИНТЕРЮНИС» на установке ЛЧ-24/7 внедрена и используется система акустико-эмиссионного мониторинга «Лель-М/A-Line 32D (DDM-M)», которая установлена в верхней части адсорбера циркулирующего газа К-102, имеющего недопустимые дефекты типа расслоения в основном металле днища и дефект плоскостного типа (трещина) в сварном шве приварки обечайки к днищу. Указанный адсорбер имеет следующие параметры: рабочее давление – 4,2 МПа, рабочая температура +45 °С, рабочая среда – 15% МЭА+ВСГ+Н₂S, марка стали корпуса – 11483.1, марка стали верхнего и нижнего днищ – 11474.1, толщина стенки корпуса – 22,0 мм, толщина стенки верхнего и нижнего днищ – 24,0 мм, внутренний диаметр корпуса – 1156 мм, внутренний диаметр верхнего и нижнего днищ – 1152 мм, высота (с учетом юбочной опоры) – 16 450 мм. Адсорбер был изготовлен Кротовопольским машиностроительным заводом (г. Брно, ЧССР) и введен в эксплуатацию в 1970 г. Ранее (с 1999 по 2009 гг.) при проведении технических освидетельствований и экспертизы промышленной безопасности адсорбера К-102 были выявлены расслоения металла верхнего днища (площадь расслоения ~ 0,4 м², глубина расслоения – 6,1-12,4 мм) и трещина (длина – 140 мм, глубина – 12-14 мм). На рис. 3 а приведен эскиз адсорбера К-102 с указанием зон предыдущего контроля методами ультразвуковой толщинометрии (УЗТ) и магнитной памяти металла (М). На рис. 4 приведены схематичные изображения вышеописанных дефектов.

Перед установкой системы мониторинга технического состояния адсорбера К-102 в период капитального ремонта весной 2012 г. специалистами ООО «ИНТЕРЮНИС» был проведен его акустико-эмиссионный контроль с целью оценки динамики развития ранее обнаруженных дефектов, уточнения степени их опасности для целостности и работоспособности адсорбера, а также выявления новых дефектов, которые могли появиться в процессе эксплуатации адсорбера. На рис. 3 б приведен эскиз адсорбера К-102 с указанием местоположения ПАЭ, установленных при проведении акустико-эмиссионного контроля. Нагружение в процессе АЭ-контроля производилось по графику, представленному на рис. 5.

В результате акустико-эмиссионного контроля адсорбера К-102 были зарегистрированы источники АЭ, информация о которых приведена в табл. 1 и на рис. 6.



а

б

Рис. 3. Эскиз адсорбера К-102

а – указаны зоны предыдущего контроля методами ультразвуковой толщинометрии (УЗТ) и магнитной памяти металла (М); б – указано местоположение ПАЭ при проведении АЭ-контроля

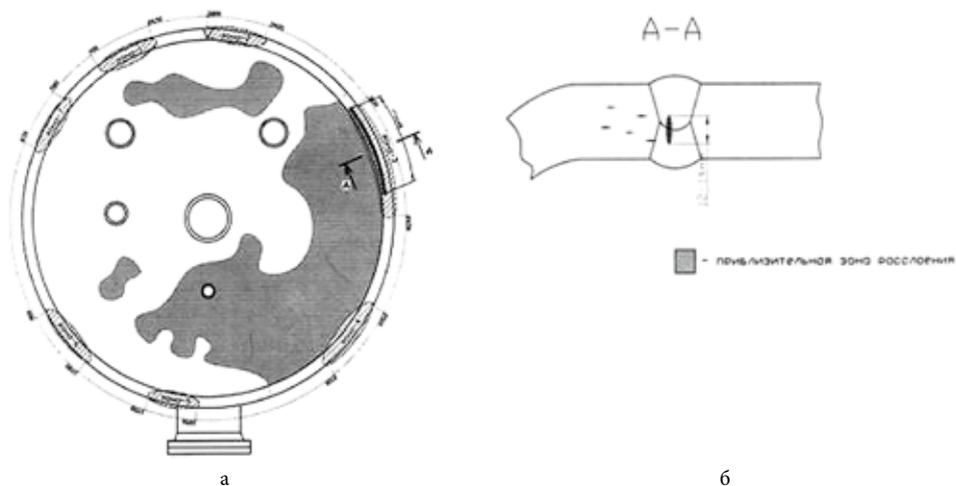
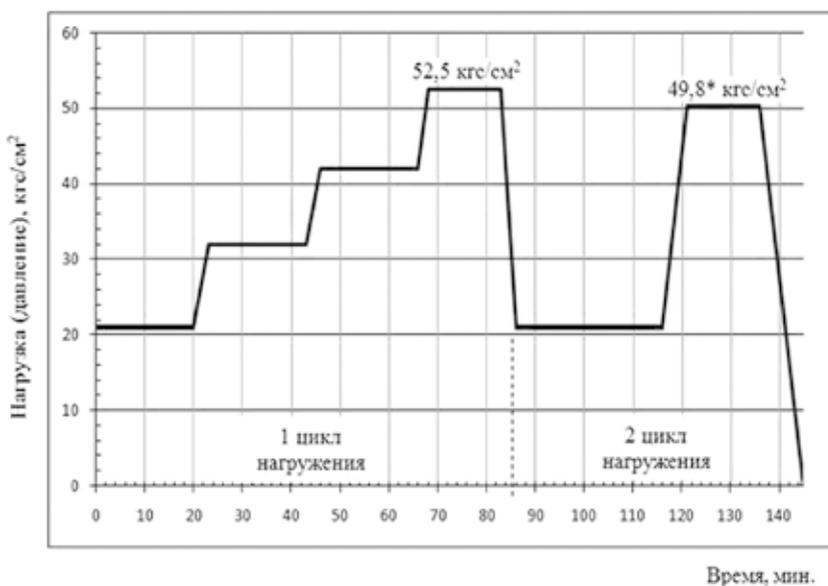


Рис. 4. Дефекты адсорбера К-102, обнаруженные ранее
 а – расслоение основного металла верхнего днища;
 б – трещина в сварном шве приварки верхнего днища к обечайке

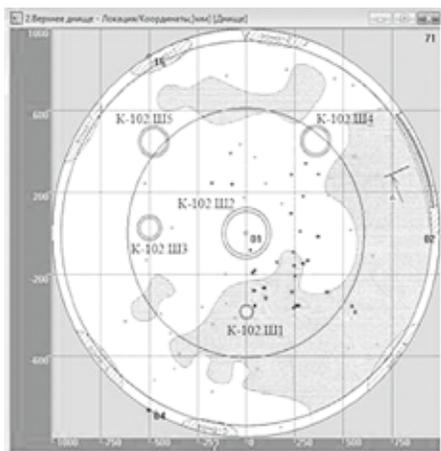


* - величина испытательного давления во 2-м цикле нагружения была выбрана для более строгого соблюдения эффекта Кайзера ($R_{\text{кп}} I_{\text{шр}} - 5\%$)

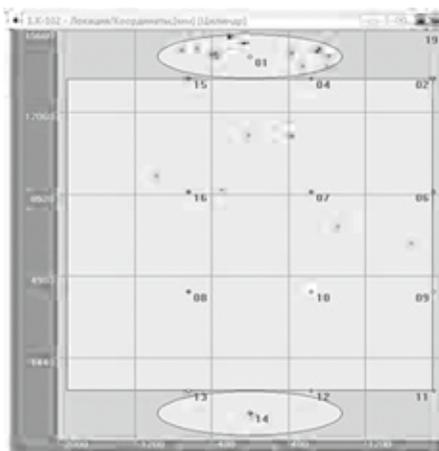
Рис. 5. График нагружения адсорбера К-102 при проведении его акустико-эмиссионного контроля

Таблица 1

№ п/п	Время регистрации	Количество источников	Класс источников	Местонахождение источников
1	1 цикл нагружения (от 21 до 42 кгс/см ²)	43	1-й класс (пассивные)	Корпус на уровне штуцера К-102.Ш16/2, верхнее днище между штуцерами К-102.Ш1 и К-102.Ш4
2		21	2-й класс (активные)	Верхнее днище в зоне штуцеров К-102.Ш1, К-102.Ш2, К-102.Ш3
3	1 цикл нагружения (от 42 до 52,5 кгс/см ²)	7	2-й класс (активные)	Верхнее днище в зоне штуцеров К-102.Ш3, К-102.Ш5
4	2 цикл нагружения (от 21 до 42 кгс/см ²)	11	1-й класс (пассивные)	Корпус на уровне штуцера К-102.Ш7 и люка-лаза К-102.К-1/1, верхнее днище в зоне штуцеров К-102.Ш1, К-102.Ш2, К-102.Ш4, К-102.Ш5
5	2 цикл нагружения (от 42 до 49,8 кгс/см ²)	8	1-й класс (пассивные)	Верхнее днище в зоне штуцеров К-102.Ш2, К-102.Ш4, К-102.Ш5



а



б

Рис. 6. Местоположение зарегистрированных источников АЭ

а – источники АЭ, зарегистрированные в 1-м цикле нагружения;

б – источники АЭ, зарегистрированные во 2-м цикле нагружения

На основании результатов, полученных при проведении АЭ-контроля, были сделаны следующие выводы о состоянии адсорбера К-102:

- источников АЭ 3-го и 4-го классов, соответствующих развивающимся дефектам, требующим немедленного вывода адсорбера из эксплуатации, не зарегистрировано;

- зарегистрированы источники АЭ 1-го и 2-го класса, места локализации которых частично соответствуют местам расположения ранее выявленных дефектов на верхнем днище адсорбера;
- в 1 цикле нагружения зарегистрированы источники АЭ 2-го класса в тех местах, где расслоений ранее выявлено не было. Большая часть указанных источников зарегистрирована при подъеме давления от эксплуатационного (42 кгс/см^2) до испытательного ($52,5 \text{ кгс/см}^2$) значения, что свидетельствует о динамике происходящих структурных изменений в металле верхнего днища при превышении эксплуатационной нагрузки. Во 2 цикле нагружения класс и количество источников снизились, однако места их локализации не изменились. Данный факт позволяет предположить возможность дальнейшего расширения зоны расслоения в процессе эксплуатации адсорбера.

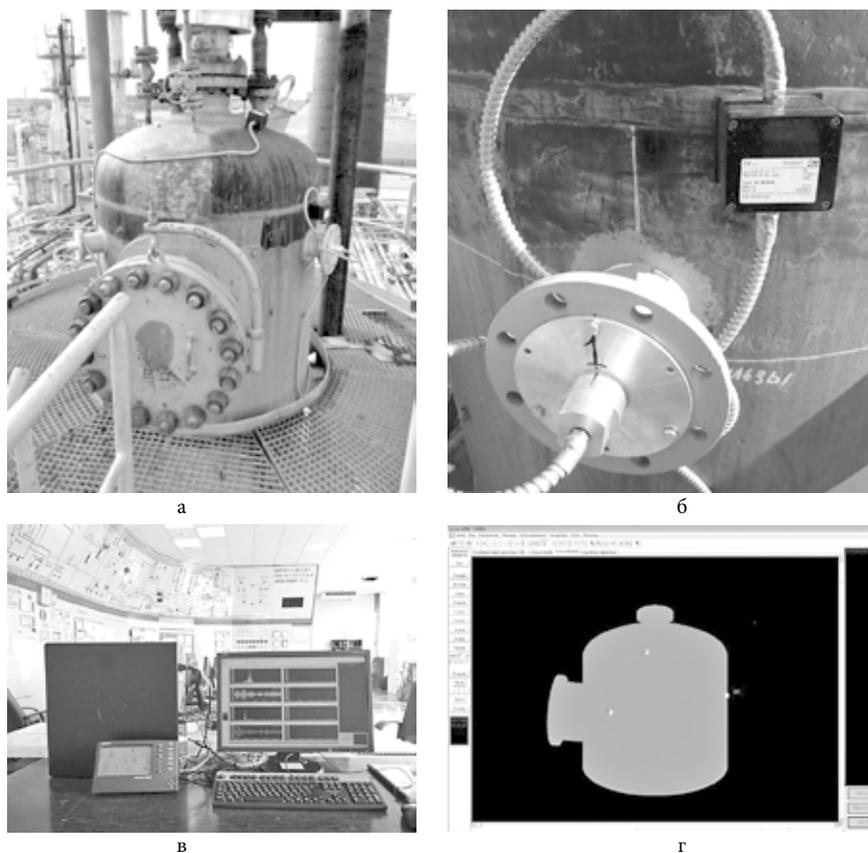


Рис. 7. Система мониторинга технического состояния верхней части адсорбера К-102
а – общий вид; б – вид места установки преобразователя акустической эмиссии;
в – рабочее место оператора системы акустико-эмиссионного мониторинга К-102;
г – диалоговое окно программного обеспечения A-Line Mon

По результатам АЭ-контроля адсорбера К-102, проведенного в период капитального ремонта 2012 г., было принято решение об установке системы постоянного мониторинга технического состояния верхней части адсорбера. Главной задачей установленной системы мониторинга является обеспечение безопасной эксплуатации адсорбера до его замены в сентябре 2013 г. Система осуществляет сбор и анализ информации о динамике развития выявленных дефектов, сигнализацию уровня опасности в случае их дальнейшего развития и предупреждение персонала. Она включает в себя 4 ПАЭ, 2 модуля сбора и обработки данных, коммутационный шкаф гальванической развязки, метеостанцию, кабельные линии и рабочую станцию (компьютер со специализированным программным обеспечением A-Line Mon). Различные составляющие установленной системы мониторинга технического состояния верхней части адсорбера К-102 приведены на рис. 7 а-г.

Программное и алгоритмическое обеспечение установленной системы мониторинга позволяет проводить оценку технического состояния адсорбера К-102 в процессе его эксплуатации на основе индикации 3 состояний: «НОРМА», «ВНИМАНИЕ» и «ТРЕВОГА». На сегодняшний день установленная система мониторинга надежно функционирует, обеспечивая непрерывную безаварийную эксплуатацию адсорбера с момента выхода установки ЛЧ-24/7 на режим. Исходя из существующего опыта эксплуатации данной системы, применение систем подобного класса имеет большую перспективу при переходе предприятий нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности на обслуживание и ремонт технологического оборудования по фактическому техническому состоянию.

АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ТРУБОПРОВОДОВ ТЕПЛОСЕТИ

С.В. Каменский, Е.С. Трофимов, ОАО «Оргэнергогаз»

Компанией «Интерюнис» разработан способ диагностики технического состояния участков трубопровода, позволяющий минимизировать материальные потери, связанные с проведением гидроиспытаний. Экспериментальные работы в рамках предлагаемого способа диагностики были проведены на 3 магистральных участках диаметром 530 мм в период с мая по август 2012 г. совместно со специалистами ОАО «Теплоцентральный» г. Жуковский, Московской обл.

Предлагаемый вариант диагностики состоит из 3 основных этапов: экспертной оценки потенциальной опасности участков теплопровода, выборочного АЭ-диагностирования и штатных гидроиспытаний.

Первый этап предлагаемого варианта диагностики заключается в экспертной оценке потенциальной опасности участков теплопровода, основанной на анализе конструктивных особенностей и условий эксплуатации трубопровода, которые существенно различаются на различных участках, что приводит в конечном счете к различному уровню их повреждаемости. В качестве исходных данных используется информация о геометрических параметрах участков трубопровода, характеристиках прокачиваемой жидкости, количестве и расположении подвижных и неподвижных опор; местоположении компенсаторов и их типах; стоимости различных видов ремонта. На основе собранных данных и статистики по аварийности была создана экспертная система автоматического ранжирования участков трубопровода по 4 категориям потенциальной аварийности: высокая, средняя, ниже средней и низкая. Аварийность в совокупности с ущербом, определяемым стоимостью ремонта поврежденного участка, характеризует величину потенциального риска.

Второй этап – диагностирование участков трубопровода, отнесенных к категории высокой аварийности, т.е. тех участков, которые во время гидроиспытаний с большой вероятностью могут разрушиться.

Диагностирование позволяет локализовать места дефектов в трубе и тем самым минимизировать потенциальные материальные потери, связанные с ремонтом.

Для выборочного диагностирования используется АЭ-контроль, проводимый в режиме т.н. квазимониторинга, заключающийся в записи АЭ-сигналов в течение увеличенного до 1 ч интервала времени без изменения величины внутреннего давления. При этом могут быть обнаружены утечки в трубе и соединениях, утончение стенки трубы в местах значительных коррозионных повреждений, трещины в местах повышенных локальных напряжений. Такой метод позволяет проводить контроль в штатном эксплуатационном режиме трубопровода, без остановки и отключения диагностируемых участков. В случае обнаружения аномальной зоны вскрывается труба, производится зачистка поверхности трубы в пределах площади аномальной зоны, при помощи УЗ-толщиномера уточняются границы аномальной зоны и степень утончения стенки трубы, затем в зоне аномалии проводится ремонт трубы.

Ниже приводятся результаты диагностики трех участков трубопровода, демонстрирующие возможность АЭ-диагностики в эксплуатационных условиях и неизменяемых режимах эксплуатации.

По результатам АЭ-диагностики на 1-м участке (ТК1604-ТК1605) дефектов не обнаружено, состояние прямой и обратной труб оценено как удовлетворительное, что было подтверждено при визуальном осмотре трубопровода в пределах технических колодцев.

На 2-м участке (ТК1609-ТК1610) наблюдалась высокая интенсивность АЭ-сигналов на прямой трубе до 90 дБ в районе сальника. Причиной таких сигналов явился износ уплотнений сальника, сальник был впоследствии заменен.

На 3-м участке (ТК1611-ТК1612) было обнаружено 4 дефекта.

- а) дефект прямой трубы в зоне ремонтной накладки (утечки и коррозия) на расстоянии 7-10 м от неподвижной опоры в районе автомобильного перехода (рис. 2);
- б) дефект трещиноподобный (обратная труба) несквозной в зоне щитовой опоры перед проходным каналом трубопровода (рис. 5);
- в) дефект в теле прямой трубы на расстоянии 23 м за неподвижной опорой между смотровым колодцем и ТК1612 (рис. 4);
- г) дефект (коррозия под ИП) в зоне байпаса за проходным каналом (рис. 6).

Третий этап предлагаемой методики диагностирования – штатная гидроопрессовка, проводится на всех участках трубопровода, подвергнутых диагностированию и прошедших ремонт по обнаруженным дефектам и неисправностям. Ее результаты должны подтвердить эффективность проведенного диагностирования и качества выполненного ремонта. После проведения обследования участков трубопроводов высокой аварийности, выполнения ремонта и гидроопрессовки трубопроводы поступают в эксплуатацию с гарантированными сроками службы.

В завершение хотелось бы добавить, что в настоящее время в компании «ИНТЕР-ЮНИС» в стадии разработки находятся 2 новых метода контроля, удачно дополняющих метод АЭ при контроле трубопроводов.

Во-первых, метод оценки коррозионного износа внутренней стенки трубы, основанный на связи степени коррозионного повреждения с шероховатостью внутренней стенки трубы, увеличение которой приводит к уменьшению амплитуды донных сигналов. В рамках методики в стенку объекта при помощи УЗ-дефектоскопа излучается импульсный ультразвуковой импульс, далее проводился анализ принятого сигнала, который представляет собой последовательность экспоненциально убывающих по амплитуде донных сигналов. В случае неповрежденной стенки число отраженных донных сигналов превышает установленный порог вплоть до 4-го, 5-го по счету отраженного донного сигнала. Если число пересечений порога от 2 до 3, это свидетельствует о наличии язвенной коррозии, число пересечений, равное 1, или отсутствие пересечений свидетельствуют о наличии многоочаговой коррозии.

Второй метод – разработанный компанией «ИНТЕРЮНИС» метод определения среднего значения толщины стенки контролируемого объекта между 2 точками доступа, основанная на явлении зависимости групповой скорости волн Лэмба от про-

изведения частоты сигнала и толщины стенки. Принципы и схема работы следующие. На объекте на расстоянии нескольких метров или десятков метров друг от друга устанавливаются 2 акустических датчика, служащих в качестве излучателя и приемника акустических сигналов. Излучающий преобразователь испускает импульсный широкополосный акустический сигнал. В объекте контроля такой сигнал распространяется в виде комбинации волн Лэмба, причем каждая частотная составляющая каждой моды распространяется со своей групповой скоростью, в результате чего на принимающий датчик различные частотные составляющие сигнала приходят в свой момент времени. При помощи частотно-временного преобразования сигнала (спектрограммы) в принятом сигнале выявляется время прихода каждой частотной составляющей, что позволяет по графику зависимости групповой скорости волн Лэмба от произведения частоты сигнала и толщины стенки определить среднюю толщину стенки контролируемого объекта между излучателем и приемником. Точность определения средней толщины может достигать 1%.

Выводы

1. Предложен новый подход к диагностированию трубопроводов теплосети, заключающийся в предварительной оценке потенциальной опасности участков трубопроводов и соответствующего уровня риска.
2. Выборочный диагностический контроль, опирающийся на результаты предварительного анализа, позволяет сократить трудоемкость подготовительных работ в период подготовки системы теплоснабжения к зимнему сезону и минимизировать потенциальные материальные потери, связанные с ремонтом, при сохранении полноты контроля и эксплуатационной надежности.
3. Диагностирование осуществляется без отключения диагностируемых участков и без нарушения их эксплуатационного режима, обеспечивая значительную экономическую выгоду.
4. В стадии разработки находятся методика оценки коррозионного износа внутренней стенки трубы и методика интегральной толщинометрии.



Рис. 1. Течь



Рис. 2. Течь и дефект сварки

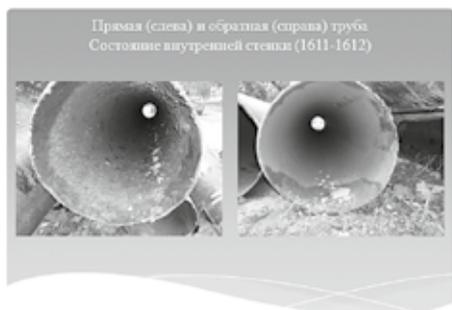


Рис. 3. Коррозия внутренней стенки



Рис. 4. Дефект в стенке трубы (несквозной)

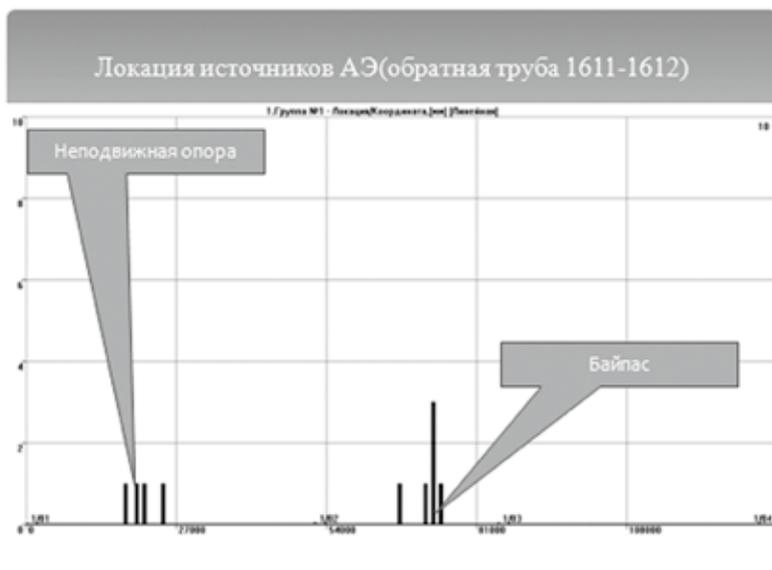


Рис. 5. Локация источников АЭ-сигналов



Рис. 6. Коррозия под изоляционным покрытием

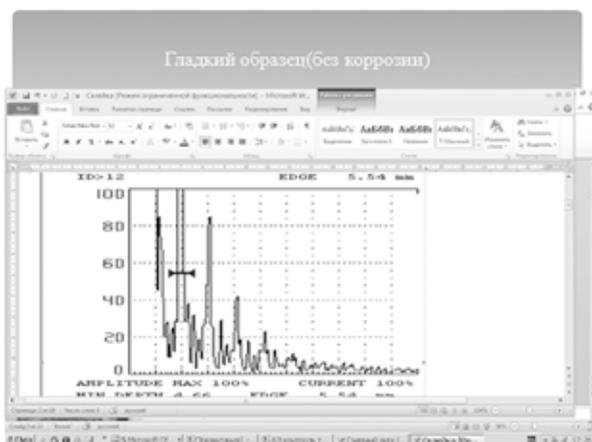


Рис. 7. Дефектограмма неповрежденной стенки трубы

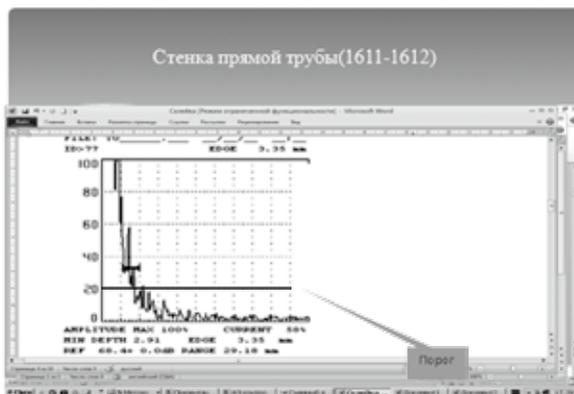


Рис. 8. Дефектограмма толщины стенки прямой трубы

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

*А.Н. Кузьмин, Е.Г. Аксельрод, С.Ю. Филиппов,
ООО «Стратегия НК», г. Екатеринбург*

Большая часть тепловых сетей Уральского региона значительно изношены и имеют срок эксплуатации свыше 15 лет. Несмотря на проведение эксплуатирующими организациями обязательных в соответствии с существующими нормами НТД регламентных мероприятий по поддержанию работоспособности трубопроводов теплотрасс, процент аварийных отказов оборудования с течением времени увеличивается. Как трубопроводы наружной прокладки, так и подземные, подвержены действию агрессивных коррозионных сред и нуждаются в постоянном контроле. Так, эксплуатация теплопроводов, проложенных в подземных каналах в условиях плохой гидроизоляции, приводит к постоянному их затоплению дождевыми, талыми и грунтовыми водами, а зачастую водами водопроводных и других трубопроводов, находящихся рядом с теплотрассой, что дополнительно ускоряет процесс коррозии. Старая теплогидроизоляционная защита тепловых труб (минвата с наружным покрытием металлическим листом, асбоцементной коркой по металлической сетке или стеклотканью) со временем выходит из строя и становится малоэффективной. Потеря герметичности и разрушение изоляции способствуют накоплению влаги на поверхности металла трубопровода и со временем усиливают процессы коррозионно-эрозионного износа материала. На коррозионные процессы влияет также воздействие таких факторов, как наличие агрессивных газов в воде (кислород, окись углерода), термические и механические нагрузки, возникающие в процессе эксплуатации, блуждающие токи. Эти факторы в совокупности вызывают активную коррозию наружной и внутренней поверхности стального трубопровода. Скорость коррозии на некоторых участках достигает величины выше 1 мм/год, что приводит к выходу из строя отдельных участков теплопроводов уже через 5-7 лет.

Анализ разрывов трубопроводов теплосетей в отопительный период показывает, что коррозия стальных труб является причиной 80-85% всех аварий на теплотрассах. Проблема возникновения аварий также заключается в том, что процессы коррозии чаще всего носят локальный, неоднородный характер и без проведения специальных диагностических мероприятий такие дефекты коррозии практически невыявляемы вплоть до наступления предразрушающего состояния и возникновения аварии. Методы технического диагностирования, традиционно применяемые для оценки технического состояния трубопроводов пара и горячей воды в соответствии с действующими НТД (РД 10-369-00, ПБ 10-573-03, РД 10-577-03), не позволяют решить поставленной задачи заблаговременного выявления участков теплосетей с опасными коррозионными повреждениями. Кроме того, в ряде случаев проведение периодического контроля неразрушающими методами НК теплотрасс в городских условиях не представляется возможным.

В этих условиях крайне важную роль играет разработка специализированных систем диагностического мониторинга тепловых сетей, которые могли бы работать на постоянной основе и информировать контрольные службы об изменении состояния оборудования в реальном времени. Основой таких систем мониторинга может быть один из наиболее распространенных методов технического диагностирования коррозии на технологических трубопроводах – метод акустической эмиссии [1, 2]. Акустико-эмиссионный метод основан на регистрации и анализе параметров сигналов акустической эмиссии материала контролируемого объекта, обусловленной наличием и развитием в нем дефектов. Источниками АЭ являются процессы развития трещин, переход материала в пластическое состояние и т.п., а также процессы, связанные с наличием дефектов – трение берегов трещины, разрушение продуктов коррозии в полости трещины, разрушение и отслоение шлаковых включений. Источниками АЭ являются также турбулентные или кавитационные режимы движения рабочего вещества, такие как утечки через сквозные дефекты, разуплотненную запорную арматуру или заглушки. К числу дефектов, выявляемых при АЭ-контроле, относятся трещины и участки, в которых происходит коррозионное растрескивание, а также течи.

Целью АЭ-контроля является выявление развивающихся и склонных к развитию (проявляющихся в процессе изменения нагрузки) дефектов или наличия течи, определение их местоположения и оценка степени их опасности. Количественные характеристики обнаруженных опасных дефектов, такие как размеры, ориентация и т.д. определяются при помощи дополнительных методов неразрушающего контроля в соответствии с действующей НТД. К объектам АЭ-контроля линейной части трубопроводов пара и горячей воды относятся линейные участки, переходы через естественные и искусственные препятствия, линейная запорная арматура, отводы, места врезок трубопроводов. Использование АЭ-метода возможно на объектах, находящихся в условиях напряженно-деформированного состояния под воздействием различных агрессивных сред.

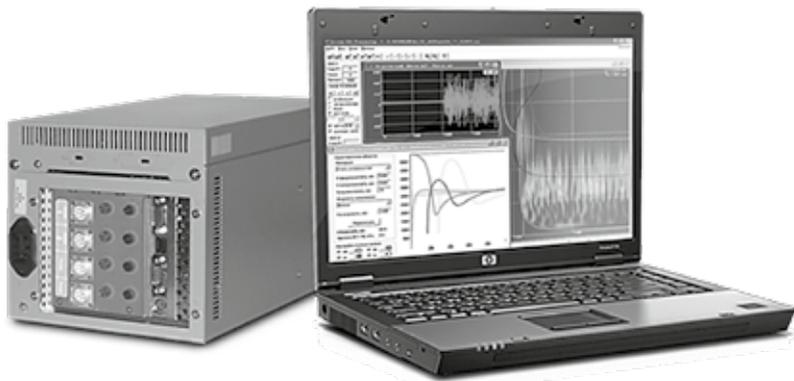


Рис. 1. Акустико-эмиссионный измерительный комплекс A-Line 32D пр-ва компании «ИНТЕРЮНИС», г. Москва

Специалисты компании «Стратегия НК» имеют большой опыт в периодическом техническом диагностировании теплосетей и паропроводов различного профиля с применением метода акустической эмиссии. Результаты этих работ подробно изложены в литературе и неоднократно докладывались на конференциях [1-4]. Рассмотрим некоторые примеры периодического контроля теплотрасс с применением метода акустической эмиссии.

В первом случае речь идет о трубопроводе горячей воды наружной прокладки (рис. 2). Контроль осуществлялся с применением цифровой акустико-эмиссионной системы ЛЕЛЬ/A-LINE 32D (DDM) производства фирмы «ИНТЕРЮНИС» (рис. 1). Контроль проводился в соответствии с ПБ 03-593-03 при опрессовке трубопровода. Эксплуатирующая организация провела нагружение с 6 кг/см^2 до 15 кг/см^2 . При двух последовательных подъемах давления оператором АЭ-контроля был выявлен катастрофически активный источник акустической эмиссии IV-го класса опасности по принятой ПБ 03-593-03 классификации. После снижения давления в трубопроводе на месте регистрации указанного источника была обнаружена утечка воды через сквозной коррозионный дефект в трубопроводе на отводе (рис. 3а). Источник проявлял себя во всех циклах изменения давления и характеризовался параметрами потока АЭ, соот-



Рис. 2. Пример диагностируемого участка теплотрассы наружной прокладки в условиях города

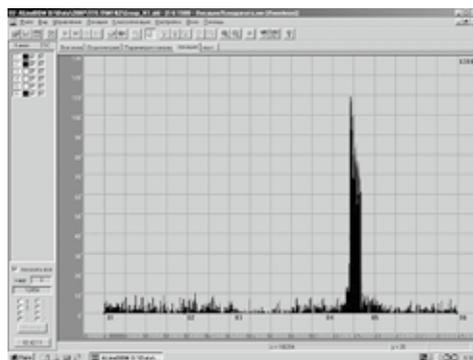
ветствующего утечке рабочего продукта и коррозионным процессам в основном металле трубопровода. Следует отметить, что обычными методами при опрессовке такие микротечи практически не выявляемы. Точное положение источника было установлено по характерной локационной диаграмме между 4-м и 5-м измерительными каналами (рис. 3б). Энергия АЭ-потока данного источника возрастала как при увеличении давления в трубопроводе, так и после его снижения (рис. 4), что свидетельствует о необратимом развитии данного дефекта как при испытаниях, так и в рабочих условиях эксплуатации. По результатам АЭ-диагностики эксплуатирующие службы были немед-

ленно осведомлены о наличии утечки воды через сквозной дефект в трубопроводе. Из представленного примера хорошо видно, что метод акустической эмиссии позволяет определять наличие или отсутствие течей как до, так и после ремонтных или профилактических мероприятий без предварительного вскрытия изоляции на диагностируемом участке теплотрассы. Но этим свойством возможности метода, безусловно, не ограничиваются.

Второе важное свойство метода заключается в возможности точного выявления коррозионно опасных участков теплотрассы. Речь идет о выявлении дефектов локальной коррозии язвенного и питтингового типа. Предсказать заранее появление таких дефектов практически невозможно, однако они носят наиболее опасный для эксплуатации характер. Последнее особенно актуально для труднодоступных участков трубопроводов и трубопроводов, проложенных в подземных каналах. Применение для предотвращения аварий на теплотрассе интегрального метода АЭ в этом случае практически не имеет альтернативы, так как доступ к таким скрытым участкам, имеющим длину по несколько сотен метров, без предварительного вскрытия канала практически невозможен. Все ремонты на таких объектах, как правило, проводятся непосред-



а



б

Рис. 3. Обнаруженная в ходе проведения гидравлических испытаний с применением метода АЭ сквозная микротечь на отводе теплотрассы: а) внешний вид течи; б) соответствующая диаграмма АЭ-контроля

ственно после аварий, приводящих к весьма серьезным последствиям (рис. 5). Для предотвращения возникновения таких крайне нежелательных ситуаций проводится комплексное техническое обследование подземных коммуникаций трубопроводов горячей воды с применением метода АЭ.

В представленном ниже примере на рис. 6 показана диаграмма зарегистрированных в процессе опрессовки опасных источников АЭ на участке от котельной прямой и обратной трубы горячего водоснабжения городской теплотрассы, проложенной в подземном канале из бетонных блоков. Большая часть обнаруженных источников АЭ соответствует дефектам коррозионной природы разной степени опасности. Из рис. 6 видно, что локационная диаграмма обнаруженных источников АЭ имеет распределенный характер без ярко выраженных максимумов. Однако такой вид локационной

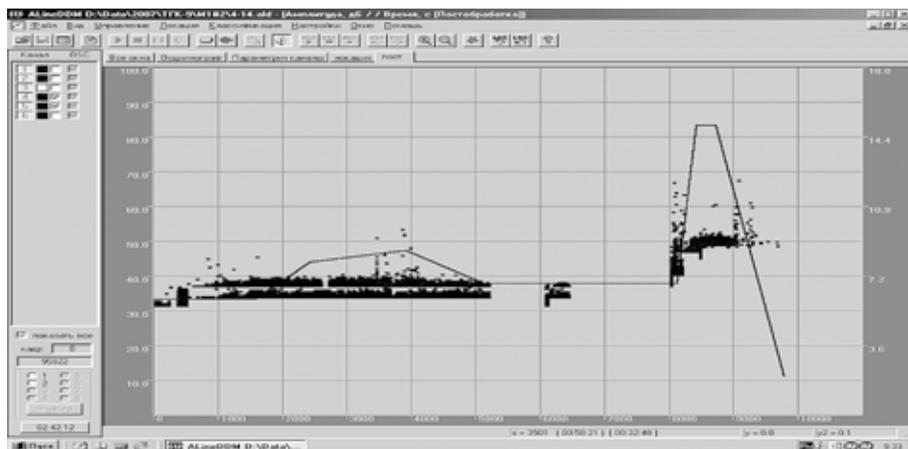


Рис. 4. Распределение энергии сигналов АЭ по времени на каналах измерения, ближайших к течи, в зависимости от диаграммы нагружения. Диаграмма нагружения показана линией, шкала справа (ед. изм. в кг/см²)

диаграммы позволил точно определить границы областей трубопроводов с коррозионными повреждениями. При последующей обработке по статистическим и энергетическим параметрам зарегистрированных источников АЭ производилась оценка опасности дефектов по механизму, описанному в [2].

После вскрытия выявленных участков и снятия изоляции в потолочной области трубопровода были обнаружены протяженные дефекты общей и язвенной коррозии с глубиной до 80% толщины стенки. Примеры обнаруженных дефектов приведены на рис. 7.

На основании проведенного контроля были четко выявлены границы участков теплотрассы с неудовлетворительным техническим состоянием. Сделан вывод, что, несмотря на длительный срок эксплуатации и частые ремонты, полная замена трассы не требуется. Рекомендован последующий ремонт и переизоляция дефектных участков, что в дальнейшем позволит обеспечить безопасную эксплуатацию трубопровода.

Несмотря на явные преимущества метода АЭ по сравнению с другими методами НК, имеющийся на сегодня опыт технического диагностирования теплосетей явно недостаточен для решения некоторых ключевых вопросов создания систем диагностического мониторинга таких объектов. Сформулируем основные требования системы КДМ теплосетей:

1. Высокая помехозащищенность и помехоустойчивость.
2. Возможность работы на большой протяженности объекта контроля и в условиях высокой температуры и влажности.
3. Наличие адекватной и достоверной системы принятия решений о техническом состоянии оборудования на основе четкой системы критериальных оценок.



Рис. 5. Пример разрыва трубопровода в результате развития минитечи на коррозионном дефекте

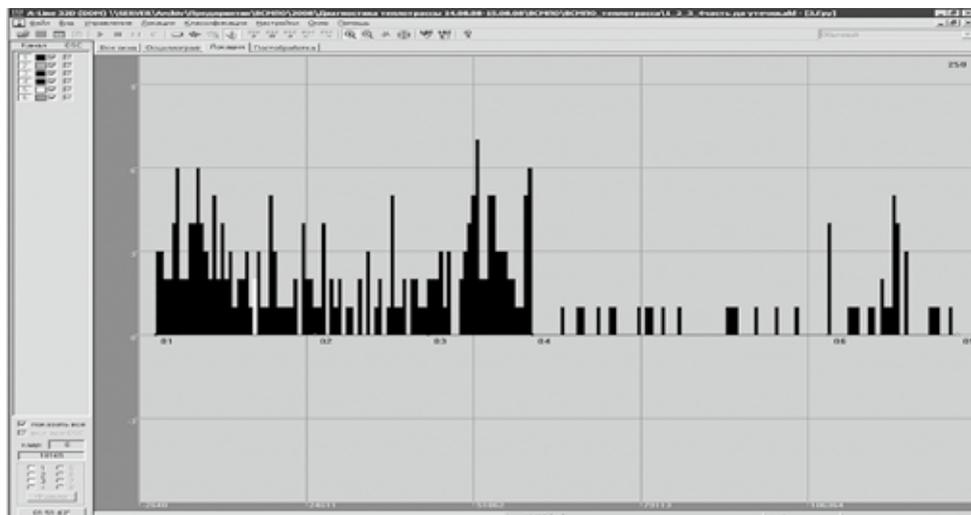


Рис. 6. Характерная локационная диаграмма источников АЭ для участка трубопровода горячего водоснабжения с дефектами локальной коррозии

Все эти вопросы на сегодняшний день с учетом современного состояния метода АЭ и современной аппаратуры либо не решены полностью, либо имеют решение в очень ограниченных рамках отдельных объектов, и эти решения не носят универсальный, общеприменимый характер. Приведем основные причины, по которым эти требования не могут быть выполнены.

1. В условиях текущей эксплуатации трубопровода АЭ-контроль затруднителен или вообще невозможен из-за высокого уровня турбулентных и прочих помех, который зачастую равен или превышает уровень полезного сигнала от де-

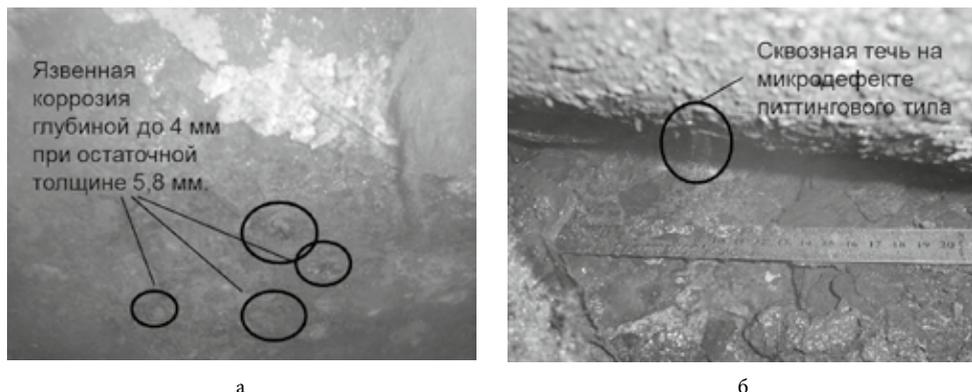


Рис. 7. Примеры локальных коррозионных дефектов трубопровода горячей воды, обнаруженных по результатам АЭ-контроля: а – язвенная коррозия; б – микротечь на коррозии

фекта в несколько раз. На практике АЭ-контроль линейной части трубопроводов теплотрасс проводится в период остановки эксплуатации либо при выводе объекта из эксплуатации, при проведении гидравлического или пневматического испытаний объекта контроля. Речь идет о так называемых опрессовках, что очень вредно для эксплуатации объекта. Полагаем, что в действующей системе КДМ теплотрасс от опрессовок можно и нужно отказаться.

- По действующим методикам максимально допустимое расстояние между датчиками АЭ при техническом диагностировании теплотрасс составляет не более 40 м. Выполнить это требование НТД на реальных объектах, особенно в условиях городской прокладки трубопроводов, бывает крайне затруднительно. При этом с увеличением расстояния между ПАЭ достоверность контроля уменьшается в геометрической прогрессии и на расстояниях более 100 м АЭ-контроль в принципе не целесообразен.
- На сегодняшний день адекватные количественные критерии оценки степени опасности источников АЭ отсутствуют. Существующая система классификации источников АЭ по ПБ 03-593-03 не позволяет установить четкой взаимосвязи с источниками АЭ и соответствующими процессами разрушения.

Однако и ситуация с другими методами обстоит не многим лучше. На основании изложенных фактов можно сделать вывод, что современное состояние приборной базы и НТД по техническому диагностированию теплотрасс, в том числе с использованием метода АЭ, не позволяют говорить о создании адекватных систем мониторинга. Действительно, на сегодняшний день системы КДМ теплотрасс, удовлетворяющие перечисленным выше требованиям, отсутствуют и проблема эта остается крайне актуальной.

Мы полагаем, что при разработке новых систем мониторинга тепловых сетей с применением интегральных методов НК эти вопросы должны быть решены в первую очередь. И на сегодняшний день имеются механизмы, которые либо в ближайшем будущем, либо уже позволяют эти задачи успешно решать. Наша компания предлагает

концепцию применения метода акустической эмиссии для оценки состояния трубопроводов ГВС. Основой такой концепции служат следующие перспективные направления развития метода акустико-эмиссионного контроля:

1. Применение технологии беспороговой регистрации данных (БРД) при регистрации параметров акустической эмиссии.
2. Использование селективных режимов в низкочастотной области спектра регистрации АЭ-сигнала.
3. Применение подходов нелинейной динамики при создании количественных критериев оценки местоположения и степени разрушения трубопроводов.

По отдельности эти технологии уже опробованы и успешно применяются на практике, проведена оценка их эффективности на реальных объектах. Однако единое комплексное решение для реальных промышленных объектов на сегодняшний день отсутствует. Разберемся кратко с каждым из этих механизмов.

Технология БРД позволяет регистрировать и выделять из случайного потока событий АЭ так называемый «полезный» сигнал, отвечающий зарождению и развитию опасных дефектов, в том числе и коррозионной природы. Блок-схема построения системы БРД представлена на рис. 8. В основе ее лежит принцип непрерывной записи АЭ-сигнала, поступающего с выхода регистрирующей цепочки: ПАЭ, предварительный усилитель, широкополосный усилитель. При этом ключевой компонент цепочки, который присутствовал ранее, а именно детектор-дискриминатор, из этой схемы полностью исключен. Отказ от схемы дискриминации позволил осуществить непрерывную запись сигнала без потери информативности. Таким образом, на входе записывающего устройства мы получаем непрерывный стохастический временной ряд событий АЭ, представляющий из себя суммарный поток «шум» + «полезный сигнал». Важно, что в этой схеме уровень шумов и различного рода помех принципиального значения не имеет и может быть даже существенно выше полезного сигнала. Задачи фильтрации в этом случае решаются уже не аппаратно посредством задания порога дискриминации, а программно, с применением современных технологий фильтрации экспериментальных временных рядов. Перечислю лишь основные из них: быстрое преобразование Фурье, метод главных компонент (т.н. «гусеница», реализованный в программе «Caterpillar»), а также метод адаптивной фильтрации. Все эти методы основаны на возможности разделения входного сигнала на случайную, «шумовую» составляющую и так называемую составляющую с ограниченным последствием. В последней сигналы представляют из себя стохастический процесс следования элементарных событий АЭ, между которыми существует причинно-следственная связь. Проще говоря, это и есть полезный сигнал, отвечающий за развитие процессов разрушения на реальном объекте.

Проблема применения таких методов фильтрации к традиционным системам АЭ заключается в том, что на выходе АЭ-системы получается не непрерывный, а дискретный временной ряд, в котором эти причинно-следственные связи нарушаются (посредством порога дискриминации ряд просеивается случайным образом, из него вместе с шумами удаляется полезная информация о сигнале АЭ, который находился ниже уровня порога дискриминации), а значит, и задачи дальнейшей фильтрации шумов не имеют устойчивого положительного решения.



Рис. 8. Принципиальная схема построения системы беспороговой регистрации данных

Сложность применения БРД заключается в том, что образующийся на выходе большой массив информации требует значительных ресурсов для обработки данных. Речь идет о первоначальной оцифровке и записи входного сигнала с минимальной частотой от 5 Мбит/сек и выше. Отсюда следует, что запись такого сигнала с одного измерительного канала в течение нескольких минут займет на жестком диске системы регистрации несколько гигабайт информации. В этом случае задача оптимизации размещения регистрируемых каналов на объекте мониторинга и сокращение их числа до необходимого минимума имеет принципиальное значение. Крайне важно в этих условиях увеличить предельно допустимую дальность между измерительными каналами без потери информативности. С этой целью был предложен способ дополнительного использования в аппаратной цепочке регистрации сигнала селективного низкочастотного фильтра с соответствующими низкочастотными датчиками АЭ, которые позволяют регистрировать распространяющийся в материале сигнал от дефекта с частотой НЧ-фильтра от 2 кГц (для сравнения, традиционные ПАЭ и схемы регистрации сигнала АЭ работают в полосе частот фильтра от 80 кГц и выше). Проведенные исследования показали [1], что в этих условиях сигнал АЭ может быть устойчиво зарегистрирован на расстояниях как минимум 100 м и выше. Кроме того, в селективной области фильтра уровень соотношения сигнал/шум улучшается на порядок, а значит, и объемы вычислений в режиме постобработки могут быть существенно сокращены.

Наконец самое важное звено мониторинговой системы – блок принятия решения о техническом состоянии объекта (рис. 8). Действующее ПБ 03-593-03 с точки зрения критериев оценки степени опасности источников АЭ малоприменимо к системам мониторинга. Принятая в ПБ система классификации напрямую связана с графиком изменения давления, а применяемые критерии носят качественный, неуниверсальный характер и в условиях низкого соотношения сигнал/шум практически неприменимы. Принцип непрерывности регистрируемого временного ряда сигнала АЭ в системе БРД позволяет решить проблему иным способом. Речь идет об использовании подходов нелинейной динамики при анализе экспериментальных данных в различных отраслях знаний. Нами установлено [5], что временной ряд АЭ на выходе системы фильтрации БРД отвечает необходимым требованиям применения подходов нелинейной

динамики. Данный ряд представляет из себя непрерывный стохастический временной процесс. Статистические свойства этого процесса могут быть оценены посредством расчета статистических характеристик хаотического аттрактора, характерный пример которого приведен на рис. 9. Последний является образом динамической системы, представляющей из себя объект контроля, свойства которого меняются со временем. К этим изменениям относятся в первую очередь процессы разрушения, которые развиваются на данном объекте. По интенсивности развития этих процессов можно судить о степени разрушения и прогнозировать дальнейшее развитие событий вплоть до разрушения.

Основные количественные характеристики хаотического аттрактора, соответствующего реальной динамической системе, которые мы можем оценить, это степень стохастичности процесса, показатели Ляпунова, показывающие степень разбегания траекторий странного аттрактора, а также корреляционная размерность и показатель Херста как критерий предсказуемости системы. Опыт таких расчетов для лабораторных модельных систем с высоким соотношением сигнал/шум по данным акустической эмиссии уже имеется. Так, группа профессора Аксельрода исследовала переходные процессы в жидких кристаллах [6, 7]. Полученные данные подтвердили возможность использования механизмов нелинейной динамики к результатам акустико-эмиссионного контроля реальных динамических систем с большим числом степеней свободы. Трубопроводы ГВС как объект мониторинга в этом смысле отвечают необходимым условиям поставленной задачи.

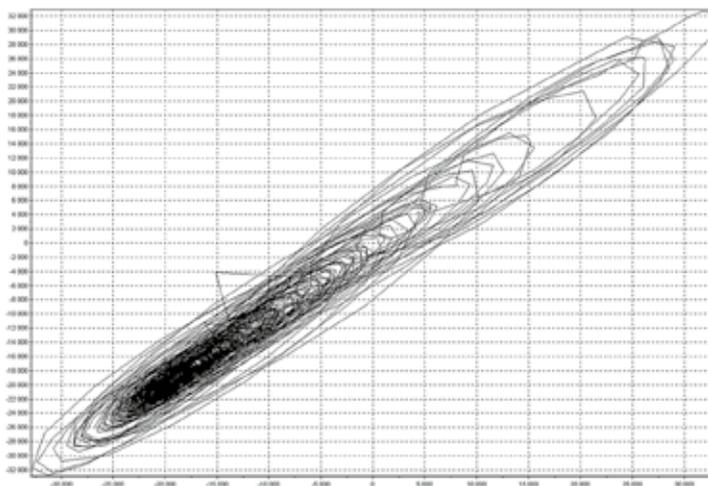


Рис. 9. Пример плоского сечения хаотического аттрактора временного ряда АЭ-наблюдаемой, соответствующей поведению развитой трещины на участке магистрального газопровода

Выводы

1. Метод акустической эмиссии является важнейшей составляющей системы мониторинга объектов с низким соотношением/шум.
2. Несмотря на некоторый положительный опыт использования метода АЭ при диагностике тепловых сетей, основной проблемой остается его слабая помехозащищенность, ограниченная дальность метода и отсутствие четких количественных критериев оценки технического состояния объекта контроля.
3. Сформулирована концепция построения системы мониторинга тепловых сетей, включающая в себя:
 - систему беспороговой регистрации данных АЭ;
 - работу в низкочастотной области спектра регистрации АЭ-сигнала;
 - построение количественных критериев оценки технического состояния объекта контроля с использованием методов нелинейной динамики.

Библиографический список

1. Кузьмин А.Н., Жуков А.В., Харебов В.Г. Практическая оценка метода акустической эмиссии на технологических газопроводах // В мире НК. – 2008. – № 3 (41). – С. 24-26.
2. Кузьмин А.Н., Жуков А.В., Стюхин Н.Ф., Харебов В.Г., Аксельрод Е.Г. Акустико-эмиссионная диагностика коррозионных дефектов трубопроводов // Технадзор. – 2007. – № 7.
3. Кузьмин А.Н., Жуков А.В., Журавлев Д.Б., Стюхин Н.Ф. Контроль трубопроводов с применением метода акустической эмиссии // Ростехнадзор. – 2008. – № 1.
4. Кузьмин А.Н., Журавлев Д.Б., Филиппов С.Ю. К вопросу технической диагностики тепловых сетей // Технадзор. – 2009. – № 3.
5. Кузьмин А.Н., Жуков А.В., Кушин А.И. Акустико-эмиссионная диагностика дефектов сварных соединений линейной части магистральных трубопроводов // Сб. рабочих материалов конференции «Техническое регулирование. Управление рисками, промышленная безопасность, контроль и мониторинг». – М.: НПС «РИСКОМ», 2006.
6. Axelrod E., Bepalov V., Kuzmin A., Kriouk V. «SpontaneousAcousticEmission (AE) atthePhaseTransitioninSmectic», Mol. Cryst. andLiq. Cryst., USA, v. 302, part 3, 363 (1997).
7. Аксельрод Е.Г., Кузьмин А.Н., Крюк В.И., Добрин В.А., Швамм К.Л. Акустическое излучение при электрогидродинамической неустойчивости в нематическом жидком кристалле // Письма в ЖТФ. – 2001. - т. 27, вып. 13. – С. 1-9.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ ШАРОВЫХ РЕЗЕРВУАРОВ АММИАКА ОБЪЕМОМ 2000 М³

*Р.В. Жуков, В.М. Давыдов, Б.А. Арифанов, П.И. Мельников,
ООО Научно-производственное предприятие «Механик», г. Москва*

Акустико-эмиссионный контроль является эффективным методом НК определения технического состояния таких металлоемких сосудов, как шаровые резервуары. Шаровые резервуары аммиака объемом 2000 м³ представляют собой сферическую конструкцию диаметром 16 м с толщиной стенки 20 мм. Протяженность монтажных стыковых сварных швов резервуара составляет более 700 м. Техническое диагностирование резервуаров включало в себя применение таких традиционных методов неразрушающего контроля (НК), как цветная дефектоскопия, магнитный и ультразвуковой контроль. Проведение 100-процентного ультразвукового контроля сварных соединений оболочки резервуара потребовало бы 45 рабочих смен на одного дефектоскописта.

Диагностирование двух единиц резервуаров аммиака поз. № 2А, 2Б объемом 2000 м³, установленных в ОАО «Минудобрения» (Воронежская обл.), проводилось в рамках экспертизы промышленной безопасности. Внешний вид одного из них показан на рис. 1.



Отличительной особенностью монтажа вышеуказанных резервуаров, по сравнению с ранее смонтированными, является то, что впервые в азотной промышленности была применена технология сварки оболочки в среде углекислого газа, что предопределило вероятность появления в сварных швах повышенного числа газовых пор и их цепочек. При проведении на резервуарах обследований в период 1999-2001 гг., проводимых со стороны внутренней поверхности на сварных швах нижней части резервуара, были выявлены поверхностные трещины коррозионного происхождения, расположенные в пределах сварного шва, связанные как с воздействием аммиака на наплавленный металл, так и цикличностью заполнения резервуара. В связи с выявлением в швах значительного количества поверхност-

Рис. 1. Внешний вид шарового резервуара аммиака объемом 2000 м²

ных трещин, было принято решение о 100-процентном контроле сварных швов и проведении последующего ремонта с применением сварки. Разработанная технология ремонта позволила значительно снизить остаточные напряжения в отремонтированных сварных швах и при последующих обследованиях эти трещины не проявлялись.

С 2004 по 2012 г. было проведено по 3 обследования на каждом резервуаре с использованием АЭ-контроля, причем с целью сокращения времени на обследование пневматические испытания проводились перед внутренним осмотром резервуара с последующим контролем другими методами. На рис. 2 показана развертка резервуара с установленными преобразователями АЭ.

На резервуаре поз. № 2Б большинство источников АЭ на выдержках имело амплитуду 60-65 дБ, максимальная амплитуда отдельных источников не превышала 70 дБ (рис. 3). Эти источники по локально-динамическому критерию относились к I классу, по амплитудному критерию – I-II классу. При ультразвуковой дефектоскопии сварных швов отмечались отдельные точечные дефекты, протяженных дефектов не было обнаружено.

При проведении в 2009 г. АЭ-контроля резервуара поз. № 2А в средней части резервуара были зафиксированы активные источники акустической активности II класса, свидетельствующие о наличии зоны повышенной акустической активности (рис. 4). На этих участках был проведен дополнительный магнитный контроль. Разрешенный срок эксплуатации этого резервуара назначен 2 года.

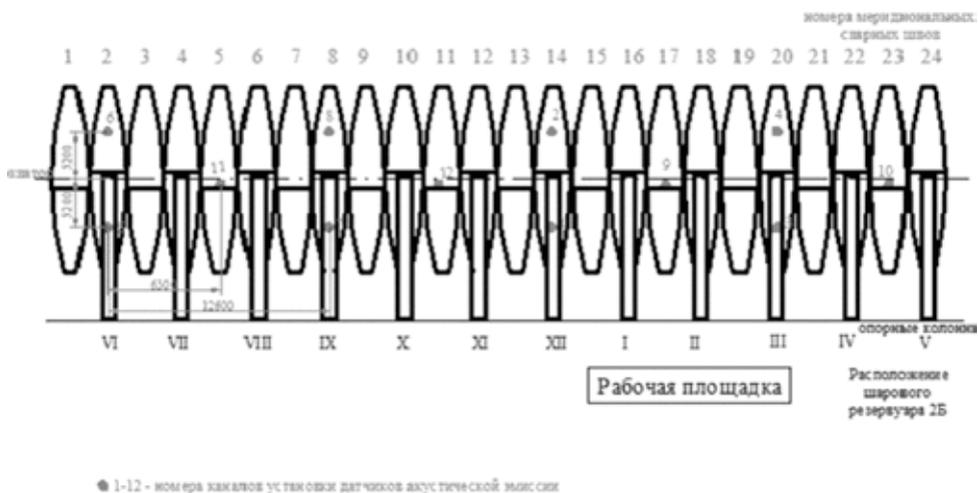


Рис. 2. Развертка резервуара аммиака объемом 2000 м³

В 2011 г. при проведении АЭ-контроля на этих участках были зафиксированы источники АЭ амплитудой до 75-90 дБ. При построении локально-динамического критерия на разных участках нагружения установлено, что эти источники являются критически активными III класса. При построении сферической локации обнаружены активные источники II класса по амплитудному критерию, причем источники АЭ лоцировались в нескольких зонах резервуара (рис. 5, 6).

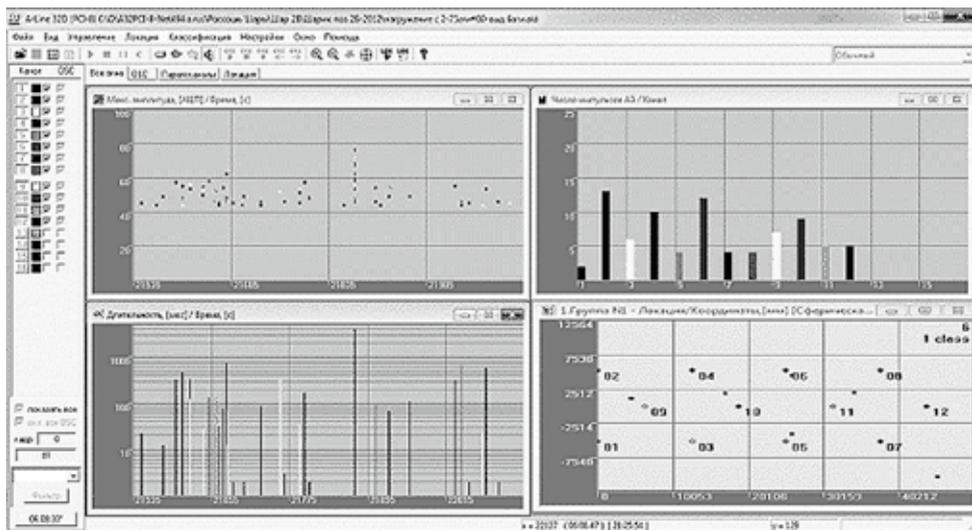


Рис. 3. АЭ-характеристики резервуара поз. № 2Б при выдержке на рабочем давлении 6,0 кгс/см²

При проведении ультразвуковой дефектоскопии сварных швов в местах источников АЭ были обнаружены протяженные недопустимые дефекты. Максимальная протяженность внутренних дефектов длиной около 2 м была обнаружена на сварном шве нижнего днища (рис. 7). В основном все дефекты располагались в средней части сечения шва.

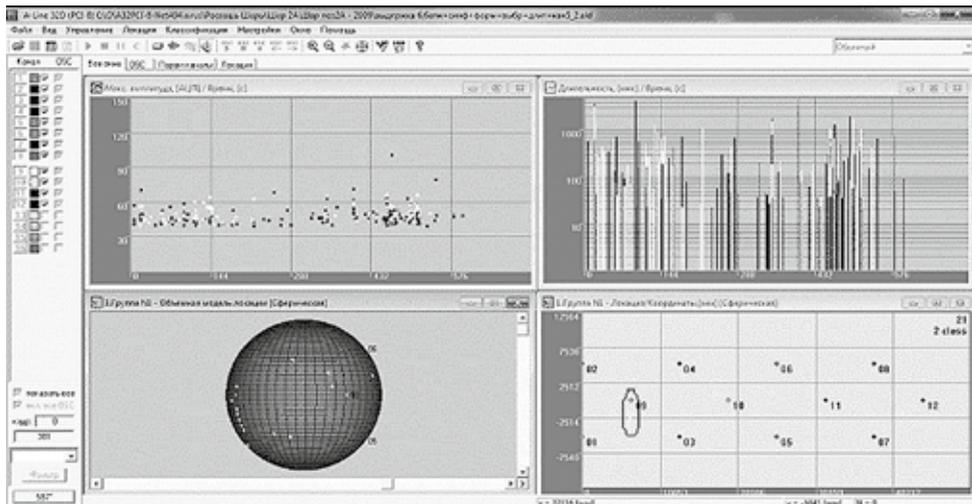


Рис. 4. АЭ-характеристики резервуара поз. № 2А при выдержке на испытательном давлении 6,6 кгс/см² (2009 г.)

Одной из причин появления данных дефектов является способ изготовления сварных швов, который, как это было отмечено выше, предопределил появление газовых пор и их цепочек. Вследствие циклической работы резервуара, возможно, произошло объединение пор в протяженный дефект. Другой возможной причиной является недостаточно качественный предыдущий ремонт, проведенный в 2001 г., поскольку большинство обнаруженных дефектов на сварных швах лепестков образовались в ме-

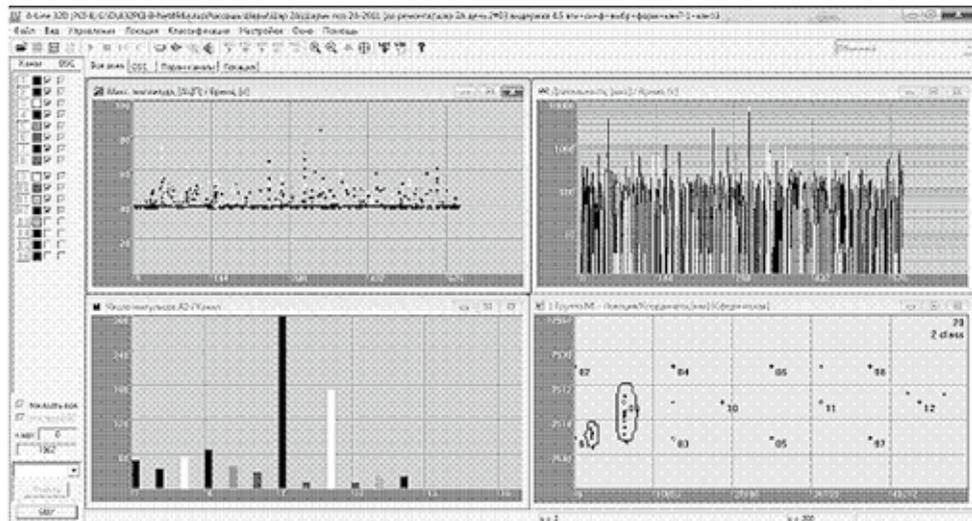


Рис. 5. АЭ-характеристики резервуара поз. № 2А при выдержке на давлении 4,5 кгс/см² (2011 г.) – до ремонта

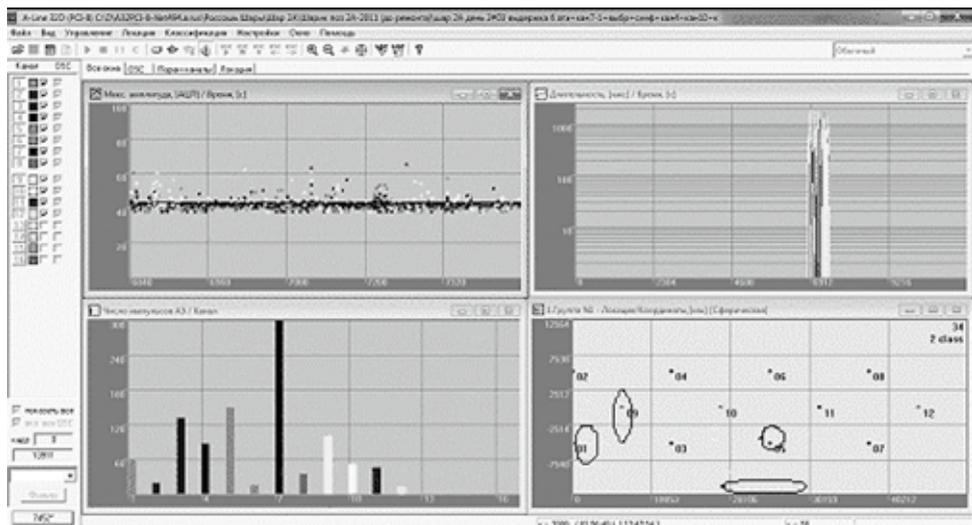


Рис. 6. АЭ-характеристики резервуара поз. № 2А при выдержке на рабочем давлении 6,0 кгс/см² (2011 г.) – до ремонта

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ УСТАЛОСТИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Г.А. Бигус, д.т.н., профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана; Ю.П. Бородин, к.т.н., ООО «ИНТЕРЮНИС»; А.А. Травкин, ФГАУ «НУЦСК при МГТУ им. Н.Э. Баумана»

подавляющее большинство деталей машин, транспортных и других конструкций в процессе эксплуатации претерпевает воздействие циклически изменяющихся нагрузок. Поэтому примерно 90% отказов деталей связано с явлением усталости металла. Усталость металла – процесс постепенного накопления повреждений под действием переменных напряжений (деформаций), приводящий к изменению свойств металла, образованию трещин и разрушению.

В настоящее время для определения уровня дефектности конструкций широко применяется метод акустической эмиссии, основанный на регистрации ультразвуковых колебаний, генерируемых развивающимися дефектами, расположенными в объекте контроля.

Экспериментальные работы по исследованию процессов усталости проводились в рамках внесения изменений в технологию акустико-эмиссионного контроля литых деталей такелажной части тележки грузовых железнодорожных вагонов. В процессе экспериментальных исследований образцы из стали 20ГФЛ и 09Г2С с искусственным дефектом в виде бокового пропила, являющимся концентратором напряжения, подвергались динамическим испытаниям на растяжение. При этом записывались сигналы акустической эмиссии, сопровождающие процесс испытаний с помощью двух акустико-эмиссионных преобразователей, установленных на образец. Изменение нагрузки фиксировалось в режиме реального времени в акустико-эмиссионной системе через параметрический канал с помощью экстензометра (рис. 1).

В рамках экспериментальных исследований было произведено выделение эволюционных стадий деформационных процессов, протекающих в материале в процессе усталостных испытаний, с помощью параметров акустико-эмиссионных данных. Начальный этап испытаний на циклическую усталость соответствует развитию локальной пластической деформации, накоплению повреждений, образованию микротрещин в зоне повышенных напряжений в вершине концентратора. При циклической деформации малоуглеродистой стали одновременно происходят три конкурирующих процесса: разблокировка дислокаций и возникновение новых дислокаций, обусловленные процессом циклического нагружения (деформационное упрочнение); вторичная блокировка дислокаций, обусловленная динамическим деформационным старением; возникновение повреждаемости (пор, субмикротрещин и микротрещин). Преобладание той или иной стадии обуславливает отнесение материала к циклически упрочняемому или разупрочняемому, для которых неупругая деформация за цикл с увеличением числа циклов соответственно уменьшается или увеличивается. Было установлено, что для образцов из стали 20ГФЛ характерно увеличение количества сигналов акустической эмиссии и разброса их значений амплитуды с ростом количества циклов испытаний.

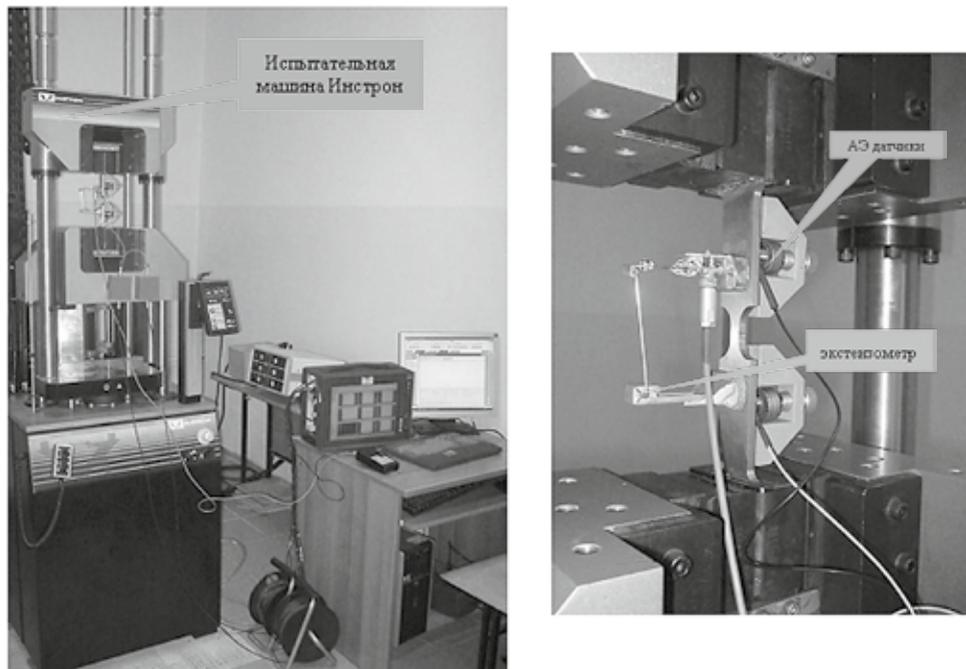


Рис. 1. Испытательный стенд

Для образцов из стали 09Г2С по мере увеличения количества циклов испытаний количество сигналов акустической эмиссии и диапазон амплитуд сигналов уменьшается. Таким образом, можно сделать предположение, что в данных условиях нагружения сталь 20ГФЛ ведет себя, как циклически разупрочняемая, а сталь 09Г2С – циклически упрочняемая.

Более интенсивно процессы накопления поврежденности происходят в области, прилегающей к надрезу и в поверхностных слоях, в зонах повышенного уровня внутренних напряжений. В начальный период циклического нагружения в области, прилегающей к концентратору напряжений, преобладают процессы упрочнения (повышения плотности дислокаций и их блокировка в результате динамического деформационного старения). Поэтому энергия, необходимая для распространения трещины, увеличивается с увеличением числа циклов, но, начиная с некоторого числа циклов нагружения, процессы повреждаемости, способствующие развитию макротрещины, становятся преобладающими. Развитие макротрещины фиксировалось по изменению параметров акустико-эмиссионного процесса, сопровождающего циклические испытания (рис. 4). В процессе испытаний была зафиксирована скачкообразность роста трещин, связанная с тем, что для того, чтобы трещина могла распространяться на некоторую длину, необходимо, чтобы в зоне деформации у вершины трещины на некотором участке была исчерпана пластичность. Механизм исчерпания пластичности зависит от локального напряженного состояния у вершины трещины. При распространении трещины

в условиях локальной квазиплоской деформации этот процесс связан с образованием ячеистой дислокационной структуры, способствующей в дальнейшем формированию микропор или субмикротрещин в зоне впереди трещины (рис. 2, 3).

С помощью программы «A-LineStat 1.00» был произведен анализ выборки сигналов, соответствующих скачку трещины. Программа «A-LineStat 1.00» предназначена для автоматической кластеризации данных акустической эмиссии. Процесс отнесения сигналов к различным кластерам основывается на том, что акустико-эмиссионные сигналы, порожденные одним и тем же источником акустической эмиссии, должны иметь схожую форму. Данные, схожие друг с другом по ряду заранее выбранных признаков, относят к одному и тому же кластеру. В программе «A-LineStat 1.00» объектом кластеризации являются акустико-эмиссионные сигналы, в качестве меры схожести используется коэффициент взаимной корреляции сигналов акустической эмиссии. В

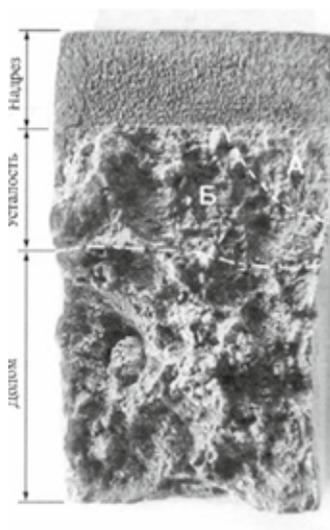


Рис. 2. Общий вид излома

результате анализа было установлено, что процесс развития трещины, помимо высокоамплитудных сигналов, генерирует низкоамплитудные сигналы в определенном диапазоне нагрузок в пределах цикла нагружения.

В рамках исследовательских работ образцы с концентраторами напряжений, усталостными трещинами подвергались статическим испытаниям. Была установлена связь количества сигналов акустической эмиссии с размером зоны пластической деформации. Для образцов с концентратором напряжений регистрировалось количество сигналов акустической эмиссии на порядок меньше, чем для образцов без концентратора. В ряде случаев при статических нагружениях усталостная трещина не генерирует сигналы во временном интервале, соответствующем достижению мак-



Рис. 3. Усталостная зона

симальной нагрузки. При этом наблюдается отсутствие сигналов при повторных нагружениях, что свидетельствует о соблюдении эффекта Кайзера, который связывает сигналы акустической эмиссии, возникающие в результате первого нагружения, с процессами пластичности. Эффект отсутствия сигналов акустической эмиссии при статических испытаниях образца с трещиной ставит вопрос о минимальном размере усталостной трещины, выявляемой методом акустической эмиссии при статических испытаниях.

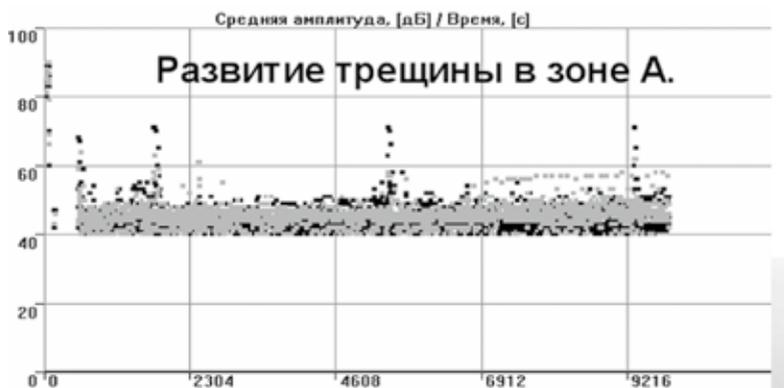


Рис. 4. Регистрация сигналов АЭ при образовании трещины

Метод акустической эмиссии является одним из наиболее эффективных методов исследования процессов усталости материалов. Анализ эволюционных стадий деформационных процессов с помощью параметров акустико-эмиссионных данных делает возможным прогнозирование процесса зарождения микротрещин. Выделение сигналов акустической эмиссии, генерируемых ростом трещины, позволяет сформировать базу для разработки критериев оценки источников акустической эмиссии, выявляемых в процессе технической диагностики натуральных объектов. Изучение поведения усталостных трещин в процессе статических испытаний способствует разработке схем нагружения конструкций, позволяющих эффективно выявлять усталостные повреждения.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОРРОЗИОННОГО СОСТОЯНИЯ ВНУТРЕННЕЙ СТЕНКИ ТРУБЫ

Ю.П. Бородин, к.т.н., ООО «ИНТЕРЮНИС»

Методика оценки коррозионного износа внутренней стенки трубы основана на использовании эффекта рассеивания упругих колебаний от шероховатой поверхности при ультразвуковой толщинометрии. Степень шероховатости внутренней стенки трубы напрямую связана с характером коррозионного повреждения и соответствующими изменениями амплитуды донных сигналов. Это обстоятельство приводит к тому, что при измерении толщины стенки (одна из распространенных операций при диагностировании трубопровода) толщиномером, имеющим только цифровой дисплей, достоверность измерений очень низка или в принципе по названной причине установить остаточную толщину стенки не удастся. Важный практический случай имеем при локальном характере распространения коррозионного дефекта. Всегда полезно определить площадь этого повреждения для того, чтобы отделить для ремонта поврежденный участок от участка с допустимой толщиной стенки. Для решения проблемы необходимо, чтобы толщиномер, кроме цифрового дисплея, имел дисплей для визуализации результатов измерений. Благодаря этому оператор может оценить характер коррозионного дефекта по количеству пересечений порога (строба), а степень утончения стенки по местоположению донного сигнала, пересекающего выбранный порог.

На рис. 1 изображена дефектограмма толщины стенки трубы при отсутствии коррозионного дефекта. Наблюдается последовательность экспоненциально убывающих по амплитуде донных сигналов. На рис. 2 изображена дефектограмма толщины стенки трубы, поврежденной коррозией. Наблюдается одновременно сдвиг первого донного сигнала в сторону меньших значений толщины стенки и одновременное уменьшение амплитуды донных сигналов вплоть до их полного исчезновения.

На рис. 3 (А) для иллюстрации предлагаемой методики схематично изображены донные сигналы при толщинометрии стенки неповрежденной (оранжевый цвет) и поврежденной (синий цвет) коррозией стенки. Для неповрежденной стенки имеем характерный спад отраженных донных сигналов, амплитуды которых способны преодолеть порог ограничения вплоть до пятого по счету донного сигнала. Для поврежденной стенки характер затухания донных сигналов сопровождается изменением амплитуды и времени прихода. Пересечение порога ограничения не наблюдается уже на четвертом донном отражении. На рис. 3 (Б) изображены донные сигналы также от неповрежденной (оранжевый цвет) и поврежденной (синий цвет) коррозией стенки. В данном случае пересечение порога ограничения для поврежденной (синий цвет) наблюдается только на втором донном отражении, что соответствует значительному коррозионному повреждению.

Для классификации коррозионного повреждения используются данные по количеству пересечений порога ограничения.

Категория 1 – число пересечений порога 4-5 (следы коррозии).

Категория 2 – число пересечений порога 2-3 (язвенная коррозия).

Категория 3 – число пересечений порога 0-1 (многоочаговая коррозия).

Методика измерения толщины стенки с коррозионным повреждением внутренней стенки трубы

1. Калибровка толщиномера.

1.1. Определение скорости распространения сигналов для образца из материала контролируемой трубы.

1.2. Выбор порога ограничения амплитуд, обеспечивающего пересечение порога пятым донным сигналом на эталонном образце.

2. Измерение фактической толщины стенки.

2.1. Измерение и регистрация количества пересечений порога донными сигналами на контролируемой трубе.

2.2. Определение фактической толщины по времени прихода первого донного сигнала.

3. Определение категории коррозионного утончения стенки.

3.1. Оценить категорию коррозионного утончения стенки контролируемой трубы в соответствии с критериями.

3.2. По усредненному значению фактической толщины стенки и скорости коррозии* определить время достижения нормативной толщины стенки (ресурс).

* Среднестатистическое значение скорости коррозии.

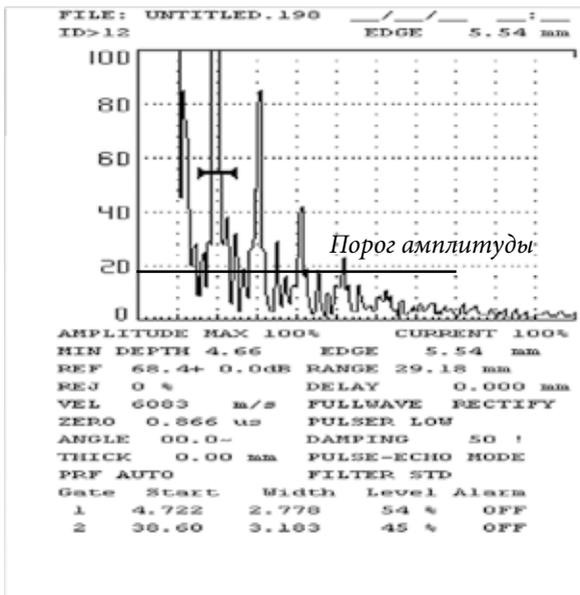


Рис. 1. Дефектограмма толщиномера.

Толщина стенки трубы, не поврежденной коррозией, 5,54 мм

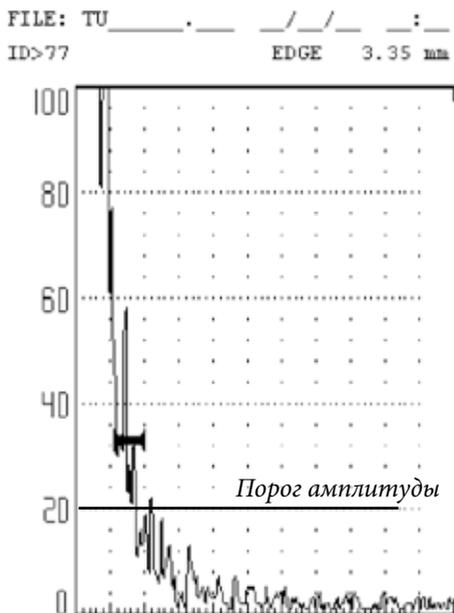


Рис. 2. Дефектограмма толщиномера.

Толщина стенки трубы, поврежденной коррозией, 3,35 мм

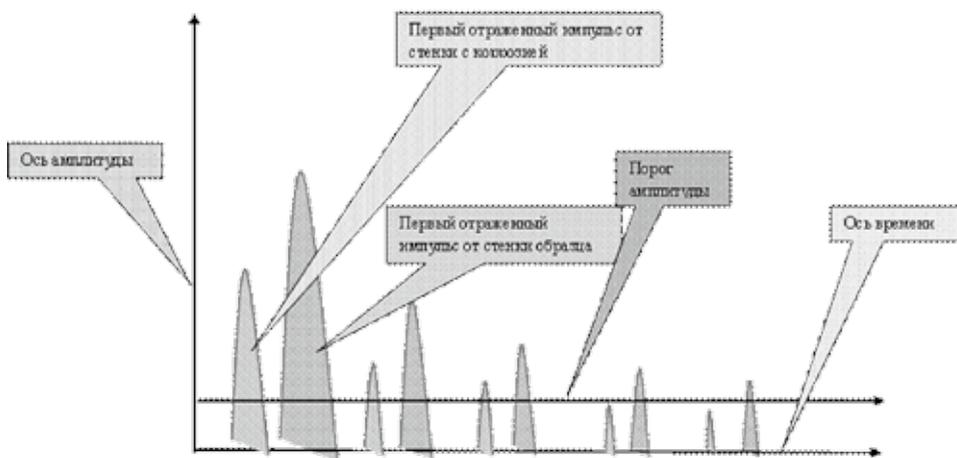


Рис. 3 (А).

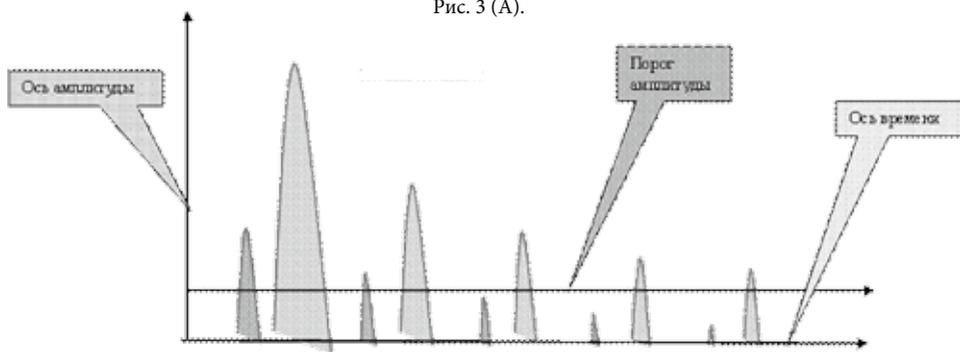


Рис. 3 (Б).

РОЛЬ ИДЕНТИФИКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ПРОГНОЗИРОВАНИИ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ

*О.В. Башков, Т.И. Башкова,
ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»*

Большинство изделий и конструкций машиностроения эксплуатируется в условиях действия циклических напряжений. Свойства материалов, которые влияют на долговечность конструкций, определяются их структурой и способностью сопротивляться знакопеременному циклическому воздействию. Одной из важных задач при эксплуатации изделий является возможность прогнозирования долговечности и, при необходимости, контроль возможного безопасного разрушения конструкций. Наиболее актуально этот вопрос стоит при эксплуатации летательных аппаратов [1]. В современных самолетах применяют новые материалы. Они должны иметь высокие механические свойства. Титановые сплавы ввиду своих уникальных свойств очень активно используются при изготовлении летательных аппаратов.

В работе рассмотрены возможности прогнозирования эксплуатационного ресурса материалов и конструкций при использовании метода акустической эмиссии. В условиях действия циклических нагрузок различные механизмы в реальных условиях эксплуатации излучают большой уровень шума, превышающий порог дискриминации АЭ-аппаратуры. Активность АЭ при этом, как правило, пропорциональна периодичности шумов механизмов диагностируемой конструкции. При большом потоке АЭ-данных выделение полезных сигналов не всегда является возможным.

Авторами разработана методика регистрации и постобработки данных, а также идентификации источников АЭ, позволяющая определять стадии структурного состояния изделий в реальных условиях эксплуатации. Известно, что накопление циклической усталости в материалах происходит стадийно. Различают несколько стадий накопления циклической усталости: циклической микротекучести, циклической текучести, циклического упрочнения (разупрочнения), развития субмикротрещин до размеров микротрещин, развития микротрещин до размеров макротрещин. Каждая стадия характеризуется определенным механизмом усталостного накопления повреждений и разрушения. При исследовании усталостного разрушения материалов различного класса (углеродистые стали, титановые, алюминиевые сплавы) авторам удалось выделить данные стадии на основе анализа сигналов АЭ. Это стало возможным после разделения сигналов и идентификации типов источников АЭ. При идентификации источников АЭ была применена методика частотно-энергетического анализа. Однако анализ Фурье-спектра был заменен вейвлет-анализом в связи с принадлежностью АЭ-сигналов к классу стохастических. Для идентификации сигналов АЭ на основе вейвлет-

разложения были разработаны параметр K_f , названный частотным коэффициентом, и критерии разделения сигналов по типам источников: излучаемые микротрещинами (<2-5 мкм), макротрещинами (>5-10 мкм), группами дислокаций при пластической деформации. На основании активности сигналов АЭ различного типа была дополнена и теоретически обоснована теория стадийности усталостного разрушения в понятиях АЭ-излучения при действии различных механизмов деформации и разрушения материалов [2].

Библиографический список

1. Башков О.В., Панин С.В., Семашко Н.А., Петров В.В., Шпак Д.А. Идентификация источников акустической эмиссии при деформации и разрушении стали 12X18H10T // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2009. – № 10. – С. 51-57.
2. Bashkov O.V., Bashkova T.I., Popkova A.A. Stages of Bending Fatigue of Titanium Alloys and Their Identification by Acoustic Emission// Сборник трудов международной конференции 30th European Conference on Acoustic Emission Testing & 7th International Conference on Acoustic Emission University of Granada, 12-15 September.

ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УЧАСТКА МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА В РЕЗУЛЬТАТЕ СКАЧКА ТРЕЩИНЫ

А.Н. Мисейко, А.В. Шведков, ООО «ИНТЕРЮНИС»

Наиболее опасными дефектами магистральных трубопроводов (МТ) являются трещины в основном металле труб и сварных соединениях. Возникая на различных стадиях жизненного цикла трубопровода и развиваясь в процессе его эксплуатации, они приводят к авариям с тяжелыми последствиями. В частности, рост трещины в магистральном газопроводе может привести к его «лавиному» разрушению на участке до нескольких километров [1].

Задача оперативного выявления развивающихся трещин в МТ и своевременного предотвращения аварий имеет огромное значение, в первую очередь, для участков, работающих в сложных природно-климатических условиях, испытывающих интенсивные нагрузки, расположенных в непосредственной близости от объектов гражданской инфраструктуры, транспортных магистралей и районов особого экологического значения [2]. К таким участкам относятся места резкого изменения профиля («перегибы») трассы трубопровода, участки, испытывающие пульсации давления на выходе перекачивающих станций, участки, подверженные деформациям из-за перепадов температур в условиях резко-континентального климата или из-за подвижек грунтов, места пересечений МТ с другими коммуникациями (линиями связи и электропередач, автомобильными и железными дорогами) и т.п.

Для решения вышеуказанной задачи все чаще применяются системы постоянного акустико-эмиссионного мониторинга, которые устанавливаются на наиболее ответственных участках МТ и, кроме преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ), как правило, оснащаются средствами регистрации механических напряжений и деформаций, температуры и давления перекачиваемого продукта, параметров воздушной среды и пр. [3]. Однако при проектировании этих систем и выборе их технических характеристик многие разработчики не в полной мере используют возможности математического моделирования для уточнения требований к чувствительности используемых преобразователей, определения диапазона значений регистрируемых параметров, установления связи параметров технического состояния МТ между собой и с параметрами развивающихся трещин, выбора адекватных критериев оценки технического состояния МТ.

В рамках работ по проектированию и установке систем акустико-эмиссионного мониторинга на участках МТ, проложенных в оползнеопасных районах, специалистами ООО «ИНТЕРЮНИС» было проведено математическое моделирование процесса изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) участка МТ в результате скачка трещины. Целью данного моделирования являлось изучение процессов распро-

странения упругих волн в МТ, вызванных смещениями поверхности трубопровода в результате релаксации напряжений в вершине трещины, а также определение оптимальных условий регистрации возникающих сигналов акустической эмиссии (АЭ) на контролируемом участке МТ.

Как известно, описание колебательных процессов, возникающих в различных конструкциях, под действием изменяющихся во времени сил может быть получено аналитическим и численным способами. Однако первый способ практически невозможно использовать для реальных объектов ввиду сложных граничных условий. Для моделирования подобных задач наиболее перспективным представляется использование численных методов, достаточно развитых и активно используемых в последнее время. При выборе конкретного численного метода следует учитывать не только эффективность процедуры вычисления, но и возможности программного продукта контролировать процесс расчета и проводить верификационные испытания. Одним из таких численных методов, отвечающих указанным требованиям, является метод конечных элементов (МКЭ), реализованный с помощью пакета программ конечно-элементного анализа ANSYS [4]. Общепринятая формулировка МКЭ предполагает отыскание поля перемещений и связана с минимизацией потенциальной энергии системы при нахождении узловых значений перемещений. После нахождения перемещений вычисляются компоненты тензоров деформаций и напряжений.

Моделирование изменения НДС участка МТ в результате скачка трещины было выполнено авторами настоящей работы в 3 этапа. На первом этапе была построена геометрическая модель участка МТ, состоящая из 8 трубных секций $\varnothing 1020 \times 12$ мм длиной по 10 м каждая (рис. 1 а, б).

На втором этапе было проведено разбиение поверхности участка МТ на оболочечные конечные элементы (рис. 2 а, б). Исходя из возможного вклада погрешности модели в итоговые результаты и учитывая имеющиеся вычислительные ресурсы, производилась некоторая идеализация исходной геометрии. Было создано несколько конечно-элементных моделей с различной степенью детализации, из которых была выбрана наиболее оптимальная, состоящая из 160 тысяч элементов, что позволяет достаточно оперативно проводить расчет (в пределах 1-4 часов), но в то же время обеспечивает приемлемую точность.

На третьем этапе задавались параметры МТ и условия его нагружения. Были смоделированы следующие условия: глубина залегания МТ – 1 м, тип грунта – суглинок, учитывалось сцепление стенок МТ с грунтом [5]. Предполагалось, что внутри трубопровода находится природный газ под давлением 2,0 МПа. Материал, из которого изготовлен МТ – низколегированная трубопроводная сталь 09Г2С (модуль Юнга $E=2 \times 10^{11}$ Па, предел текучести $\sigma_t=0,37 \times 10^9$ Па). Поведение материала при проведении расчетов принималось упругим, а нагружение – динамическим.

Скачок трещины на поверхности МТ моделировался приложением единичного ступенчатого импульса в области площадью 1 см². Длительность импульса составляла 0,0001 сек., а величина давления на поверхности МТ в указанной области – $2 \cdot 10^4$ Па, что соответствовало значениям параметров импульсов, регистрируемых при скачках трещин в ходе испытаний реальных объектов [6].

После построения математической модели участка МТ был проведен расчет его НДС. Время расчета зависело от таких параметров, как общее число элементов, число контактирующих элементов, величина шага по нагружению, число подшагов и максимально допустимое число равновесных итераций на каждом подшаге [4].

Необходимо отметить, что до выполнения расчета НДС были определены собственные частоты и возможные формы колебаний моделируемого участка МТ (рис. 3 а-д). Было установлено, что собственные частоты колебаний находятся в диапазоне 1,021-1,087 Гц и не могут оказать существенного влияния на результаты моделирования.

Результаты моделирования изменения НДС участка МТ в виде картин распределения полей перемещений (в мм) по его поверхности, зафиксированных через определенные интервалы времени, прошедшие с момента имитации скачка трещины, показаны на рис. 4 а-е. На рис. 5 а-е приведена зависимость амплитуды смещения (в мм) поверхности МТ от времени (в мс) на различных расстояниях от точки приложения импульса, имитирующего скачок трещины. При этом указанная зависимость показана для 3 возможных направлений распространения колебаний – X (в горизонтальном направлении перпендикулярно оси МТ), Y (в вертикальном направлении перпендикулярно оси МТ), Z (вдоль оси МТ).

Анализ результатов моделирования позволил сделать следующие выводы:

- распространение полей перемещений, возникших при имитации скачка трещины на поверхности МТ, происходит в начальный период времени (<0,006 сек.) по окружности трубопровода, а позднее – преимущественно вдоль образующей, к которой приложена нагрузка, с последующим расхождением колебаний по окружности трубопровода;
- поля перемещений распространяются вдоль МТ преимущественно со скоростью, симметричной нулевой моды волны Лэмба (вклад этой составляющей в групповую скорость распространения упругих волн в трубопроводе максимален);
- наибольшей амплитудой при заданных условиях моделирования обладают смещения, происходящие по нормали к поверхности контролируемого участка МТ;
- максимальная (по модулю) амплитуда смещений на поверхности контролируемого участка МТ заданной длины (80 м) составляет от 0,12 мм (в месте имитации скачка трещины) до 0,00000016 мм (на расстоянии 80 м от места имитации скачка трещины);
- с увеличением расстояния на каждые 4 м между источником приложения импульсной нагрузки и местом регистрации колебаний на поверхности МТ амплитуда упругих волн затухает в среднем в 2,5-3,2 раза;
- оптимальное расстояние между ПАЭ, определяемое их чувствительностью и уровнем шумов в момент проведения АЭ-контроля, по теоретическим оценкам для ПАЭ с рабочей частотой 159 кГц и 32 кГц при уровне порога 40-46 дБ составляет 48 и 77 м соответственно.

Таким образом, моделирование изменения НДС позволило описать характер распределения полей перемещений на поверхности МТ в результате имитации скачка тре-

щины, определить порядок величин смещения поверхности МТ при единичном импульсном воздействии в заданной области, уточнить требования к чувствительности используемых преобразователей акустической эмиссии, сделать выводы о затухании упругих волн на различных расстояниях от места имитации скачка трещины и выполнить теоретическую оценку оптимального расстояния между ПАЭ.

Библиографический список

1. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Безопасность трубопроводного транспорта / И.И. Мазур, О.М. Иванцов и др. – М.: МГФ «Знание», 2002. – 629 с.
2. Коршак А.А., Коробков Г.Е., Душин В.А., Набиев Р.Р. Обеспечение надежности магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов. – Уфа: Фонд содействия развитию научных исследований, 2003. – 190 с.
3. Харемов В.Г., Ладыгин А.П., Черных М.В. Автономные системы мониторинга трубопроводов // Тренды. События. Рынки. Федеральный деловой журнал. – 2012. – № 4 (63).
4. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
5. СНиП 3.02.01-87 Земляные сооружения, основания и грунты. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 88 с.
6. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 7: В 2 кн. Кн. 1: В.И. Иванов, И.Э. Власов. Метод акустической эмиссии. – М.: Машиностроение, 2005. – 829 с.

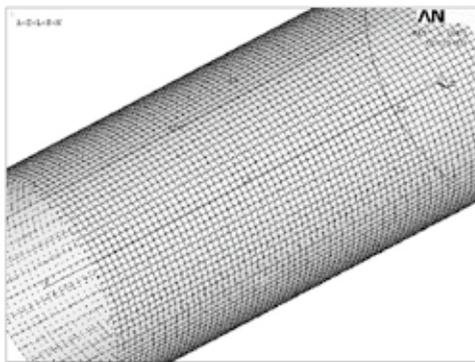


а – общий вид

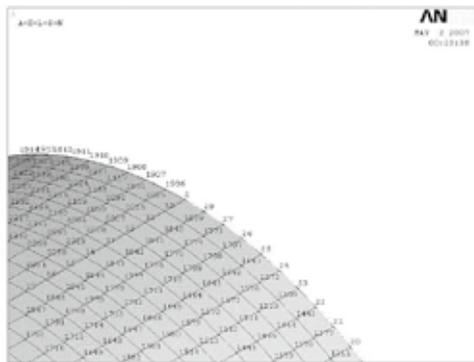


б – крупненный вид

Рис. 1. Геометрическая модель участка МТ

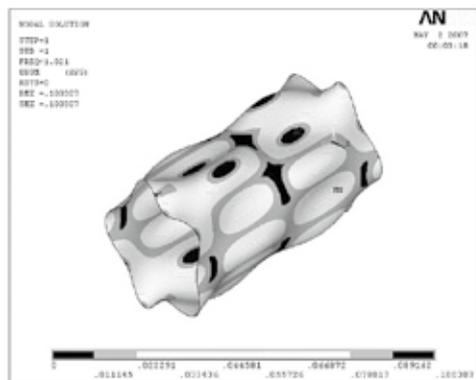


а – общий вид

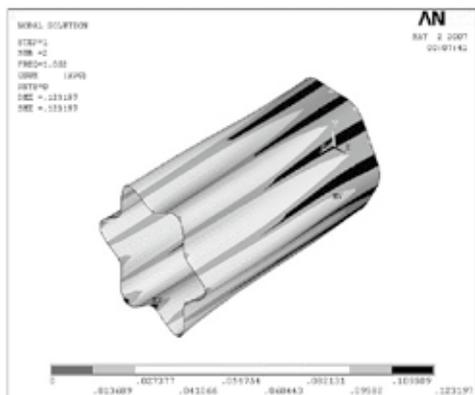


б – крупненный вид

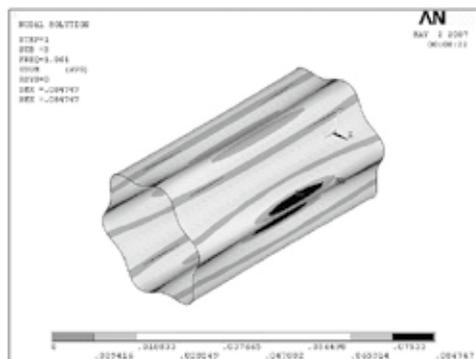
Рис. 2. Конечно-элементная модель участка МТ



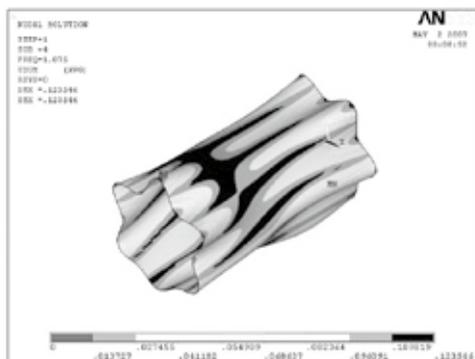
а – собственная частота 1,021 Гц



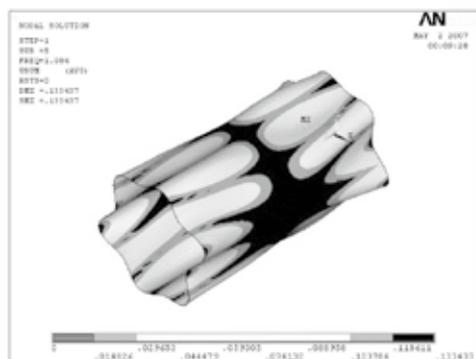
б – собственная частота 1,052 Гц



в – собственная частота 1,061 Гц



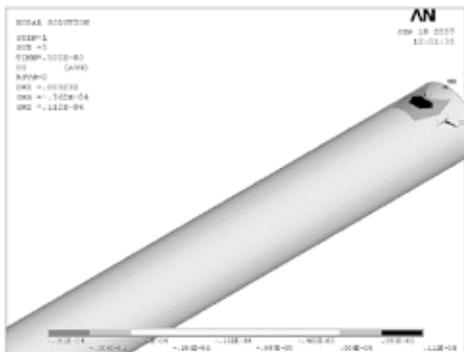
г – собственная частота 1,075 Гц



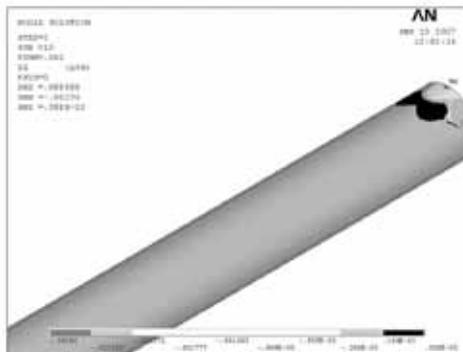
д – собственная частота 1,084 Гц

Рис. 3. Собственные частоты и возможные формы колебаний участка МТ

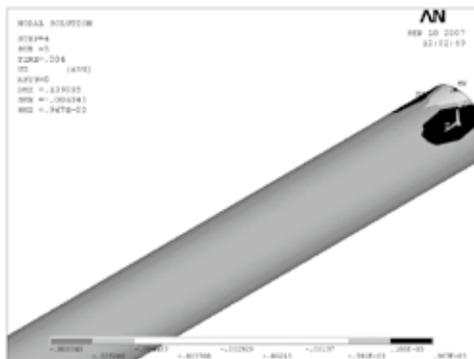
Изменение напряженно-деформированного состояния участка магистрального трубопровода в результате скачка трещины



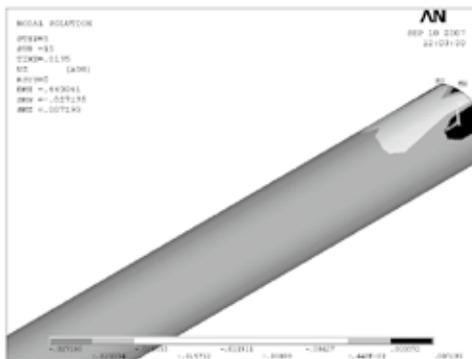
а – через 0,0005 сек.



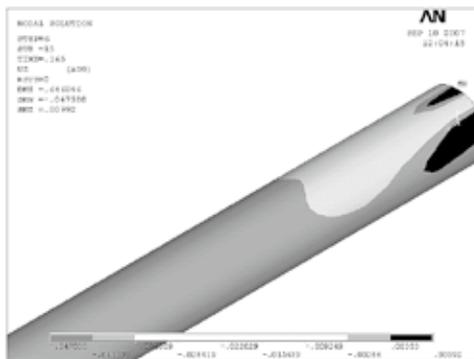
б – через 0,002 сек.



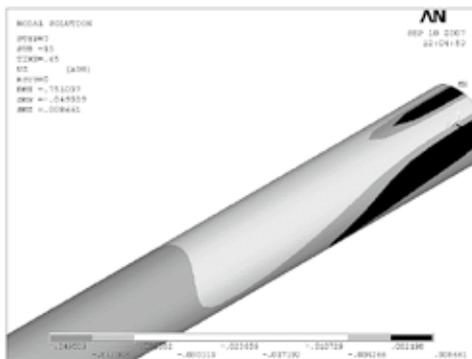
в – через 0,004 сек.



г – через 0,0195 сек.

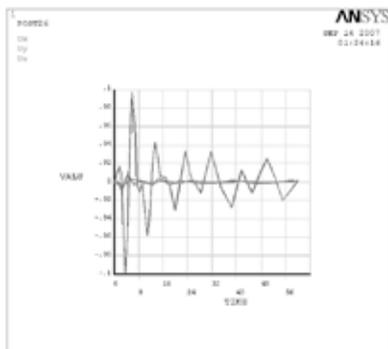


д – через 0,165 сек.

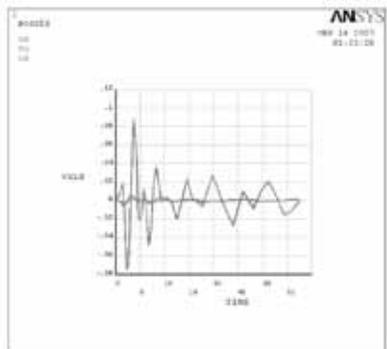


е – через 0,65 сек.

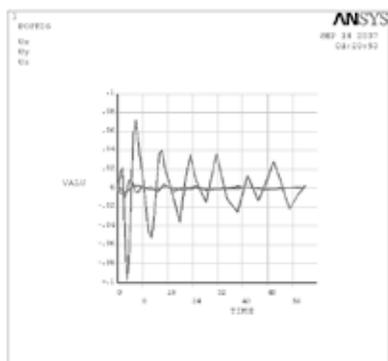
Рис. 4. Распределение полей перемещений по поверхности участка МТ через определенные интервалы времени, прошедшие с момента имитации скачка трещины



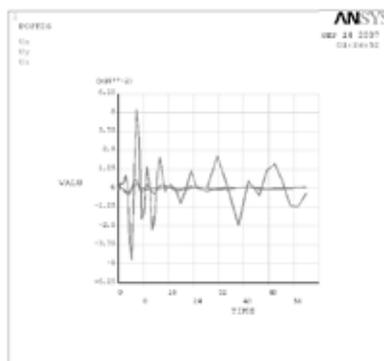
а – на расстоянии 4 м



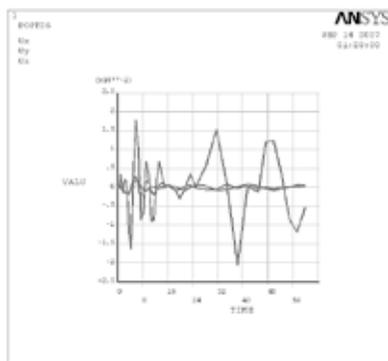
б – на расстоянии 8 м



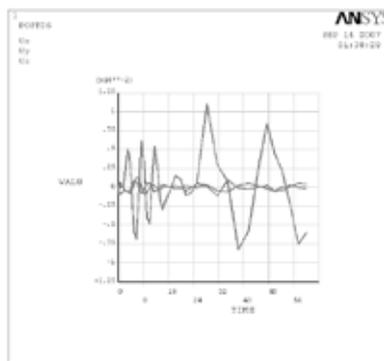
в – на расстоянии 12 м



г – на расстоянии 16 м



д – на расстоянии 20 м



е – на расстоянии 24 м

Рис. 5. Зависимость амплитуды смещения (в мм) поверхности участка МТ от времени (в мс) на различных расстояниях от места имитации скачка трещины

U_x – смещение в горизонтальном направлении перпендикулярно оси МТ,

U_y – смещение в вертикальном направлении перпендикулярно оси МТ,

U_z – смещение вдоль оси МТ)

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В СИСТЕМАХ КОРРОЗИОННОГО МОНИТОРИНГА ОБОРУДОВАНИЯ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Ю.С. Попков, Е.А. Марков, М.В. Черных,
ООО «ИНТЕРЮНИС», г. Москва

*Экспериментальные исследования проведены совместно с Российским государственным университетом нефти и газа имени И.М. Губкина.
Руководитель темы: М.Л. Медведева, д.т.н., проф.*

Основой любого нефтеперерабатывающего завода (НПЗ) являются установки первичной переработки нефти, расположенные в начале технологической цепочки. Коррозия оборудования на этих установках обусловлена, в частности, присутствием в сырой нефти и в нефтепродуктах хлор- и сераорганических компонентов, выделением сероводорода и диоксида углерода, отстоем пластовой воды, конденсацией воды, присутствием нафтеновых кислот, растворенных минеральных солей и кислотного растрескивание.

Перспективные области применения метода акустической эмиссии в системах коррозионного мониторинга:

- непрерывный контроль коррозии при изменении состава поступающего сырья;
- оценка эффективности антикоррозионных мероприятий;
- обнаружение течей через сквозные коррозионные перфорации;
- увеличение межремонтного пробега;
- определение очередности ремонта оборудования.

В общем случае электрохимическая коррозия сопровождается процессами, которые служат источниками акустической эмиссии [2]. К ним относятся: отслаивание и растрескивание защитных покрытий и продуктов коррозии, отрыв и схлопывание пузырьков водорода, коррозионное растрескивание, межкристаллитная коррозия, утечки нефти, нефтепродуктов, теплоносителей или хладагентов, пластическая деформация у вершины трещины. Анодное растворение металла относят к недетектируемым процессам по причине низкой амплитуды сигнала [3].

Вследствие большого разнообразия источников актуальной становится задача распознавания импульсов АЭ разной природы. В качестве информативных параметров используют параметры формы и спектра сигналов, в частности, время нарастания переднего фронта и усредненную частоту [4].

В настоящее время существуют примеры практического использования метода акустической эмиссии для ранжирования дниц резервуаров хранения сырой нефти и нефтепродуктов по степени опасности [5, 6]. При этом в качестве источника называют разрушение продуктов коррозии. Метод АЭ применяют также в режиме индикации, когда по результатам измерений делают вывод о наличии или отсутствии коррозии, а также о ее типе.

Задача коррозионного мониторинга не только обнаружить сам факт протекания коррозии и определить ее тип, но и дать количественную оценку скорости процесса. Характеристикой общей коррозии может служить потеря массы в единицу времени на единицу площади или рост глубины поражения в год. Локальная коррозия характеризуется глубиной проникновения, количеством питтингов или язв на единицу площади поверхности и площадью поражения. При неравномерной коррозии глубина поражения является статистической величиной и выражается графиками распределения. Во всех описанных случаях необходимо связать количественные параметры АЭ с выбранной количественной характеристикой коррозии.

Природа действующих источников АЭ, а соответственно, вид и параметры зависимости, определяются условиями эксплуатации оборудования (составом среды, давлением, температурой) и материалом, из которого оно изготовлено. Экспериментально получаемые результаты определяются инструментальными и методическими факторами, такими как выбор преобразователей АЭ (ПАЭ), расстояние между ПАЭ, коэффициент предварительного усиления, аппаратные и программные фильтры, алгоритмы выделения дискретных импульсов из непрерывного сигнала, порог амплитудной дискриминации, пути распространения и затухание сигнала в объекте контроля.

В настоящем исследовании на примере стали 20 изучалась зависимость между активностью, спектральными характеристиками АЭ, скоростью коррозии и уровнем кислотности испытательной среды, содержащей ионы хлора. Похожая коррозионная ситуация складывается при конденсации воды с растворенным хлороводородом по линии головного погона атмосферной колонны.

Образцы из стали 20, вырезанные из листа толщиной 4-5 мм в форме полос шириной 30 мм, опускались в испытательную среду. На образцах устанавливались ПАЭ GT200 с рабочей частотой 165 кГц и полосой 130-200 кГц. Сигналы с ПАЭ поступали через предварительные усилители с коэффициентом усиления 26 дБ на многоканальную АЭ-систему A-Line 32D (PCI-8). Испытывались три варианта образцов. В первом варианте образцы были покрыты защитным покрытием до определенной глубины погружения в раствор, так что граница раздела фаз «воздух-раствор» была защищена. Во втором варианте для контакта металла с испытательной средой в покрытии оставлялись «окошки». В третьем варианте образцы испытывались без защитного покрытия.

Скорость коррозии определялась весовым методом на образцах-свидетелях.

АЭ-система предварительно запускалась на измерения до погружения образцов в испытательную среду. При выборе порога амплитудной дискриминации на уровне 32 дБ частота регистрации помех не превышала 20 имп/час.

Частота регистрации импульсов при погружении в 3-процентные растворы хлорида натрия существенно возрастала. Наибольшая активность АЭ наблюдалась в растворах с наибольшей кислотностью при водородном показателе $pH=1$. Частота регистрации импульсов в среднем достигала 36 тысяч имп/час или 10 имп/с. Одновременно на поверхности образцов наблюдалось образование пузырьков газа и отслаивание защитного лакокрасочного покрытия. Образовывались коричневатые рыхлые продукты коррозии.

В пассивирующем растворе гидроксида натрия с $pH=12$ единственным визуально наблюдаемым процессом было отслаивание защитного покрытия. При этом регистрировалось до 7,3 тысяч импульсов в час (2 имп/с). Но, когда в пассивирующий раствор были опущены образцы без покрытия, частота импульсов была такой же, как и на воздухе при измерении помех.

Испытания на питтинговую и язвенную коррозию проводили на образцах без защитного покрытия. Во время образования питтингов и язв в нейтральной среде, содержащей ионы хлора, максимальная частота импульсов наблюдалась примерно через сутки от начала экспозиции и достигала величины около 100 имп/ч при средней амплитуде ниже 40 дБ. Продукты коррозии не позволили точно зафиксировать моменты образования питтингов на образцах.

Язвенная коррозия в слабощелочном растворе гидроксида натрия ($pH = 8,5$) не сопровождалась заметной АЭ. На поверхности образцов наблюдались рыхлые коричневатые продукты коррозии без выделения пузырьков газа.

Получена монотонная зависимость скорости коррозии от величины водородного показателя (рис. 1) [7]. Значения скорости коррозии в испытательных средах составили: от 0,09 ($pH=7,0$) до 2,59 г/м² х час ($pH=1,0$).

Сумма импульсов АЭ за время испытаний линейно уменьшается с ростом pH . Соотношение со скоростью коррозии не столь однозначное. В растворах с pH , равном 4,0 и 5,5, скорость коррозии была одинаковой, а сумма импульсов линейно уменьшалась с ростом водородного показателя.

Отсутствие заметной АЭ при испытании образцов без покрытий в слабощелочном растворе гидроксида натрия свидетельствует о том, что сигнал от анодного растворения металла находится по амплитуде ниже порога дискриминации. Некоторый рост активности АЭ при погружении запассивированных образцов в нейтральный раствор с ионами хлора, возможно, связан с питтингообразованием. Но прямых визуальных подтверждений этому нет. При испытаниях в кислых средах источником регистрируемых импульсов, по-видимому, являлось выделение пузырьков водорода и отслаивание защитного покрытия. Отслаивание и растрескивание покрытия являлось источником АЭ и при пассивации образцов с покрытием в щелочной среде.

Угол наклона кумулятивных амплитудных распределений, построенных для результатов испытаний в кислых средах, не зависит от значения pH -среды (рис. 2). Это свидетельствует о том, что при изменении кислотности среды в диапазоне 1÷5,5 источники акустических сигналов имеют одну и ту же природу.

В протяженных объектах происходит затухание сигнала. Это ограничивает радиус зоны контроля одним ПАЭ. Прием коэффициент затухания равным 4 дБ/м,

что характерно для сосудов и труб. Предположим, что частота помехи не превышает 10 имп/ч при заданной величине порога дискриминации, как и было ранее получено в эксперименте. В качестве критерия оценки коррозионной ситуации будем использовать частоту регистрации импульсов. Если ее величина равна или превышает 20 имп/ч, считаем, что идет коррозия.

Удаление зоны коррозии от ПАЭ на 1 м равносильно смещению амплитудных распределений влево на 4 дБ, или смещению порога вправо на ту же величину. Тогда при $pH=4$ радиус зоны контроля одним ПАЭ – 2 м.

Если в продукт головного погона атмосферной колонны попадает сероводород, водородный показатель среды может снизиться до 2÷3. Радиус зоны контроля увеличится до 3 м.

На практике зона контроля может отличаться в зависимости от материала и толщины стенки трубопровода или в результате применения дополнительных волноводов.

Для того чтобы судить об особенностях протекания коррозии и эффективно применять метод АЭ в условиях интенсивных акустических помех, необходимо уметь идентифицировать импульсы от разных видов источников. Традиционным инструментом для решения данной задачи является спектральный анализ. Однако форма спектра сильно зависит от отражений, интерференции и затухания волн в объекте контроля, а также от искажений в измерительном тракте. Например, резонанс в преобразователе дает пик в амплитудном спектре, частота которого не связана с природой источника. Поэтому в качестве информативного параметра было решено вычислять распределение спектральной энергии с разбиением измеряемого диапазона частот на широкие интервалы.

Во время измерений записывались осциллограммы, которые затем обрабатывались в программе A-Line OSC. Далее анализировались гистограммы, построенные для всей совокупности записанных осциллограмм.

Обнаружено, что коррозия с боковых поверхностей образца сопровождается более высокочастотными импульсами, у которых в диапазоне 300-500 кГц сосредоточено больше 20% энергии. В предшествующих исследованиях [8] подобный результат объяснялся перераспределением энергии между симметричной и антисимметричной нулевыми модами волн Лэмба в зависимости от расположения источника по толщине пластины.

Посредством анализа гистограмм удалось выделить две спектральные группы осциллограмм, записанных в условиях коррозии в кислых средах (рис. 3). Им соответствуют два локальных пика на гистограммах. Первую группу составляют осциллограммы, у которых в среднем 75 % энергии сосредоточено на частотах 30-100 кГц. У второй группы в среднем 85 % энергии сосредоточено на частотах 100-200 кГц. Распределения импульсов по доле спектральной энергии выше 200 кГц более однородные. Следовательно, информация, необходимая для разделения разных типов импульсов, содержится в пределах от 30 до 200 кГц.

С ростом pH-среды количество импульсов в обеих спектральных группах монотонно уменьшается. Меняется и соотношение между объемами групп. Из этого сле-

дует вывод, что в процессе коррозии в кислых средах действовали одновременно два типа источников сигнала, разных по своей природе. Активность обоих типов источников зависит от рН-среды. Этими источниками служат: отрыв пузырьков от стенки образца и их схлопывание при всплытии, а также отслаивание защитного покрытия.

Путем прямого сопоставления результатов измерений АЭ на образцах в сильно-кислом (рН=1) и сильнощелочном (рН=12) растворах удалось выделить импульсы от пузырьков водорода (рис. 4). У этих импульсов в среднем 70-75% энергии сосредоточено на частотах 30-100 кГц, 5-10% – на частотах 100-200 кГц, а остальная часть энергии – на частотах выше 200 кГц. Они составляют первую спектральную группу. Источником второй группы импульсов предположительно является отслаивание защитного покрытия.

Интенсивность протекания реакции водородной деполяризации с выделением пузырьков газа напрямую связана со скоростью коррозии. А отслаивание покрытия или продуктов коррозии в общем случае может происходить и без протекания коррозии. Поэтому на практике правильнее оценивать скорость коррозии по накоплению не всех импульсов, а только импульсов первой спектральной группы.

Распределение спектральной энергии импульсов по частотам зависит не только от природы источников АЭ, но и от затухания сигнала на разных частотах, от выбора преобразователей, настроек фильтров, геометрии объекта контроля. Поэтому свойства спектральных групп импульсов АЭ от образования пузырьков газа или действия источников другой природы не являются константами. Соответственно сложно однозначно задать универсальные параметры классификации, а определение параметров классификации вручную при каждой установке АЭ-системы увеличивает трудоемкость проведения контроля. С этих позиций весьма перспективно использовать методы автоматической кластеризации.

Изучена возможность применения программы кластерного анализа A-Line Stat для автоматического выделения спектральных групп импульсов. Степень сходства осциллограмм определялась путем расчета коэффициентов корреляции. Первоначально корреляционный порог был задан равным 0,8. Из выборки объемом 161 осциллограмма удалось выделить 5 кластеров объемом от 2-х до 5 элементов. На двухпараметрическом распределении (рис. 5) видны две группы точек, которые соответствуют двум ранее обнаруженным спектральным группам. Кластеры 1 и 2 входят в первую группу, а кластеры 3, 4 и 5 во вторую. Объем кластеров составил всего 7,5% от объема исходной выборки.

Для достижения более полной кластеризации порог был снижен до 0,35. Осциллограммы разделились на три кластера (рис. 6). Первый кластер включил в себя большую часть импульсов первой спектральной группы. Второй кластер распределился между обеими группами. Третий кластер состоял преимущественно из осциллограмм второй спектральной группы. Объем кластеризованных импульсов составил 60,9% от объема выборки.

Таким образом, путем кластеризации в программе A-Line Stat удалось успешно выделить импульсы первой спектральной группы, то есть импульсы АЭ от процессов выделения водорода при катодной поляризации.

Согласно литературным источникам [3] АЭ от анодного растворения часто лежит ниже порога дискриминации. Однако не исключено, что АЭ с низкой амплитудой вносит вклад в непрерывный сигнал, который обычно классифицируется как шум и, соответственно, не анализируется.

Данная гипотеза проверена в условиях язвенной коррозии стали 20 в слабощелочном растворе гидроксида натрия. Сопоставлены результаты измерений АЭ при расположении образцов на воздухе и в испытательной среде.

Измерения проводились двумя способами: системой A-Line 32D (PCI-8) при пониженном пороге дискриминации и с применением внешнего модуля АЦП E20-10 (LCard).

В первом варианте измерений ожидалось, что импульсы АЭ, сложившись с помехами, увеличат регистрируемую частоту импульсов. Во втором варианте измерений рассчитывался среднеквадратичный уровень непрерывного сигнала и его спектр мощности.

После снижения порога амплитудной дискриминации от 32 до 28 дБ частота регистрации импульсов возросла от единиц импульсов в час до сотен и тысяч импульсов в час. Но заметной разницы в результатах измерений на воздухе и в испытательной среде обнаружено не было.

Непрерывный сигнал, записанный модулем АЦП E20-10 (LCard), предварительно фильтровался для удаления периодической составляющей аппаратного шума. Применялись программные режекторные фильтры, задерживающие гармоники периодического сигнала.

Среднеквадратичный уровень сигнала при расположении образца на воздухе и в испытательной среде практически не различался и составил 5,6 мкВ, приведенных ко входу усилителя (15 дБ).

Спектральный анализ сигнала осуществлялся посредством построения периодограмм методом Уэлча. Существенных изменений спектра мощности при помещении образцов в коррозионный раствор не обнаружено.

Заключение по экспериментальным результатам

1. В процессе коррозии стали 20 в средах с $\text{pH}=1 \div 5,5$, содержащих ионы хлора, источниками АЭ являются выделение водорода и/или отслаивание и растрескивание защитного покрытия. С ростом pH-среды происходит подавление реакции водородной деполяризации и источником сигнала служит только разрушение покрытия.
2. Анодное растворение стали 20 со скоростью $0,09 \div 2,5 \text{ г/м}^2 \times \text{час}$ не сопровождается акустической эмиссией выше уровня чувствительности измерительной аппаратуры.
3. Сумма импульсов АЭ с ростом pH-среды линейно уменьшается, что связано со снижением интенсивности выделения водорода. С увеличением скорости коррозии сумма импульсов в целом возрастает. Однако полученная экспери-

ментальная зависимость не является однозначно линейной, что, по-видимому, связано со сложным влиянием выбранных составов испытательной среды на процесс анодного растворения железа.

4. Показана принципиальная возможность разделения импульсов от разрушения покрытия и выделения водорода по спектральному распределению энергии.
5. Оценена эффективность применения кластерного анализа в программе A-Line Stat для разделения групп импульсов АЭ, зарегистрированных в процессе коррозии.

Выводы

Применение метода АЭ в системах коррозионного мониторинга перспективно при выполнении одного из следующих условий:

- кислая рабочая среда, когда в результате водородной деполяризации выделяются и схлопываются пузырьки газа;
- продукты коррозии образуют слой, который впоследствии отслаивается и растрескивается;
- материал в данных условиях эксплуатации склонен к коррозионному растрескиванию или межкристаллитной коррозии.

Библиографический список

1. Медведева М.Л. Коррозия и защита оборудования при переработке нефти и газа. – М.: Изд-во «Нефть и газ». 2005. – 312 с.
2. S. Yuyama. Fundamental Aspects of Acoustic Emission Applications to the Problems Caused by Corrosion. / Corrosion Monitoring in Industrial Plants Using Nondestructive Testing and Electrochemical Methods. - G.C.Moran & P.Labine eds., American Society for Testing and Materials, (STP908), 1986, pp. 43-74.
3. A. Pollock. Acoustic emission capabilities and applications in monitoring corrosion. / Corrosion Monitoring in Industrial Plants Using Nondestructive Testing and Electrochemical Methods. - G.C.Moran & P.Labine eds., American Society for Testing and Materials, (STP908), 1986, pp. 30-42.
4. A. Pratepasen. Pitting Corrosion Monitoring Using Acoustic Emission. / Pitting Corrosion. - Edited by Nasr Bensalah, Publisher: InTech, Published, 2012, pp. 43-60.
5. P.J. van de Loo, B. Herrmann. How Reliable is Acoustic Emission (AE) Tank Testing? The Quantified Results of an AE Usergroup Correlation Study! / NDT.net, 1999, Vol.4 No.2.
6. S. Yuyama, M. Yamada, K. Sekine, S. Kitsukawa. High Pressure Institute of Japan Recommended Practice for Acoustic Emission Testing for Corrosion in the Bottom Plate of Aboveground Tanks. / Materials Evaluation, 2007, pp. 888-892.
7. Медведева М.Л. Отчет о НИР по теме: «Исследование влияния агрессивности коррозионной среды на параметры сигналов акустической эмиссии» – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2012. – 23 с.
8. Харебов В.Г., Попков Ю.С. Автоматизированные системы комплексного коррозионного мониторинга и перспективы применения метода акустической эмиссии в их составе // В мире неразрушающего контроля. – 2008. – № 3. – С. 14-17.

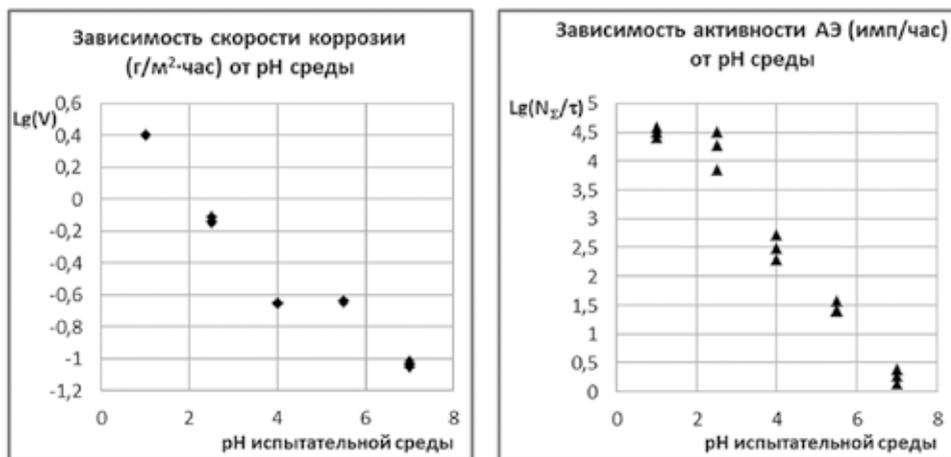


Рис. 1. Скорость коррозии стали 20 и активность АЭ в средах с pH = 1÷7 [7]

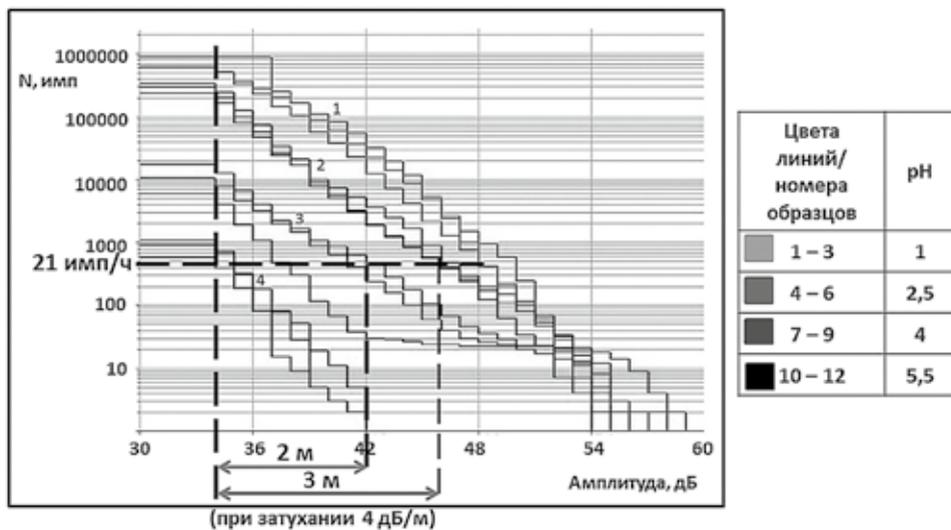


Рис. 2. Кумулятивные распределения амплитуд импульсов за 24 часа экспозиции образцов в испытательной среде

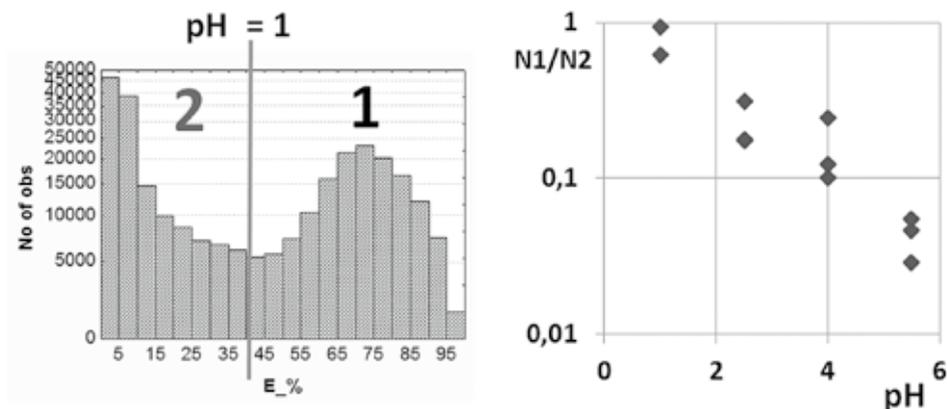
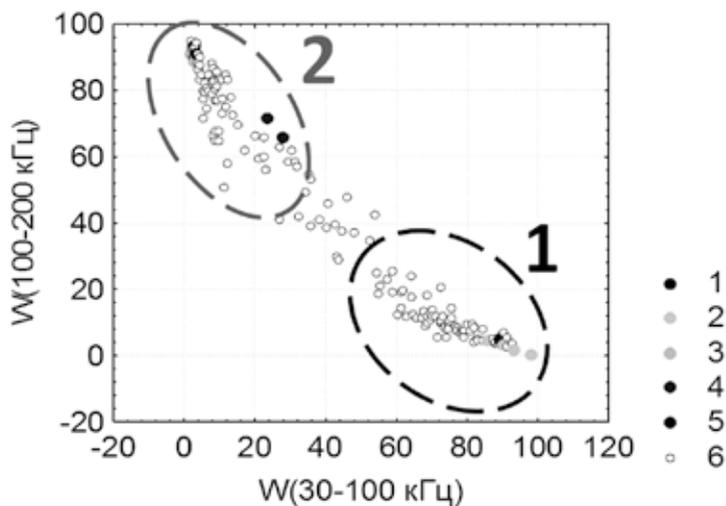


Рис. 3. Изменение спектрального состава АЭ с ростом pH-среды (x – доля энергии в интервале частот 30-100 кГц; y – число импульсов)

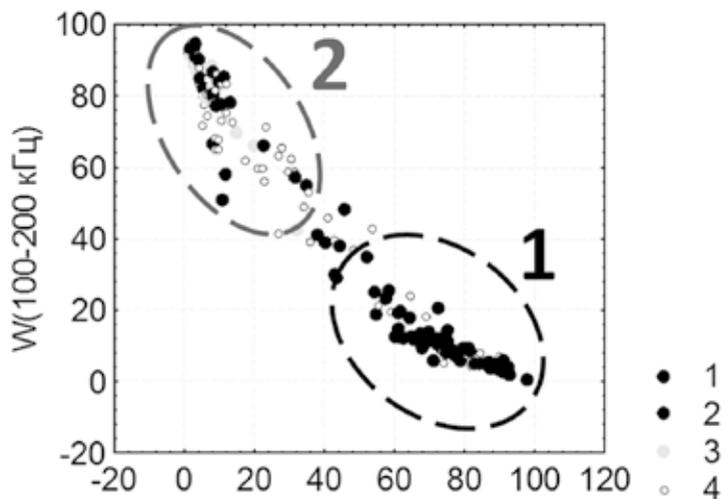


Рис. 4. Распределение спектральной энергии АЭ в зависимости от природы действующих источников (x – доля энергии в заданном интервале частот; y – число импульсов)



- кружками выделены спектральные группы импульсов;
- цветные кружки 1-5 – кластеры; 6 – некластеризованные импульсы.

Рис. 5. Кластеры осциллограмм при пороге - 0,8 и минимальном числе осциллограмм в кластере – 2.
Язвенная коррозия в слабощелочном растворе гидроксида натрия



- кружками выделены спектральные группы импульсов;
- цветные кружки 1-5 – кластеры; 6 – некластеризованные импульсы.

Рис. 6. Кластеры осциллограмм при пороге - 0,35 и минимальном числе осциллограмм в кластере – 10.
Язвенная коррозия в слабощелочном растворе гидроксида натрия

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫХ СОСТОЯНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ХРУПКИХ ПОКРЫТИЙ И АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Н.А. Махутов, А.В. Фомин, В.И. Иванов, И.Е. Васильев, ИМАШ РАН, В.Н. Пермяков, ТюмГНГУ

Раннее предупреждение близости объекта к предельному состоянию является весьма актуальной задачей предотвращения аварий. Для оценки близости промышленных объектов к предельному состоянию используют различные методы технической диагностики и неразрушающего контроля: тензометрический, визуальный, ультразвуковой, радиационный, магнитный и другие виды [1]. Наиболее перспективными являются метод акустической эмиссии [2] и метод хрупких покрытий [3]. В процессе испытания и эксплуатации диагностируемых объектов эти методы позволяют получать интегральную картину напряженно-деформированного состояния в зоне исследования, своевременно обнаруживать зарождение повреждения и его развитие, определять пространственные координаты очагов разрушения, устанавливать их характер и степень опасности.

Однако применение существующих методов неразрушающего контроля (НК) за состоянием диагностируемых объектов не всегда обеспечивает в полной мере предупреждение и предотвращение развития опасных состояний. Наиболее целесообразно проводить мониторинг (непрерывный или периодический контроль), сочетая различные методы диагностики. Это обусловлено необходимостью, во-первых, учитывать факторы, влияющие на повреждаемость конструкций, а во-вторых, повышать вероятность выявления возникновения и развития потенциально опасных и сложно идентифицируемых дефектов с применением других методов контроля.

Совместное использование нескольких методов диагностики, наряду с повышением вероятности обнаружения мест повреждения объектов, позволит более достоверно определять напряженно-деформированное состояние элементов объектов, регистрировать смещения и нарастание деформаций в несущих элементах конструкции, оценивать их текущее состояние и выделять зоны, наиболее подверженные опасности разрушения. При этом главным условием обеспечения безопасной эксплуатации объектов является постоянный мониторинг за процессом накопления повреждений, образования и развития трещин в высоконагруженных и высокорисковых зонах конструкций.

Среди интегральных методов диагностики на практике весьма большое распространение получил акустико-эмиссионный метод [2]. Однако при всех достоинствах метода АЭ существуют ограничения, одним из которых является отсутствие полезных сигналов АЭ в области упругой деформации материала объекта. Проблемы, связанные с выделением сигналов АЭ из шумов, являются предметом других исследований.

В области упругого деформирования материала невозможна оценка напряженно-деформированного состояния диагностируемых конструкций, поскольку сигналы АЭ излучаются преимущественно при перестройке структуры. Сигналы АЭ излучаются в моменты перестройки структуры материала: при пластическом деформировании, образовании микротрещин, их слиянии и развитии магистральной трещины, что в ряде случаев является недопустимым (например, для конструкций из хрупких и квазихрупких материалов). На рис. 1 представлена диаграмма нагружения образца на растяжение из алюминиевого сплава, которая содержит два выраженных участка: упругого деформирования (удлинение 0-3 мм) и пластического деформирования (удлинение, превышающее 3 мм).

Весьма эффективным средством контроля, позволяющим выявлять дефекты и оценивать прочность конструкций, являются хрупкие покрытия [3-4], представляющие возможность определять уровень напряжений и деформаций как в области пластической деформации, так и при упругой деформации (область удлинения 0-3 мм на рис. 1). Тензопокртия позволяют произвести количественную оценку коэффициентов концентрации напряжений, определить места наиболее вероятного разрушения и скорость роста трещин.

Контроль состояния хрупких тензопокртий и фиксацию образовавшихся трещин

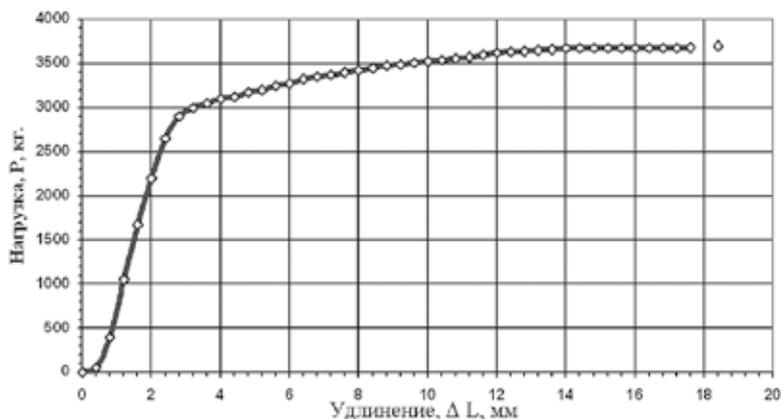


Рис. 1. Диаграмма нагружения гладкого образца на растяжение

выполняют визуально, используя для этого направленный свет. Однако визуальное наблюдение за образованием и распространением трещин в тензопокртии весьма неудобно на практике. Это в значительной степени препятствует широкому распространению метода в качестве средства диагностики и НК при исследовании распределения полей деформаций и выявлении скрытых дефектов в производственных конструкциях. Лучшие результаты дает совместное использование методов АЭ и хрупких покрытий [5].

В описываемых испытаниях использовался оксидный тензоиндикатор (рис. 2), представляющий собой алюминиевую фольгу толщиной порядка 100 мкм, электрохимиче-

ски анодированную с одной стороны (для получения прозрачной хрупкой оксидной пленки толщиной 10–40 мкм) и наклеенную на исследуемый элемент конструкции – образец из алюминиевого сплава [6].

При возникновении в подложке алюминиевой фольги деформаций ϵ_1 , превышающих величину пороговой деформации ϵ_0 в оксидной пленке тензоиндикатора образуются трещины, отражающие силовое поле наибольших напряжений (деформаций) на поверхности конструкции.

Используя тарировочные характеристики тензоиндикаторов (σ_σ , ϵ_σ) и график изменения численности трещин в оксидной пленке (N) от уровня деформаций в подложке (рис. 3), можно с погрешностью, не большей 15 %, произвести оценку значений наибольших деформаций (напряжений) на поверхности конструкции.

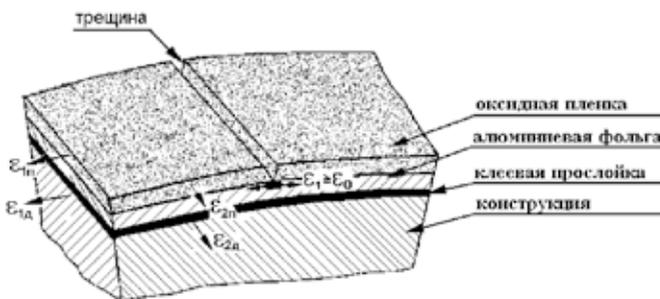


Рис. 2. Схема оксидного тензоиндикатора

Оксидные тензоиндикаторы могут быть использованы для проведения исследований как в области пластических деформаций (в интервале значений от 0,05 до 7 %), так и упругих. Они имеют широкий температурный диапазон от -200 °С до +200 °С, а при температурах от -50 °С до +50 °С обладают постоянными характеристиками, работают в воде, масле и их парах, в течение длительного времени сохраняют характеристики стабильными (не менее 5 лет).

Разрушение хрупкого аморфного слоя окисной пленки (образование трещины) сопровождается звуковым импульсом. Высвобождаемая в процессе трещинообразования энергия упругой деформации генерирует волны акустической эмиссии. Длительность отдельных импульсов изменяется от единиц микросекунд до миллисекунд, а энергия достигает 10^{-5} Дж. Импульс, распространяясь от источника к приемнику АЭ, претерпевает существенное искажение вследствие многократных отражений, дисперсии скорости и затухания звука.

В экспериментах использовалась многоканальная многопараметрическая акустико-эмиссионная система А-Line 32D и акустико-эмиссионные преобразователи (ПАЭ) G-200 с резонансной частотой 150 кГц. Предварительные усилители имели полосу пропускания 30-500 кГц, коэффициент усиления 26 дБ.

Оксидные тензоиндикаторы изготовлены из алюминиевой фольги А7 толщиной 200 мкм, которая наклеивалась на поверхность образца с применением эпоксидного

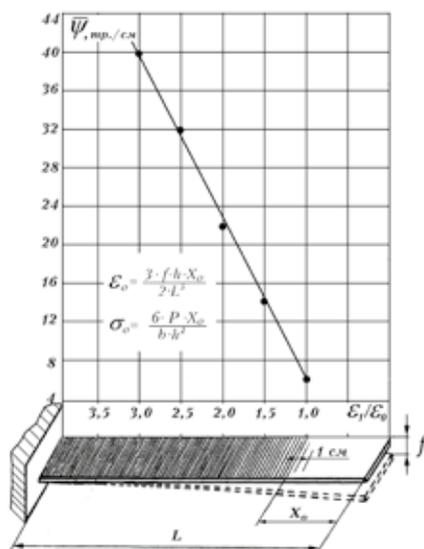


Рис. 3. Определение характеристик тензочувствительности тензоиндикаторов на тарировочных балках: ϵ_0 – величина пороговой деформации; σ_0 – величина порогового напряжения; Ψ – средняя численность трещин на базе 1 см

клея. Образцы были в виде плоских пластин толщиной 2 мм из высокопрочного алюминиевого сплава В95.

Ниже приведены результаты испытаний образцов с тензоиндикаторами, имеющими величину пороговой деформации 1000 и 1500 мкм/м. Толщина оксидных пленок этих тензоиндикаторов составляла 28 и 22 мкм соответственно. Электрохимическое анодирование алюминиевой фольги проводилось в 20-процентном водном растворе серной кислоты. Длительность процесса электрохимического анодирования варьировалась от 30 до 60 минут, плотность тока от 4 до 8 А/дм², температура электролита от 0 до 30 °С. Такой способ получения тензоиндикаторов позволял регулировать их чувствительность от предельно низких значений $\epsilon_0=400$ 500 мкм/м до максимально высоких значений $\epsilon_0=2000$ 2500 мкм/м (для оксидных пленок, получаемых в сернокислотном электролите).

На рис. 4 приведены эскиз образца (Рис. 4а), его сечение (Рис. 4б), схема образования трещины в покрытии (Рис. 4в), а также показаны места установки оксидного тензоиндикатора и преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ) G 200, используемых для регистрации сигналов АЭ при испытаниях. Нагружение образцов при испытаниях производилось на электрогидравлической установке МТС, позволяющей создавать усилие на разрыв до 500 кН и проводить испытания как в ручном, так и автоматическом режиме нагружения.

Параметры АЭ-сигналов зависят от характеристик тензоиндикатора (толщины

хрупкого слоя, длины скачка трещин, скорости звука в материале покрытия), а также скорости нагружения, т.е. скорости превышения пороговой деформации (ϵ_0) при нагружении: $d(\epsilon_i/\epsilon_0)/d\tau$, при которой в тензоиндикаторе происходит образование трещин нормального отрыва.

Собственные шумы электрического тракта АЭ-системы А-Line 32D, включающего ПАЭ, предусилитель, блок сбора и предварительной обработки информации, составляли 32 дБ. Для отстройки от акустических шумов испытательного стенда (вибрации, шумов электрогидравлического привода, проскальзывания образца в захватах) порог дискриминации был повышен до 40 дБ. Скорость ультразвуковых волн для лоцирования источников АЭ определялась перед испытаниями на образцах с тензоиндикатором

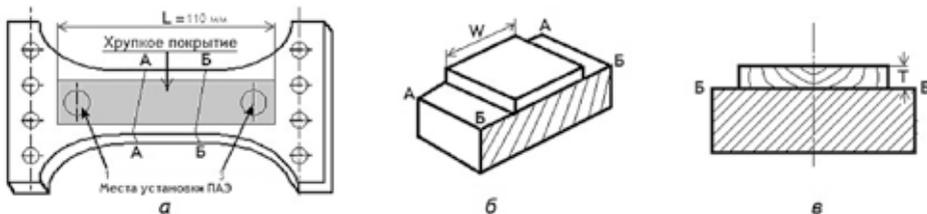


Рис. 4. Эскиз образца с указанием хрупкого покрытия (тензоиндикатора) и ПАЭ

ми и составляла 2800 м/с.

На рис. 5 представлены записи калибровочных импульсов, используемых для установки параметров АЭ-системы, и соответствующие им спектры импульсов. Использовались источник Су (излом графитового стержня карандаша) и АЭ-калибратор, представляющий собой преобразователь АЭ, излучающий импульсный сигнал.

На рис. 6 показаны импульсные сигналы АЭ, зарегистрированные при образовании трещин в оксидном покрытии. Каждый радиоимпульс АЭ соответствует образованию трещины в тензоиндикаторе. Идентификация источников АЭ осуществлялась посредством выбора частотного диапазона (спектральная фильтрация), выбором порога регистрации сигналов (амплитудная фильтрация), регистрацией сигналов от источников АЭ, располагающихся между ПАЭ (пространственная фильтрация) и индикаций источников по АЭ-импульсам, амплитуда и длительность которых расположены вблизи кривой, соответствующей истинным сигналам АЭ (параметрическая фильтрация – критерий Капистрано).

Для проведения испытаний образца на разрыв в режиме постоянно повышающейся нагрузки был использован тензоиндикатор с величиной пороговой деформации $\epsilon_0 = 1500$ мкм/м и толщиной оксидной пленки порядка 22 мкм. Нагрузка повышалась в ручном режиме. При этом в контрольных точках фиксировалось время и уровень растягивающего усилия. Результаты испытаний образца на разрушение в условиях постоянной возрастающей нагрузки представлены на рис. 6. Следует отметить два этапа равномерного нагружения с разными скоростями (от 0 до 100 с и от 100 с до 450 с).

Регистрация трещин в тензоиндикаторах осуществлялась по сигналам АЭ. Пер-

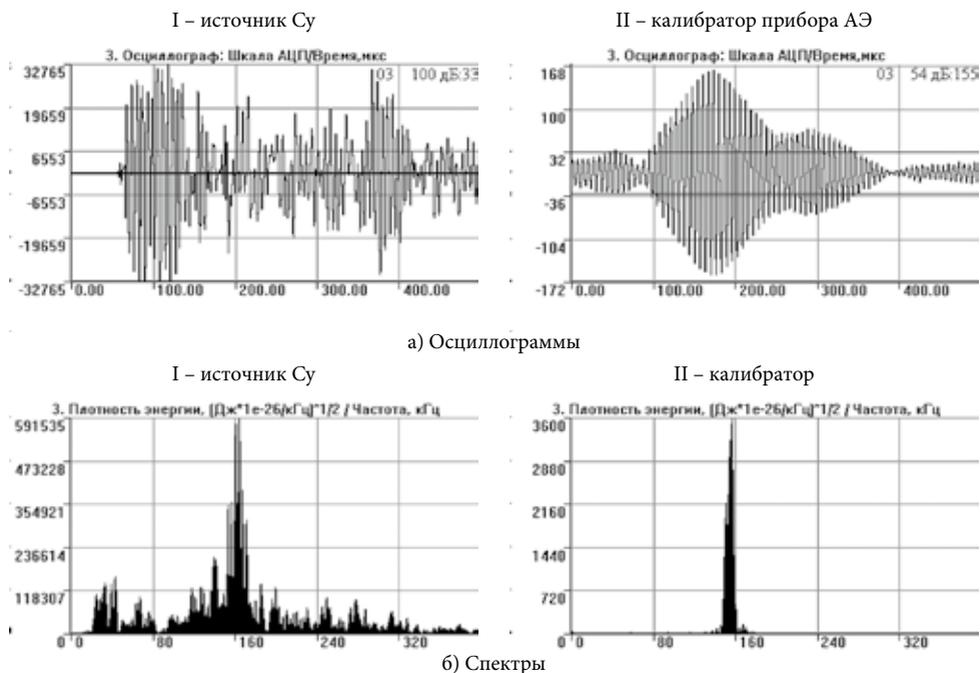


Рис. 5. Калибровка АЭ-каналов на испытательном образце:

а) формы калибровочных импульсов на выходе ПАЭ, б) спектры соответствующих импульсов

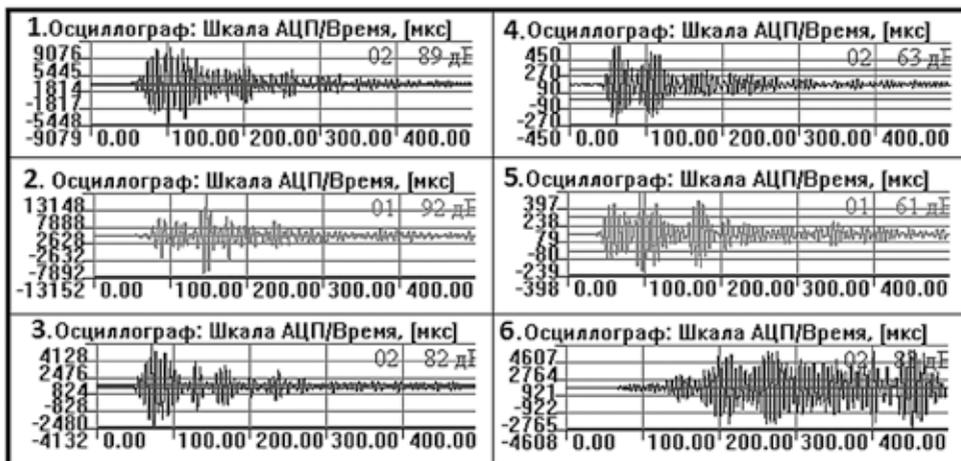


Рис. 6. Сигналы АЭ при разрушении хрупкого покрытия

вые лоцируемые сигналы образования трещин в оксидной пленке тензоиндикатора были зарегистрированы при $P = 8$ кН (рис. 6). Величина порогового напряжения и пороговой деформации тензоиндикатора, определенная в зоне действия максимальных напряжений, где $F = 80$ мм², составляла: $\sigma_0 = P/F = 100$ МПа, $\varepsilon_0 = \sigma_0/E = 1430$ мкм/м, т.е. тензочувствительность оксидной пленки была несколько ниже прогнозируемой (1500 мкм/м).

Сигналы АЭ регистрировались уже в начале нагружения образца при $P = 8$ кН, и ак-

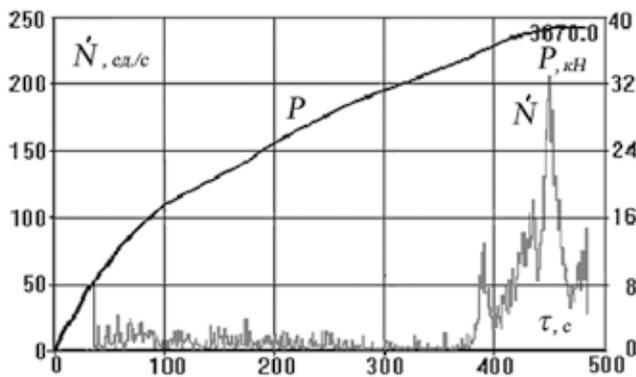


Рис. 7. Графики зависимости активности АЭ (\dot{N}) и растягивающего усилия (P) от времени (τ) при возрастании нагрузки на образец с оксидным тензоиндикатором

тивность постепенно возрастала с ростом нагрузки примерно до $P = 34,5$ кН, соответствующей переходу материала образца в область пластической деформации. Затем активность сигналов АЭ резко повышалась и достигала своего максимума при $P = 38,2$ кН, после чего активность АЭ заметно снижалась и вновь возрастала перед разрушением образца. Амплитуда сигналов АЭ достигала 90 дБ уже при $P = 8$ кН и повышалась до 95 дБ при $P = 34,5$ кН.

С ростом активности сигналов АЭ значения амплитуды и энергии сигналов заметно падают до 60 и 105 дБ соответственно. Перед разрушением образца амплитуда АЭ-сигналов не превышает 60 дБ, а энергия – 90 дБ. Локация источников АЭ показала их концентрацию в центре образца. Общее число локализованных источников АЭ превышало 9000. До уровня нагрузки $P = 34,5$ кН, соответствующей началу структурных изменений материала (переходу в пластическое состояние), источники АЭ были распределены равномерно по длине образца. При большей нагрузке источники АЭ, связанные с пластическим деформированием, концентрировались ближе к центру.

Анализ сигналов АЭ показал, что образование трещин в оксидной пленке тензоиндикатора происходило вплоть до разрушения подложки. Численность трещин в тензоиндикаторе в зоне разрушения превышала 300 тр./см, т.е. расстояние между трещинами было сопоставимо с толщиной покрытия ($\delta \approx 22$ мкм).

Следует отметить, что в месте разрушения образца отслаивания клея от тензоиндикатора и подложки не наблюдалось, тогда как на образце, подверженном цикли-

ческому нагружению, зона отслаивания достигала 4 см². Такой характер разрушения обусловлен, очевидно, более низким уровнем максимальных пластических деформаций, а также тем, что эпоксидный клей обладает значительно меньшим сопротивлением к циклической нагрузке.

На рис. 7 приведены графики изменения активности АЭ (\dot{N}) и нагрузки (P) от времени (τ) для образца с оксидным тензоиндикатором при циклическом нагружении. Уровень максимальной нагрузки на каждом последующем цикле нагружения постоянно возрастал, достигая при разрушении 43,5 кН. Регистрация сигналов АЭ отмечалась уже на первом цикле при $P = 5,8$ кН (в области упругих деформаций), а наибольшая активность АЭ имела место на шестом и седьмом циклах нагружения при повышении нагрузки до 40 и 42,5 кН соответственно.

На предпоследнем цикле нагружения сигналы АЭ регистрировались уже после выхода на максимальный уровень при $P = 42,5$ кН, что свидетельствовало о наступлении ползучести материала, когда рост пластических деформаций происходил без увеличения нагрузки. В последнем цикле нагружения АЭ наблюдалась уже при малых значениях нагрузки и активность постоянно возрастала вплоть до момента разрушения.

Максимальные значения амплитуды и энергии сигналов АЭ, достигающие 90-95 дБ и 130 дБ соответственно, регистрировались уже на первых циклах нагружения при повышении нагрузки от 15 до 30 кН. На последних циклах, несмотря на резкое повыше-

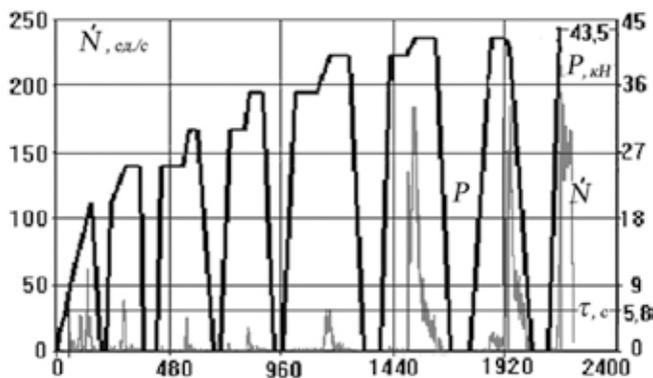


Рис. 8. Графики активности АЭ (\dot{N}) и уровня нагрузки (P) от времени (τ) в процессе циклического нагружения образца с оксидным тензоиндикатором

ние активности АЭ, амплитуда и энергия сигналов заметно падает (до 50 и 80 дБ соответственно). В момент разрушения амплитуда и энергия сигналов АЭ составляют 50 и 90 дБ соответственно. Локация источников АЭ показала их концентрацию в центре образца. Общее число лоцированных источников АЭ достигало 15 тыс.

Анализ сигналов АЭ и визуальное наблюдение показали, что образование трещин в оксидной пленке происходило на всех циклах нагружения вплоть до разрушения образца. В трех последних циклах нагружения при нагрузке свыше 40 кН наблюдалось резкое повышение активности АЭ (рис. 7). Это было связано не с тре-

щинообразованием в оксидной пленке, а с пластической деформацией образца. С ростом нагрузки активность АЭ возрастала по мере расширения пластической области и процессов разрушения образца. Чувствительность оксидного тензоиндикатора, определенная по экспериментальным данным: $P=5,8$ кН, $F=80$ мм², $\sigma_0 = P/F = 72$ МПа, $\epsilon_0 = \sigma_0/E = 1030$ мкм/м, была близка к прогнозируемой (1000 мкм/м).

В тензоиндикаторе при нагружении фиксируется визуально множество трещин (рис. 8). Уровень максимальных деформаций при разрушении образца практически в семьдесят раз превышал пороговое значение тензоиндикатора $\epsilon_0 = 1030$ мкм/м, а численность трещин в тензоиндикаторе в этой зоне достигала 300 тр./см, т.е. расстояние между трещинами было сопоставимо с толщиной покрытия ($\delta \approx 28$ мкм).

По результатам экспериментальных исследований, проведенных при испытаниях тензоиндикаторов, нанесенных на образцы из алюминиевого сплава В95 в условиях непрерывного и циклического нагружения, могут быть сделаны следующие выводы.

1. Хрупкие оксидные тензоиндикаторы пригодны для контроля напряженно-деформированного состояния в основном металле, начиная с упругих деформаций порядка 0,05% и до уровня значительных пластических деформаций 5–7%, при которых наблюдалось разрушение образцов. Количество трещин в тензоиндикаторах постоянно возрастало по мере увеличения нагрузки, достигая в зоне разрушения $\Psi = 300\text{--}400$ тр./см, т.е. расстояние между трещинами было



Рис. 9. Картина трещин в тензоиндикаторе после разрушения образца

сопоставимо с толщиной хрупкой оксидной пленки: $\delta = 20\text{--}30$ мкм. При этом уровень растягивающих деформаций мог практически в 50–70 раз превышать величину пороговой деформации тензопокртия.

Отслаивание тензоиндикатора от подложки наблюдалось лишь в зоне разрушения образца. Причем это происходило лишь в том случае, когда уровень пластических деформаций был выше 7%, а испытания проводились в условиях циклического нагружения.

2. Использование приборов АЭ для оценки состояния хрупких тензоиндикаторов и материала подложки при испытаниях образцов на разрыв позволило с

высокой степенью надежности контролировать весь процесс нагружения образцов, начиная от упругих деформаций порядка 0,05% – образования первых трещин в тензоиндикаторах, и до значительных пластических деформаций: 5-7%, при которых происходило их разрушение.

3. Сигналы АЭ, связанные с образованием трещин в тензоиндикаторах и возникшие при структурных изменениях и разрушении материала подложки, достаточно хорошо различаются по амплитуде, энергии и уровню активности АЭ.
4. Предложенный комплексный метод диагностики, наряду с повышением вероятности обнаружения мест накопления повреждений, позволяет с высокой степенью надежности контролировать напряженно-деформированное состояние в опасных зонах диагностируемого объекта, сигнализируя о возникновении потенциальных угроз (по скорости и уровню роста упругих деформаций) задолго до возникновения необратимых структурных изменений в материале конструкции.

Библиографический список

1. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник / Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Ковалев А.В. и др. / под ред. В.В. Клюева. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.
2. Иванов В.И., Власов И.Э. Метод акустической эмиссии. Неразрушающий контроль: Справочник; В 7 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. т. 7. кн. 1. – М.: Машиностроение. 2005. – 340 с.
3. Пригоровский Н.И., Панских В.К. Метод хрупких тензочувствительных покрытий. – М.: Наука, 1978. – 183 с.
4. Махутов Н.А., Ушаков Б.Н., Васильев И.Е. Применение хрупких тензочувствительных покрытий для оценки прочности и выявления дефектов в сварных швах трубопроводов // Вестник машиностроения. – 2011. – № 2. – С. 44-48.
5. Махутов Н.А., Васильев И.Е., Богуславский А.А., Васильев А.И. Автоматизация процесса регистрации трещин в хрупких тензочувствительных покрытиях // Заводская лаборатория. – 2010. – № 11. – С. 45-50.
6. Патент № 2403564 РФ: МПК G 01N 29/14. Устройство для диагностики предельного состояния и раннего предупреждения об опасности разрушения материалов и изделий / Васильев И.Е., Иванов В.И., Махутов Н.А., Ушаков Б.Н.; заявитель и патентообладатель Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, № 2009100183/28, заяв. 11.01.2009, опубли. 10.11.2010 Бюл. № 31.

ИССЛЕДОВАНИЕ АЭ-СИГНАЛОВ КОРРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

*В.Н. Костюков, А.П. Науменко, С.Н. Бойченко, Ал.В. Костюков,
Научно-производственный центр «Динамика», г. Омск*

Проблема обеспечения безопасной эксплуатации и эффективности работы сложных технических систем и оборудования опасных производственных объектов приобретает в настоящее время особое значение [1-4].

Целью работы является исследование сигналов акустической эмиссии (АЭ), возникающих в результате имитации и роста локального коррозионного дефекта [3, 4] на образце стали в лабораторных условиях. Полученные закономерности могут послужить основой для создания критерия оценки степени опасности коррозионных повреждений на объектах различного назначения.

Исследование коррозионных процессов занимает много времени, поскольку такие процессы являются медленнопротекающими, при этом в реальных условиях коррозионные процессы могут развиваться в течение от нескольких месяцев до нескольких лет. Для ускорения исследований влияния различных факторов на параметры процесса коррозии используют повышенные концентрации агрессивной среды и температуры, наложение поляризирующего напряжения и другие факторы.

Для исследования химической коррозии с помощью метода акустической эмиссии использовался стержень, изготовленный из стали Ст3, длиной 500 мм, наружным диаметром 50 мм. В нем просверливалось 6 отверстий, с последующим заливанием в него раствора. Для инициирования процесса коррозии проводилось два эксперимента с разной концентрацией веществ. В первом случае был выбран 50-процентный раствор азотной кислоты, а во втором случае был взят 20-процентный раствор.

В процессе роста дефекта было обнаружено, что коррозионный процесс на поверхности образца протекал неодинаково: в первом опыте процесс быстро прекратился, а во втором – процесс длился несколько суток. Испытания проводились при нормальных условиях. Для получения экспериментальных данных было использовано штатное оборудование подсистемы акустико-эмиссионных измерений стационарной системы КОМПАКС. Система при этом работала в режиме регистрации сигналов АЭ. Внешний вид экспериментальной установки приведен на рис. 1.

В процессе проведения эксперимента получены такие данные, как суммарное число АЭ-импульсов по всем каналам (рис. 2), распределение амплитуды импульсов АЭ со всех каналов за время испытаний (рис. 3), распределение длительности импульсов АЭ со всех каналов за время испытаний (рис. 4), зависимость длительности импульсов АЭ от амплитуды (рис. 5), распределение энергии импульсов АЭ со всех каналов за время испытаний и другие зависимости и взаимозависимости.

С целью выявления закономерностей соответствия характеристик АЭ-сигналов особенностям их возникновения в процессе корродирования металлов проведена статистическая обработка данных.

В основе статистической обработки данных [5, 6] лежит группирование результатов наблюдений по интервалам: определение размаха изменений параметра x ; выбор количества интервалов и их величины; подсчет для каждого i -го интервала $[x_i - x_{i+1}]$ частоты n_i или относительной частоты (частотности v_i) попадания вариантов в интервал. В результате формируется представление экспериментальных данных в виде интервального или статистического ряда. По рассчитанным данным строится гистограмма параметра, а затем производится расчет описательной статистики исходных данных.

В результате получены следующие данные:

1. Гистограмма амплитуд АЭ-сигналов, полученных по всем каналам, в диапазоне (44...74) дБ с интервалом 3 дБ. С помощью стандартных средств Excel проведен расчет описательной статистики данных, из которой следует, что среднее значение амплитуд составляет $(47,9 \pm 2,6)$ дБ (рис. 6).
2. С целью уточнения среднего значения для диапазона амплитуд АЭ-сигналов (44...56) дБ произведен расчет статистики с интервалом 1 дБ, среднее значение и стандартное отклонение амплитуд составляют $(47,5 \pm 2,6)$ дБ.
3. В диапазоне (44...49) дБ с шагом 0,5 дБ, среднее значение и стандартное отклонение составляют $(46,5 \pm 1,4)$ дБ.
4. Произведен расчет по длительности, выраженный гистограммой импульсов АЭ-сигналов по всем каналам, в диапазоне (2...2882) мкс (рис. 7), среднее значение и стандартное отклонение составляют $(250,5 \pm 50,3)$ мкс.
5. Получена статистика и гистограмма энергии по всем каналам, среднее значение и стандартное отклонение составляют $(29744,6 \pm 10563,4)$ мкВ \times мкс.

Зависимость длительности от амплитуды по всем каналам (рис. 5) показывает, что имеются два локальных максимума распределений сигналов по длительности с примерно одинаковой амплитудой. Одна область более короткая до 50 мкс, вторая иначе более длинная от 100 мкс до 104 мкс. Отсюда следует, что коррозионный процесс протекает двумя путями.

Рассмотрим полученные данные по первой группе сигналов (до 50 мкс).

На рис. 8 изображена гистограмма амплитуд по первой группе сигналов (до 50 мкс) в диапазоне (44...74) дБ с шагом 2 дБ. Для нее рассчитана описательная статистика, из которой следует, что среднее значение и стандартное отклонение составляют $(48,6 \pm 2,3)$ дБ.

С целью уточнения среднего значения для диапазона амплитуд АЭ-сигналов построены гистограммы с разными интервалами: в диапазоне (44...56) дБ с шагом 1 дБ (рис. 9) среднее значение и стандартное отклонение составляют $(45,3 \pm 2,4)$ дБ; в диапазоне интервалов (44...48,5) дБ с шагом 0,5 дБ среднее значение и стандартное отклонение составляют $(44,4 \pm 1,4)$ дБ.

Расчет статистики для длительностей в диапазоне интервалов (2...58) мкс (рис. 10) показал, что среднее значение и стандартное отклонение составляют $(4,9 \pm 2,1)$ мкс.

Для длительностей АЭ-сигналов в диапазоне (2...16) мкс среднее значение и стандартное отклонение составляют $(2,7 \pm 1,5)$ мкс.

Рассмотрим полученные данные по второй группе сигналов (от 100 мкс до 104 мкс).

С целью уточнения среднего значения диапазона амплитуд АЭ-сигналов (45...53) дБ произведена оценка с шагом 1 дБ. В этом случае среднее значение и стандартное отклонение составляют $(46,7 \pm 2,1)$ дБ.

Расчеты статистики длительностей АЭ-сигналов в диапазоне интервалов (100...3220) мкс показали, что оценки среднего значения и стандартного отклонения составляют $(600,8 \pm 232,4)$ мкс, а в диапазоне (100...1790) мкс (рис. 11) среднее значение и стандартное отклонение составляют $(435,7 \pm 215,4)$ мкс.

Таким образом, по совокупности всех данных можно констатировать, что при протекании коррозионных процессов генерируются АЭ-импульсы со следующими параметрами амплитуды импульсов – $(47,9 \pm 2,6)$ дБ; длительность импульсов – $(250,5 \pm 50,3)$ мкс; энергия импульсов – $(29744 \pm 10563,4)$ мкВ × мкс.

Уточненный анализ данных выявил, что АЭ-сигналы можно охарактеризовать двумя группами параметров:

- в пределах длительности АЭ-импульсов до 50 мкс оценка среднего значения амплитуд импульсов в диапазоне составляет $(44,4 \pm 1,4)$ дБ; оценка среднего значения длительности импульсов в диапазоне $(2...58)$ мкс – $(4,9 \pm 2,1)$ мкс; оценка среднего значения длительности импульсов в диапазоне $(2...16)$ мкс – $(2,7 \pm 1,5)$ мкс;
- в пределах длительности от 100 мкс до 104 мкс оценка среднего значения амплитуд импульсов составляет $(46,7 \pm 2,1)$ дБ; оценка среднего значения длительности импульсов в диапазоне $(100...1790)$ мкс – $(435,7 \pm 215,4)$ мкс.

В результате обработки данных получены параметры амплитуд и длительностей АЭ-сигналов, соответствующие коррозионным процессам, которые используются в системе комплексного мониторинга КОМПАКС® для классификации АЭ-процессов.

Библиографический список

1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 7: В 2 кн. Кн. 1: В.И. Иванов, И.Э. Власов. Метод акустической эмиссии. – М.: Машиностроение, 2005. – 829 с.
2. Иванов В.И. Оценка дополнительного времени эксплуатации объектов с применением акустико-эмиссионного контроля // Дефектоскопия. – 1982. – № 11. – С. 60-64.
3. Баранов В.М., Губина Т.В. Применение акустической эмиссии для исследования и контроля коррозионных процессов. – М.: МИФИ, 1990. – 72 с.
4. Акустико-эмиссионная диагностика коррозионных дефектов трубопроводов / А.Н. Кузьмин, А.В. Жуков, Н.Ф. Стюхин, В.Г. Харебов, В.Г. Аксельрод // ТехНАДЗОР. – 2007. – № 7.
5. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1991. – 304 с.
6. Науменко А.П. Методика статистического анализа диагностических признаков // Наука, образование, бизнес: докл. и тез. докл. регион. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию РТФ ОмГТУ. – Омск. – 2011. – С. 188-195.

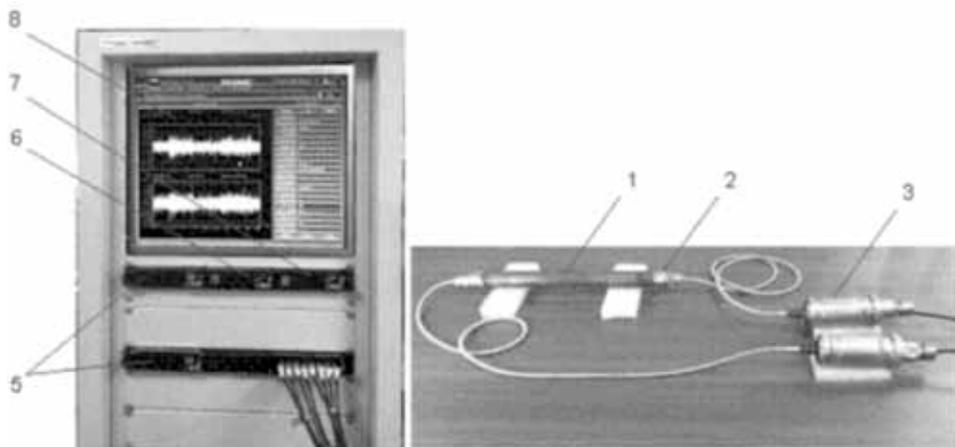


Рис. 1. Экспериментальная установка

- 1 – стальной стержень с 6 отверстиями; 2 – датчики АЭ; 3 – адаптеры 4106;
4 – модуль гальванической развязки 3234; 5 – модули питания 3622; 6 – модуль обработки АЭ-сигналов 3541; 7 – процессорный модуль 3003; 8 – дисплей

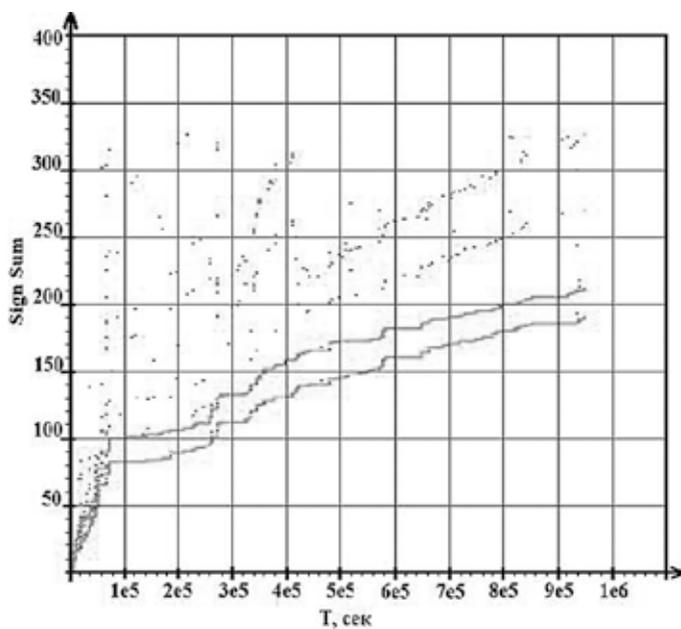


Рис. 2. Суммарное число АЭ-импульсов по всем каналам

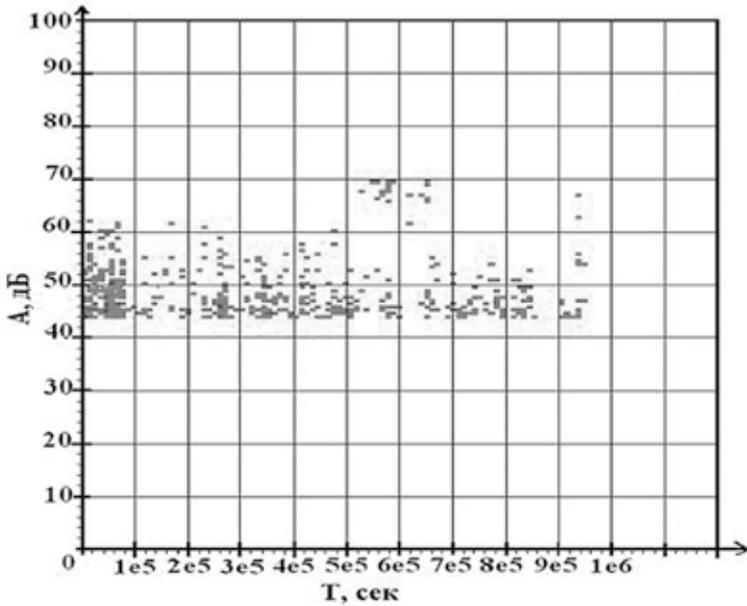


Рис. 3. Распределение амплитуды импульсов АЭ со всех каналов за время испытаний

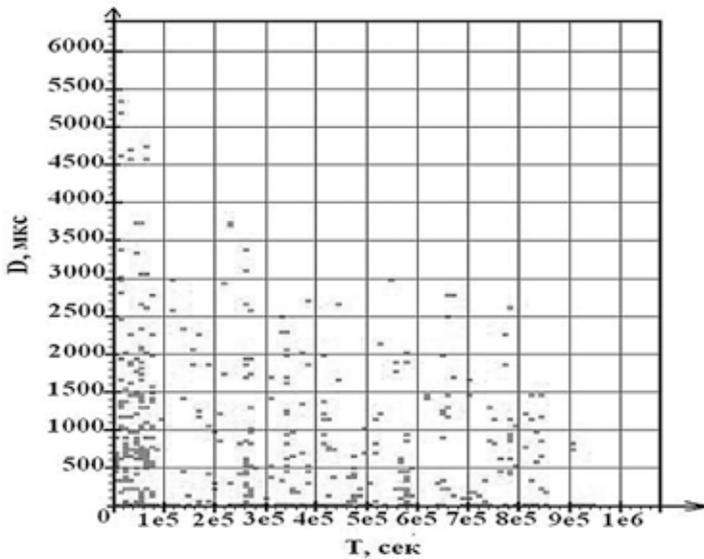


Рис. 4. Распределение длительности импульсов АЭ со всех каналов за время испытаний

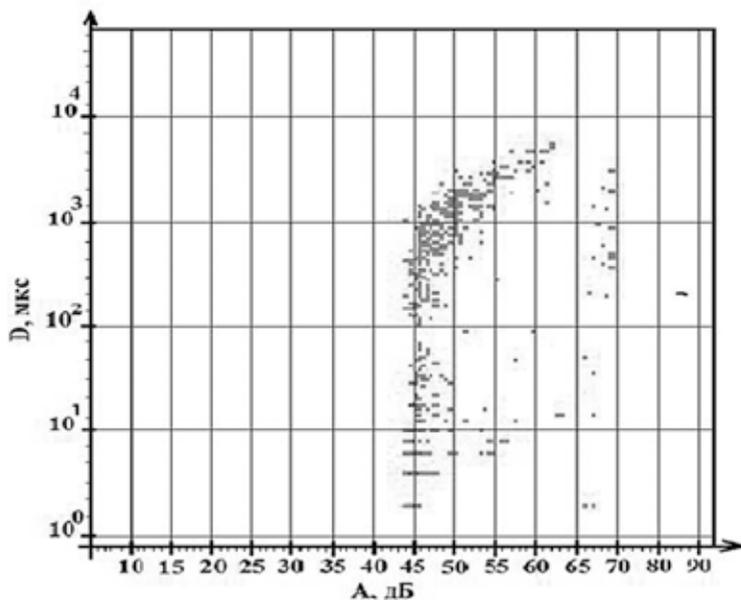


Рис. 5. Зависимость длительности импульсов АЭ от амплитуды

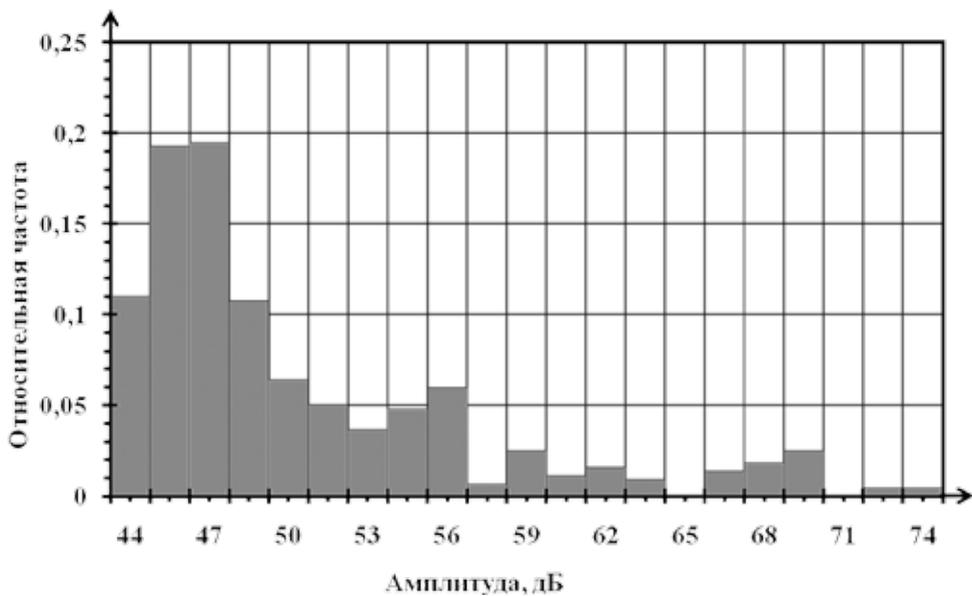


Рис. 6. Гистограмма амплитуд импульсов по всем каналам

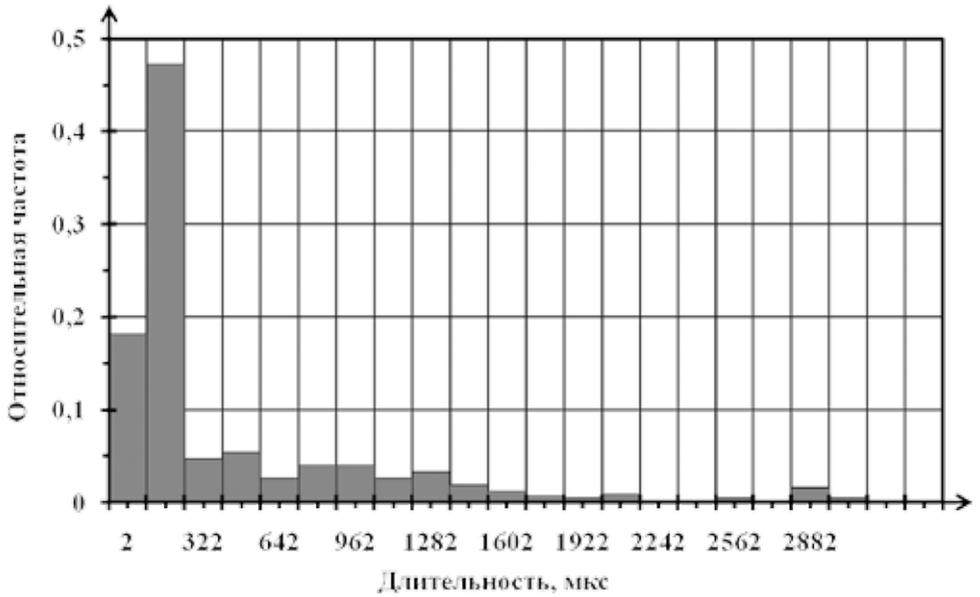


Рис. 7. Гистограмма длительности по всем каналам

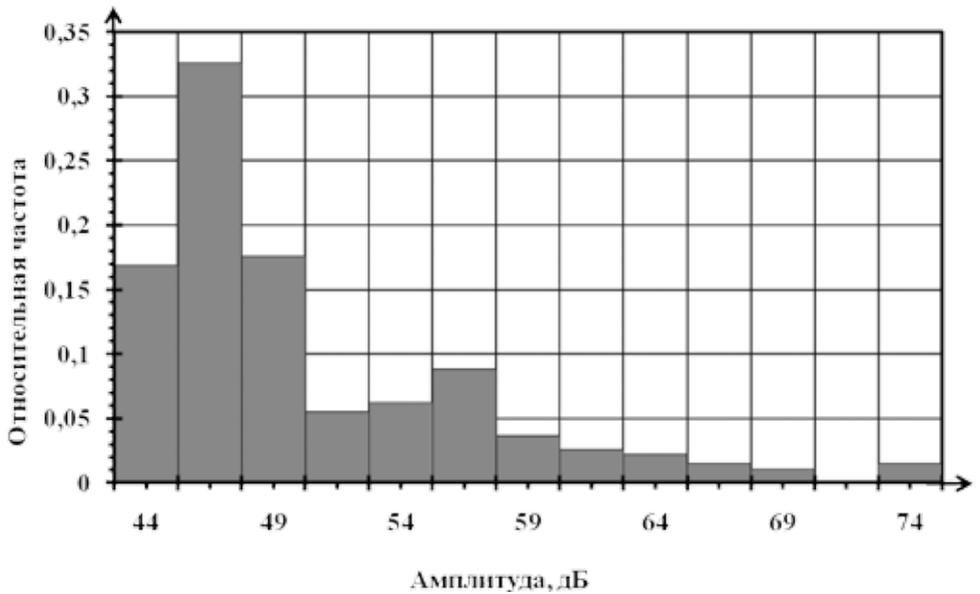


Рис. 8. Гистограмма амплитуд импульсов по первой группе сигналов

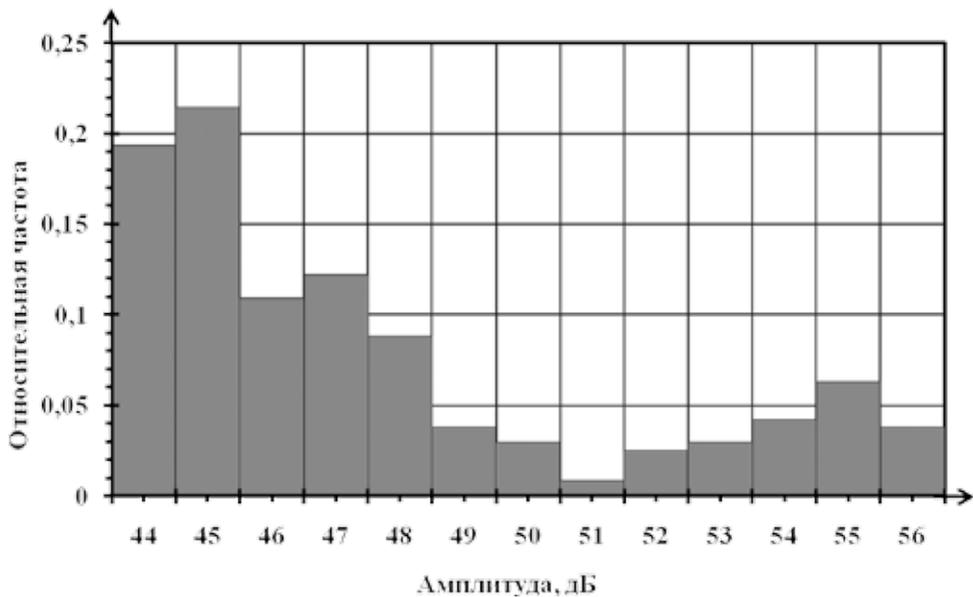


Рис. 9. Гистограмма амплитуды в диапазоне (44...56) дБ

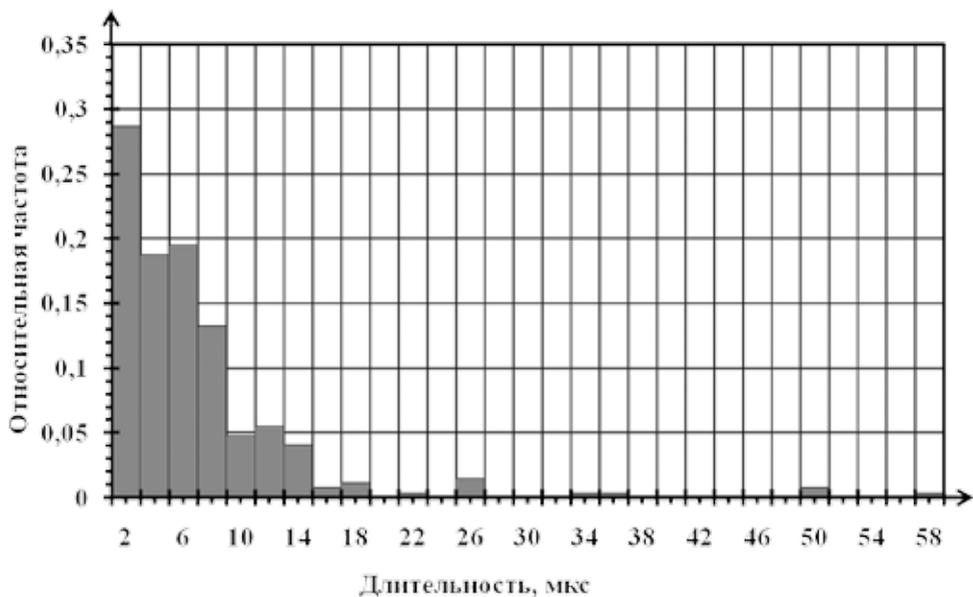


Рис. 10. Гистограмма длительности в диапазоне (2...58) мкс

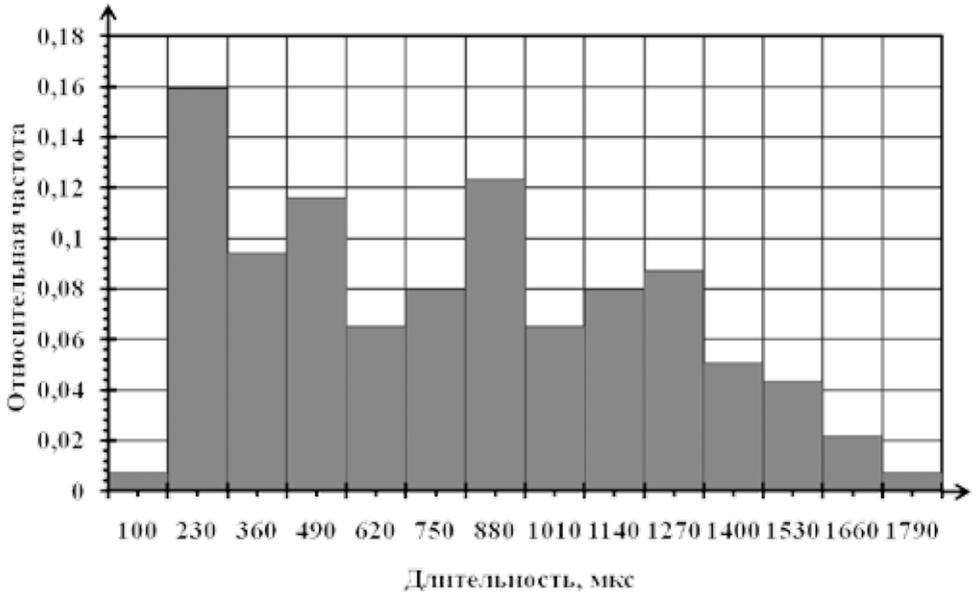


Рис. 11. Гистограмма длительности в диапазоне (100...1790) мкс

ГАРМОНИЗАЦИЯ РОССИЙСКИХ НОРМ И ПРАВИЛ В ОБЛАСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ С МЕЖДУНАРОДНЫМИ СТАНДАРТАМИ

В.И. Эльманович, ООО «ИНТЕРЮНИС»

В связи с вступлением России в ВТО актуальной задачей является гармонизация Российских технических норм и регламентов со стандартами США и Евросоюза.

Проведен сравнительный анализ требований Российских нормативных документов:

- ПБ 03-440-02 Правила аттестации персонала в области неразрушающего контроля.
- ПБ 03-593 Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов.
- ГОСТ 27655-88 Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения.
- ГОСТ Р 52727-2007 Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования.
- РД 03-299 Требования к акустико-эмиссионной аппаратуре, используемой для контроля опасных производственных объектов.
- РД 03-300 Требования к преобразователям акустической эмиссии, применяемым для контроля опасных производственных объектов.

Европейских норм:

- EN 473:2008. Non-destructive testing. Qualification and certification of NDT personnel. General principles.
- EN 1330-9. Non-destructive testing – Terminology – Part 9 : terms used in Acoustic Emission testing.
- EN 13477-1:2001. Non-destructive testing. Acoustic emission. Equipment characterization. Equipment description.
- EN 13477-2:2010. Non-destructive testing. Acoustic emission. Equipment characterisation. Verification of operating characteristic.
- EN 13554:2002. Non-destructive testing-Acoustic emission-General principles.
- EN 14584:2005. Non-destructive testing-Acoustic emission-Examination of metallic pressure equipment during proof testing-Planar location of AE sources.
- EN 15856:2010. Non-destructive testing-Acoustic emission-General principles of AE testing for the detection of corrosion within metallic surrounding filled with liquid.

Стандартов США:

- ASME Article 12, Subsection A, Section V, Boiler and Pressure Vessel Code-2010 Edition. «Acoustic Emission Examination of Metallic Vessels During Pressure Testing».
- ASTM E569 - 07 Standard Practice for Acoustic Emission Monitoring of Structures During Controlled Stimulation.
- ASTM E1139/E1139M-12 Standard Practice for Continuous Monitoring of Acoustic Emission from Metal Pressure Boundaries.

Рассмотрены пути приведения российских технологий акустико-эмиссионного контроля в соответствие с международными стандартами.

ТЕХНИЧЕСКИЙ АУДИТ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ГОТОВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ И НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ К ПЕРЕВОДУ НА УВЕЛИЧЕННЫЕ МЕЖРЕМОНТНЫЕ ПРОБЕГИ

В.И. Эльманович, В.С. Едигаров, Т.А. Сурина, ООО «ИНТЕРЮНИС»

1. Общие положения

В мировой нефтеперерабатывающей промышленности наблюдается устойчивая тенденция к увеличению межремонтных пробегов технологических установок. Эта тенденция обусловлена как экономической, так и технической целесообразностью. Увеличение межремонтных периодов уменьшает общие затраты предприятия (затраты на ремонт, диагностику и недополученную прибыль от простоя установок в ремонте).

При заниженных по сравнению с технически обоснованными межремонтными периодами частные ремонты превращаются в осмотры со вскрытием. Средства, уходящие на вскрытие сосудов и устранение мелких неполадок по дефектной ведомости (замена прокладок, шпилек и т.д.), ограничивают возможности делать капитальные вложения на обновление оборудования и их деталей, агрегатов. Частые ремонты не решают проблемы обеспечения надежности и безопасности, а высвободившиеся при увеличенных межремонтных периодах средства целесообразно потратить на диагностику и мониторинг в процессе эксплуатации (до 20-25% ремонтного фонда).

Актуальность перевода технологических установок нефтеперерабатывающих предприятий на работу с увеличенными межремонтными пробегами не вызывает сомнения. Однако опыт нефтеперерабатывающих предприятий США и Евросоюза не может быть использован непосредственно в виду отличия российских и зарубежных норм и правил на проектирование, изготовление и оценку технического состояния технологического оборудования, подхода к инспектированию и ремонту оборудования.

Высокая степень физического и морального износа технологического оборудования российских предприятий не позволяет осуществить переход на увеличенные межремонтные периоды волевым актом – изданием соответствующих приказов по предприятию и назначением лиц, ответственных за осуществление перехода на увеличенные межремонтные периоды.

Вопросы, связанные с переводом технологических установок предприятия на увеличенные межремонтные периоды, можно разбить на три группы:

- Группа 1. Технические вопросы.
- Группа 2. Нормативно-правовые вопросы.
- Группа 3. Организационные вопросы.

К вопросам группы 1 относится определение физической возможности пробега оборудования без недопустимого количества отказов и внеплановых остановок установок. Здесь же необходимо выявить оборудование, подлежащее первоочередной замене, поскольку без замены такого оборудования переход на систему комплексного ремонта с увеличенным межремонтным пробегом невозможен в принципе. В этом же круге вопросов находится контроль технического состояния оборудования в процессе его эксплуатации и своевременное устранение неполадок, внедрение системы устранения пропусков без остановок технологического процесса, остановки для восстановления (замены) катализатора и т.д.

К вопросам группы 2 относится «вписание» увеличенного межремонтного пробега в действующую в России нормативно-правовую базу. В частности, Система экспертизы промышленной безопасности Ростехнадзора требует проведение технических освидетельствований, экспертиз промышленной безопасности, тарировку предохранительных клапанов и т.п. с определенной периодичностью, которая не будет совпадать с установленным межремонтным пробегом.

К вопросам группы 3 относится изменение существующей на предприятии Системы технического обслуживания, ремонта и контроля технического состояния оборудования.

Для решения вопросов, относящихся ко всем 3-м группам, целесообразно проведение аудита технического состояния – технического аудита (ТА) технологического оборудования предприятия.

Технический аудит включает:

1. Сбор исходных данных, разработку и согласование Программ работ по всем видам технологического оборудования, оборудования КИПиА и т.п.
2. Разработку методики перевода технологических установок на увеличенный межремонтный пробег и определение методов контроля оборудования в межремонтный период, в том числе методов мониторинга оборудования в рабочем состоянии с учетом технологических и технических особенностей технологических установок, цехов.
3. Анализ существующих систем постоянного и периодического мониторинга оборудования. Разработку рекомендаций по модернизации систем мониторинга (при необходимости).
4. Оценку фактической возможности предприятия для проведения технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) оборудования в условиях увеличенных межремонтных пробегов.
5. Выдачу Технического отчета с рекомендациями и мероприятиями по обеспечению безопасной эксплуатации оборудования при переводе на увеличенные межремонтные пробеги и переводе оборудования на ремонт по фактическому техническому состоянию.
6. Согласование увеличенных межремонтных пробегов с Ростехнадзором.

Цель технического аудита – оценка организационно-технической готовности технологических установок к обеспечению бесперебойной, безопасной, безаварийной работы при их переводе на увеличенный межремонтный пробег.

Для достижения поставленной цели выполняют следующие работы:

1. Проведение анализа опасностей, угроз и уровней защиты от негативных событий на установках.
2. Проведение анализа условий эксплуатации, технического обслуживания и контроля технического состояния стационарного и динамического оборудования технологических установок.
3. Выявление коррозионных факторов и механизмов повреждений металла оборудования установок.
4. Проведение анализа материального оформления оборудования и трубопроводов по установкам.
5. Проведение анализа химико-технологической защиты оборудования от коррозии.
6. Проведение анализа фактической скорости коррозии по сравнению с паспортной и составление перечня технологического оборудования с указанием фактической скорости коррозии.
7. Проведение анализа существующих систем мониторинга оборудования и разработку рекомендаций по дополнительным мониторинговым мероприятиям, обеспечивающим безаварийную эксплуатацию оборудования в межремонтный период.
8. Оценку возможности и условий безопасной эксплуатации установок при увеличенных межремонтных пробегах.
9. Разработку компенсирующих и мониторинговых мероприятий по обеспечению бесперебойной, безопасной, безаварийной работы при переводе установок на увеличенные межремонтные пробеги.

2. Порядок проведения технического аудита

Технический аудит включает:

- экспертную оценку общего технического состояния оборудования, которая выполняется на основании изучения технической документации, условий эксплуатации, коррозионных карт, информации о ремонтах, отказах и их причинах, анализа результатов проведенных технических освидетельствований и технических диагностирований;
- опрос и анкетирование персонала технологических установок;
- выборочный осмотр оборудования и трубопроводов;
- выборочные поверочные расчеты на прочность оборудования и трубопроводов;
- анализ выявленных отказов и повреждений каждого вида оборудования;
- выявление коррозионных факторов и механизмов повреждений металла оборудования установки;
- анализ материального оформления оборудования и трубопроводов;
- анализ химико-технологической защиты оборудования;
- анализ фактической скорости коррозии по сравнению с паспортной;
- составление Перечня технологического оборудования с указанием фактической скорости коррозии;

- анализ полученных данных и оценка возможности перевода установок на режим эксплуатации увеличенным межремонтным пробегом;
- разработку корректирующих или мониторинговых мероприятий, обеспечивающих безаварийную эксплуатацию оборудования в межремонтный период.

3. Анализ опасностей на установках

При проведении ТА идентификация опасностей проводится на основании сведений из Декларации промышленной безопасности ОПО (данные об опасных веществах, основные сценарии развития аварий и т.п.).

Основными поражающими факторами аварии на технологических установках нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий являются:

- ударная волна при взрывах парогазовоздушной смеси;
- тепловое излучение пожара пролива и «огненного шара»;
- токсическое поражение.

4. Анализ условий эксплуатации, технического обслуживания и контроля технического состояния стационарного и динамического оборудования технологических установок

4.1. Коррозионные факторы и механизмы повреждений металла оборудования по технологическим установкам

Проведение ТА рассмотрим на примере установки первичной переработки нефти АВТ-6, приведен на рис. 1 и в таблице 1.

В технологических средах установок подготовки и первичной переработки нефти основными коррозионными агентами являются хлористые соли, хлористый водород и сероводород. Основными источниками образования HCl – кальциевые и магниевые соли и хлорорганические соединения. Гидролиз солей и разложение хлорорганики в широком температурном интервале «обеспечивает» хлористым водородом практически все технологические потоки установки. В процессе переработки нефти все серосодержащие соединения термически разлагаются с выделением части серы в виде H₂S. В связи с этим образование сероводорода происходит постоянно на различных стадиях нефтепереработки.

Агрессивность технологических сред определяется присутствием и других коррозионных агентов, находящихся или образующихся в процессе переработки: кислорода, полиотионовых кислот, нафтеновых кислот, а также введенными реагентами, например, NaOH.

Риск реализации щелочного растрескивания может возникнуть вследствие наличия в аппаратах застойных зон, в которых происходит повышение концентрации щелочи из-за упаривания или в случае передозирования NaOH.

Коррозия под действием полиотионовых кислот характерна для «горячего» оборудования, находящегося в простое, в случае если в период останова установки не предприняты соответствующие меры по предупреждению образования этих кислот на внутренней поверхности оборудования.

Коррозия под действием нафтеновых кислот на установке, по-видимому, не встречается, в противном случае поражения металла носили бы катастрофический характер. Этот вид коррозии протекает в основном на блоках атмосферной и вакуумной перегонки нефти при температурах 200...400 °С. Разрушению подвергаются печные змеевики, трубопроводы от печей до ректификационных колонн, корпуса колонн в зоне ввода горячей струи, тарелки и др. Скорость коррозии углеродистой стали при 270...280 °С может составлять 10 мм/год.

Таким образом, основными повреждающими факторами технологического оборудования установки АВТ-6 в эксплуатационном режиме являются:

- высокотемпературная сероводородная коррозия (химическая коррозия в отсутствие влаги);
- электрохимическая сероводородная коррозия (усугубляется присутствием хлоридов);
- коррозия в водных растворах, содержащих хлориды и кислород (касается, в основном водяных холодильников).

4.2. Анализ материального оформления оборудования и трубопроводов

Сведения о материальном исполнении оборудования установки АВТ-6 получают из паспортов сосудов и аппаратов, других документов и посредством опроса специалистов. Полученные данные сопоставляют с рекомендациями РТМ 26-02-39-84 «Методы защиты от коррозии и выбор материалов для основного оборудования и трубопроводов установок подготовки и первичной переработки нефти».

Минимизация риска реализации доминирующих механизмов повреждения и увеличение срока службы оборудования установки обеспечивается рациональным выбором конструкционных материалов и применением химико-технологических мероприятий, направленных на снижение коррозионной агрессивности технологических сред.

4.3. Существующие методы химико-технологической защиты оборудования установок от коррозии и коррозионный мониторинг

Для снижения коррозионной агрессивности технологических сред на установке АВТ-6 применяется:

- защелачивание нефти путем подачи раствора щелочи в обессоленную нефть;
- обработка растворами нейтрализатора и ингибитора коррозии конденсационно-холодильного тракта колонны К-2.

Коррозионный мониторинг, реализованный на установке АВТ, с участием компании «ИНТЕРЮНИС» позволил значительно увеличить эффективность защиты от коррозии за счет оптимизации подачи ингибитора.

На рис. 2, 3 представлены результаты анализа состояния технологического оборудования установки. На рис. 2 показаны годы ввода технологического оборудования* в эксплуатацию в процентах от всего оборудования. На рис. 3 приведено распределение срока службы оборудования по годам.

Из приведенных графиков видна явная неравномерность ввода в эксплуатацию производственных мощностей, вызванная как политическими, так и экономическими причинами. На первый взгляд картина удручающая. Высокая степень физического и морального износа оборудования не просто затрудняет переход на увеличенный

Принципиальная схема установки АВТ-6

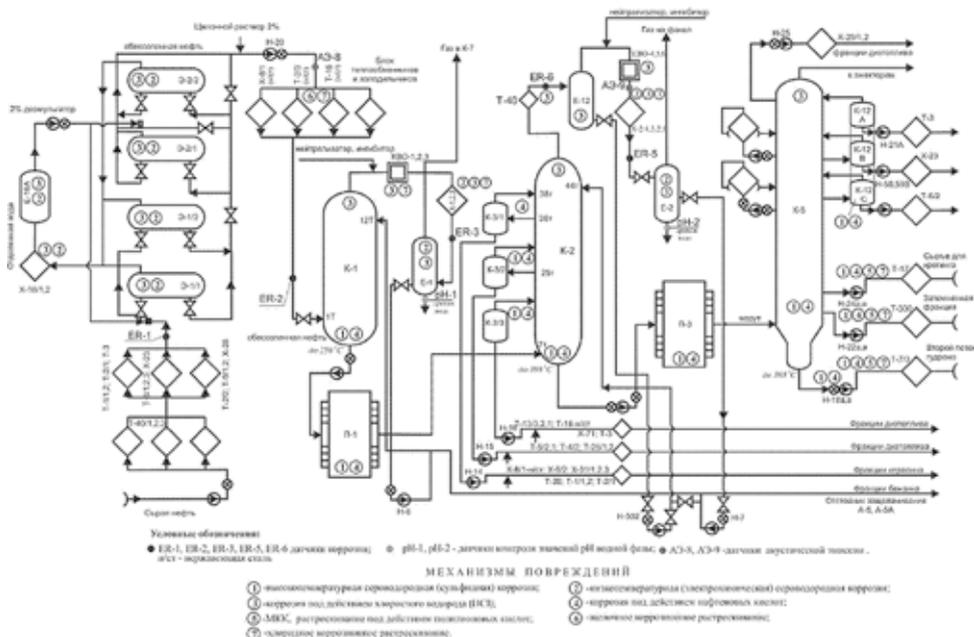


Рис. 1. Технологическая схема установки АВТ-6 с указанием действующих механизмов повреждения

межремонтный период без снижения уровня промышленной безопасности. Неизбежное старение оборудования и экономические факторы, препятствующие его замене, создают условия, при которых повышаются риски аварий и инцидентов даже при существующих межремонтных периодах в соответствии с ППР-77. Поэтому одной из стратегических задач может являться ускоренное обновление производственных фондов. Ввод новых производственных мощностей (замена оборудования) должен сопровождаться своевременным выбытием изношенного оборудования, срок службы которого истек и стоимость полностью амортизирована.

Подчеркнем, однако, что все оборудование, приведенное на рис. 2, либо успешно эксплуатируется до сих пор, либо нами обоснована возможность его временной эксплуатации до замены в соответствии с Планом технического перевооружения предприятия.

По результатам ТА проводят статистический анализ сроков эксплуатации сосудов, аппаратов, печей и башен-градирен, насосных агрегатов, ответственных технологических трубопроводов, причин замены по видам оборудования. Распределение оборудования по срокам его эксплуатации приведено на рис. 4-5.

На рис. 6 приведено процентное соотношение оборудования, подлежащего замене, в зависимости от причин замены (а) и по видам оборудования (б).

* Сосуды, технологические трубопроводы, технологические печи.

Вероятные механизмы повреждения металла оборудования установки АВТ-6

Коррозионные агенты	Механизмы повреждений металла	Характер повреждений углеродистой и низколегированной стали	Характер повреждений стали 08Х13	Характер повреждений нержавеющей стали типа 18-10
Сероводород	Высокотемпературная сероводородная коррозия	Общая неравномерная коррозия; межкристаллитное обезуглероживание стали	-	-
	Низкотемпературная сероводородная коррозия (протекает в условиях наличия поверхностной влаги)	Язвенные поверхностные повреждения; блистеринг (расслоение, вздутия); растрескивание	-	Растрескивание ¹
Хлористый водород; хлориды	Коррозия в растворах соляной кислоты; хлоридное коррозионное растрескивание	Общая коррозия	Питтинг	Питтинг; растрескивание
Щелочь	Щелочная коррозия; щелочное растрескивание	Щелочная коррозия; растрескивание	-	Растрескивание
Полиитионовые кислоты	МКК; коррозионное растрескивание	-	-	МКК; растрескивание
Нафтенковые кислоты	Коррозия под воздействием кислоты	Раковины или желобки с острыми краями, на поверхности нет продуктов коррозии		-

На рис. 7 приведена типовая схема применения концепции ИБОР, которая позволяет на нефтеперерабатывающих предприятиях США и Евросоюза значительно увеличить межремонтные пробеги за счет оптимизации процесса технического освидетельствования, ремонта и диагностики, внедрения корректирующих мероприятий и выполнения большого объема работ по стационарному и периодическому мониторингу технического состояния в процессе эксплуатации (на рабочем режиме).

¹ При совместном присутствии сероводорода и хлоридов при наличии влаги риск растрескивания нержавеющей аустенитных сталей типа 18-10 резко возрастает.



Рис. 2. Годы ввода технологического оборудования

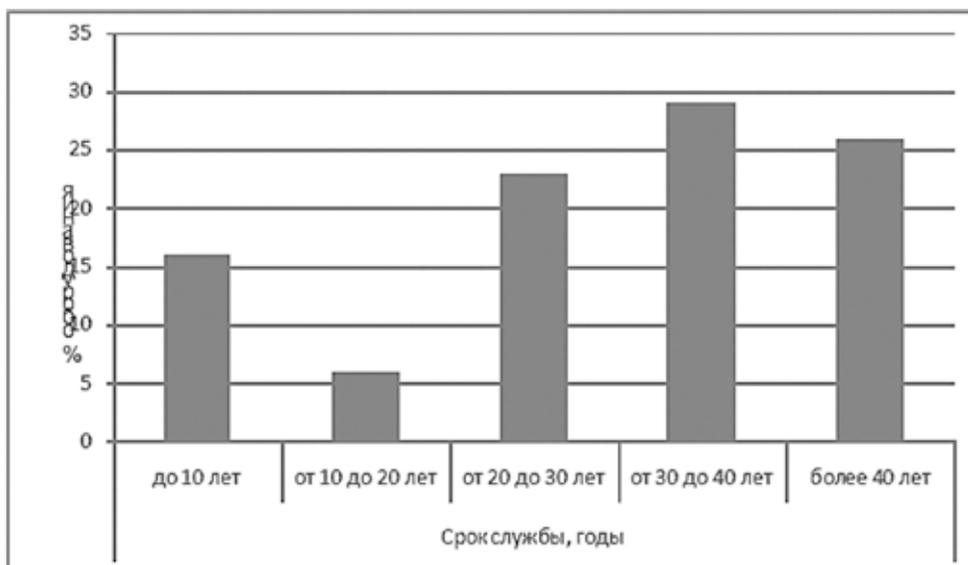


Рис. 3. Распределение оборудования в зависимости от его срока службы

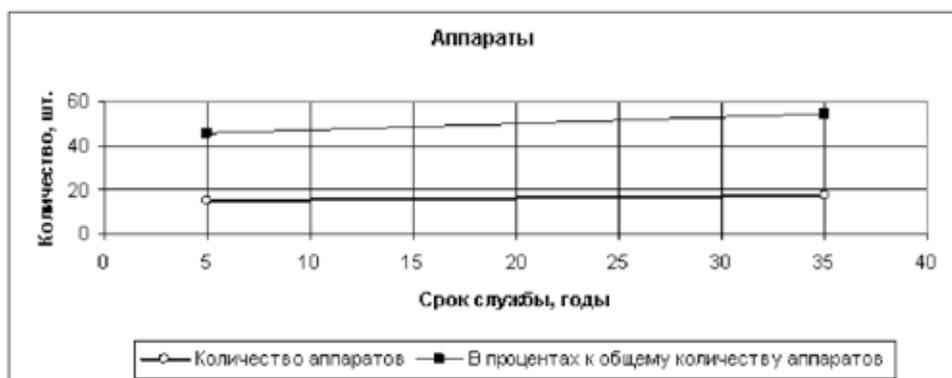
По результатам ТА (рис. 8) разрабатываются компенсирующие и мониторинговые мероприятия по обеспечению бесперебойной, безопасной, безаварийной работы при переводе установок на увеличенные межремонтные пробеги.

Компенсирующие мероприятий и мониторинг (КМиМ) включают:

1. Согласованную с Ростехнадзором Программу перевода технологических установок на увеличенные межремонтные пробеги.
2. Перечень оборудования, подлежащего первоочередной замене (до перехода на увеличенные межремонтные пробеги).
3. График проведения технических освидетельствований, ревизий и экспертиз промышленной безопасности с учетом увеличенных межремонтных пробегов.
4. Методику и программу тарировки всех предохранительных клапанов в условиях увеличенных межремонтных пробегов.

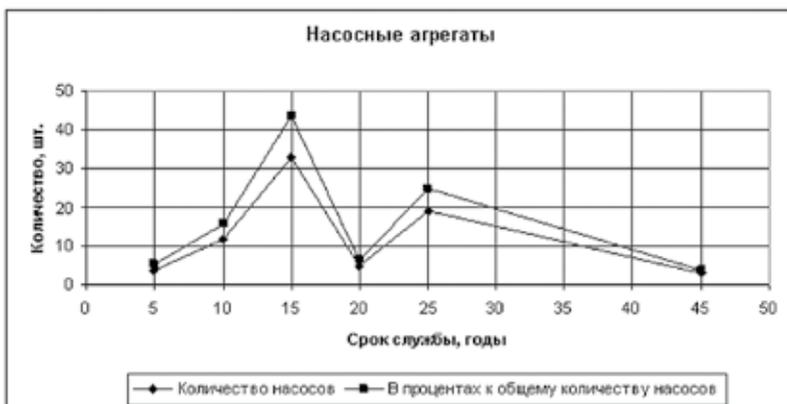


а

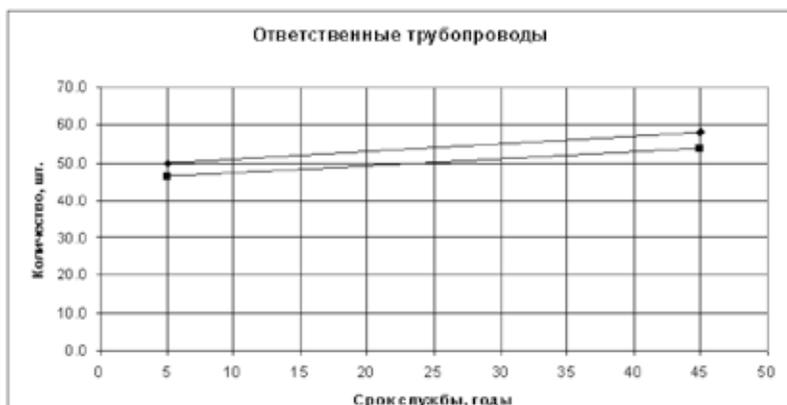


б

Рис. 4. Распределение сосудов и аппаратов по срокам их эксплуатации



а



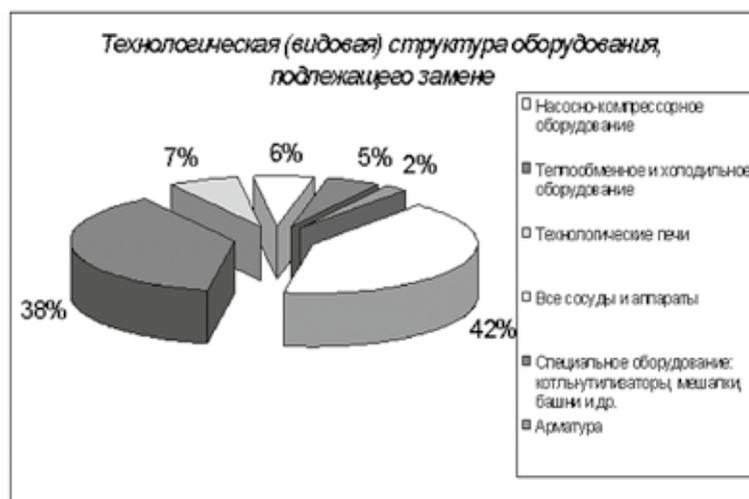
б



Рис. 5. Распределение насосных агрегатов и аппаратов, трубопроводов, печей и башен-градирен по срокам их эксплуатации



а



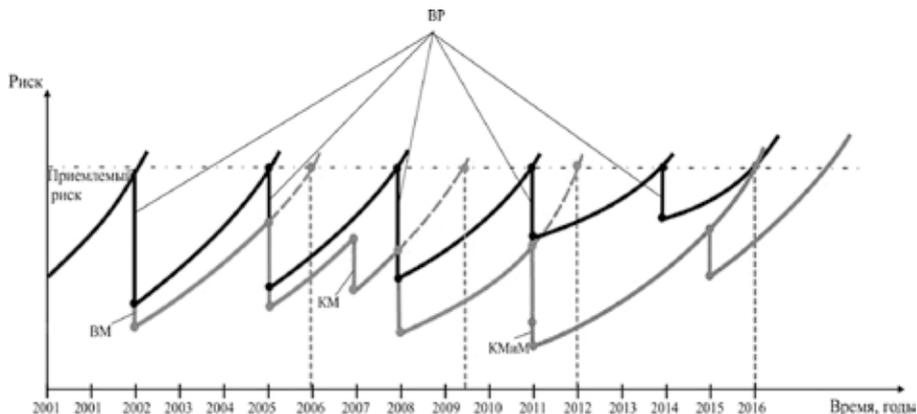
б

Рис. 6. Процентное соотношение оборудования, подлежащего замене

5. Методику постоянного и периодического контроля технического состояния технологического оборудования в процессе эксплуатации (на рабочем режиме) в межремонтный период.
6. Другие мероприятия в зависимости от фактического технического состояния оборудования.
7. Программу организации и проведения производственного контроля за выполнением КМиМ.
8. Рекомендации по совершенствованию структуры службы управления промышленной безопасностью (рис. 9).

Выводы

1. Показана актуальность перевода технологических установок нефтеперерабатывающих предприятий на работу с увеличенными межремонтными пробегами.
2. Предложена Методика проведения технического аудита организационно-технической готовности технологических установок нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий к переводу на увеличенные межремонтные пробеги.
3. На примере установки первичной переработки нефти АВТ-6 показано выполнение основных этапов ТА и даны рекомендации компенсирующим и мониторинговым мероприятиям, обеспечивающим бесперебойную, безопасную, безаварийную работу при переводе установок на увеличенные межремонтные пробеги.
4. Приведена рекомендуемая структура Службы управления промышленной безопасностью.



КМиМ- i ($i = 1, 2 \dots$) – корректирующие мероприятия и мониторинг (вибрационный мониторинг, коррозионный мониторинг, акустико-эмиссионный мониторинг и т.п.).

VR – восстановительный ремонт.

Рис. 7. Увеличение межремонтных пробегов за счет внедрения корректирующих мероприятий и мониторинга

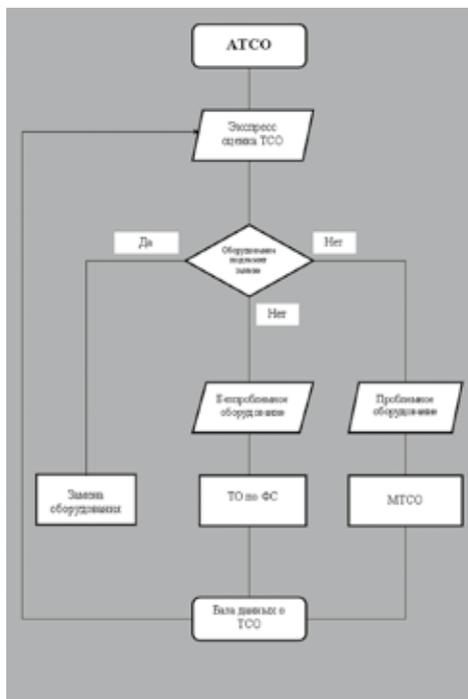


Рис. 8. Блок-схема проведения Технического Аудита



СПК – служба производственного контроля;

СТН – служба технического надзора;

СУР – служба управления рисками;

СООС – служба охраны окружающей среды;

СОТ – служба охраны труда;

СИОС – служба инженерного обеспечения страхования;

ВГСО – военизированный газоспасательный отряд.

Рис. 9. Рекомендуемая структура Службы управления промышленной безопасностью

ОПЫТ ПРОВЕДЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ГОРОДА АЭ-ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ГАЗОПРОВОДА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Ю.П. Бородин, Д.А. Терентьев, ООО «ИНТЕРЮНИС», г. Москва

Вопросы обеспечения безопасной эксплуатации трубопроводов высокого давления системы городского газоснабжения являются весьма актуальными в связи с большим потенциальным ущербом при возникновении инцидентов. Предъявляются повышенные требования к качеству проектирования, строительства и последующего обслуживания таких газопроводов. Важной составляющей в процессе эксплуатации является техническое диагностирование, которое дает возможность оценить текущее техническое состояние трубопроводов и осуществить прогноз на несколько лет вперед.

В настоящей работе на примере эксплуатируемого ГУП «МОСГАЗ» участка, проложенного вдоль ул. Озерная в г. Москва (табл. 1), показаны некоторые новые подходы к диагностике газопроводов высокого давления, находящихся в черте города.

Таблица 1

Параметры контролируемого трубопровода

Условный диаметр газопровода	Ду 1020 мм
Толщина стенки	10,6 мм
Длина участка	500 м
Рабочее давление	10,8 атм
Транспортируемая среда	Газ
Вид прокладки	Подземная. В одном коридоре 2 нитки трубопровода
Срок эксплуатации	32 года

Целью диагностирования являлась оценка технического состояния по данным акустико-эмиссионного (АЭ) контроля. При проведении работ использовалась АЭ-система «А-Line PCI 8» производства компании «ИНТЕРЮНИС» и преобразователи акустической эмиссии (ПАЭ) типа GT200 производства компании «ГлобалТест».

Во время проведения диагностики специалистам компании «ИНТЕРЮНИС» пришлось решить две специфические проблемы, связанные с эксплуатацией газопровода в городских условиях.

Первая проблема заключалась в том, что у трубопровода данного типа внутреннее давление формируется на газораспределительной станции (ГРС), и его величина на выходе поддерживается строго постоянной. Обычная процедура повышения дав-

ления, необходимая для проведения АЭ-контроля, потребовала бы остановки подачи газа потребителям.

Для проведения диагностики было принято решение использовать тот факт, что отбор газа, осуществляемый потребителями, приводит к колебаниям внутреннего давления в пределах 10-15%. По этой причине АЭ-контроль проводился в режиме так называемого квазимониторинга, заключавшегося в том, что сбор АЭ-данных осуществлялся в течение увеличенного до 4-5 часов отрезка времени, достаточного для того, чтобы зарегистрировать сигналы от дефектов, связанных с деградационными процессами в металле трубы.

К дефектам, которые обнаруживаются в данных условиях, могут быть отнесены: трещины коррозии под напряжением на стадии слияния одиночных трещин в магистральную, трещины замедленного разрушения, многоочаговые коррозионные повреждения наружной стенки трубы, усталостные трещины на стадии приближения размеров к критическим значениям, выше которых наблюдается неуправляемый рост трещины.

Все перечисленные дефекты при их обнаружении методом АЭ в условиях неизменяемого внутреннего давления в трубопроводе должны квалифицироваться как опасные.

Вторая проблема была связана с изготовлением необходимого числа шурфов, являющихся единственным способом обеспечить доступ к объекту при АЭ-диагностировании трубопровода подземной прокладки.

Из-за наличия пересечений с автомобильными проездами шурфы были изготовлены на значительных расстояниях друг от друга (табл. 2).

Таблица 2

Номера шурфов и расстояния между ними

Номера шурфов	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8
Расстояние между шурфами, м	80	70	80	70	80	80	42

При имевших место на контролируемом объекте значениях уровня шума и степени затухания акустического сигнала (21-25 дБ и 1-1,5 дБ/м соответственно) определение местонахождения АЭ-источников классическим методом, использующим времена прихода сигнала на два ближайших к источнику ПАЭ, оказалось возможным лишь на участке длиной 42 м между 7 и 8 шурфами. Анализ АЭ-данных показал, что опасные источники III и IV категории на данном участке отсутствовали.

Для решения проблемы локации АЭ-источников на остальных участках, имевших протяженность от 70 до 80 м, была использована разработанная компанией «ИНТЕРЮНИС» методика АЭ-контроля при одностороннем доступе. Суть ее заключается в следующем. В большинстве случаев АЭ-контроль проводится на объектах с толщиной стенки 3-50 мм, а типичные рабочие частоты ПАЭ составляют от 30 до 500 кГц. В

этой ситуации принятый ПАЭ сигнал, как правило, представляет собой комбинацию волн Лэмба нулевого порядка S_0 и A_0 [1]. Основной особенностью данного типа волн является наличие дисперсии – зависимости скорости распространения от частоты. В частности, для стали значения групповых скоростей мод нулевого порядка $v_{ГР S_0}$ и $v_{ГР A_0}$ меняются в диапазоне от нуля до $5,3 \cdot 10^3$ м/с. Поэтому, несмотря на то, что АЭ-сигнал излучается микротрещиной в виде импульса длительностью 0,001-0,01 мкс, различные частотные составляющие сигнала приходят на ПАЭ с разбросом в десятки и сотни микросекунд.

Наиболее подходящим методом анализа АЭ-сигналов, распространяющихся в виде волн Лэмба, является использование спектрограмм – специальных преобразований сигнала, дающих представление о распределении его энергии и по времени, и по частоте [2-3].

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. 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. 1) две кривые, заданные уравнениями:

$$t(f) = \begin{cases} L/v_{ГР S_0}(f, h) + t_0; \\ L/v_{ГР A_0}(f, h) + t_0. \end{cases} \quad (1)$$

Компанией «ИНТЕРЮНИС» был разработан основанный на преобразовании Хафа [4] метод определения расстояния L до источника АЭ по спектрограмме сигнала. Его добавление к функционалу программного обеспечения АЭ-систем семейства «А Line» позволило определять местоположения АЭ-источника при приходе сигнала только на один из ближайших ПАЭ. При регистрации АЭ-сигнала на основе его осциллограммы вычисляется соответствующая спектрограмма, затем при помощи преобразования Хафа производится автоматическое выявление дисперсионных кривых с вычислением расстояния до источника сигнала.

Поскольку для успешного проведения локации по предложенной методике достаточным условием является приход АЭ-сигнала только на один ПАЭ, данная методика позволяет увеличить расстояние между шурфами в 2 раза по сравнению со случаем использования локации на базе разностей времен прихода (РВП), требующей прихода сигнала на два ближайших ПАЭ (рис. 2). Кроме того, эксперименты с использованием имитатора Су-Нильсена показали [5], что точность локации при использовании новой методики может достигать 1% от расстояния между ПАЭ и источником.

При анализе данных с участков между 1 и 7 шурфами особое внимание было обращено на ряд АЭ-сигналов амплитудой от 57 до 68 дБ, приходящих на ПАЭ, расположенный в 5 шурфе, но не доходящих в силу затухания до преобразователей АЭ, расположенных в соседних 4 и 6 шурфах.

Использование методики одностороннего доступа позволило выяснить, что соответствующие источники АЭ находились на удалении от 0,5 до 3,5 м от ПАЭ, расположенного в 5 шурфе (рис. 3).

Выводы

1. Проведена АЭ-диагностика газопровода высокого давления, проложенного в городских условиях.
2. АЭ-контроль проводился в режиме квазимониторинга, заключающегося в том, что сбор данных осуществляется без принудительного изменения давления на ГРС в течение увеличенного до 4-5 ч отрезка времени.
3. Использование методики одностороннего доступа, основанной на анализе дисперсионной природы сигнала, позволило вдвое увеличить допустимую для АЭ-контроля дистанцию между шурфами.

Библиографический список

1. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. – М.: Наука. 1966. – 169 с.
2. Терентьев Д.А., Елизаров С.В. Вейвлет-анализ сигналов АЭ в тонкостенных объектах // Контроль. Диагностика. – 2008. – № 7. – С. 51-54.
3. Hamstad, M. A., O'Gallagher A., Gary J., «Examination of the Application of a Wavelet Transform to Acoustic Emission Signals», Journal of Acoustic Emission, Vol. 20, 2002, pp. 39–81.
4. Терентьев Д.А., Булыгин К.А. Новые методы применения нормальных волн при контроле тонкостенных объектов больших геометрических размеров. Часть 1: Автоматическое распознавание дисперсионных кривых на спектрограмме АЭ-сигнала // В мире НК. – 2011. – № 2. – С. 46-48.
5. Terentyev D.A., Barat V.A. and Bulygin K.A. The Extraction Method for Dispersion Curves from Spectrograms using Hough Transform. - Journal of Acoustic Emission, 29, 2011, 232-242.

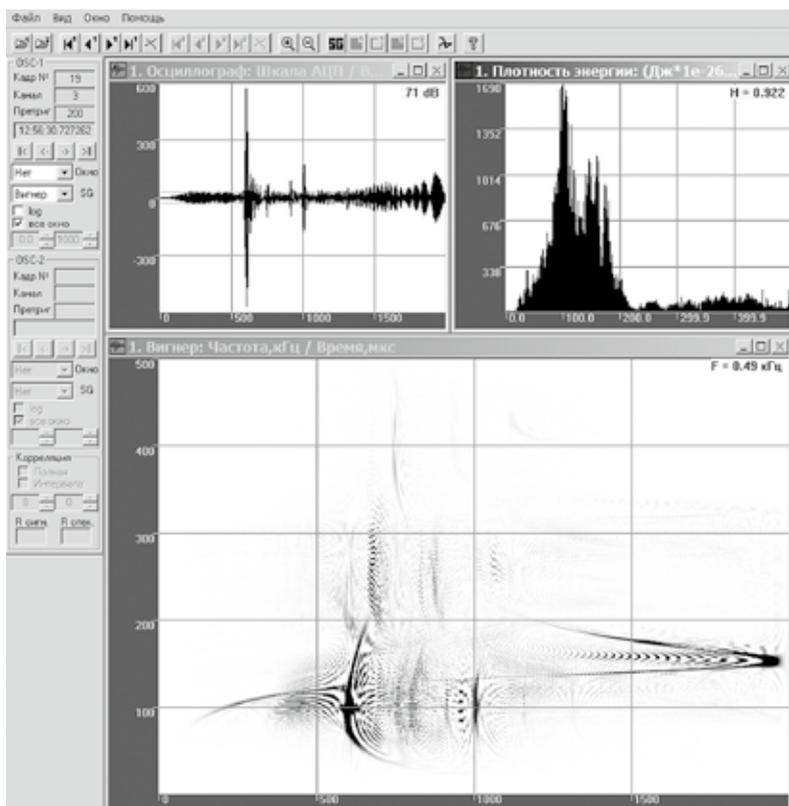


Рис. 1. Осциллограмма, спектр и спектрограмма АЭ-сигнала от источника Су-Нильсена

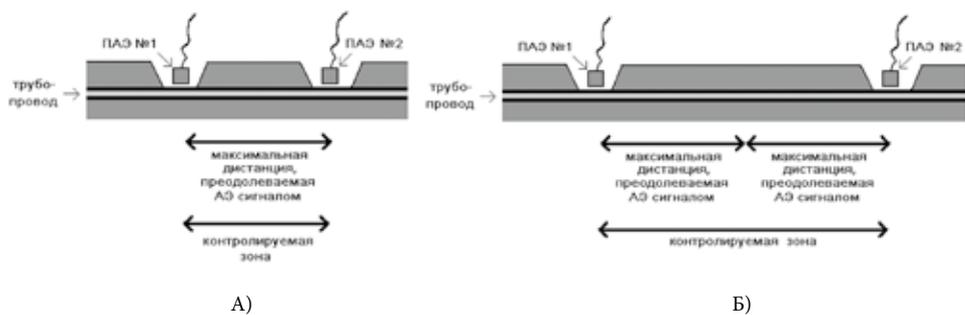


Рис 2. Соотношение между размером контролируемой зоны и максимальной дистанцией, преодолеваемой АЭ-сигналом в объекте контроля:

- А) При использовании РВП-локации;
- Б) При использовании методики одностороннего доступа

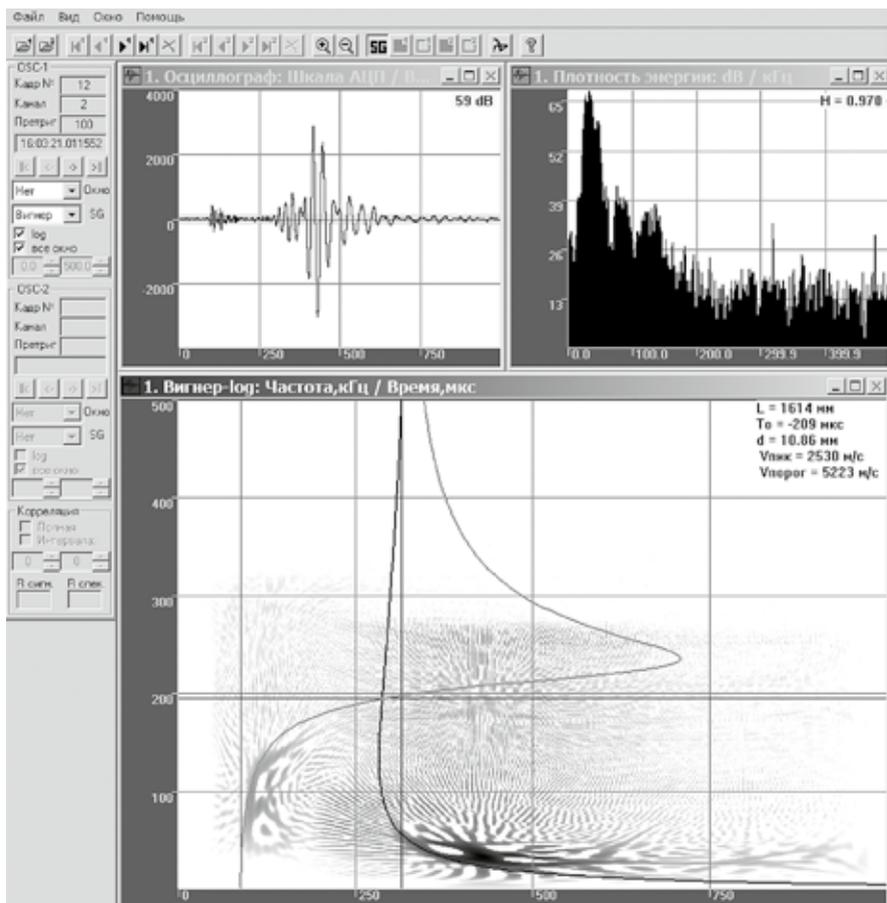


Рис. 3. Осциллограмма, спектр и спектрограмма АЭ-сигнала, принятого преобразователем АЭ в 5 шурфе, а также соответствующие дисперсионные кривые и их параметры

Список иллюстраций

Рис. 1. Осциллограмма, спектр и спектрограмма АЭ-сигнала от источника Су-Нильсена.

Рис 2. Соотношение между размером контролируемой зоны и максимальной дистанцией, преодолеваемой АЭ-сигналом в объекте контроля:

А) При использовании РВП-локации.

Б) При использовании методики одностороннего доступа.

Рис. 3. Осциллограмма, спектр и спектрограмма АЭ-сигнала, принятого преобразователем АЭ в 5 шурфе, а также соответствующие дисперсионные кривые и их параметры.

Название статьи на английском

Experience in AE testing of high pressure gas pipeline in the city.

Аннотация

В условиях города проведена АЭ-диагностика газопровода высокого давления. Из-за невозможности изменения давления на выходе газораспределительной станции контроль проведен с использованием случайных колебаний внутреннего давления трубы. Использование основанной на анализе дисперсионных кривых волн Лэмба методики одностороннего доступа позволило вдвое увеличить расстояние между шурфами при АЭ-контроле.

AE testing of high pressure gas pipeline carried out in the city. Because of the impossibility of changing the outlet pressure gas distribution station AE testing was carried out using the random fluctuations of the internal pressure pipe. Using an analysis of the Lamb wave dispersion curves allowed doubling the distance between the pits during the AE control.

Ключевые слова

АЭ-контроль, локация, спектрограмма, волны Лэмба, дисперсионные кривые
AE testing, location, spectrogram, Lamb waves, dispersion curves.

Резюме

Терентьев Денис Анатольевич, к.ф.-м.н., старший специалист научно-исследовательского отдела, ООО «ИНТЕРЮНИС».

Бородин Юрий Петрович, к.т.н., начальник отдела диагностики, ООО «ИНТЕРЮНИС».

ДОСТОВЕРНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

А.Н. Мисейко, А.В. Шведков, ООО «ИНТЕРЮНИС»

Несмотря на то, что практика применения метода акустической эмиссии (АЭ) для контроля магистральных трубопроводов (МТ) существует достаточно долго, до сих пор у специалистов в этой области не имеется единого мнения об эффективности данного метода контроля подобных объектов. Это обусловлено отсутствием масштабных исследований в указанном направлении и единого нормативного документа, регламентирующего вопросы проведения акустико-эмиссионного контроля МТ различного назначения. Между тем эффективность акустико-эмиссионного контроля МТ напрямую определяется достоверностью получаемых результатов. Под достоверностью результатов акустико-эмиссионного контроля МТ следует понимать вероятность принятия безошибочных решений по наличию/отсутствию источников АЭ различных классов на контролируемом участке МТ. При принятии таких решений могут возникать ошибки двух видов: перебраковка и недобраковка. Перебраковка возникает в случае, если выявленному источнику АЭ присвоен класс более высокий, чем он имеет в действительности или если выявлен ложный источник. Недобраковка возникает в случае, если выявленному источнику АЭ присвоен класс более низкий, чем он имеет в действительности, или если не выявлен источник АЭ, который мог бы быть выявлен при проведении акустико-эмиссионного контроля МТ.

Достоверность результатов акустико-эмиссионного контроля МТ складывается, по большому счету, из двух составляющих: достоверности определения степени опасности (класса) выявляемых источников АЭ и достоверности определения их местоположения (локализации). Достоверность определения степени опасности (класса) источников АЭ зависит от эффективности нагружения контролируемого участка МТ, безошибочности идентификации сигналов АЭ на фоне помех, точности измерения их параметров, правильности выбора критериев оценки технического состояния МТ и проведения расчетов в соответствии с выбранными критериями. Достоверность определения местоположения (локализации) источников АЭ определяется идентичностью и высокими показателями метрологических характеристик (чувствительностью, полосой рабочих частот) используемых преобразователей АЭ и каналов АЭ-аппаратуры, точностью определения расстояний между преобразователями АЭ, безошибочностью задания скорости распространения акустических волн в каждой локационной группе, точностью регистрации временных параметров сигналов АЭ, зарегистрированных преобразователями каждой локационной группы, правильностью выбора алгоритмов локализации и проведения расчетов в соответствии с выбранными алгоритмами.

Все вышеперечисленные факторы, влияющие на достоверность акустико-эмиссионного контроля МТ, можно условно разделить на две группы: факторы, в основе

которых лежат инструментальные погрешности применяемых технических средств, и факторы, обусловленные погрешностями методического характера. Влияние факторов первой группы достаточно просто может быть минимизировано за счет использования технических средств с более высокими метрологическими и эксплуатационными характеристиками. Более сложной задачей является минимизация влияния факторов второй группы. Их изучение представляет особый интерес для повышения достоверности результатов акустико-эмиссионного контроля МТ.

В докладе приводятся оценки достоверности результатов акустико-эмиссионного контроля МТ по альтернативному признаку на основе данных, полученных при диагностировании трех участков линейной части магистральных нефтепроводов, общей протяженностью 258 км. В качестве эталонного метода оценки технического состояния МТ использовался ультразвуковой эхо-метод. Авторами сделана попытка оценить влияние выбора расстояния между преобразователями АЭ, режима нагружения МТ и критерия оценки технического состояния участка МТ на достоверность результатов акустико-эмиссионного контроля.

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АНАЛИЗА РИСКА АВАРИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*А.М. Лепихин, д.т.н., Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука»
КНЦ СО РАН, г. Красноярск*

А.П. Черняев, к.т.н., НПО «СибЭРА», г. Красноярск

В настоящее время одной из наиболее актуальных задач обеспечения безопасности технических систем становится задача анализа риска. Это связано с двумя обстоятельствами. Во-первых, становится насущной практическая потребность в количественном измерении существующих и перспективных техногенных угроз. Во-вторых, теоретические исследования проблемы риска привели к созданию методологической основы, достаточной для проведения количественных оценок указанных угроз [1-3]. Тем не менее, как показывает анализ, при проведении оценок риска аварий объектов и технических устройств различного назначения приходится сталкиваться со значительными методическими сложностями. Фундаментальные методические сложности уже были рассмотрены в [4]. В данной работе остановимся на некоторых практических аспектах оценки риска.

Опасные объекты представляют собой сложные технические системы с многосвязной иерархической структурой. Как правило, эти объекты содержат большое число технических устройств, различающихся по функциональному назначению, конструктивному исполнению, используемым конструкционным материалам. В большинстве случаев источники аварий этих устройств формируются за счет накопления повреждений в структуре конструкционных материалов. Эти повреждения затем приводят к разрушениям конструкций, авариям технических устройств и объекта в целом. Исходя из этого, при анализе риска следует принимать во внимание процессы на различных системных уровнях: мегауровне (объект), метауровне (техническое устройство), макроуровне (конструкция) и микроуровне (материал). Для каждого уровня имеют место специфические показатели защищенности от разрушений, аварий и катастроф (таблица 1). Эти показатели задаются рядом нормативно-правовых и нормативных документов. Помимо этого защищенность объекта от аварий обеспечивается организационно-распорядительными документами, регламентирующими деятельность обслуживающего персонала.

Иерархия показателей и нормативного обеспечения безопасности технических систем

Уровень иерархии системы	Показатели защищенности	Нормативно-технические документы	Организационно-распорядительные документы
Мегауровень (объект)	Функция безопасности $S(t)$. Риск $R(t)$	ФЗ 116 Технические регламенты РД 03-418-01	Технологические регламенты
Метауровень (техническое устройство)	Функция риска (вероятность аварии) $P_f(t) = \Phi\{P_i(t)\}$	Правила безопасности. Нормы проектирования	Должностные инструкции. Правила проведения диагностирования
Макроуровень (конструкция)	Средний ресурс $T_{ср}$. Интенсивность отказа λ . Вероятность отказа $P_i(t)$	Нормы расчетов прочности и ресурса	Должностные инструкции. Правила проведения контроля
Микроуровень (материал, область разрушения)	Критические напряжения. Характеристики механики разрушения	Теории прочности. Механика разрушения	–

Еще более сложная иерархия возникает при анализе опасных процессов, формирующих аварии. Здесь приходится анализировать процессы на уровне объекта, конструкции технического устройства, материала, структуры материала (таблица 2).

Иерархические уровни моделирования опасных процессов

Уровень иерархии системы	Масштабы размеров и времени, м, сек	Элемент уровня	Параметры	Программные пакеты
Объектовый	$10^1 - 10^4$ $10^1 - 10^9$	Технический объект	Связи элементов и потоков вещества. Нагрузки, воздействия	GPSS, SIMULINK
Конструкционный	$10^1 - 10^2$ $10^1 - 10^9$	Конструкция	Нагрузки, воздействия, перемещения, деформации	ANSYS, LS-DYNA, KOSMOS

Элементный (сплошная среда)	$10^{-1} - 10^1$ $10^1 - 10^8$	Элемент конструкции	Напряжения, деформации	ANSYS, LS-DYNA, KOS- MOS, NASTRAN
Область разрушения (сплошная среда)	$10^{-2} - 10^{-1}$ $10^1 - 10^7$	Локальный объем элемента	Напряжения, деформации, характеристики механики разрушения	ANSYS, LS-DYNA, NAS- TRAN
Структурный (гетерогенная структура)	$10^{-6} - 10^{-2}$ $10^1 - 10^5$	Блок зерен	Микронапряже- ния, микроде- формации	Специальные программы
Молекулярный	$10^{-9} - 10^{-6}$ $10^{-3} - 10^3$	Зерно, кристалл	Кинетические коэффициенты	Специальные программы

Существенно различными оказываются параметры и средства моделирования этих процессов. Очевидно, что эти многоуровневые процессы должны находить адекватное отражения в анализе риска. Представляется маловероятным возможность охвата этих процессов в одной модели или одной процедуре анализа риска. Более конструктивным подходом можно считать осуществление разложения риска на компоненты, отражающие иерархию структуры системы. Наиболее подходящим для этих целей можно полагать риск-разложение в следующей форме [5]:

$$R_{\Sigma} \rightarrow \{R_i\} \rightarrow \{R_{ij}\} \rightarrow \{R_{ijk}\}, \quad (1)$$

где R_{Σ} – системный (объектовый) риск; R_i – субсистемный риск; R_{ij} – конструкционный риск; R_{ijk} – критериальный риск.

Компоненты верхнего уровня данного разложения должны содержать «стоимостную» оценку потерь. Компоненты нижнего уровня могут определяться в форме вероятностей событий.

Согласно этому разложению для оценки интегрального риска аварии сложного объекта требуется нетривиальное нелинейное преобразование оценок показателей риска на нижних иерархических уровнях. При этом следует принимать во внимание различные механизмы катастроф сложных систем (ветвящиеся или каскадные катастрофы) (рис. 1).

Поскольку механизм катастрофы заранее неизвестен, и разные модели будут давать разные оценки риска, риск следует оценивать в интервальной форме:

$$e^{-x} \leq R_{\Sigma} \leq x^{-a}. \quad (2)$$

В этом случае фактическая оценка риска точно не определена, но она будет находиться внутри указанной вилки.

Для относительно простых по структуре объектов и технических устройств вполне применимы стандартные технологии анализа риска: метод построения деревьев

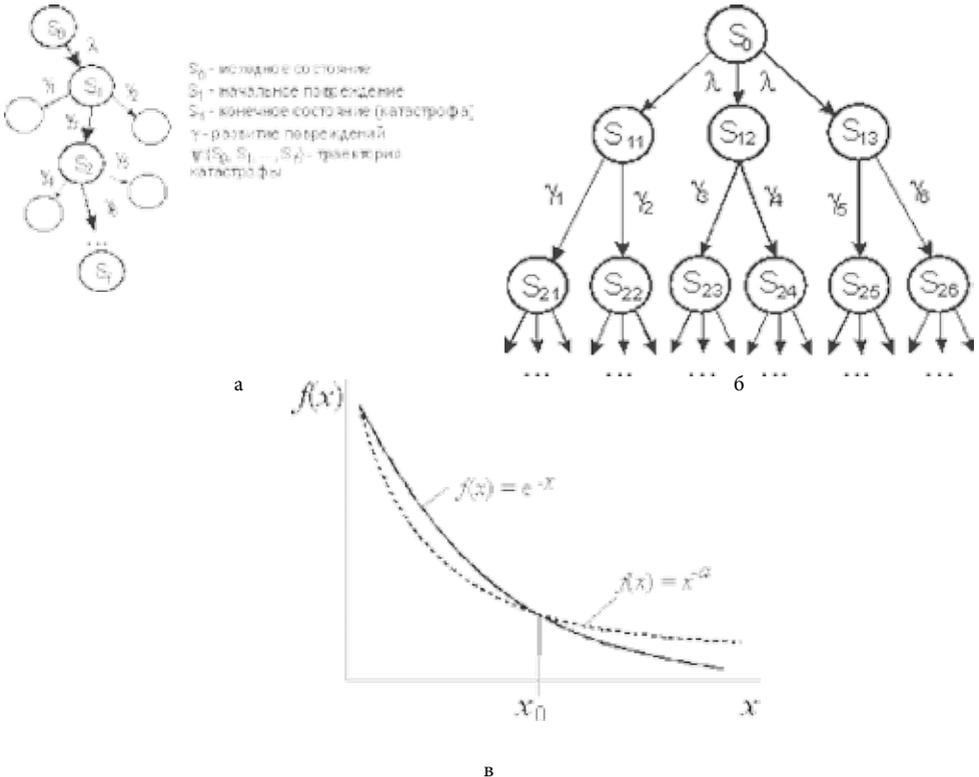


Рис. 1. Схемы ветвящейся (а) и каскадной (б) катастроф и их функции риска (в)

отказов и исходов, метод логических вероятностей и др. [3]. В ряде случаев эти методы применяются и к анализу риска разрушения конструкций. Недостаток этих методов заключается в том, что они требуют задавать вероятности исходных событий (разрушений отдельных элементов конструкций). Обычно эти вероятности задаются на основе обобщенных статистических данных, слабо отражающих специфические условия нагружения конкретной конструкции и особенности истории накопления повреждений.

По нашему мнению, более адекватным подходом для оценки конструкционного риска является расчет на основе вероятностных моделей механики разрушения [5]. В этом случае учитывается специфика нагрузок и воздействий, напряженно-деформированного состояния конструкций, состояния и свойств конструкционных материалов. Наиболее простой в расчетах можно считать модель «нагрузка – прочность». По этой модели функция риска (вероятность разрушения) определяется в форме:

$$R_f = 1 - erf \left\{ -\frac{(m_1 - m_2)^2}{2(s_1^2 + s_2^2)} \right\} = 1 - erf \left\{ -\frac{n - 1}{\sqrt{V_1^2 n^2 + V_2^2}} \right\}, \quad (3)$$

где n – коэффициент запаса; m_1, m_2, s_1, s_2 – средние значения и среднеквадратические отклонения критических и действующих напряжений в рассматриваемой конструкции; V_1, V_2 – коэффициенты вариаций критических и действующих напряжений.

Для высокоответственных конструкций, обладающих высокой надежностью, более адекватной является пуассоновская модель отказов. Для этой модели функция риска вычисляется в следующей форме [5]:

$$P_f(V, k) = 1 - \exp \left\{ - \sum_{i=1}^k \int \mu_i(l_c) \frac{dV}{V_0} \right\} \quad (4)$$

Параметр V_0 имеет смысл эталонного объема, для которого определяется математическое ожидание $\mu(l_c)$ числа дефектов критических размеров. Математическое ожидание $\mu(l_c)$ имеет следующий вид:

$$\mu(l_c) = \mu \int_0^{\infty} f(l_c) \left[\int_{l_c}^{\infty} f(l) dl \right] dl_c \quad (5)$$

Интегральная часть формулы (5) представляет собой вероятностный фильтр вида $P\{l \geq l_c\}$, который «прореживает» ансамбль дефектов в конструкции. С использованием выражения (5) для хрупких разрушений получаем:

$$\mu(l_c) = \mu \int_0^{\infty} \frac{\beta_c^k}{\theta_c} \left(\frac{l_c}{\theta_c} \right)^{\beta_c - 1} \times \exp \left\{ - \left(\frac{l_c}{\theta_c} \right)^{\beta_c} \right\} \times \exp \left\{ - \left(\frac{l_c}{\theta} \right)^{\beta} \right\} dl_c \quad (6)$$

Для квазихрупких разрушений имеем следующее выражение:

$$\mu(l_c) = \mu \int_0^{\infty} \frac{\alpha^k}{\Gamma(k)} \mathcal{N}_c^{k-1} \exp \left\{ - \alpha l_c^\gamma \right\} \times \exp \left\{ - \left(\frac{l_c}{\theta} \right)^{\beta} \right\} dl_c \quad (7)$$

Для вязких разрушений:

$$\mu(l_c) = \mu \int_0^{\infty} \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ - \frac{1}{2} \left(\frac{l_c - m}{s} \right)^2 \right\} \times \exp \left\{ - \left(\frac{l_c}{\theta} \right)^{\beta} \right\} dl_c \quad (8)$$

Дальнейшее углубление моделей можно провести в части учета особенностей роста трещин при случайном нагружении. В частности, использование модели выбросов случайных процессов позволяет получить следующее выражение для функции риска:

$$P_f(K_c, l, t) = 1 - \int_l \int_{K_c} f(l)f(K) \left[1 - \exp \left\{ -\frac{K_c^2}{2\pi S^2 l(t)} \right\} \right] \cdot \quad (9)$$

Рассмотрим некоторые практические аспекты оценки риска разрушения конструкций. В качестве примера используем случай разрушения воздушного ресивера с разбросом осколков на 40-50 м. В результате разрушения были повреждены соседние ресиверы, разрушена кирпичная стена здания компрессорной подстанции, повреждены опоры ЛЭП (рис. 2).

Сосуд изготовлен в 1966 г. и принят в эксплуатацию на Назаровской ГРЭС в 1968 г. Сосуд был установлен на открытом воздухе и подвергался воздействию внешних климатических температур, характерных для г. Назарово. Сосуд нагружен внутренним рабочим давлением 4 МПа (40 атм.). Другие нагрузки и воздействия в документации не отмечены. Согласно паспорту основные элементы сосуда (обечайки, днища) изготовлены из стали 16ГС. Горловина люка изготовлена из стали 20. Рекомендуемый диапазон применения стали 16ГС от -40 до +475 °С. Допускаемые напряжения для материала сосуда (сталь 16ГС, $R_{0.2} = 325$ МПа, $R_m = 450$ МПа по ГОСТ 19281-89):

$$[\sigma] = \min \left\{ \frac{R_{0.2}}{n_{0.2}}; \frac{R_m}{n_m} \right\} = \min \left\{ \frac{325}{1.5}; \frac{450}{2.5} \right\} = 180 \text{ МПа.}$$



а)



б)

Рис. 3. Общий вид разрушенного объекта (а) и источник разрушения – непровар в сварном соединении

(6)

Номинальные напряжения в обечайке сосуда при заданном рабочем давлении:

$$\sigma = \frac{P(D + s_{min})}{2\varphi s_{min}} = \frac{4 \times (1200 + 20,5)}{2 \times 0,8 \times 20,5} \approx 150 \text{ МПа.}$$

Коэффициент концентрации напряжений в зоне сварного соединения обечайки с горловиной люка (с учетом непровара):

$$\alpha_{\sigma} = 4,0.$$

Коэффициент деформационного упрочнения металла:

$$m = 0,75 \frac{\lg \left[\frac{R_m}{R_{0,2}} (1 + 1,4Z) \right]}{\lg \left[(10^5 \ln \left(\frac{1}{1-Z} \right)) / (200 + 0,5R_{0,2}) \right]} = 0,16.$$

Эффективный коэффициент концентрации напряжений (с учетом непровара):

$$K_{\sigma} = \alpha_{\sigma}^{\frac{2m}{1+m}} \left(\frac{\sigma_H}{R_{0,2}} \right)^{\frac{m-1}{1+m}} = 2,54.$$

Максимальные локальные напряжения в зоне инициации разрушения (в зоне непровара) $\sigma_i = \sigma_H \times K_{\sigma} = 381 \text{ Мпа.}$

Расчет риска проведем по двум схемам: по классической методике построения деревьев событий и на основе формулы (3). В первом случае структурная схема была представлена двумя составными событиями разрушения: разрушением соединений обечайки и днища (сварные соединения 1 категории) с интенсивностью $\lambda = 7,03 \times 10^{-7} \text{ год}^{-1}$; разрушением соединений патрубков и люка (сварные соединения второй категории) с интенсивностью $\lambda = 5,12 \times 10^{-6} \text{ год}^{-1}$. Во втором случае расчет проводился по номинальным и максимальным напряжениям. Результаты расчета показали следующее. Вероятность разрушения по структурной схеме при наработке 40 лет составила $P_f = 1,16 \times 10^{-3}$. Вероятности разрушения на основе модели «нагрузка-прочность» получились следующими: по номинальным напряжениям $P_f = 7,0 \times 10^{-2}$, по максимальным напряжениям $P_f = 3,2 \times 10^{-1}$. Как видим, полученные оценки отличаются друг от друга на один порядок. Оценка по максимальным напряжениям вполне согласуется с фактом разрушения объекта. Следовательно, модель «нагрузка-прочность» может использоваться при анализе риска разрушений конструкций.

В качестве заключения можно отметить следующее. Анализ риска опасных объектов представляет собой сложную научно-техническую задачу, для решения которой необходим иерархический мультиобъектный анализ. Мультиобъектный анализ должен включать иерархически соподчиненные модели риска – статистические, логические, вероятностные. Анализ риска следует начинать с нижнего уровня – с оценок вероятностей разрушения конструкций. Такие оценки могут проводиться как дополнение классических расчетов прочности при проведении экспертизы безопасности технических устройств различного назначения. Имеющиеся вероятностные модели механики разрушения позволяют выполнять такие расчеты для большинства конструкций без требований дополнительной статистической информации. Для широкого проведения расчетов вероятностей разрушений необходима систематизация данных о фактических коэффициентах запаса прочности и вариациях напряжений и характеристик механических свойств конструкционных материалов.

Библиографический список

1. Perrow Ch. Normal Accidents: Living with High-Risk Technologies, N.Y.: Basic Books, 386 pp., 1999.
2. Henley E., Kumamoto H. Probabilistic risk assessment and management for engineers and Scientists. IEEE PRESS, 1996. – 597 p.
3. Шубин В.С. Рюмин Ю.А. Надежность оборудования химических и нефтеперерабатывающих производств. – М.: Химия, 2006. – 359 с.
4. Lepikhin A. A Critical Look at Risk Analysis of Disasters. Risk Analysis VII & Brownfields V. WITpress, 2010, PI-59–PI-67pp.
5. Лепихин А.М., Махутов Н.А., Москвичев В.В., Черняев А.П. Вероятностный риск-анализ конструкций технических систем. – Новосибирск: Наука, 2003. – 174 с.

ISBN 978-5-904450-07-6



The image features a vibrant blue background with a large, bright white circle in the center. The circle is framed by several concentric, curved lines in various shades of blue, creating a sense of depth and movement. The overall design is clean and modern.

Москва, 2013