
СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К АНАЛИЗУ БЕЗОПАСНОСТИ И РИСКОВ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ ТЕХНОСФЕРЫ С УЧЕТОМ КЛАССОВ ОПАСНОСТЕЙ

Чл.-корр. РАН Махутов Н.А., к.т.н. Гаденин М.М.

Рабочая группа при Президенте РАН по анализу риска и проблем безопасности,
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

В соответствии со Стратегией национальной безопасности, федеральным законодательством в области промышленной безопасности и стратегического планирования в нашей стране в настоящее время начинают формироваться новые стратегические основы системы обеспечения защищенности опасных производственных объектов ОПО I и II классов опасностей, критически и стратегически важных для национальной безопасности промышленных объектов, в первую очередь – от тяжелых катастроф техногенного характера регионального, национального, глобального масштабов с большими социально-экономическими последствиями и высокими индивидуальными $R_{и}(t)$ и экономическими $R_{э}(t)$ рисками. Постановка таких государственных задач осуществляется на основании федеральных законов, указов Президента Советом Безопасности Российской Федерации и его Научным советом в соответствии с положениями Стратегии национальной безопасности.

В соответствии с Федеральным законом «О стратегическом планировании в Российской Федерации» (ФЗ №172 от 28.06.2014 г.) одним из практически важных решений по реализации фундаментальных научных исследований и прикладных разработок в области обеспечения безопасности промышленных объектов должны стать научно-методическое обоснование и количественное определение неприемлемых (недопустимых) $R_{кн}(t)$ и $R_{кэ}(t)$ и приемлемых (допустимых) $[R_{и}(t)]$ и $[R_{э}(t)]$ названных выше видов рисков от тяжелых аварий и катастроф на опасных производственных ОПО, критически КВО и стратегически СВО важных объектах, определяемых соответствующими величинами вероятностей $P(t)$ и $[P(t)]$ и ущербов $U(t)$ и $[U(t)]$.

Актуальность фундаментальных исследований и разработок в направлении совершенствования методологии анализа безопасности и рисков на основе современных требований видна из данных по числу крупных техногенных и природных катастроф в мире в течение последних четырех десятилетий (рис. 1). Превышение числа техногенных катастроф над природными составило 1,2-1,7 раза при темпах роста порядка 10-12% в год; для природных катастроф эта величина была на уровне 7-8% в год [7]. Если к концу XX века экономические ущербы от природных превышали ущербы от техногенных катастроф, то, начиная с первого десятилетия XXI века основной ущерб приносили уже техногенные катастрофы, в том числе крупнейшие – на Саяно-Шушенской ГЭС, морской платформе BP в Мексиканском заливе, на АЭС «Фукусима-1» (с ущербами от каждой от 5 до 20 млрд. долларов США). Важно, что при этом темпы роста мирового валового

продукта составляли 2-3,5% в год. Это в целом указывает на снижение возможностей мирового сообщества предупреждать и парировать техногенные риски.

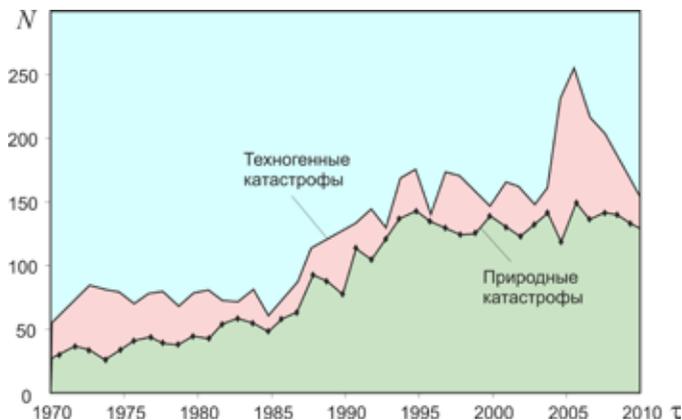


Рис. 1. Изменение во времени числа крупных техногенных и природных катастроф

В Российской Федерации в последние годы относительная устойчивость числа техногенных катастроф на уровне 350-500 в год сопровождалась ростом общих ущербов от них при постепенном снижении темпов роста ВВП (от 4 до 1% в год). С учетом отмеченных основных закономерностей экономического развития и изменения техногенных рисков для дальнейшего анализа и прогноза состояния и повышения уровня национальной и промышленной безопасности исключительно важное значение имеют базовые положения Стратегии национальной безопасности [6], федеральных законов о промышленной безопасности, о безопасности гидротехнических сооружений, о транспортной безопасности, о безопасности зданий и сооружений.

Система государственного регулирования и надзора за комплексной безопасностью, включая промышленную безопасность, на большом числе СВО, КВО, ОПО и ОТР охватывает широкий спектр технологий, сценариев аварий и катастроф, видов повреждений, условий нагружения, а также используемых при этом методов диагностики и мониторинга их состояния. В наибольшей степени продвинутыми оказались вопросы декларирования и экспертизы промышленной безопасности ОПО. В настоящее время преимущественно проявляется актуальность анализа рисков тяжелых катастроф для критически (КВО) и (СВО) стратегически важных объектов. Возможности расчетных оценок рисков при этом, к сожалению, пока крайне низки (менее 0,01%). Предельно опасные угрозы безопасным условиям эксплуатации этих объектов техносферы оцениваются по величинам критических рисков $R_c(t)$ как от единичных неблагоприятных событий с тяжелыми ущербами $U(t)$ даже при малых вероятностях $P(t)$, так и от различных их сочетаний с варьируемыми ущербами $U(t)$, но при более высоких вероятностях.

Как упоминалось выше, в качестве обобщающих параметров использования показателей риска для оценки условий возникновения неблагоприятных ситуаций и событий и анализа величины способного реализоваться в этих условиях ущерба в комплексной системе «техносфера — окружающая среда — человек» могут быть использованы две группы рисков:

-
- индивидуальные риски $R_{\text{н}}(t)$ неестественной потери человеческих жизней или здоровья (при возникновении техногенных аварий и катастроф, пожарах, природных явлениях и т.п.);
 - экономические риски $R_{\text{э}}(t)$, определяемые прямыми и косвенными экономическими ущербами с учетом ущербов от потери человеческих жизней и здоровья.

В рамках действующих правовых и нормативно-технических документов в сфере промышленной безопасности наибольшее применение получили индивидуальные риски $R_{\text{н}}(t)$. Вместе с тем, значительные последствия экологического и экономического характера от промышленных аварий могут возникать и при малых величинах $R_{\text{н}}(t)$. В связи с этим важными интегральными параметрами для оценки промышленной безопасности будут становиться экономические риски $R_{\text{э}}(t)$, экономические ущербы $U(t)$ и вероятности $P(t)$ неблагоприятных процессов и событий с учетом техногенных, природных и антропогенных поражающих и повреждающих факторов

Обобщение большого объема информации о возникновении чрезвычайных ситуаций на потенциально опасных промышленных объектах показало, что исключительную важность в этом случае имеет категорирование как самих таких объектов и возникающих на них чрезвычайных ситуаций, так и вызывающих их опасностей. При этом были выделены семь классов (категорий) опасных ситуаций (К1-К7) для всех основных типов потенциально опасных промышленных объектов:

К1 – локальные опасные ситуации, возникающие на отдельных агрегатах технических систем и производств и обусловленные накоплением повреждений и отказами – образованием дефектов, коррозионными повреждениями, технологическими повреждениями, с небольшими ущербами $U_i(t)$ в пределах 10^4 - 10^5 руб.;

К2 – объектовые опасные ситуации, возникающие на отдельных объектах с образованием технологических повреждений, трещин, изменений геометрической формы сечений, коррозионными язвами и т.п., с ущербами $U_i(t)$ в пределах 10^5 - 10^6 руб.;

К3 – местные опасные и чрезвычайные ситуации, возникающие на отдельных объектах с частичным повреждением объекта, его узлов и агрегатов, с ущербами $U_i(t)$ до 10^6 - 10^7 руб. и более;

К4 – региональные чрезвычайные ситуации, возникающие на наиболее опасных объектах техносферы с образованием значительных повреждений их оборудования, нанесением угроз жизни и здоровью операторов, персонала и населения, а также окружающей среде, с ущербами $U_i(t)$ до 10^7 - 10^8 руб. и более;

К5 – национальные чрезвычайные ситуации, возникающие на особо крупных и опасных объектах и промышленных предприятиях с проявлением сильных пожаров и взрывов, гибелью операторов, персонала и населения, разрушением инфраструктур и повреждением объектов природной среды, и с ущербами $U_i(t)$ до 10^8 - 10^9 руб. и более;

К6 – глобальные чрезвычайные ситуации, возникающие на крупнейших объектах промышленной инфраструктуры с нанесением ущербов населению, другим объектам и окружающей природной среде и нарушением условий жизнеобеспечения регионов и государств, использующим эти объекты; при этом экономические потери могут измеряться 10^9 - 10^{10} руб. и более.

К7 – планетарные катастрофы, возникающие при экстремальных воздействиях военного, техногенного или природного характера с тяжелыми последствиями для жизнедеятельности государств, континентов и планеты в целом.

Для категорий опасных ситуаций К1 – К7 с учетом действующих в нашей стране федеральных законов о техническом регулировании (2001 г.), о промышленной безопасности опасных производственных объектов (1997 г.) и ряда решений Совета Безопасности Российской Федерации (2003-2011 гг.) в анализ безопасности объектов техносферы вводятся названные выше четыре группы (ГО1-ГО4) потенциально опасных объектов:

ГО1 – объекты технического регулирования (ОТР);

ГО2 – опасные производственные объекты (ОПО);

ГО3 – критически важные для безопасности регионов и страны объекты (КВО);

ГО4 – стратегически важные для национальной безопасности объекты (СВО) – имеющие общегосударственное значение техногенные объекты и производства.

Интегральные риски $R_n(t)$ и $R_{сн}(t)$ при функционировании всех деталей, узлов, агрегатов и систем промышленного объекта будут складываться соответственно из рисков для отдельных категорий объектов ОТР, ОПО, КВО при $i=1, 2, \dots, 4$.

При чрезвычайных ситуациях потенциальная опасность рассматриваемых объектов, как и других объектов техногенной инфраструктуры, определяется тремя (И1-И3) основными иницирующими и поражающими источниками ЧС:

И1 – неконтролируемыми выбросами опасной энергией $E_i(t)$ (упругой, кинетической, тепловой, акустической, вибрационной);

И2 – неконтролируемыми выбросами опасных, в том числе горючих и отравляющих веществ $W_i(t)$;

И3 – опасными нарушениями и повреждениями информационных потоков $I(t)$ в системах управления и регулирования процессов функционирования летательных аппаратов и обеспечения их безопасности (поражения первичных преобразователей, систем связи, программных продуктов, систем автоматизированной защиты).

Интегральные риски $R_n(t)$ при этом определяются по выражению

$$R_n(\tau) = \sum_i P_i(\tau) U_i(\tau) \leq [R_n(\tau)] = \frac{R_{ки}(\tau)}{n_R} = m_Z Z_R(\tau) \quad (1),$$

где $P_i(t)$ – вероятности (частоты) и $U_i(t)$ – ущербы от возникших чрезвычайных ситуаций, n_R – запас по рискам ($n_R \geq 1$); $Z_R(t)$ – необходимые затраты на анализ и снижение рисков $R_n(t)$ до приемлемого (допустимого) уровня $[R_n(t)]$; m_Z – коэффициент эффективности затрат ($m_Z \geq 1$).

Эти интегральные риски по (1) будут связаны с ущербами $U_i(t)$ и вероятностями $P_i(t)$ проявления каждого из трех названных иницирующих и поражающих источников ($i=1, 2, 3$), как

$$R_n(\tau) = \sum_{i=1}^3 [R_{Ei}(\tau) + R_{Wi}(\tau) + R_{Ii}(\tau)] \quad (2).$$

При анализе безопасности и рисков эксплуатации промышленных объектов следует учитывать три основных фактора (Ф1-Ф3), создающих чрезвычайные ситуации:

Ф1 – техногенный фактор, обусловленный внутренними и внешними опасными механическими, химическими и физическими факторами, включая условия и параметры нагруженности, состояние конструкционного материала и др.;

Ф2 – антропогенный (человеческий) фактор, обусловленный опасными действиями человека на всех стадиях жизненного цикла рассматриваемого объекта (проекти-

рование, изготовление, контроль, эксплуатация) в штатных и нештатных ситуациях (включая несанкционированные, террористические и военные воздействия);

Ф3 – природный фактор, обусловленный воздействием природных явлений.

$$R_{\text{и}}(t) = \sum_{i=1}^3 [R_{\text{чи}}(t) + R_{\text{ти}} + R_{\text{пи}}(t)] \quad (3).$$

Интегральные $R_{\text{и}}(t)$ риски аварий и катастроф по выражению (3) в общем случае обусловлены не только отдельными указанными факторами (Ф1, Ф2, Ф3), но и их различным сочетанием (социально-природно-техногенных факторов Ф1-Ф2-Ф3, природно-техногенных Ф1-Ф2, техногенно-антропогенных Ф2-Ф3) в их взаимодействии.

При создании и эксплуатации промышленных объектов должно предусматриваться введение в анализ пяти типов (Т1-Т5) штатных, аварийных и катастрофических ситуаций:

Т1 – нормальные (штатные) условия эксплуатации в соответствии с принятыми нормами и правилами;

Т2 – режимные отклонения от нормальных условий эксплуатации с проведением регламентированных диагностических и ремонтно-восстановительных работ (возникают при штатном функционировании объектов, последствия от них предсказуемые, защищенность от них достаточная);

Т3 – проектные аварийные ситуации с повреждениями узлов и агрегатов объекта, требующими остановки эксплуатации, принятия специальных решений и ремонтно-восстановительных работ (возникают при выходе за пределы штатных режимов с предсказуемыми и приемлемыми последствиями, защищенность от них частичная);

Т4 – запроектные аварийные и катастрофические ситуации с непредвиденными источниками и последствиями (возникают при необратимых повреждениях ответственных элементов с высокими ущербами и человеческими жертвами; степень защищенности от них недостаточная);

Т5 – гипотетические катастрофические ситуации, обусловленные наиболее сильными и трудно прогнозируемыми экстремальными воздействиями на объекты авиационной техники (могут возникать при непредсказанных заранее вариантах и сценариях развития с максимально возможными ущербами и жертвами; защищенность от них низкая).

Типы опасных ситуаций Т1-Т5 обусловлены указанными выше иницирующими И1-И3 источниками возникновения чрезвычайных ситуаций, аварий и катастроф, а также связаны с основными, создающими предпосылки чрезвычайных ситуаций факторами Ф1-Ф3.

При разработках комплексных методов и систем обеспечения защиты промышленных объектов от угроз техногенного, антропогенного и природного характера должны постулироваться названные выше аварийные ситуации и учитываться необходимость решения двух базовых задач:

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

При анализе возникновения опасных ситуаций (классы К1-К7, типы Т1-Т5) под-

лежит исследованию и обоснованию характер воздействия и поражения (X1-X4) от реализации аварийных и катастрофических процессов:

X1 – механические разрушения и осколочные поражения от разрушения деталей, узлов и агрегатов и примыкающих конструкций;

X2 – взрывы углеводородосодержащих, дисперсно-газо-воздушных смесей и поражения от взрывных волн;

X3 – пожары от возгорания легковоспламеняющихся веществ промышленного производства и сопутствующие им тепловые излучения;

X4 – выброс продуктов горения, отравляющих и загрязняющих веществ с предельными дозовыми и концентрационными параметрами с поражениями ими людей и окружающей природной среды.

Возникновение и развитие аварийных и катастрофических ситуаций на потенциально опасных промышленных объектах проходит через ряд последовательных стадий (С1-С5):

С1 – появление и накопление рассредоточенных многоочаговых повреждений в механических системах при штатных и нештатных режимах изготовления и эксплуатации промышленных объектов;

С2 – возникновение отказов в зонах исходных дефектов или в зонах максимального накопления повреждений деталей узлов и агрегатов, обусловленных образованием, например, течей, нарушением геометрических форм элементов несущих конструкций и т.п.;

С3 – частичные разрушения несущих элементов с образованием малых и ограниченных разрушений при штатных и нештатных режимах;

С4 – аварии на рассматриваемых объектах с образованием магистральных, объемных разрушений, выходом рабочего тела за пределы объектов, возникновением взрывов и пожаров, загрязнением окружающей среды;

С5 – тяжелые катастрофы с крупномасштабными разрушениями, и гибелью людей, и трудновосполнимыми ущербами для окружающей среды.

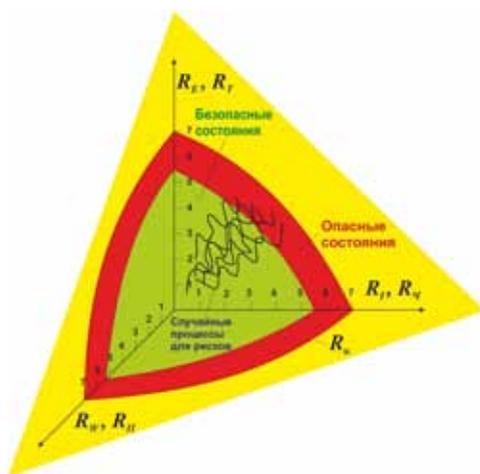


Рис. 2. Предельные поверхности критических и приемлемых рисков проектирования, создания и функционирования промышленных объектов

Анализ интегральных $R_{\text{и}}(t)$ рисков для рассмотренных видов чрезвычайных ситуаций С1-С5 может проводиться на основе выражений (1)-(3). При этом для ситуаций С5 и С4 в первую очередь должны рассматриваться экстремальные внешние техногенно-антропогенные воздействия на критически важные узлы и агрегаты рассматриваемого объекта и их компоненты, а также экстремальные повреждения несущих элементов этих объектов.

Одним из практических решений реализации фундаментальных научных исследований и прикладных разработок в области обеспечения безопасности промышленных объектов должно стать научно-методическое обоснование и построение предельных поверхностей и кривых (рис. 2) критических неприемлемых (недопустимых) $R_{\text{к}}(t)$ и приемлемых $[R(t)]$ (допустимых) рисков тяжелых аварий и катастроф, определяемых соответствующими величинами вероятностей $P_{\text{к}}(t)$ и $[P(t)]$ и ущербов $U_{\text{к}}(t)$ и $[U(t)]$.

Стратегическим приоритетом создания и функционирования различных типов (классов) промышленных объектов является удержание в построенном по компонентам присутствующих рисков, как указано выше, трехмерном пространстве допустимых, опасных и неприемлемых состояний радиуса-вектора от вероятностных интегральных составляющих рисков $R_{\text{и}}(t)$. Данный радиус-вектор, характеризующий текущее состояние рассматриваемого объекта, формируется в пространстве приемлемых рисков $R_{\text{и}}(t) \leq [R_{\text{и}}(t)]$ для заданной стадии жизненного цикла t и указанных выше классов К7-К1 опасных ситуаций в соответствии с выражениями (1) - (3):

$$R_{\text{э}}(\tau) \leq [R_{\text{э}}(\tau)] = \frac{R_{\text{кэ}}(\tau)}{n_{R_{\text{э}}}} \quad (4),$$

$$R_{\text{и}}(\tau) \leq [R_{\text{и}}(\tau)] = \frac{R_{\text{ки}}(\tau)}{n_{R_{\text{и}}}} \quad (5),$$

где $n_{R_{\text{э}}}$, $n_{R_{\text{и}}}$ - запасы по экономическим и индивидуальным рискам ($n_{R_{\text{э}}} \geq 1$).

По относительным величинам указанного радиуса-вектора $R_{\text{в}}(t) = R_{\text{в}}$ в пространстве классов чрезвычайных ситуаций К7-К1 можно и следует проводить количественное категорирование потенциальной опасности промышленных объектов с учетом источников по выражению (2) и факторов по выражению (3) с определением величин указанных рисков:

$$\bar{R}_{\text{и}} = \sqrt{\bar{R}_{\text{О}}^2 + \bar{R}_{\text{Т}}^2 + \bar{R}_{\text{П}}^2} \quad (6),$$

$$\bar{R}_{\text{и}} = \sqrt{\bar{R}_{\text{Е}}^2 + \bar{R}_{\text{В}}^2 + \bar{R}_{\text{И}}^2} \quad (7),$$

В определении соответствующих показателей рисков в выражениях (1) – (7) для промышленных объектов с целью стратегического планирования и управления промышленной безопасностью различных категорий объектов (ОТР, ОПО, КВО и СВО) могут участвовать соответствующие по научные, административные и надзорные органы; в том числе для объектов типа ОТР ими могут быть проектные и эксплуатирующие предприятия или саморегулируемые организации, для объектов типа ОПО III и IV классов

опасности – местные органы исполнительной власти или региональные органы исполнительной власти, для объектов ОПО I и II классов опасности, КВО и СВО ими могут быть Совет Безопасности Российской Федерации, отраслевые ведомства, Российская академия наук, Министерство по чрезвычайным ситуациям, Ростехнадзор, Федеральные органы исполнительной власти.

За основу анализа условия безопасной эксплуатации промышленных объектов на основе рассматриваемой концепции должны быть приняты, с одной стороны, показатели (классы, категории) возможных чрезвычайных ситуаций, а с другой – показатели категорирования самих потенциально опасных объектов. Последние могут быть представлены в виде количественных значений, определяемых из соотношения соответствующих относительных величин рисков для человеческих жизней, техносферы и окружающей среды по выражению (6) и для их компонентов по уровням опасных веществ, энергии и информационных потоков по выражению (7) – рис. 3.

В определении соответствующих показателей категорирования опасности промышленных объектов по величинам рисков и управлении этими показателями должны участвовать для различных категорий объектов соответствующие по подведомственности административные и надзорные органы, в том числе для объектов типа ОТР ими могут быть (см. рис. 3) проектные и эксплуатирующие предприятие (ПП) или саморегулируемые организации (СРО), для объектов типа ОПО – местные органы исполнительной власти (МОИВ) или региональные органы исполнительной власти (РОИВ), для объектов КВО и СВО ими являются Совет Безопасности Российской Федерации (СБ РФ), отраслевое ведомство, Российская академия наук (РАН), Министерство по чрезвычайным ситуациям (МЧС), Ростехнадзор (РТН), Федеральные органы исполнительной власти (ФОИВ).

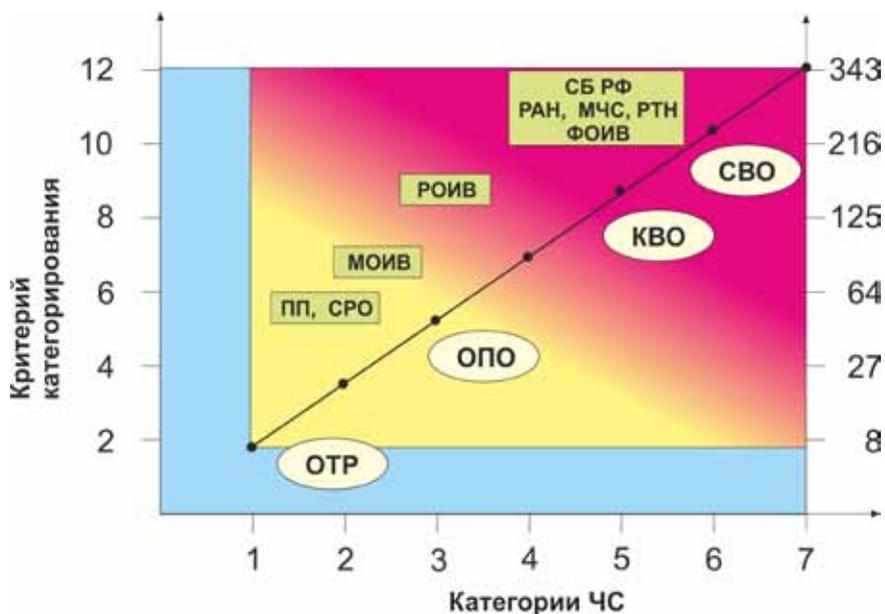


Рис. 3. Категорирование объектов и чрезвычайных ситуаций по величинам рисков

Базовые параметры ущербов $U_i(t)$ и вероятностей $P_i(t)$ интегральных рисков $R_i(t)$ по выражению (1) позволяют построить кривые их критических, неприемлемых $P_k(t)$, $U_k(t)$ и приемлемых $[P(t)]$, $[U(t)]$ значений (см. рис. 4).

При этом для соответствующих областей ущербов $U(t)$ и классов (К1-К7) аварий и катастроф в приоритетном порядке должны быть выделены группы (ГО4-ГО1) потенциально опасных промышленных объектов.

Таким образом, для решения комплексных вопросов безопасности и защищенности потенциально опасных и важных для жизнедеятельности страны промышленных объектов от аварий и катастроф техногенного, антропогенного и природного характера первоочередному анализу подлежат следующие, начинающихся от наиболее значимых, цепочки последовательностей:

- группы ГО4→ГО3→ГО2→ГО1 потенциально опасных производственных объектов СВО→КВО→ОПО→ОТР;
- классы чрезвычайных (аварийных и катастрофических) ситуаций К7→К6→К5→К4→К3→К2→К1;
- факторы возникновения опасных ситуаций Ф3→Ф2→Ф1;
- источники аварий и катастроф И3→И2→И1;
- типы аварийных и катастрофических ситуаций Т5→Т4→Т3→Т2→Т1;
- характер действия поражающих процессов Х4→Х3→Х2→Х1;
- стадии возникновения и развития опасных процессов и явлений С5→С4→С3→С2→С1.

Действующая в настоящее время традиционная правовая и нормативно-техническая база ориентирована в основном на рассмотрение указанных выше цепочек в обратном направлении, начиная от простых и заканчивая тяжелыми: ГО1→ГО4, К1→К7; Ф1→Ф3; И1→И3; Т1→Т5; Х1→Х4; С1→С5. Это обстоятельство привело к тому, что для анализа каждой тяжелой аварии или катастрофы, стоящей в конце цепочки, создавались специальные комиссии, и разрабатывались специальные компенсирующие диагностические, ремонтно-восстановительные мероприятия, и принимались соответствующие решения для каждой тяжелой аварии или катастрофы. При этом взаимоувязанный системный подход к этой процедуре практически отсутствовал.

Поэтапный переход от указанных традиционных цепочек последовательностей к новым позволит в приоритетном порядке разработать и использовать методы, системы, средства анализа тяжелых аварий и катастроф (классов К7, К6, К5) на критически (КВО) и стратегически (СВО) важных промышленных объектах (ГО4, ГО3) для наиболее опасных их типов (Т5, Т4) и стадий (С5, С4). На базе этого анализа путем упрощений можно рассматривать более простые случаи создания и функционирования отдельных узлов и агрегатов этих объектов (ОТР, ОПО).

Научные исследования и методические разработки по поддержанию и повышению уровня эксплуатационной безопасности промышленных объектов по критериям прочности, надежности и ресурса призваны обеспечить приемлемый уровень их защищенности. Если проанализировать представленные на рис. 4 данные о структуре и подходах к нормированию расчетов по обеспечению безаварийной эксплуатации рассматриваемых объектов, то можно видеть те проблемы, которые на протяжении многих лет решались практически во всех отраслях техники.

Если рассмотреть их в направлении развития традиционных подходов к нормированию (т.е. справа налево), то можно увидеть исходные проблемы: прочность, ресурс, износостойкость, хладостойкость, сейсмостойкость. Эти проблемы были очевидны, и до 70-х годов прошлого столетия на основе результатов их решения в нашей стране была создана соответствующая нормативная база (ОСТы, ГОСТы, СНиПы, нормы). Далее, вплоть до второго десятилетия XXI века, происходило углубление научного понимания новых и актуальных проблем качества и работоспособности конструкций через введение в рассмотрение проблем надежности, живучести, безопасности и риска. Проблема нормирования защищенности от аварий и катастроф будет решаться на последующей стадии. На рис. 4 кривой показана степень применения на практике действующей и перспективной нормативно-технической и исследовательской базы.

Вопросы нормирования прочности в рамках сложившихся традиционных методов решаются в достаточно полной мере (от 10^{-1} до 10^0 случаев расчетов). По мере усложнения решаемых задач в направлении от прочности и ресурса до риска и защищенности степень применяемых методов расчета резко снижается (от 10^{-4} до 10^{-3} случаев). Восстановление до приемлемого уровня степени применения новых методов (до 10^0) в общей структуре нормативно-технических документов по использованию новых критериев – надежности, живучести, безопасности, риска – это то направление, которое предстоит реализовать применительно к объектам авиастроения. В решении этих проблем важную роль играют федеральные законы о промышленной безопасности (ПБ), транспортной безопасности (ТБ), о чрезвычайных ситуациях (ЧС), о ядерной и радиационной безопасности (ЯРБ).



Рис. 4. Структура и направления развития методов нормирования

Первая, основная задача перехода от традиционных методов к новым методам состоит в том, что при решении проблемы обеспечения условий безопасной эксплуатации промышленных объектов следует двигаться по рис. 4 не в традиционном направлении справа налево, а в перспективном направлении — слева направо, т.е. изначально решать задачи достижения заданных рисков и заданной защищенности от возможных аварий и катастроф и требовать применения таких норм расчетов и испытаний, которые обеспечивали бы приемлемый уровень этих заданных параметров защищенности и риска рассматриваемых объектов.

В целях уменьшения вероятности возникновения нештатных ситуаций (с соответствующим повышением рисков их реализации) и снижения возможного ущерба от их проявления для потенциально опасных промышленных объектов должен быть реализован комплекс мероприятий, учитывающий следующие обстоятельства:

- характер источников опасности и особенностей их проявления;
- допустимые режимы эксплуатации применительно к каждой фазе нарастания рисков;
- возможности применения средств парирования угроз на основе результатов комплексной диагностики и мониторинга рассматриваемого объекта.

Решение указанных задач может быть обеспечено путем создания и практического применения комплекса современных методов и средств контроля параметров состояния машины или конструкции при возможно широком диапазоне их изменения (в том числе — и за пределами штатных режимов), систем мониторинга и анализа данных об окружающей среде и возможных внешних воздействиях на систему, использование банков данных и баз знаний по сценариям развития нештатных ситуаций, критериям их оценки и алгоритмам превентивных действий систем парирования чрезвычайных ситуаций по программируемым командам системы мониторинга рисков.

Таким образом, на основе современных требований к анализу безопасности и рисков для объектов техносферы с учетом классов опасностей при реализации все-



Рис. 5. Государственная система обеспечения безопасности и защищенности промышленных объектов

го комплекса государственных мероприятий в данном направлении (рис. 5), включая нормирование, декларирование, экспертизу и фундаментальные исследования, являются базовые положения законодательства о стратегическом планировании, ориентированные на два приоритета – социально-экономическое развитие и обеспечение национальной безопасности. Эти приоритеты будут достигаться через государственные, федеральные целевые и специальные программы, проблемные планы Российской академии наук. Главными результатами работ будут федеральные законы, указы Президента, федеральные нормы и правила, технические регламенты, стандарты Российской Федерации, Таможенного, Экономического союзов и Союзного государства Беларуси и России. При этом следует отметить, что анализ и обеспечение условий безопасной эксплуатации промышленных объектов на основе концепции риска, создание и использование системы мониторинга рисков для оценки состояния как непосредственно промышленных объектов в процессе их эксплуатации, так и «техногенно-природно-социальной» системы в целом с соблюдением современных требований к приемлемым уровням возникающих рисков и к защите рассматриваемых объектов и систем от возникновения различного характера чрезвычайных ситуаций составляют суть перехода на новый уровень государственного обеспечения комплексной безопасности, отвечающего Стратегии национальной безопасности страны.

Список использованной литературы

1. Махутов, Н.А. Критерии безопасности и рисков в проблемах функционирования, модернизации и развития техносферы. Федеральное справочное издание : Информационно-аналитическое издание. – Т. 23. – М. : Центр стратегического партнерства, 2010. – С. 239–245.
2. Махутов, Н.А. Анализ и управление экологическими рисками. Федеральное справочное издание : Информационно-аналитическое издание. – Т. 24. – М. : Центр стратегического партнерства, 2010. – С. 402–407.
3. Махутов, Н.А., Гаденин, М.М. Фундаментальные и прикладные исследования безопасности и рисков объектов энергетики. Федеральное справочное издание : Информационно-аналитическое издание. – Т. 25. – М. : Центр стратегического партнерства, 2011. – С. 439–446.
4. Махутов, Н.А., Гаденин, М.М. Техногенная безопасность: Диагностика и мониторинг состояния потенциально опасного оборудования и рисков его эксплуатации. Федеральное справочное издание : Информационно-аналитическое издание. – Т. 26. – М. : НП «Центр стратегического партнерства», 2012. – С. 307–314.
5. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты : многотомное издание / научный руководитель чл.-корр. РАН Н.А. Махутов. – М. : МГОФ «Знание», 1998–2014. – Т. 1–45.
6. Стратегия национальной безопасности Российской Федерации до 2020 года. Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 12 мая 2009 г. – № 537.
7. Воробьев, Ю.Л., Акимов, В.А., Соколов, Ю.И. Комплексная безопасность человека. – М. : ФГУ ВНИИ ГОЧС, 2011. – 360 с.

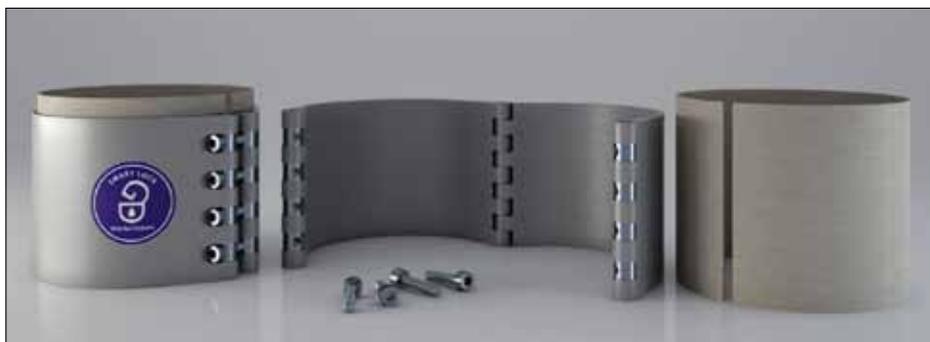
-
8. Гаденин, М.М. Многопараметрический анализ условий безопасной эксплуатации и защищенности машин и конструкций по критериям прочности, ресурса и живучести // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2012. – № 6. – С. 50–56.
 9. Махутов, Н.А., Гаденин, М.М. Техническая диагностика остаточного ресурса и безопасности : учебное пособие / под общ. ред. В.В. Клюева. – М. : Издательский дом «Спектр», 2011. – 187 с. – (Серия «Диагностика безопасности»).
 10. Гаденин, М.М. Характеристики механических свойств материалов в анализе условий достижения предельных состояний // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2012. – Т. 78. – № 2. – С. 58–63.
 11. Gadenin, M.M. Characteristics of mechanical properties of materials in studies of conditions of attainment of marginal stated // Inorganic Materials. – 2013. – Vol. 49. – No 15. – P. 1352–1356.
 12. Махутов, Н.А. Прочность и безопасность : фундаментальные и прикладные исследования. – Новосибирск : Наука, 2008. – 528 с.
 13. Махутов, Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. – Ч. 1. Критерии прочности и ресурса. – Новосибирск : Наука, 2005. – 493 с.; Ч. 2. Обоснование ресурса и безопасности. – Новосибирск : Наука, 2005. – 610 с.
 14. Махутов, Н.А., Рачук, В.С., Гаденин, М.М. и др. Прочность и ресурс ЖРД. – М. : Наука, 2011. – 525 с. – (Серия Исследования напряжений и прочности ракетных двигателей).
 15. Махутов, Н.А., Рачук, В.С., Гаденин, М.М. [и др.] Напряженно-деформированные состояния ЖРД. – М. : Наука, 2013. – 646 с. – (Исследования напряжений и прочности ракетных двигателей).
 16. Исследования напряжений и прочности ядерных реакторов : в 9 кн. / под ред. Н.А. Махутова, М.М. Гаденина. – М. : Наука, 1987–2009.
 17. Разрушение гидроагрегата № 2 Саяно-Шушенской ГЭС : причины и уроки : сборник материалов : в 3-х т. – М. : НП «Гидроэнергетика России», 2013.
 18. Совет Безопасности Российской Федерации – 20 лет. – М. : Известия, 2012. – 215 с.

НОВЫЕ МЕТОДЫ РЕМОНТА И ЗАЩИТЫ МОРСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ.

УСИЛИВАЮЩАЯ КОМПОЗИЦИОННАЯ МУФТА ДЛЯ РЕМОНТА ТРУБОПРОВОДОВ ДИАМЕТРОМ 89-1420ММ

Группа компаний «НЕФТЕГАЗДИАГНОСТИКА»
ООО МК «КАСКАД»

Усиливающая композиционная муфта для ремонта трубопроводов диаметром 89-1420 мм



Принцип работы муфты – компенсация внутреннего давления в трубопроводе за счет создания внешнего контактного давления, что обеспечивает разгрузку металла дефектного участка стенки трубы. На дефектный участок трубопровода надевается жесткий упругий композитный элемент, т.н. **лайнер** с нанесенным на его внутреннюю поверхность клеевым компаундом.

Поверх лайнера монтируется мощный силовой корпус композитной муфты и затягивается болтовым соединением **с заданным тарированным усилием**.

При обжатии силового корпуса излишки клея выдавливаются из-под лайнера, гарантированно заполняя все неровности поверхности трубы и обеспечивают надежную герметизацию наружной поверхности трубопровода.

После полимеризации компаунда вокруг трубы формируется герметичная композитная оболочка, усиленная мощным силовым корпусом

УКМТ успешно применяется для ремонтов подводных морских трубопроводов.

Применяемый клей полимеризуется при влажности до 100 % и температуре стенки трубы до минус 7 градусов.

Материал муфты не подвержен коррозии, металлические детали выполнены из нержавеющей стали.

Модификация УКМТ-А позволяет ликвидировать аварийные сквозные отверстия.



Технология УКМТ (Smart LockR) имеет серьезные преимущества по сравнению с традиционными способами ремонта:

- удобство монтажа и, соответственно, небольшое время ремонта, что особенно критично при ремонте глубоководных трубопроводов;
- нечувствительность к циклическим нагрузкам;
- отсутствует необходимость сброса давления – ремонт проводится при рабочих параметрах трубопровода;
- среднее время ремонта одного дефекта на глубине 28 метров 18 минут!



УКМТ обеспечивает эксплуатацию отремонтированного участка трубопровода без обслуживания и ремонта не менее 30 лет.



Изолирующая композиционная муфта быстромонтируемая **SmartWrap**

Предназначена для изоляции кольцевых сварных швов стальных трубопроводов диаметром 4-52 дюймов в любых условиях эксплуатации, в том числе для подводного монтажа на глубинах до 1000 м.

Конструкция муфты обеспечивает надежную, герметичную и плотную изоляцию шва и околошовной зоны сварных стыков на весь срок эксплуатации трубопровода.

Установка муфты проста и не требует специальных инструментов.

Конструктивно муфта состоит из внешней силовой оболочки, выполненной из химически и коррозионностойкого композиционного материала и оснащенной самоориентирующимися замковыми узлами из кислотостойкой нержавеющей стали, внутреннего лайнера из эпоксидного стеклопластика и слоя водостойкого эпоксидного адгезива, наносимого непосредственно перед установкой.

Внешняя силовая оболочка обеспечивает натяг и фиксацию лайнера в околошовной зоне, герметизацию стыка с изоляцией трубопровода и защиту околошовной зоны от механических воздействий.

Внутренний лайнер обеспечивает герметизацию околошовной зоны посредством эпоксидного адгезива.

Эпоксидный адгезив благодаря исключительным гидрофобным свойствам, обеспечивает заполнение микронеровностей поверхности околошовной зоны стыка и препятствует коррозии трубопровода, не допуская контакта поверхности трубопровода с окружающей средой.

Для исключения возможности коррозии все металлические части муфты выполнены из нержавеющей стали AISI316L.

Конструкция внешней силовой оболочки предусматривает монтаж на трубопровод одним человеком, затяжка замковых соединений не требует подгонки замков, что важно в условиях монтажа муфты под водой в условиях ограниченной видимости и невозможности тонких манипуляций.



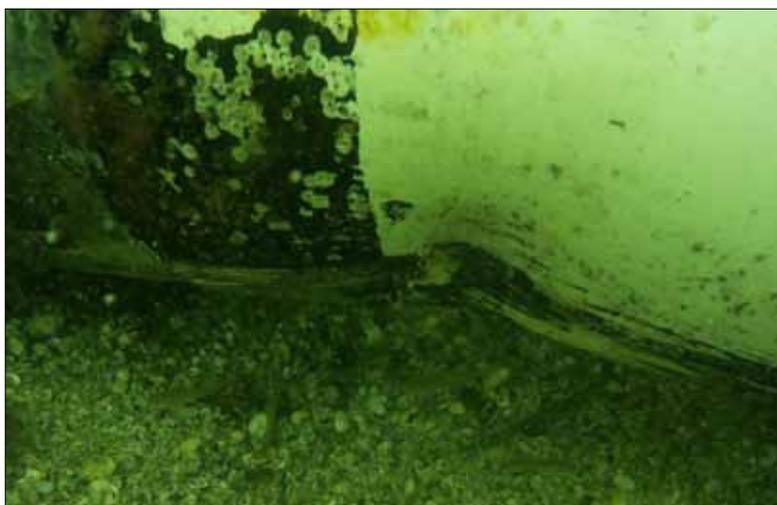
Лайнер устанавливается таким образом, чтобы валик усиления сварного стыка располагался между краями лайнера для избегания возникновения концентраторов напряжений на шве и предусматривает возможность в случае необходимости адаптации его формы под конкретные условия посредством механической обработки.

ПОДВОДНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПО УСТАНОВКЕ МУФТЫ СМАРТ (серия «БЕЛУГА») НА МОРСКОЙ ПОДВОДНЫЙ НЕФТЕПРОВОД

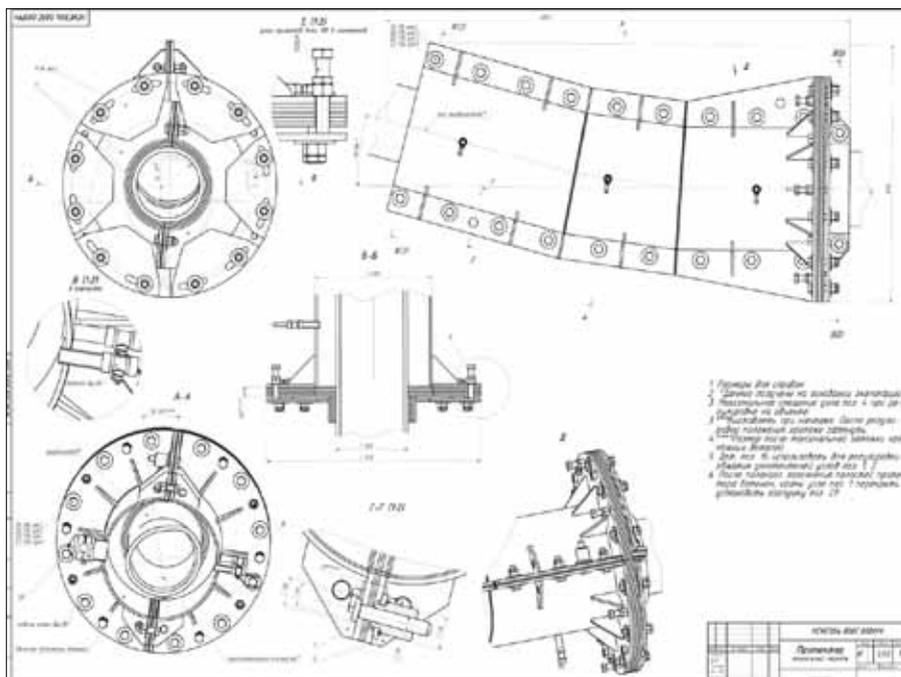
В результате обследования МПН в месте деформации было установлено, что МПН смещен в левую сторону примерно 20 метров по ходу движения среды, протяженность загиба МПН – 1000 мм, стрелка погиби – 65 мм.



В нижней части МПН с правой стороны по ходу движения среды имеется вмятина.



Для обеспечения локального упрочнения трубопровода была спроектирована и изготовлена ремонтная муфта по технологии British Gas. Для подкрепления деформированного участка МПН было принято решение установить на него муфту СМАРТ-325БС и закачать в неё методом восходящего потока бетонный раствор «Бастион» РРбт



Для подкрепления деформированного участка МПН было принято решение установить на него муфту СМАРТ-325БС и закачать в неё методом восходящего потока бетонный раствор «Бастион» РРбт.

После разработки грунта под местом установки муфты СМАРТ была опущена и установлена на штатное место нижняя часть муфты, затем была опущена верхняя часть муфты.



Изготовленная муфта СМАРТ-325БС «Белуга» весом 593 кг имеет габаритные размеры 2097 мм x 110мм x 970 мм. Для заливки использовалась сухая строительная смесь «Бастион» РРбт (сертификат соответствия № РОСС RU. АВ86. Н07350). Подача осуществлялась бетононасосом, объем заполнения смесью составляет 520 кг.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ПЕРЕВООРУЖЕНИЕ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ И НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ ПУТЕМ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

В.И. Эльманович, Т.А. Сурина
ООО «ИНТЕРЮНИС»

Введение

В соответствии с 116-ФЗ (в редакции, действующей с 01.01.2014 г.) «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» нефтеперерабатывающие и нефтехимические предприятия относятся к опасным производственным объектам (ОПО) I-го класса опасности (опасные производственные объекты чрезвычайно высокой опасности). Обеспечение безопасности таких ОПО обладает высшим приоритетом перед остальными видами деятельности компаний.

В Федеральном законе 116-ФЗ [1] определены правовые, экономические и социальные основы обеспечения безопасной эксплуатации опасных производственных объектов. Конкретные мероприятия по обеспечению промышленной безопасности прописаны в федеральных нормах и правилах [2-5].

Одним из ключевых требований промышленной безопасности к эксплуатации опасного производственного объекта является проведение в установленном порядке экспертиз промышленной безопасности зданий, сооружений и технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте, а также проведение диагностики, испытаний, освидетельствований сооружений и технических устройств.

Вместе с тем, высокая степень физического и морального износа технологического оборудования российских предприятий приводит к тому, что существующие процессы обеспечения промышленной безопасности, основанные на предписывающих требованиях формального выполнения норм и правил промышленной безопасности, не обеспечивают предотвращения крупных аварий, взрывов, пожаров, гибели людей.

На настоящий момент сложилась следующая ситуация:

- существующая система экспертизы промышленной безопасности находится в глубоком кризисе;
- уровень подготовки, квалификация эксплуатационного персонала нефтеперерабатывающих предприятий имеет тенденцию к снижению;
- мотивации к интенсивному и добросовестному труду нуждаются в пересмотре;
- кончаются советские запасы прочности оборудования, добросовестности и дисциплины специалистов экспертных организаций, эксплуатационного персонала предприятий;
- улучшить существующее положение вещей не удастся путем косметических усовершенствований (переаттестацией персонала, пересмотром инструкций, заменой одних экспертных организаций другими и т.п.);

-
- не следует рассчитывать на то, что проблемы обеспечения промышленной безопасности на нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях будут решены на федеральном уровне за счет изменения законодательства, технического регулирования, государственного надзора;
 - после кардинальных изменений в 2013 г. нормативно-правовой базы обеспечения промышленной безопасности не следует рассчитывать на то, что и в дальнейшем все вопросы обеспечения безопасности нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях будут решаться на федеральном уровне;
 - нефтегазовым компаниям следует самостоятельно разрабатывать корпоративные стандарты Контроля Технического Состояния технологического оборудования.

Эволюция стратегий обеспечения безопасности опасных производственных объектов

Историческая ретроспектива концепций прочностной безопасности оборудования, в частности, работающего под давлением, схематически представлена на рисунке 1.

На этапе 1 была осознана необходимость применения неразрушающего (в первую очередь – визуального) контроля (НК) ответственных конструкций и разработаны методы расчета на прочность основных несущих элементов таких конструкций. Этап 2 характеризуется появлением физических методов НК (ультразвукового, рентгенографического, магнитно-порошкового и капиллярного).

Интенсивное развитие науки о прочности привело к разработке эффективных методов расчета конструкций, работающих в условиях сложного напряженного состояния, повышенных температур (ползучесть), циклических (усталость) и динамических нагрузок. К середине XX века задачи этапов 1 и 2 были успешно решены. Специалисты в области прочности и дефектоскопии были оснащены достаточно мощным инструментарием.

На этапе 3 началось широкое использование этого инструментария при входном контроле поставляемой продукции и техническом диагностировании эксплуатируемого оборудования. В 70-е годы в нефтепереработке и нефтехимии основные концепции этапа 3 по техническому надзору, ревизии, отбраковке эксплуатируемого оборудования были нормативно закреплены в Правилах устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением, документах, выпущенных специализированными научно-исследовательскими институтами.

С конца 70-х годов в научно-методическом плане произошли значительные изменения:

- разработаны методы прикладной механики разрушения и механики структурно-неоднородных сред, позволяющие рассчитывать конструкции с дефектами любой сложности;
- разработаны мощные численные методы (например, метод конечных элементов) расчета на прочность конструкций любой сложности;
- появились дешевые и доступные любому исследователю персональные ЭВМ;
- разработан и мощно аппаратно оформлен метод акустической эмиссии (АЭ), позволяющий выявлять и отслеживать развивающиеся дефекты в конструкциях.

На 4-м этапе развития стратегий обеспечения безопасности были разработаны нормативно-технические документы, позволяющие проводить оценку прочности оборудования с дефектами металла и сварных соединений [6-8]. Однако заложенная

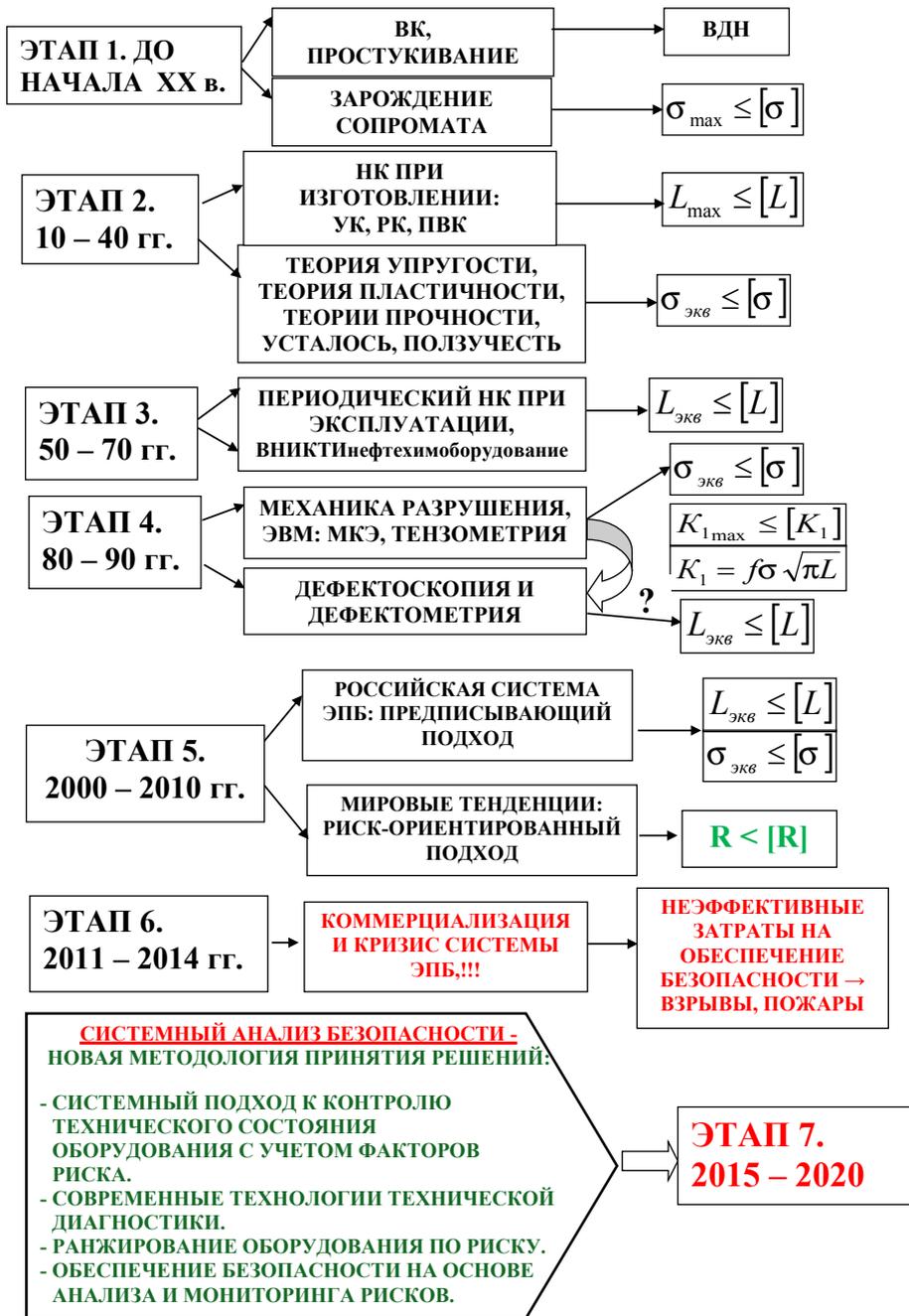


Рисунок 1 – Эволюция стратегий обеспечения безопасности ОПО

в нормативно-технических документах 70-х годов идеология обследования, ревизии и отбраковки на базе периодического НК во время эксплуатации, замера фактических толщин стенок и назначения отбраковочных толщин осталась без изменения и в ныне действующих руководящих документах [9-11].

В результате в технической диагностике нефтеперерабатывающего и нефтехимического оборудования сложилась парадоксальная ситуация: у экспертов, выполняющих техническое диагностирование оборудования, нет методики расчета прочности и долговечности оборудования с учетом результатов проведенного НК (визуально-измерительного, ультразвукового, рентгенографического и т.п.), и они фактически вынуждены эти результаты игнорировать, ограничиваясь так называемыми «экспертными оценками» технического состояния. Такая ситуация не может не приводить к случаям необоснованной перебраковки (запрету на эксплуатацию оборудования с допустимыми дефектами) и недобраковки (допуску в эксплуатацию оборудования с недопустимыми дефектами), что чревато значительными экономическими, экологическими и прочими потерями (цена «пропуска» и цена «ложной тревоги».

На 5-м этапе в России была создана Система экспертизы промышленной безопасности (ЭПБ), в задачи которой входили:

- оценка соответствия документации, технических устройств, зданий и сооружений на ОПО требованиям норм и правил промышленной безопасности;
- оценка технического состояния технических устройств, зданий и сооружений на ОПО.

Система ЭПБ базируется на предписывающем подходе. Объем, методы, периодичность контроля технических устройств (ТУ) прописаны в нормативных документах. Проведение экспертизы построено на коммерческой основе: аттестацию экспертов, лабораторий НК проводят коммерческие аттестационные центры. Лицензии на ЭПБ выдают практически любой частной компании, имеющей хотя бы одного эксперта. Тендерная политика компаний – поручить экспертизу фирмам, которые предложат минимальную цену. Государственное регулирование заключалось в утверждении заключений экспертизы в Ростехнадзоре. Отказ в утверждении основывался только на формальных признаках, безотносительно содержания заключений экспертизы.

На Западе начиная с 2000 г. пошли принципиально другим путем.

На рубеже XX и XXI века Американским нефтяным институтом (API) разработан и активно внедряется в США и Евросоюзе пакет нормативно-методических документов:

- API 580 Risk Based Inspection - 2000;
- API 581 Risk Based Inspection - 2008. RBI Technology;
- API 579-1/ASME FFS-1 Fitness-For-Service - 2007. USA Standard;
- API RP 571 Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry - 2003.

Это – новые технологии технической диагностики и переход к риск-ориентированному подходу обеспечения промышленной безопасности.

Мы сейчас, на 6-м этапе (2011-2014 гг.) наблюдаем:

- коммерциализацию и кризис системы ЭПБ;
- неэффективные затраты на обеспечение безопасности и, как следствие - взрывы, пожары, не смотря на большие ресурсы, вкладываемые в обеспечение безопасности.

В 2013 году в России произошла смена парадигмы обеспечения промышленной безопасности опасных производственных объектов (ОПО) – переход от предписывающего подхода к целеустанавливающему, риск-ориентированному (с отставанием на 10-15 лет от «наших западных партнеров»).

Переход этот, надо сказать, половинчатый.

В редакции 116-ФЗ, действующей с января нынешнего года, в ФНП «Общие требования к обоснованию безопасности опасного производственного объекта» ничего про объем, методы и периодичность КТС нет.

Цели изменения нормативно-правового поля были другие – устранение препятствий бизнесу при проектировании новых конкурентоспособных установок (пожаробезопасные расстояния, взрывозащищенное исполнение аппаратных и т.п.).

На отступление от норм и правил *на действующих установках* закон 116-ФЗ индальгенции не дает.

Назрела и перезрела необходимость перехода к 7-му этапу.

Системный анализ безопасности – новая методология принятия решений содержащей:

- системный подход к контролю технического состояния оборудования с учетом факторов риска;
- современные технологии технической диагностики, объединяющие неразрушающий контроль и науку о прочности;
- ранжирование оборудования по риску;
- обеспечение безопасности на основе анализа и мониторинга рисков.

Концепции обеспечения безопасности

Исторически в основу построения организационно-технических систем обеспечения безопасности были положены различные концепции. Некоторые положения, представляющиеся в свое время многообещающими и очевидными, были отвергнуты в ходе построения и развития систем обеспечения безопасности.

На протяжении последних десятилетий концепции обеспечения безопасности менялись достаточно динамично. Так, если в Федеральном законе «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.1997 №116-ФЗ **безопасность** определяется как **состояние защищенности** жизненно важных интересов личности и общества (*концепция абсолютной безопасности*), то в Федеральном законе №184-ФЗ «О техническом регулировании» от 27.12.2002 **безопасность** определяется как состояние, при котором отсутствует недопустимый **риск** (*концепция приемлемого риска*).

Концепция абсолютной безопасности (безаварийной эксплуатации). Эта концепция заложена в проектах оборудования и сооружений, введенных в эксплуатацию в XX веке. Отличительная черта этой концепции состояла в совпадении мер по обеспечению надежности и безопасности. После аварии на Чернобыльской АЭС (1986 г.) 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 технических устройств и

связанный с ними риск для имущества компании, здоровья и жизни персонала и населения следует снижать не повышением надежности и так высоконадежных систем, а путем совершенствования технологий защиты.

Концепция максимальной проектной аварии. Ее основная идея состоит в постулировании тех аварий, которые являются максимальными, предполагая, что создание системы защиты от этих аварий автоматически гарантирует безопасность в случае всех остальных аварий, меньших по масштабу. Очевидно, что максимальность постулируемой аварии определялась лишь существующими теоретическими представлениями проектировщика и совокупностью инженерных решений, имеющихся в его распоряжении. При этом, огромные затраты на системы защиты от максимальной проектной аварии в принципе не могут обеспечить абсолютной безопасности.

Концепция приемлемого риска. В этой концепции отправной точкой анализа безопасности является понятие риска, связанного с данной технологией, и уровня приемлемого риска. Эта концепция основана на вероятностном анализе безопасности (ВАБ). За основу (аксиому) положен тот эмпирический факт, что никакая деятельность не может быть полностью безопасной, т.е. достичь абсолютной безопасности невозможно. Методология ВАБ применяется для ОПО, уровень безопасности которых высок, а статистика аварийности вследствие этого крайне незначительна. Поэтому основным методом оценки риска аварий является теоретико-вероятностный метод, основанный на логико-вероятностных моделях в виде диаграмм причинно-следственных связей типа «дерево отказов» и «дерево событий».

Современные технологии анализа риска рассматривают риск как возможность реализации случайных событий с негативными (нежелательными) последствиями. Как количественная мера, риск есть функционал двух функций – вероятности и последствий негативного события (разрушение, разгерметизация оборудования):

$$\text{РИСК} = f(\text{ВЕР}, \text{ПОР}) \quad (1),$$

$$\text{ВЕР} = F1(Q, N, t, \tau, S) \quad (2),$$

$$\text{ПОР} = F2(U_{\text{нас}}, U_{\text{то}}, U_{\text{ос}}) \quad (3),$$

где

ВЕР – вероятность разрушения;

ПОР – негативные последствия разрушения;

Q – нагруженность конструкции;

N – количество циклов нагружения;

t – продолжительность цикла нагружения;

τ – время эксплуатации конструкции;

S – действующие механизмы повреждения.

Существо нормирования, регулирования и управления обеспечением безопасностью с использованием рисков сводится к требованию не превышения величин формирующихся и реализующихся рисков по выражениям (1) – (3) величин приемлемых рисков [R].

$$\text{РИСК} = f(\text{ВЕР}, \text{ПОР}) \leq [R] \quad (4).$$

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

Концепция контроля технического состояния оборудования с учетом факторов риска (КТС УФР)

Формулы (1) – (3) имеют не практическое, а методологическое значение, т.к. для сложных производственно-технологических систем (ПТС) вид функции $f(\text{ВЕР}, \text{ПОР})$ 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:

$$\text{РИСК} = \text{ВЕР} \times \text{ПОР} \quad (5).$$

Методические принципы обеспечения промышленной безопасности с учетом факторов риска

В крупных компаниях вопросы выделения средств на промышленную безопасность и оптимального распределения этих средств должны решаться на уровне корпоративных стандартов. В любом случае система обеспечения промышленной безопасности (СОПБ) на предприятиях компании должна строиться исходя из миссии компании, ее стратегических целей и задач.

Здесь мы излагаем лишь рекомендуемые методические принципы построения СОПБ:

1. Обеспечение промышленной безопасности путем анализа и мониторинга рисков.
2. Учет двумерного аспекта риска.
3. Определение механизмов повреждения при оценке риска.
4. Использование методов, дополняющих количественную оценку риска: анализ опасностей технологического процесса, расчеты на прочность с учетом всех

действующих нагрузок и конструктивных особенностей, расчеты по концепции «течь перед разрушением», экспертные оценки.

5. Ранжирование технологических установок по степени риска.
6. Ранжирование по степени риска технических устройств на технологической установке.
7. Выделение в отдельных единицах оборудования наиболее нагруженных и/или повреждаемых элементов.
8. Разработка и внедрение систем контроля технического состояния оборудования, направленных на уменьшение вероятности аварии.
9. Внедрение систем защиты, направленных на уменьшение негативных последствий аварии.
10. Перерасчет рисков на основе выполненного неразрушающего контроля.

Следует отметить, что СОБП будет неэффективна без внедрения современных информационных технологий.

Базовая концепция мониторинга риска

Базовая концепция мониторинга риска и управления риском с использованием формулы (5) показана на рисунке 2. События 1, 2 и 3 лежат в области неприемлемого риска, остальные события – в области приемлемого риска.



Рисунок 2 – Базовая концепция мониторинга риска и управления риском

Методологическим принципом концепции КТС УФР является двухмерный аспект риска и, соответственно, отказ от концепции приемлемого риска.

Стратегия поддержания риска на приемлемом уровне показана на рисунке 3. В такой постановке задача управления риском сводится к известной задаче системного анализа об оптимальном распределении ограниченных ресурсов.

В концепции КТС УФР выделяют некоторую область приемлемого риска (рисунок 3) и разрабатывают перечень компенсирующих и мониторинговых мероприятий, обеспечивающих функционирование ОПО в области приемлемого риска. Экономический эффект достигается как от повышения безопасности ПТС, так и от экономии ресурсов на объектах с риском ниже приемлемого.

Базовая концепция снижения рисков при ИБОР приведена на рисунке 4.

Конечно, обеспечение безопасной эксплуатации не может быть достигнуто только за счет оптимизации контроля технического состояния. Неизбежен некоторый «остаточный риск». Если этот риск выше приемлемого, разрабатываются системы эшелонированной защиты.

В задачи КТС УФР не входит разработка новых систем защиты производственно-технологической системы (ПТС). Поддержание заданного уровня промышленной безопасности ОПО обеспечивается эффективным функционированием уже имеющихся систем защиты ПТС.

Система контроля технического состояния с учетом факторов риска

В таблице 1 приведен сравнительный анализ двух методологий контроля технического состояния технологического оборудования.

Таблица 1 — Две методологии контроля технического состояния

Контроль технического состояния, основанный на плано-предписывающем подходе	Контроль технического состояния с учетом факторов риска
Объем, методы и периодичности КТС устанавливаются заранее вне зависимости от условий работы оборудования или степени риска его эксплуатации	Объем, методы и периодичности КТС оборудования определяются на основе оптимизации риска его эксплуатации
Применим для широкого круга типов оборудования и механизмов повреждения без учета фактического технического состояния конкретного оборудования	Применим для оборудования с известными механизмами повреждения с учетом фактического технического состояния и опыта его эксплуатации
Оптимизация затрат на ремонт и диагностику, повышение безопасности эксплуатации не гарантировано	Обеспечивает заданный уровень безопасности эксплуатации оборудования при общем снижении эксплуатационных затрат, за счет оптимизации затрат на ремонт и диагностику

Ключевые положения системы контроля кехнического состояния с учетом факторов риска:

- двумерный аспект анализа риска;
- учет механизмов повреждения при оценке риска;

-
- использование методов, дополняющих количественную оценку риска: анализ опасностей технологического процесса, расчеты на прочность с учетом всех действующих нагрузок и конструктивных особенностей, расчеты по концепции «течь перед разрушением», экспертные оценки;
 - ранжирование технологических установок по степени риска;
 - ранжирование по степени риска технических устройств на технологической установке;
 - выделение в отдельных единицах оборудования наиболее нагруженных и/или повреждаемых элементов;
 - анализ систем мониторинга, направленных на уменьшение вероятности аварии;
 - анализ систем защиты, направленных на уменьшение негативных последствий аварии;
 - перерасчет рисков на основе выполненного неразрушающего контроля.

Специализированное программное обеспечение (ПО) СКТС УФР разрабатывается для обеспечения промышленной безопасности с учетом необходимости стимулирования инновационной деятельности.

Специализированное программное обеспечение (ПО) СКТС УФР разрабатывается для обеспечения промышленной безопасности с учетом необходимости стимулирования инновационной деятельности.

СКТС УФР внедряется с целью:

- получения дополнительной прибыли за счет увеличения времени непрерывной эксплуатации установок и сокращения затрат на ремонты вследствие увеличения периода между остановочными (капитальными) ремонтами – межремонтного пробега;
- повышения устойчивости (бесперебойной, безопасной, безаварийной работы) оборудования предприятий за счет внедрения адекватных компенсирующих мероприятий и мониторинга, современных методов диагностики и контроля состояния оборудования установок, цехов.

Составными частями СКТС УФР являются:

1. Пакет нормативных документов: федеральные законы, федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности, национальные стандарты, своды правил, стандарты организации (СТО).
2. Компьютерный программный продукт на платформе SAP, включающий:
 - базу данных по оборудованию с оценкой степени риска по каждой единице оборудования, пополняемую по результатам технического диагностирования;
 - электронные паспорта, содержащие пополняемые сведения о техническом состоянии технологического оборудования;
 - электронные регламенты, содержащие интерактивные технологические схемы (ИТС) по установкам (технологическим блокам) с возможностями интерактивного взаимодействия с базой данных по техническому состоянию оборудования;
 - ПЛАСы по установкам (ситуационный план размещения установки с указанием зон постоянного мониторинга, максимальные радиусы поражения при авариях);

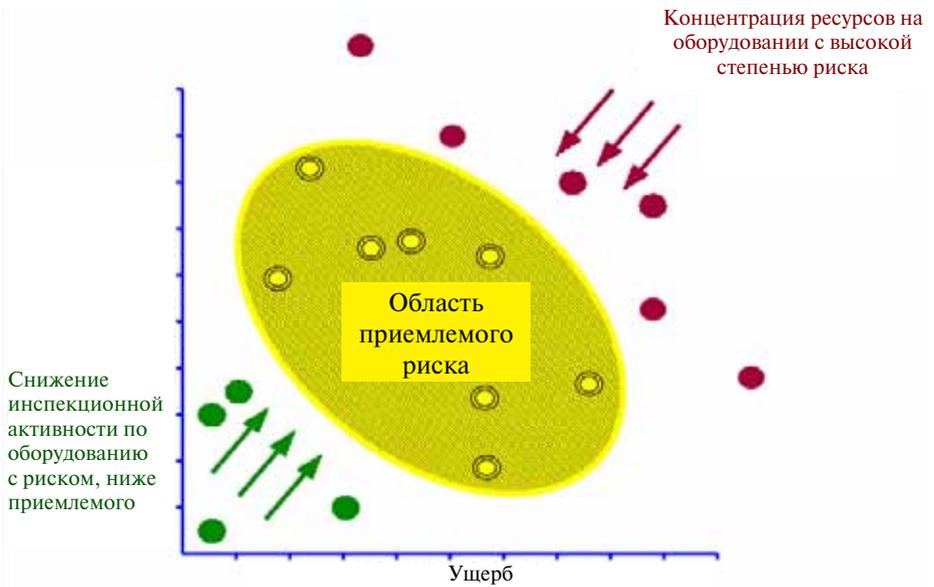
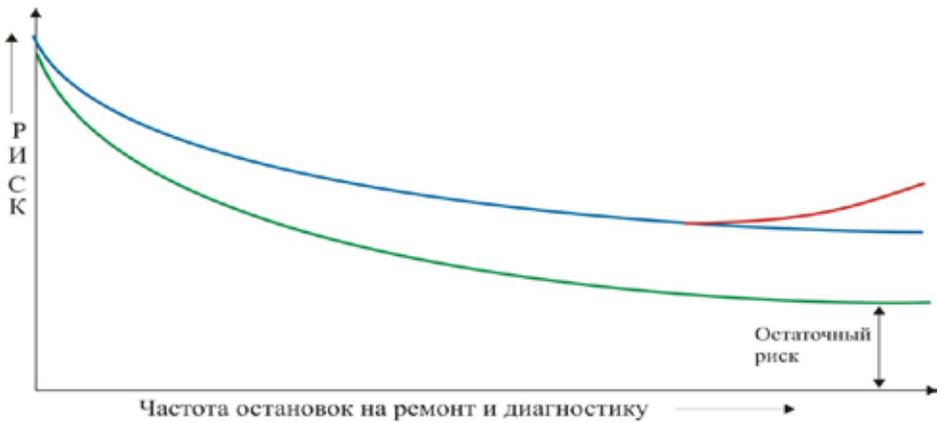


Рисунок 3 – Управление риском эксплуатации ОПО за счет перераспределения ресурсов на технические устройства повышенного риска



- Кривая риска с использованием типовых программ ремонта и диагностики.
- Кривая риска с использованием оптимизации процессов технического инспектирования на основе ИБОР.
- Кривая риска, возрастающего от избыточной инспекционной активности.

Рисунок 4 – Базовая концепция снижения риска эксплуатации ОПО за счет оптимизации процесса технического освидетельствования, ремонта и диагностики

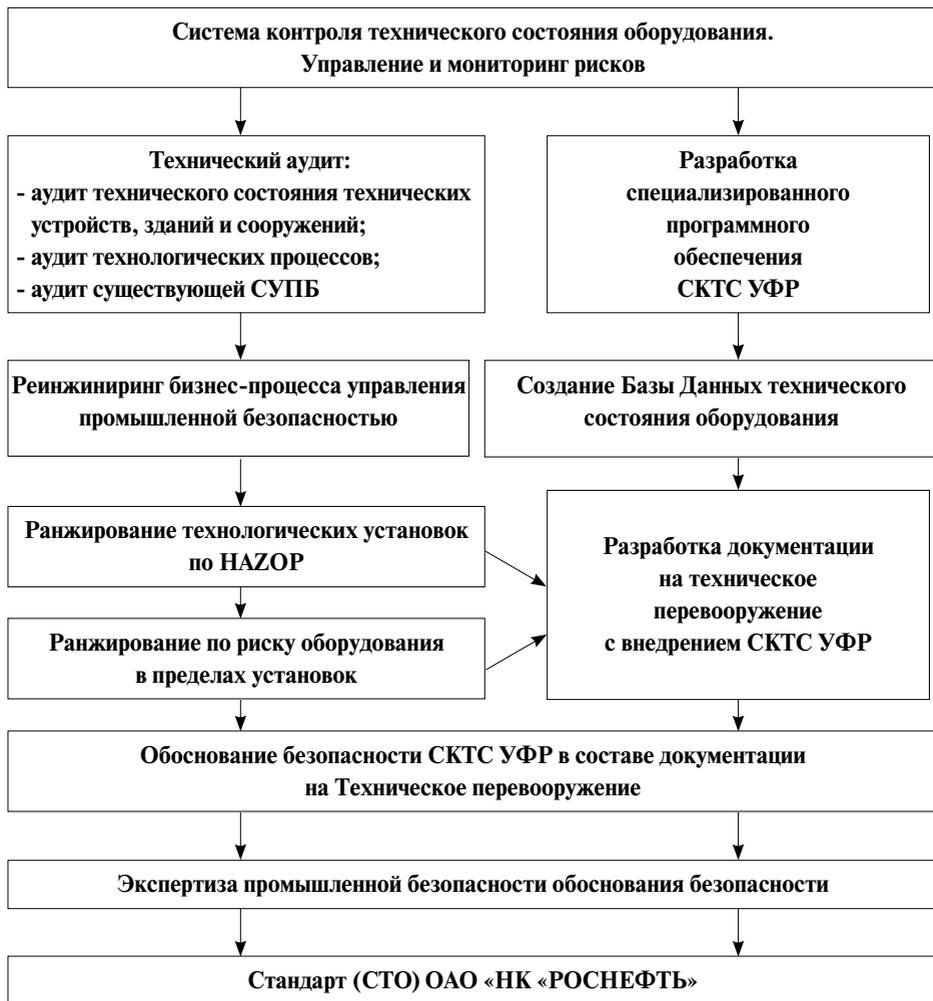


Рисунок 5 - Блок-схема системы контроля технического состояния оборудования с учетом факторов риска

- компьютерный расчет вероятности, последствий и степени риска инцидентов и аварий с учетом технического состояния оборудования;
- анализ результатов внедрения корректирующих мероприятий и мониторинга;
- компьютерный перерасчет степени риска и, соответственно, — объема, методов и периодичности контроля технического состояния;
- установленные ранги, уровни, периодичность и объем неразрушающего контроля для технических устройств;
- схемы сосудов и аппаратов, технологических трубопроводов в формате AutoCAD с зонами контроля;



Рисунок 6 — Ранжирование по степени риска установок площадки переработки нефти

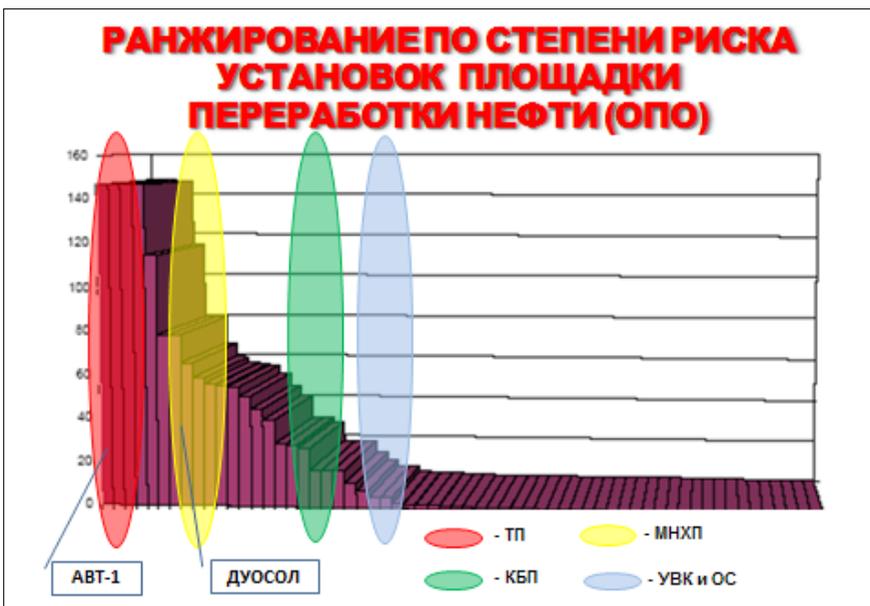


Рисунок 7 — Ранжирование по степени риска сосудов в пределах установки

- структурированные данные/базы данных (классификаторы, реестры, справочники и т.д.) собранные/созданные в СКТС УФР должны быть в дальнейшем совместимы, доступны для использования с любым выбранным позднее ИТ решением (типа ЕАМ, MES, ERP и т.д.);
- руководящие документы, стандарт предприятия.

Блок-схема рекомендуемой системы контроля технического состояния оборудования приведена на рисунке 5.

Стандарт предприятия «Система обеспечения промышленной безопасности на базе анализа и мониторинга риска эксплуатации технологического оборудования»

Объем, методы и периодичность работ по контролю технического состояния технологического оборудования определяется на основе мониторинга риска.

При мониторинге риска проводят:

- составление карт механизмов повреждения по отдельным технологическим блокам и установке в целом;
- оценку риска с использованием специализированного программного обеспечения СКТС УФР;
- ранжирование по риску оборудования в пределах технологической установки;
- ранжирование по риску несущих элементов в пределах отдельных единиц оборудования;

Примеры ранжирования по риску приведены на рисунках 6 – 7.

Выводы:

1. Кризис системы экспертизы промышленной безопасности обуславливает проведение кардинальных изменений методологии обеспечения промышленной безопасности опасных производственных объектов:
 - **внедрение новых технологий технической диагностики;**
 - **переход от предписывающего подхода к обеспечению промышленной безопасности к целеустанавливающему (риск-ориентированному);**
 - **переход от мониторинга технического состояния к мониторингу рисков.**
2. При эксплуатации ОПО по техническому состоянию эффективным является сочетание периодического мониторинга со стационарным коррозионно-диагностическим мониторингом объектов высокого риска.
3. В существующем в России нормативно-правовом поле внедрение новых технологий обеспечения промышленной безопасности возможно по следующей схеме: ранжирование по степени риска технологических установок и оборудования в пределах установки → техническое перевооружение путем создания системы контроля технического состояния оборудования → разработка обоснования безопасности (ОБ) в составе документации на техническое перевооружение → экспертиза промышленной безопасности ОБ.
4. Эффективная реализация риск-ориентированного подхода возможна путем внедрения специализированного программного обеспечения управления и мониторинга рисков.

Список использованной литературы

1. Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.1997 г. № 116-ФЗ (в редакции, действующей с 01.01.2014).
2. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств», утвержденные приказом Ростехнадзора от 11.03.2013 г. № 96.
3. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила проведения экспертизы промышленной безопасности» (Утверждены приказом Ростехнадзора от 14 ноября 2013 г. № 538).
4. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Порядок осуществления экспертизы промышленной безопасности в химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности», утвержденные приказом Ростехнадзора от 15.10.2012 № 584.
5. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила промышленной безопасности опасных производственных объектов, на которых используется оборудование, работающее под избыточным давлением», утвержденные приказом Ростехнадзора от 25.03.2014 № 116.
6. ПНАЭ Г-7-002-86 Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок / Госатомэнергонадзор СССР. – М. : Энергоиздат, 1989. – С. 61.
7. РД 26-6-87 Сосуды и аппараты стальные. Методы расчета на прочность с учетом смещения кромок сварных соединений, угловатости и некруглости обечаек.
8. Методика оценки прочности и определения возможности дальнейшей эксплуатации нефтехимических сосудов и аппаратов с местными нарушениями геометрической формы в виде вмятин и выпучин. – Волгоград : ВНИКТИнефтехимоборудование, 2006.
9. ДиОР-05 Методика диагностирования технического состояния и определения остаточного ресурса технологического оборудования нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производств. – Волгоград : ВНИКТИнефтехимоборудование, 2006.
10. СА-03-003-07 Расчеты на прочность и вибрацию стальных технологических трубопроводов.
11. СТО-СА-03-004-2009. Трубчатые печи, резервуары, сосуды и аппараты нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств. Требование к техническому надзору, ревизии и отбраковке. – Волгоград : ВНИКТИнефтехимоборудование, 2006.

АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ МЕТАЛЛОКОМПОЗИТНЫХ СОСУДОВ

А.М. Лепихин (СКТБ «Наука» КНЦ СО РАН)
А.П. Черняев (НИЦ «СибЭРА»)

Металлокомпозитные баки высокого давления (МКБВД) находят все более широкое применение в космических аппаратах. Основные достоинства таких баков заключаются в малом весе и высокой прочности. Конструктивно баки состоят из тонкого металлического сосуда (лейнера), обернутого высокопрочной композитной оболочкой. Высокие требования к надежности МКБВД определяют необходимость проведения контроля качества изготовления лейнера и композитной оболочки.

Проведенные в НАСА комплексные работы по неразрушающему контролю МКБВД, включающие шерографию, визуально-измерительный контроль внутренней поверхности, ультразвуковой и тепловизионный контроль, акустико-эмиссионный контроль, не позволяют сделать однозначный вывод о достаточности того или иного метода контроля [1, 2]. Анализ показывает, что в настоящее время нет какого-либо единственного метода контроля, обеспечивающего достоверную отбраковку МКБВД по несущей способности. Наиболее близким к решению этой задачи является метод акустической эмиссии, имеющий физическую основу, связанную с процессами деформирования и разрушения МКБВД.

Акустико-эмиссионный (АЭ) контроль относится к виду пассивного акустического контроля и основан на регистрации и анализе свободных колебаний акустических волн, возникающих в процессе пластической деформации и разрушения (роста трещин) контролируемых объектов. Области применения АЭ-контроля определяются его особенностями. Целью АЭ-контроля является обнаружение, определение координат и слежение (мониторинг) за источниками акустической эмиссии, связанными с несплошностями на поверхности или в объеме материала объекта контроля [3–5].

Независимо от НАСА и Европейского космического агентства, СКТБ «Наука» КНЦ СО РАН, совместно с НИЦ «СибЭРА» провели ряд испытаний МКБВД с использованием АЭ-контроля. Контролю подвергались как лейнеры баков, так и собственно баки в процессе гидравлических и пневматических испытаний внутренним давлением. В ходе испытаний была отработана методика АЭ-контроля и получена информация об особенностях процессов деформирования и разрушения баков. Используемая схема АЭ-контроля позволяла «прослушивать» акустические шумы как в металле лейнера, так и в композитной оболочке. Для реализации данной схемы два регистратора АЭ устанавливались на металлических фланцах и четыре регистратора устанавливались на силовой композитной оболочке (рисунок 1). Результаты АЭ-контроля обрабатывались программным комплексом используемой акустико-эмиссионной системы A-Line32D.

В качестве основного критерия опасности АЭ-сигналов в данном программном комплексе используется локально-динамический критерий.

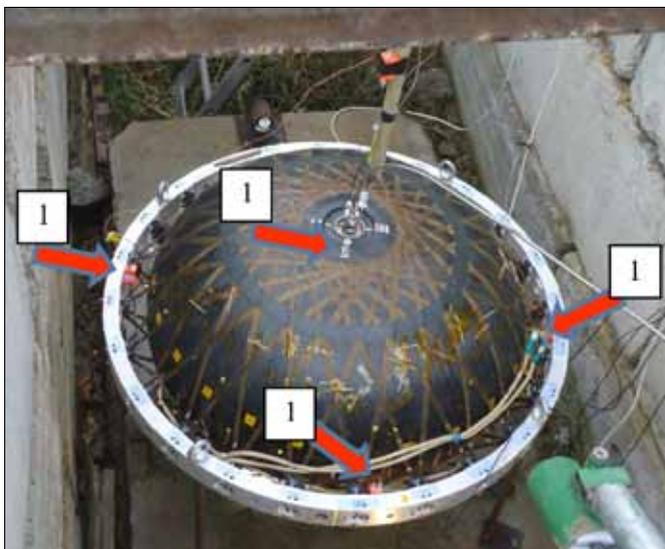


Рисунок 1 – Металлокомпозитный бак с датчиками акустической эмиссии (1) перед испытаниями

При АЭ-контроле лайнеров в заданном диапазоне давлений до 0.6 МПа выявляются в основном пассивные источники АЭ II класса по локально-динамическому критерию в зонах сварных соединений фланцев с днищами. На одном из лайнеров были обнаружены источники III класса по локально-динамическому критерию.

При АЭ-контроле баков при внутреннем давлении до 10 МПа активных, критических и катастрофических источников акустической эмиссии не выявлено. Локализация зон АЭ-сигналов наблюдается при давлении 13-15 МПа. Источники АЭ III и IV классов (по локально-динамическому критерию) фиксируются при давлениях разрушения (16-18 МПа и выше).

Основная масса АЭ-источников сосредоточена в области сварных соединений фланцев с днищами лайнера, а также в области трения поверхностей титанового лайнера и силовой композитной оболочки (рисунок 2). Характер регистрируемых АЭ-сигналов показан на рисунке 3. Как следует из рисунка 3, АЭ-контроль баков позволяет фиксировать момент начала разрушения за 45-55 секунд до визуального подтверждения момента разрушения КБВД.

Основной вопрос АЭ-контроля МКБВД заключался в определении наиболее эффективного критерия оценки опасности АЭ-сигналов для отбраковки МКБВД. При этом рассматривались такие критерии, как амплитудный критерий [МР 204-86], локально-динамический критерий [МР 204-86], интегральный критерий [МР 204-86], интегрально-динамический критерий [NDIS 2412-80], критерий кода ASME, критерий МОНРАК и др. Однако оказалось, что ни один из указанных нормативных критериев опасности АЭ-сигнала не удовлетворяет в полной мере требованиям отбраковки лайне-

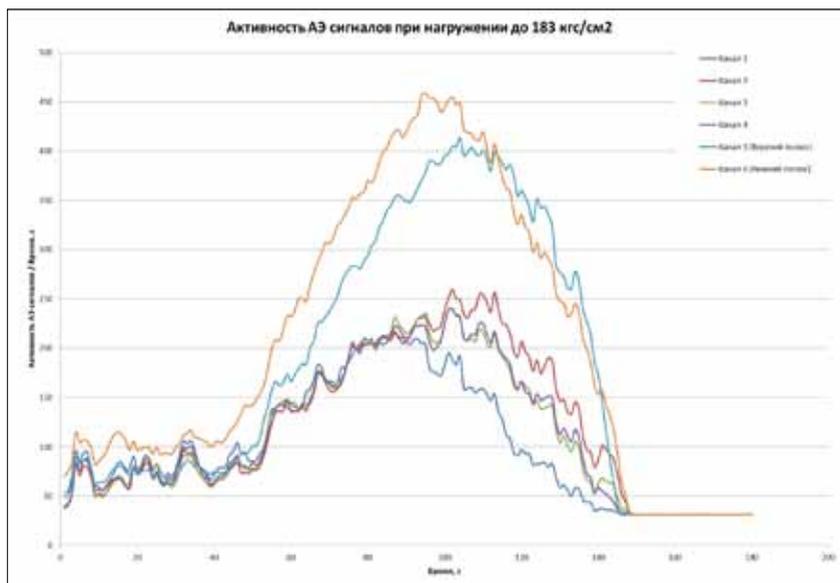


Рисунок 2 – Локация источников акустической эмиссии при повышении давления

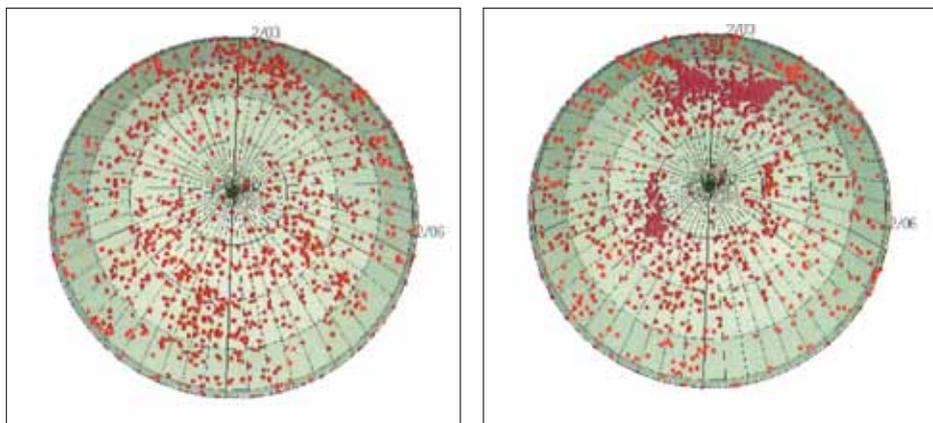


Рисунок 3 – Характер акустических сигналов при разрушении бака

ров и МКБВД. Это подтверждается результатами АЭ-контроля лейнеров, которые показали разные картины акустической активности под нагрузкой: на лейнере №134702 не выявлено активных дефектов, а на лейнере №134703 зафиксирована высокая АЭ-активность (АЭ-источники третьего класса) в зоне сварного соединения глухого фланца в диапазоне давлений от 0.5 до 0.6 МПа. При этом лейнер №134703 показал высокие прочностные характеристики в процессе испытаний на прочность до разрушения. Таким образом, используемый в программном комплексе A-Line 32D локально-динамический критерий дает консервативную оценку (перебраковку) опасности АЭ-сигналов.

Сложность задачи выбора критерия в данном случае связана не с недостатками метода или особенностями критериев, а с особенностями объекта контроля. Совместное деформирование лейнера и композитной оболочки приводит к сложной картине АЭ с наложением сигналов от источников АЭ в лейнере, композитной оболочке и контактного трения поверхностей лейнера и оболочки. Отчетливо выделение АЭ-сигналов формирующихся очагов разрушения удается получить только на заключительных стадиях деформирования и разрушения КБВД при давлениях, значительно превышающих давления испытаний на прочность и герметичность, предусмотренные конструкторско-технологической документацией.

Для более достоверной трактовки результатов необходимо провести специальный математический анализ полученных данных АЭ-контроля с установлением непосредственных связей параметров акустической эмиссии с процессами деформирования и разрушения лейнера и композитной оболочки и установить предельные значения этих параметров для отбраковки КБВД. По имеющейся информации, глубоких исследований связи параметров акустической эмиссии с конкретными технологическими дефектами тонкостенных титановых лейнеров в РФ не проводилось. При этом схема нагружения КБВД и АЭ-контроля должна быть ступенчатой.

Анализ литературных источников [6–10] показывает, что для решения указанной задачи отбраковки в качестве одного из приемлемых АЭ-критериев можно рассматривать «индекс Фелисити» FR , определяемый как отношение давление, при котором зафиксировано начало существенной акустической эмиссии на рассматриваемой ступени нагружения к давлению на предыдущей ступени нагружения.

Постепенное снижение этого показателя по ступеням повышения нагрузки свидетельствует о наличии активных процессов деформирования и разрушения в конструкции. С учетом этого, качественным браковочным признаком принимается снижение значение индекса FR по мере повышения уровня нагруженности бака. В то же время, стандарт ASME рекомендует при $FR < 0.95$ проводить отбраковку сосуда. Таким образом, уровень $FR = 0.95$ можно рассматривать как количественный критерий браковки.

Исследования [1] показывают, что зависимости FR для металла лейнера (FR) и композита (FR^c) различаются по углу наклона к оси нагрузки. Точка пересечения зависимостей ($FR^c = FR$) определяет «равноопасность» разрушения лейнера и композитной оболочки. Из этого можно полагать, что обеспечение условия $FR^c < FR'$ будет соответствовать реализации концепции безопасности «течь перед разрушением». При этом следует установить приемлемый уровень индекса Фелисити для лейнера [FR'], в полной мере реализующий его прочностные характеристики.

Следует заметить, что индекс Фелисити не может рассматриваться как исчерпывающий критерий отбраковки МКБВД. Для решения задачи разработки критериев отбраковки лейнеров и МКБВД с требуется следующее:

- 1) использовать АЭ-преобразователи на лейнере и композитной оболочке с разными диапазонами частот регистрируемых сигналов. Это позволит разделить картины АЭ для указанных конструктивных элементов и классифицировать выявляемые источники АЭ отдельно для каждого из них;
- 2) провести работы по исследованиям процессов деформирования и разрушения образцов лейнера и композитной оболочки с непрерывным АЭ-контролем в процессе нагружения. Это позволит выявить характерные особенности, как

-
- механизмов разрушения, так и связанных с этими механизмами сигналов АЭ, с идентификацией и классификацией этих сигналов по уровням опасности;
- 3) доработать программное обеспечения комплекса A-Line32D анализа АЭ-сигналов с учетом особенностей объектов АЭ-контроля (лейнера и КБВД). Используемое в настоящее время программное обеспечение разработано для обработки АЭ-сигналов, получаемых на материалах одной структуры;
 - 4) провести комплексный амплитудный и спектральный анализ АЭ-сигналов с целью определения высокоинформативных параметров, способных выделять критические стадии процесса деформирования и разрушения металлокомпонитных конструкций.

Список использованных источников

1. ASTM, Practice for Acoustic Emission Examination of Fiberglass Reinforced Plastic Resin (FRP) Tanks/Vessels, E1067 // American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA. – 2001. – 19428-2959.
2. Nondestructive Evaluation and Monitoring. Projects NASA White Sands Test Facility (WSTF) POCs: NASA WSTF: Regor Saulsberry. – (575) 524-5518.
3. Полок, А. Акустико-эмиссионный контроль // Металлы. – 9-е изд. – Т. 17. – АСМІ, 1989. – С. 278–294.
4. ГОСТ Р 52727-2007. Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования.
5. ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов.
6. De Groot, P., P. Wijnen, and R. Janssen, Real-time Frequency Determination of Acoustic Emission for Different Fracture Mechanisms in Carbon/Epoxy Composites, Composites Sci. Technol. – 1995. – 55. – P. 405–421.
7. Prosser, W.H., K.E. Jackson, S. Kellas, B.T. Smith, J. McKeon, A. Friedman, Advanced, Waveform Based Acoustic Emission Detection of Matrix Cracking in Composites, Matls. – Eval., 1995. – 53:9. – P. 1052–1058.
8. Integrity evaluation of COPVs by means of acoustic emission testing / Yoshihiro Mizutani, Kouki Saiga, Hideyuki Nakamura, Nobuhito Takizawa, Takahiro Arakawa and Akira Todoroki; Tokyo Institute of Technology, Department of Mechanical Sciences and EngiNeering. – Tokyo, Japan.
9. Optimized Software Approaches to Predict Rupture in Fracture-critical Composites and Implications for Structural Health Monitoring / Charles T. Nichols, Jess M. Waller, Regor L. Saulsberry, Kenneth L. Johnson. White Sands Test Facility, NASA Engineering and Safety Center.
10. Mizutani, Y., Morino, Y. Takahashi, T. Integrity evaluation of COPVs by means of acoustic emission testing., Proc. of 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures // Structural Dynamics, and Materials Conf. – 2003. – April 7-10. – Norfolk, Virginia, USA.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (RFMEFI60714X0038).

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 20 НА РАСТЯЖЕНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАГНИТНОЙ ПАМЯТИ МЕТАЛЛА И АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Дубов А.А., Семашко Н.А., Привалов В.Ю.
ООО «Энергодиагностика», г. Москва, Россия

Известно, что при стандартных испытаниях стальных образцов на растяжение мы получаем силовые (предел текучести $s_{0,2}$ и предел прочности $s_{вр}$) и деформационные (относительное удлинение d и относительное сужение y) характеристики материала, которые являются условными. Условными, потому что неизменными условиями являются: определенная форма образца и определенный порядок испытаний.

Кроме того, в результате таких испытаний образца мы получаем напряжения ($s_{0,2}$, $s_{вр}$), которые не являются внутренними напряжениями, возникающими на образце при деформации растяжения, они отображают всего лишь условный эквивалент напряжений – внешнюю удельную силу, приложенную к образцу конкретной формы.

Еще одной важной характеристикой механических свойств материала является предел пропорциональности – $s_{п.л.}$ (или предел упругости). Эта важная, но условно заданная характеристика имеет четкое физическое толкование: на кривой «напряжение-деформация» вблизи от условного общепринятого предела пропорциональности существует точка, характеризующаяся тем, что в ней равны приращения величин упругой и пластической составляющих продольной деформации при малом изменении нагрузки – равны производные упругой и пластической составляющих деформации по напряжению.

При обычных стандартных испытаниях на растяжение стального образца на регистрирующем устройстве разрывной машины получают диаграмму «напряжение-деформация» (s - e), на которой видны значения $s_{0,2}$ и $s_{вр}$. Значение предела пропорциональности $s_{п.л.}$ на указанной диаграмме определить невозможно.

Рассмотрим возможности методов магнитной памяти металла (МПМ) и акустической эмиссии (АЭ) при определении указанных механических характеристик на примере испытаний на растяжение отдельных стальных образцов.

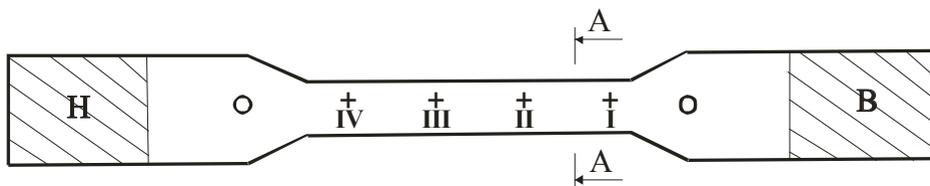


Рис.1 – Форма и размеры образца: В – верхний зажим; Н – нижний зажим; I, II, III, IV – номера трехкомпонентных датчиков (H_x , H_y , H_z); + – места установки датчиков МПМ; о – места установки датчиков АЭ; А-А – сечение образца

На рис.1 показаны форма и размеры образцов из стали 20, на которых выполнялись сопоставительные исследования.

Испытания образцов на растяжение выполнялись одновременно с измерением собственного магнитного поля образца с использованием нескольких трехкомпонентных датчиков, установленных вдоль рабочей части образца вблизи его поверхности с равным расстоянием между центрами датчиков (рис.1).

Для регистрации и обработки акустических импульсов применялась акустико-эмиссионная система СДС, которая включает в себя системный блок и персональный компьютер с программным обеспечением (ПО «Maestro»).

Датчики МПМ подключались к специализированному магнитометру типа ИКН-5М-32 с регистрирующим устройством и блоком памяти. Датчики АЭ устанавливались между зажимами испытательной машины и рабочей частью образца (см. рис.1) и подключались к регистрирующему устройству. С заранее заданной скоростью деформации к образцу прикладывалась нагрузка растяжения вплоть до его разрушения. На регистраторе разрывной машины строилась диаграмма нагрузка–удлинение « $P-\Delta l$ » с дальнейшим ее переводом по известным алгоритмам в диаграмму напряжение–деформация « $\sigma-\epsilon$ ».

На рис.2 показана диаграмма « $\sigma-\epsilon$ », построенная по результатам испытания одного из образцов из стали 20 на растяжение. Здесь же на рис.2 представлен график изменения результирующего магнитного поля $|\Delta H|$ в зависимости от деформации ϵ .

При этом изменение результирующего магнитного поля $|\Delta H|$, учитывающего относительное изменение состояния образца по отношению к исходному, рассчитывалось по результатам измерения трехкомпонентным датчиком в ближайшей точке к месту разрыва образца с использованием алгоритма:

$$|\Delta H| = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}.$$

Далее по графику, представленному на рис.2, делалось сопоставление, и определялись значения $|\Delta H|$, соответствующие пределу текучести $|\Delta H|_T$, пределу прочности

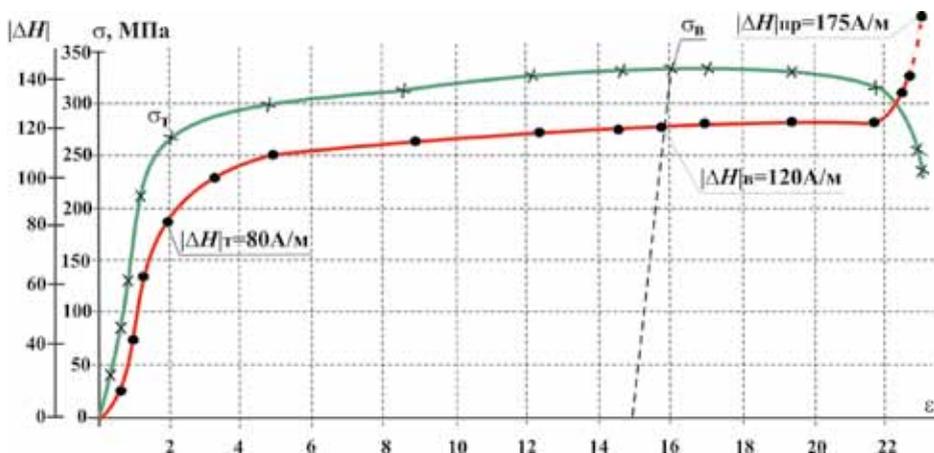


Рис.2 – Диаграммы $\sigma=f(\epsilon)$ (—x—) и $|\Delta H|=f(\epsilon)$ (—•—)

$|\Delta H|_в$ и предельному значению напряжений в шейке образца в момент его разрушения $|\Delta H|_{пр}$.

Используя полученные в результате испытаний образца значения $|\Delta H|$, соответствующие механическим параметрам $s_t, s_b, s_{пр}$, определялось предельное значение магнитного показателя $m_{пр}$ по соотношению:

$$m_{пр} = \frac{|\Delta H|_в}{|\Delta H|_т} = \left(\frac{\sigma_b}{\sigma_t} \right)^2 \quad (1)$$

или

$$m_{пр} = \frac{|\Delta H|_{пр}}{|\Delta H|_в} = \frac{\sigma_{пр}}{\sigma_b} \quad (2),$$

где $s_{пр}$ – истинное значение напряжений в зоне максимального сужения образца (в «шейке»).

Подставляя численные значения магнитных и механических параметров из результатов испытаний образца (рис.2) в соотношения (1) и (2), получаем:

$$m_{пр} = \frac{120 \text{ А/м}}{80 \text{ А/м}} = 1,5 \approx \left(\frac{330 \text{ МПа}}{270 \text{ МПа}} \right)^2 = (1,22)^2 \cong 1,49 \quad (1),$$

$$m_{пр} = \frac{175 \text{ А/м}}{120 \text{ А/м}} = 1,46, \quad \sigma_{пр} = 1,46 \times \sigma_b = 1,46 \times 330 \cong 482 \text{ МПа} \quad (2).$$

Численные значения соотношений (1) и (2), полученные при разных уровнях напряжений и деформаций, оказались примерно равными с незначительной погрешностью:

$$\frac{1,49 - 1,46}{1,49} \times 100\% \cong 2\%.$$

Энергетические соотношения (1) и (2), полученные при испытании образца, предлагается использовать при определении предельного значения $m_{пр}$ непосредственно на оборудовании, изготовленного из того же материала, что и образец.

Энергетическое соотношение (1), полученное по параметрам акустической эмиссии, оказалось примерно равным энергетическому соотношению, полученному по параметрам магнитной памяти металла. Полученный результат можно объяснить следующим образом. При рассмотрении соотношения (1) по результатам испытаний образца на растяжение по методу МПМ в расчет брались значения магнитного поля и его изменения, зафиксированные в ближайшей точке измерения к месту разрыва образца, т.е. к локальному месту неравномерной деформации. Поэтому для объективного сопоставления энергетических параметров метода МПМ и метода АЭ были рассмотрены результаты измерений параметров АЭ (суммарного счета импульсов – ΣN

и суммарной энергии – ΣE) именно в области неравномерной деформации образца (области «шейки»).

Выводы

1. Полученные результаты испытаний образцов на растяжение с использованием методов МПМ и АЭ выявили одинаковую энергетическую связь используемых параметров, соответственно, магнитных и акустических с механическими характеристиками металла – s_t и s_b .

2. В результате испытаний образцов на растяжение впервые получено энергетическое соотношение между параметрами АЭ (суммарным счетом импульсов – ΣN и суммарной энергией – ΣE) и механическими характеристиками металла s_t и s_b . Использование данного соотношения на практике позволит делать количественную оценку предельного состояния металла при диагностике реального оборудования.

3. Метод МПМ по сравнению с методом АЭ показал преимущество в локализации на образце зоны концентрации напряжений (зоны будущей «шейки») еще на этапе до предела текучести ($\sim 0,5, 0,6s_t$).

4. По результатам фиксирования импульсов АЭ на стадии деформации образца вплоть до предела текучести сложно различить сигналы, связанные с зажимами образца в испытательной машине, от сигналов на рабочей части образца.

5. Выявлена возможность взаимной дополняемости методов МПМ и АЭ при совместном их использовании на практике. Методом МПМ возможно на более раннем этапе (на уровне $\sim 0,5, 0,6s_t$) выявлять зону максимальной концентрации напряжений и деформации, и затем в этой зоне с точностью до 1 мм можно устанавливать датчики АЭ для выполнения мониторинга.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ТОЛЩИНОМЕТРИИ В ЗАВОДСКИХ УСЛОВИЯХ

Терентьев Д.А.

Введение

Большая часть акустико-эмиссионных систем работает в диапазоне частот от 10 до 500 кГц. Данный частотный диапазон используется для АЭ-контроля, поскольку лишь на нем одновременно удовлетворяются 2 следующих требования: во-первых, затухание акустического сигнала мало настолько, что полезный сигнал может распространяться на дистанции до нескольких десятков метров, во-вторых, уровень шумов низок по сравнению с полезными сигналами. Уникальные свойства указанного частотного диапазона, позволяющие быстро проводить контроль больших площадей объекта малым количеством датчиков, были бы полезны не только для АЭ-контроля, т.е. пассивного метода акустического контроля, но и для активных методов контроля. Особо перспективным является совмещение в одном устройстве двух указанных методов контроля.

Одной из наиболее актуальных задач неразрушающего контроля является обнаружение коррозионного поражения объекта и определение его степени.

Как правило, в качестве количественной характеристики поражения объекта применяются значения остаточной толщины стенки и площади коррозионных повреждений. Для их определения обычно используются ультразвуковые толщинометры, позволяющие производить локальные измерения толщины стенки. Недостатками такого способа НК являются высокая трудоемкость контроля больших по площади объектов, необходимость снятия изоляции на всей контролируемой области, невозможность контроля толщины участков объекта, к которым отсутствует физический доступ. Эти недостатки приводят к тому, что измерения толщины, как правило, проводятся на небольших по площади участках контролируемого объекта, в результате чего степень коррозионного повреждения определяется с большой погрешностью, появляется вероятность пропуска коррозионного дефекта, увеличивается степень субъективности контроля, кроме того, значительные по площади участки объектов остаются вовсе не обследованными. Следует также отметить сложность организации мониторинга больших по площади объектов методами ультразвуковой толщинометрии.

Таким образом, актуальной является задача разработки метода, позволяющего проводить не точечный, а интегральный контроль толщины, т.е. получать данные о значениях толщины стенки в некоторой области объекта при помощи датчиков, установленных по периметру этой области. Для решения поставленной задачи акустическими методами необходима передача сигнала по стенке объекта на дистанции до не-

скольких метров. Это требует перехода от характерных для обычных УЗ-толщиномеров частот порядка нескольких мегагерц к указанной выше области частот 10–500 кГц.

Принципы работы метода

Компанией «ИНТЕРЮНИС» разработан метод интегрального контроля и мониторинга толщины стенки, основанный на явлении зависимости групповой скорости акустических волн Лэмба от произведения частоты сигнала и толщины стенки. Метод может быть реализован на базе стандартных АЭ-систем и преобразователей АЭ. Принципы и схема работы следующие (рис. 1). На объекте на расстоянии нескольких метров или десятков метров друг от друга устанавливаются 2 преобразователя АЭ, служащие в качестве излучателя и приемника акустических сигналов. На излучающий преобразователь подается электрический дельта-импульс, в результате чего преобразователь АЭ испускает импульсный (длительностью порядка микросекунды) и широкополосный (с частотами в десятки и сотни килогерц) акустический сигнал. Сигнал распространяется по стенке объекта в виде комбинации волн Лэмба и регистрируется вторым преобразователем АЭ, удаленным на несколько метров. Рассчитывается спектрограмма принятого сигнала, т.е. частотно-временное преобразование осциллограммы. Обработка спектрограммы позволяет с высокой точностью определить времена прихода различных частотных составляющих сигнала. Время прихода различных частотных составляющих волн Лэмба следующим образом (рис. 2) зависит от графика значений толщины на отрезке между ПАЭ:

$$t(f) = \begin{cases} t_0 + \int_0^L \frac{dx}{v_{ГР S_0}(f h(x))}, & \text{для волны } S_0 \\ t_0 + \int_0^L \frac{dx}{v_{ГР A_0}(f h(x))}, & \text{для волны } A_0 \end{cases} \quad (1)$$

и формирует на спектрограмме т.н. дисперсионные кривые. Отсюда следует, что анализ зависимости времени прихода волн Лэмба от частоты, т.е. анализ спектрограммы, позволяет получить информацию о значениях толщин на отрезке между ПАЭ. Здесь $v_{ГР}$ – групповая скорость волны Лэмба, t_0 – момент излучения, L – расстояние между излучателем и приемником.

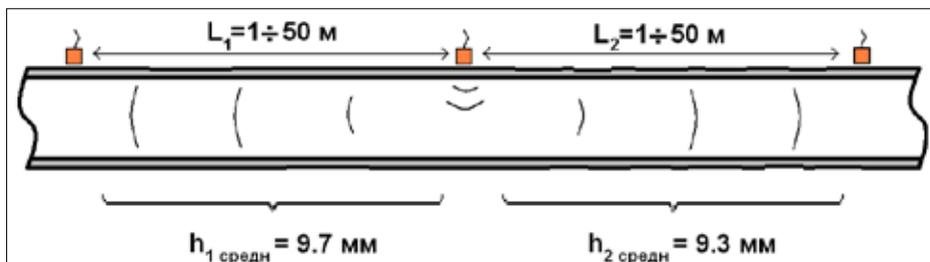


Рис. 1. Расположение излучателя и приемников на объекте контроля и значения средних толщин между ними

Специализированная процедура сбора данных для проведения интегральной толщинометрии была добавлена к возможностям выпускаемого компанией «ИНТЕРЮНИС» портативного универсального прибора «UNISCOPE». Для расчета и обработки спектрограмм АЭ-сигналов применяется разработанное компанией «ИНТЕРЮНИС» программное обеспечение «A-Line OSC Processing» (рис. 3). Процесс обработки спектрограммы и определения толщины стенки может проводиться как вручную, так и в автоматическом режиме при помощи специально разработанной модификации преобразования Хафа.

Для тестирования работы метода было проведено несколько серий экспериментов.

1-я серия экспериментов: постоянная толщина

1-я серия экспериментов проводилась на объектах с постоянной на отрезке между ПАЭ толщиной стенки.

Использовались выведенные из эксплуатации участки газопровода, а также вырезанные участки труб без изоляции в лабораториях ЗАО «Дигаз» и МГТУ им. Н.Э. Баумана (рис. 4). Объекты имели

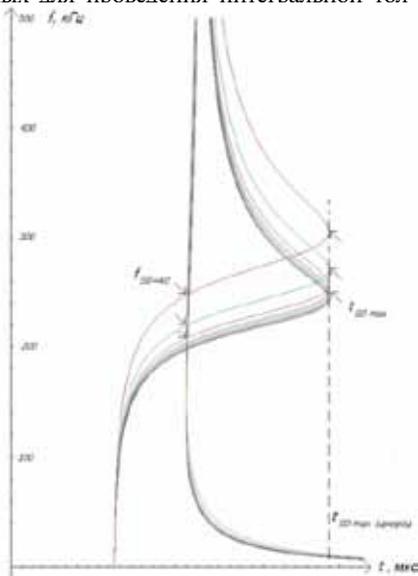


Рис. 2. Зависимость от толщины стенки объекта графиков времени $t(f)$ прихода различных частотных составляющих сигнала, излученного в виде дельта-импульса. Случай равномерной толщины

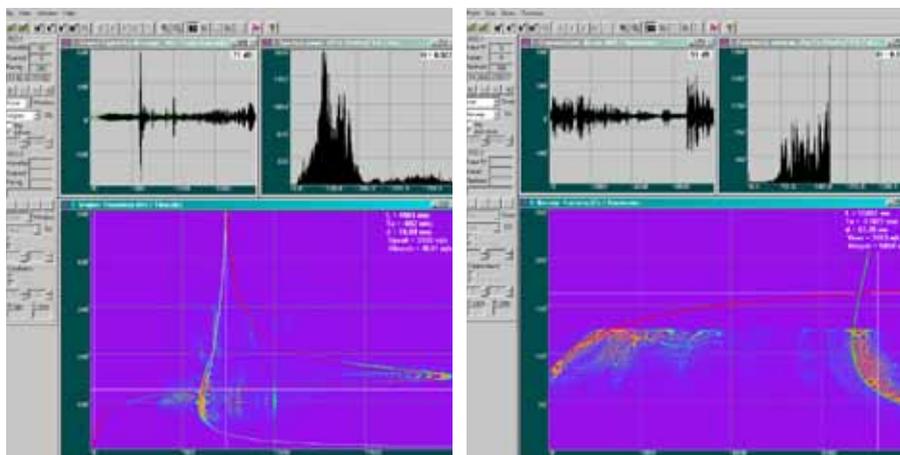


Рис. 3. Программное обеспечение «A-Line OSC Processing». Спектрограммы сигналов, дисперсионные кривые и результаты измерения интегральной толщины на участках различных газопроводов

протяженность 2.4 м и больше, толщину стенки 8–17 мм, диаметр 500–1220 мм, исследовались как объекты с изоляцией, так и без нее.

Было выявлено, что точность определения значений толщины в хороших условиях может достигать 1%. Обнаружено, что метод работоспособен во всем обследованном диапазоне толщин. Выявлено, что дистанция между 2 ПАЭ должна быть не менее 0.5–1 м, поскольку лишь в этом случае различные составляющие дисперсионных кривых достаточно отделены друг от друга по оси времени. Также обнаружено, что максимальная дистанция между 2 преобразователями ограничивается затуханием акустического сигнала и для труб в хорошем состоянии доходит до 12 м при наличии изоляции и до 56 м на трубопроводах со снятой изоляцией (рис. 4). Эксперименты показали, что сварные швы не оказывают влияния на процесс измерений. Было выявлено, что при анализе спектрограмм с трубопроводов существенную проблему составляют сигналы, приходящие не по кратчайшим путям, а по винтовым линиям, один или несколько раз огибающим трубу. Наличие таких сигналов приводит к появлению на спектрограмме одной или нескольких дополнительных кривых, которые, в отличие, например, от электрических наводок, не всегда отличимы по своей форме от истинных дисперсионных кривых.

2-я серия экспериментов: размер контролируемой зоны

2-я серия экспериментов была посвящена определению размеров зоны между ПАЭ, значения толщины в которой влияют на результаты измерений. На АРП «Сысерт» (ОАО «Газпром», Свердловская обл.) был поставлено 2 эксперимента на выведе-



Рис. 4. 1-я серия экспериментов на объектах с постоянной на отрезке между ПАЭ толщиной стенки

денных из эксплуатации участках трубопровода длиной порядка 10 м, диаметром 1020 мм и толщиной стенки 9 и 12 мм.

В первом эксперименте (рис. 5) при помощи угловой шлифовальной машины на трубопроводе создавался искусственный дефект, представляющий собой утонение размером 1700x130 мм и остаточной толщиной стенки от 85% начальной на первой стадии эксперимента до 55% в конце эксперимента. Преобразователи АЭ располагались сбоку от дефекта на различном удалении от его оси.

Во втором эксперименте сбоку от отрезка, соединяющего ПАЭ, поочередно было создано 9 дефектов, каждый из которых представлял собой прямоугольник 300x100 мм. Значения толщины в зоне каждого искусственно созданного дефекта составляли около 50% от первоначального.

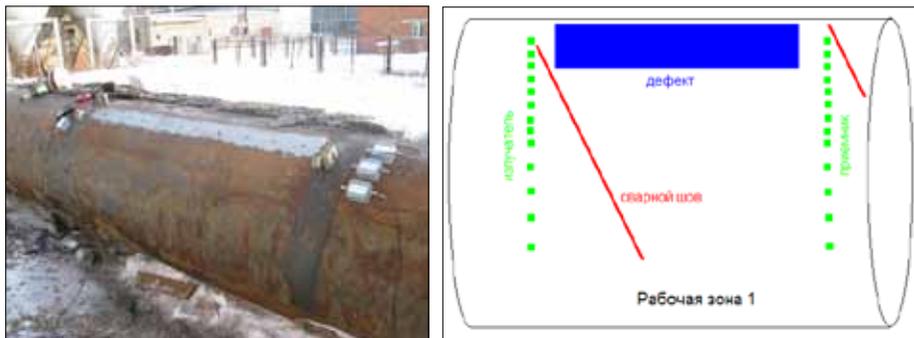


Рис. 5. Искусственный дефект размером 1700x130 мм. ПАЭ сбоку от дефекта

В результате этих экспериментов было выявлено что зона, значения толщины в которой влияют на результаты измерений, представляет собой вытянутую вдоль отрезка, соединяющего ПАЭ, область, имеющую ширину не более 2–6% от дистанции между ПАЭ.

3-я серия экспериментов: влияние вариаций толщины

3-я серия экспериментов была посвящена исследованию того, какое именно значение толщины определяется при наличии на объекте вариаций толщины – среднее, максимальное или минимальное, а также экспериментальной проверке формулы (1). Для упрощения анализа данных исследовался простейший случай, когда профиль толщины на отрезках между различными ПАЭ представляет собой функцию типа «ступенька».

На АРП «Сысерть» на выведенном из эксплуатации участке трубопровода создавался искусственный дефект, представляющий собой утонение шириной 60–80 мм, длиной 2000 мм и остаточной толщиной от 11 мм в начале эксперимента до 6 мм в конце эксперимента (рис. 6). ПАЭ при этом располагались на оси дефекта таким образом, что часть ПАЭ находилась внутри области утонения, а часть снаружи.

На НПС «Аксинино-2» (МН «Дружба», Брянская обл.) был поставлен эксперимент на выходной трубе фильтра-грязеуловителя, на которой имелся кольцевой сварной шов, соединявший 2 участка трубы с различными толщинами стенки (14.7–15.9 мм и 9.8 мм) и одинаковым внешним диаметром 700 мм.



Рис. 6. Искусственный дефект размером 2000 на 60-80 мм. ПАЭ – на оси дефекта

На НПС Макарьево Нижегородской обл. был поставлен следующий эксперимент (рис. 7). На трубе диаметром 500 мм, выходящей из камеры приема-пуска снаряда, имелся изгиб, в пределах которого толщина стенки была увеличена по сравнению с линейной частью трубы (25.1–25.9 и 12.1–12.6 мм соответственно). Длина изгиба составляла 1750 мм по внешней части.



Рис. 7. Эксперимент на трубе, выходящей из камеры приема-пуска снаряда

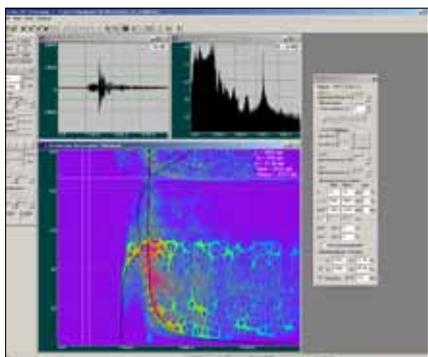


Рис. 8. Наложение дисперсионных кривых для случая неравномерной толщины на спектрограмму экспериментально полученного сигнала

Полученные в экспериментах с профилем толщины типа «ступенька» дисперсионные кривые (рис. 8) совпали с кривыми, рассчитанными для соответствующей геометрии объекта по формуле (1).

Отмечено, что формы дисперсионных кривых на объектах с существенными вариациями толщины стенки отличаются от случая объектов с постоянной толщиной (рис. 9). По этой причине появляется рассогласование между результатами, полученными на различных частотных диапазонах и при использовании различных волн Лэмба. К примеру, при использовании участка дисперсионной кривой волны S_0 , соответствующего низкочастотной части спада групповой скорости с ростом частоты, получаемые эффективные значения толщины лежат в диапазоне между среднеарифметическим и максимальным значениями толщины на отрезке. При использовании участка дисперсионной кривой волны S_0 , соответствующего практически линейной части спада или роста групповой скорости с ростом частоты, получаемые эффективные значения толщины совпадают со среднеарифметическим значением толщины. В то же время, при использовании низкочастотного участка дисперсионной кривой волны A_0 , соответствующего быстрому росту групповой скорости с ростом частоты, получаемые эффективные значения толщины

лежат в диапазоне между минимальным и среднеарифметическим значениями толщины.

Эти результаты, а также тот факт, что мода A_0 , как правило, излучается на более низких частотах, чем мода S_0 , в результате чего распространяется на большие дистанции, привели к тому, что более перспективной была признана работа с низкочастотными ПАЭ (GT205, DIS 3-60) и волной A_0 .

4-я серия экспериментов: работа в заводских условиях

4-я серия экспериментов была посвящена проверке работоспособности метода в заводских условиях. В ходе ее применялась специальная модификация выпускаемого ГК «ИНТЕРЮНИС» универсального прибора неразрушающего контроля «UNISCOPE» с увеличенной до 20000 точек длиной осциллограммы, работой 1-го канала в режиме master, а 2-го канала – в режиме slave, что позволило гарантированно регистрировать осциллограммы сигналов даже при больших дистанциях между излучателем и приемником или при низких амплитудах приходящего сигнала. Использовались ПАЭ GT200, GT205, DIS3-60.

1-й эксперимент в серии был проведен на заводе «Газпром нефтехим Салават». Было отобрано 7 трубопроводов диаметром от 162 до 431 мм, покрытых краской и заполненных водой. Длины участков трубопроводов составили от 7.1 до 21.9 м. Толщина стенок находилась в диапазоне от 4.19 до 11.05 мм.

Наличие воды в трубопроводах привело к значительному усложнению АЭ-сигналов по сравнению с сигналами, наблюдавшимися в предыдущих экспериментах. На каждой конкретной частоте в том момент времени, когда должна была прийти мода S_0 или A_0 , сигнал не наблюдался, но сразу после этого момента началось размытое во времени послезвучание (рис. 10 а, б).

Была выдвинута гипотеза, что такой вид спектрограмм вызван тем, что различные компоненты сигнала проходили некоторую часть пути по металлу, а некоторую – по воде, и различные задержки, зависящие от соотношения длин двух путей, приводили к размытому во времени «послезвучанию». Подтверждением этого служит наблюдение сигнала по воде в виде размытой вертикальной полосы, примерно соответствующей скорости 1400 м/с.

Во время ремонта на заводе на тех же самых трубопроводах, что и в 1-ом эксперименте, был проведен 2-й эксперимент. В связи с ремонтом на этот раз в трубопроводах отсутствовала жидкость. Были получены положительные результаты на расстояниях от 1 до 7 м на трубах без изоляции со следующими параметрами:

- диаметр – 221 мм, толщина – 5.65-7.84 мм;
- диаметр – 381 мм, толщина – 7.23-11.05 мм;
- диаметр – 431 мм, толщина – 7.60-10.03 мм –

наблюдалась мода A_0 , средняя погрешность определения толщины составила порядка 10% (рис. 10 в). В то же время на трубе с наименьшим значением диаметра – диаметр – 162 мм, толщина – 4.59-7.60 мм –

дисперсионные кривые не были выражены (рис. 10 г). Возможно, это объясняется более сильным влиянием на трубах малого диаметра наложения друг на друга сигналов, огибающих трубопровод по спирали.

3-й эксперимент в серии был проведен на территории Рязанской нефтеперерабатывающей компании. Во время его проведения наблюдались сильные электрические помехи, что крайне затруднило анализ данных.

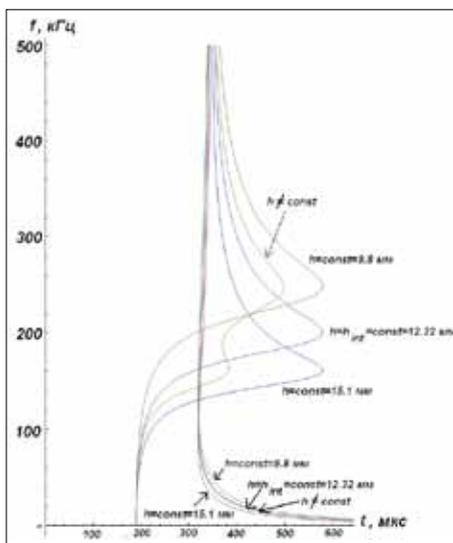


Рис. 9. Расчетные графики дисперсионных кривых мод S_0 и A_0 для случая геометрии с рис. 10. Приведены графики дисперсионных кривых для однородных толщин 15.1 (максимальная), 9.8 (минимальная) и 12.23 мм (средняя), а также графики дисперсионных кривых для случая неоднородной толщины, когда 44% пути сигнал проходит по стенке толщиной 15.1 мм, а 56% пути – по стенке толщиной 9.8 мм

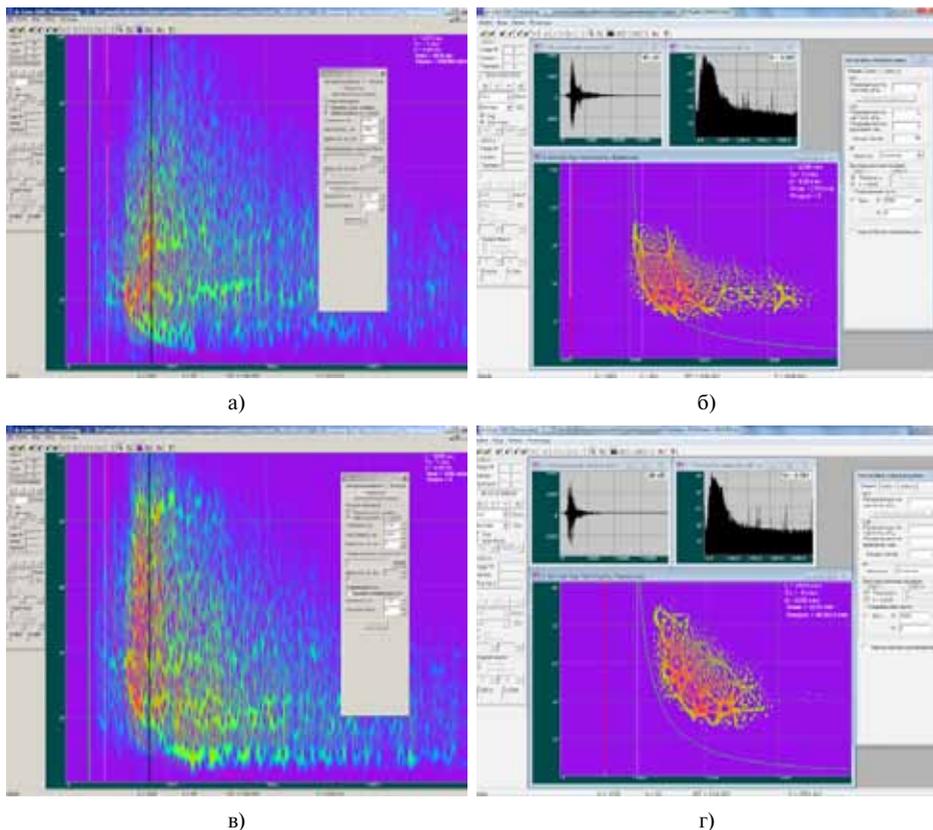


Рис. 10. Спектрограммы, полученные во время эксперимента на заводе «Газпром нефтехим Салават».

а), б) – на трубопроводах с водой, в), г) – на тех же трубопроводах без воды

Наличие жидкости в трубопроводах, как правило, приводило к значительному усложнению АЭ-сигналов, как и в первом эксперименте в Салавате. Тем не менее, на некоторых трубопроводах с водой и бензином на дистанциях 1–3 м удалось успешно провести измерение интегральной толщины как по моде S_0 , так и по моде A_0 . Сделать однозначный вывод о том, какие именно условия приводят к возможности или невозможности работы метода интегральной толщинометрии в присутствии жидкости, не удалось из-за сильного влияния наводок

Из 4 трубопроводов, в которых отсутствовала жидкость, на 3 удалось получить положительные результаты при помощи ПАЭ GT200. 2 раза наблюдалась мода S_0 ; на теплообменнике с толщиной стенки 11.94-12.09 мм на дистанции 3.63 м, а также на трубопроводе с H_2 с толщиной стенки 10.27-11.58 мм на дистанциях от 1 до 2 м. На больших дистанциях мода S_0 затухла. 1 раз наблюдалась мода A_0 на сосуде с толщиной стенки 3.00-3.02 мм на дистанциях от 1.74 до 3.27 м. На 4-м объекте без жидкости (теплообменник с газом по контуру) наблюдался крайне высокий уровень электрических наводок, что не позволило получить качественные спектрограммы.

Выводы

1. Разработан метод интегрального контроля и мониторинга толщины стенки, позволяющий определять значения толщины стенки объекта в области между двумя датчиками, установленными на объекте на некотором удалении друг от друга.
2. Метод реализован на базе стандартных АЭ-систем и преобразователей АЭ. Процедура сбора данных для проведения интегральной толщинометрии реализована на базе выпускаемого компанией «ИНТЕРЮНИС» портативного универсального прибора «UNISCOPE».
3. Контролируемая зона представляет собой вытянутую вдоль отрезка, соединяющего датчики, область, имеющую ширину не более 2 диаметр – 162 мм, толщина – 4.59-7.60 мм –6% от дистанции между датчиками.
4. Использование низкочастотных участков дисперсионных кривых волн Лэмба A_0 позволяет получить значение толщины, лежащее между среднеарифметическим и минимальным значениями толщины стенки объекта на отрезке между двумя датчиками.
5. Испытания на выведенных из эксплуатации объектах показали, что метод как минимум работоспособен в диапазоне толщин 8–17 мм, при диаметре трубы 500–1220 мм. При этом максимальная дистанция между 2 преобразователями ограничивается затуханием акустического сигнала и для труб в хорошем состоянии доходит до 12 м при наличии изоляции и как минимум до 56 м на трубопроводах со снятой изоляцией. На объектах с постоянной толщиной стенки точность определения толщины достигает 1%.
6. В условиях работы на территории нефтехимических заводов метод работоспособен как минимум на трубах без изоляции с диаметром 221–431 мм на дистанциях от 1 до 7 м. Погрешность определения толщины при этом составляет порядка 10%. Важным условием является отсутствие жидкости в контролируемом объекте.

Список использованной литературы

1. Advanced ultrasonic methods for material and structure inspection / edited by Tribikram Kundu. – ISTE, 2007. – 393 p.
2. Елизаров, С.В., Букатин, А.В., Ростовцев, М.Ю., Терентьев, Д.А. Новинки программного обеспечения АЭ-систем семейства A-Line // В мире НК. – 2008. – № 3. – С. 18–21.
3. Терентьев, Д.А., Елизаров, С.В. Вейвлет-анализ сигналов АЭ в тонкостенных объектах // Контроль. Диагностика. – 2008. – № 7. – С. 51–54.
4. Терентьев, Д.А., Бульгин, К.А. Новые методы применения нормальных волн при контроле тонкостенных объектов больших геометрических размеров. – Ч. 1: Автоматическое распознавание дисперсионных кривых на спектрограмме АЭ-сигнала // В мире НК. – 2011. – № 2. – С. 46–48.
5. Seco F, Jim nez, A,R. “Modelling the generation and propagation of ultrasonic signals in cylindrical waveguides”, in Ultrasonic waves. – Ch. 1. – P. 1–28. – Intech Open Access Publisher, 2012.
6. ASME standard API 579-1 // ASME FFS-1. – 2007. – June 5. – 1128 p.

7. Елизаров, С.В., Алякритский, А.Л., Барат, В.А., Трофимов, П.Н., Кольцов, В.Г., Шиманский, А.Г., Щелаков, Д.А. Новый портативный инструмент НК «UNISCOPE» //Международный журнал по неразрушающему контролю “Территория NDT”. – 2012. – № 2. – С. 65–68.

8. Терентьев, Д.А., Жуков, А.В. Новые методы применения нормальных волн при контроле тонкостенных объектов больших геометрических размеров. – Ч. 2: Интегральная толщинометрия // В мире НК. – 2011. – № 3. – С. 68–70.

9. Терентьев, Д.А. Интегральная толщинометрия // В мире НК. – 2014. – № 1. – С. 59–62.

АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ МОНИТОРИНГ СОСУДОВ С ОТСТУПЛЕНИЯМИ ОТ НОРМ И ПРАВИЛ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Колбин А.Л., Тихонов Д.С., Эльманович Г.Н.
ООО «Диагностика и анализ риска»

Короткоцикловая адсорбция (КЦА) широко используется на нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях.

Типовые применения установок КЦА:

- отходящий газ каталитического риформинга;
- продувочные газы гидроочистки;
- остаточный газ нефтехимического процесса;
- синтез-газ из установок парового риформинга метана;
- очистку синтез-газа из установки частичного окисления;
- отходящий газ производства этилена;
- отходящий газ производства стирола;
- газ коксовой печи;
- отходящий газ установки производства аммиака.

Также КЦА используется в технологиях газоразделения:

- получение водорода из природного и коксового газа, других водородсодержащих газов;
- получение метана из природного газа;
- получение окиси и двуокиси углерода;
- выделение этилена;
- получение азота и технического кислорода из воздуха (рис. 1).

Свое широкое применение КЦА получила из-за следующих преимуществ:

- высокая селективность по адсорбируемым компонентам в зависимости от выбора адсорбента;
- быстрый пуск и остановка по сравнению с криогенными блоками;
- большой диапазон работы от 5 до 100% производительности без изменения энергетических затрат;
- большая гибкость установок, т.е. возможность быстрого изменения режима работы, производительности и чистоты в зависимости от потребности;
- автоматическое регулирование режима;
- возможность дистанционного управления;
- низкие энергетические затраты по сравнению с криогенными блоками;
- простое аппаратурное оформление.

Водородные установки КЦА обеспечивают водородом высокой чистоты крупнейшие установки нефтеперерабатывающих предприятий. КЦА также позволяет обеспе-

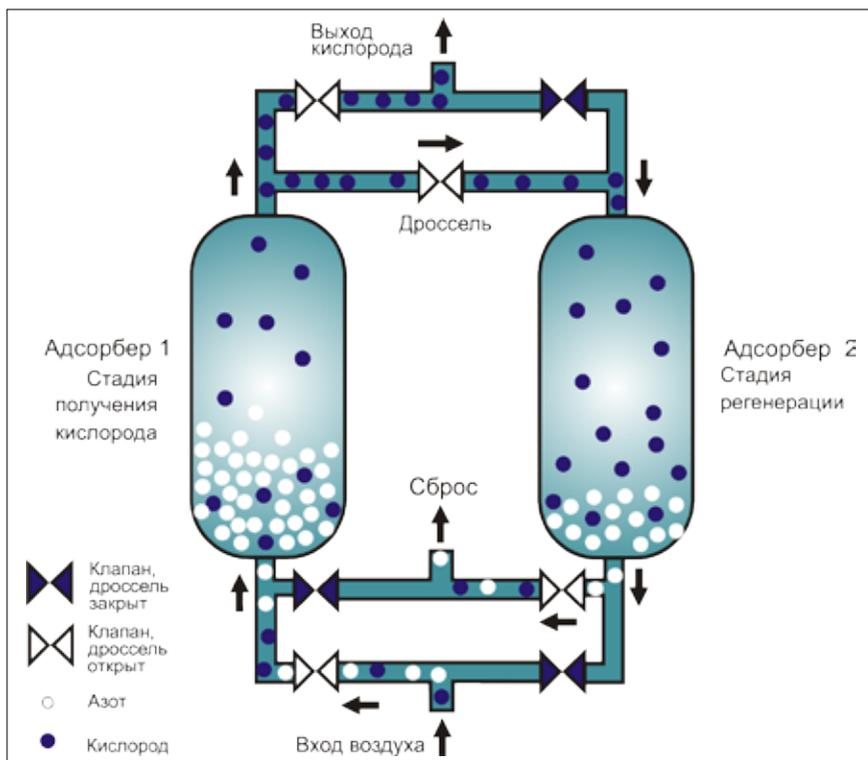


Рис.1 – Схема получения технического кислорода из воздуха

читать оптимизацию водородного баланса предприятия за счет извлечения водорода из отдаваемых газов и возврата в сеть.

Технические и экономические преимущества технологии КЦА очевидны. Однако они имеют один **существенный недостаток, не очевидный потребителю**. Поскольку рабочий цикл адсорберов КЦА короткий (3–5 мин.), таких циклов за время эксплуатации накапливается много, слишком много для аппаратов, спроектированных и изготовленных по ОСТ 26.291-94 [1] (в последнее время – по ГОСТ Р 52630-2012 [2] и ПБ 03-584-03) [3]. Так при 3-х минутном цикле имеем 20 циклов в час, 175 тыс. за 8760 час. (год непрерывной работы) и срок безопасной эксплуатации адсорберов КЦА составляет менее 6 лет непрерывной работы. После выработки этого срока в зонах концентрации напряжений происходит зарождение и развитие усталостных трещин. При этом срок службы сосуда определяется уже не прочностью, а его живучестью, то есть способностью сопротивляться развитию трещин.

Таким образом, обеспечение безотказной, безопасной и безаварийной эксплуатации адсорберов КЦА после 5-ти лет наработки возможно только при внедрении акустико-эмиссионного мониторинга.

Расчет на прочность сосудов, работающих при однократном (статическом) нагружении (количество циклов нагружения не превышает 10^3), проводится по ГОСТ Р 52857-2007 [4–6].

При циклическом нагружении:

1. Сосуды, спроектированные и изготовленные до 2008 г., работающие в условиях малоциклового усталости и рассчитанные по ГОСТ 25859 – 83 [5], предназначены для эксплуатации в условиях, когда количество главных циклов нагружения от давления, стесненности температурных деформаций или других видов нагружений от 10^3 до $5 \cdot 10^5$ за весь срок эксплуатации сосуда.
2. Начиная с 2008 г. расчет на прочность сосудов, эксплуатируемых в условиях малоциклового усталости, выполняют по ГОСТ Р 52857.6-2007 [4], которым количество главных циклов нагружения от давления, стесненности температурных деформаций или других видов нагружений от 10^3 до 10^6 за весь срок эксплуатации сосуда.

В любом случае предельное количество циклов безопасной эксплуатации адсорбированных КЦА находится в пределах от $5 \cdot 10^5$ до 10^6 .

В настоящее время наиболее научно обоснованная методология расчета на прочность сосудов, эксплуатируемых в условиях циклического нагружения, изложена в API 579-1/ASME FFS-1 [7].

При количестве циклов нагружения более $1 \cdot 10^5$ – $5 \cdot 10^5$ изделия (например, коленчатые валы двигателей, вагонные оси) уже работают в условиях многоциклового усталости, а это – уже совсем другие требования к технологии и качеству изготовления, чем заложенные в ОСТ 26.291-94 и ГОСТ Р 52630-2012.

При действии циклических (повторно-переменных) напряжений в металлах и сплавах происходит зарождение и постепенное развитие трещин (усталость металла), вызывающее в конечном итоге, полное разрушение детали или конструкции. Это разрушение особенно опасно, так как может происходить под действием напряжений, намного меньших пределов прочности и текучести.

Процесс усталостного разрушения разделяется на две основные стадии:

стадия 1 – накопление необратимых изменений, приводящее к возникновению трещин на поверхности металла;

стадия 2 – развитие трещины.

На стадии 1 происходит накопление субмикроскопических и микроскопических изменений в структуре металла. Повреждения на стадии 1 не могут быть выявлены средствами неразрушающего контроля (НК).

Стадия 2 процесса усталостного разрушения состоит в распространении усталостной трещины. Стадия распространения трещины чаще всего занимает значительную долю общего времени, необходимого для усталостного разрушения. Повреждения на стадии 2 могут быть выявлены средствами НК. На этой стадии наиболее эффективен акустико-эмиссионный (АЭ) мониторинг.

Вопросы усталости материалов и усталости конструкций детально рассмотрены в стандарте США API 579-1/ASME FFS-1 [7]. В [7] показано, что к использованию характеристик усталости материалов, полученных по данным испытаний на циклическую прочность гладких образцов, при расчете на прочность и долговечность сосудов и аппаратов следует подходить крайне осторожно. В силу конструктивных особенностей и технологии изготовления сосудов и аппаратов кривая Велера (см. рис. 2) для них будет всегда иметь ниспадающий характер (пунктирная линия). «Физического» предела усталости сосудов σ_{-1} не существует. При количестве циклов нагружения более 10^5 безотказная, безопасная

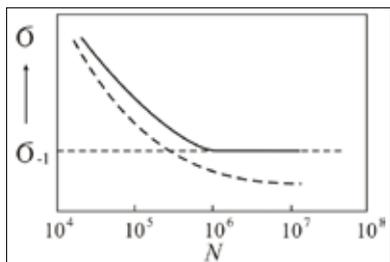


Рис. 2. Схематические кривые усталости (кривые Велера)



Рис. 3. Объект акустико-эмиссионного мониторинга – адсорбер КЦА

и безаварийная эксплуатация сосудов возможна только при внедрении адекватных компенсирующих мероприятий и мониторинга.

Объектом акустико-эмиссионного мониторинга являлся адсорбер, изготовленный в апреле 2004г. в ОАО «СалаватНефтеМаш», г. Салават, Россия (рис. 3).

Основанием для проведения мониторинга являлась необходимость временной (до замены на новый) эксплуатации аппарата с отступлениями от действующих норм и правил. При техническом освидетельствовании адсорбера, проведенном в июне 2013 г., была обнаружена трещина в околошовной зоне вертикального сварного шва. Длительная остановка технологического процесса для ремонта или замены адсорбера на новый была связана с неприемлемыми для компании экономическими потерями. Для приобретения и монтажа нового адсорбера требовалось 30 дней. Было принято решение изготовить временную ремонтную конструкцию путем приварки накладной латки (см. рис. 4).

Такой ремонт сосуда, работающего под давлением, является отступлением от действующих норм и правил (ПБ 03-576-03 [8], ОТУ-3 [9]). Эксплуатация временной ремонтной конструкции возможна только при условии организации непрерывного мониторинга для отслеживания возможного развития дефектов. Согласно ПБ 03-593-03, п. 2.1.2 [10] в качестве метода мониторинга использован акустико-эмиссионный метод.

Цель мониторинга: проследить динамику возможного развития дефектов в аппарате, дать оценку опасности дефектов для принятия решения о необходимости аварийной остановки адсорбера.

Порядок проведения АЭ-мониторинга:

- поверочный расчет адсорбера на прочность и трещиностойкость, оценка возможности и условий отсутствия аварийного разрушения аппарата;
- разработка технологии проведения акустико-эмиссионного мониторинга и аппаратное оформление системы мониторинга;
- монтаж системы мониторинга;
- калибровка и настройка параметров АЭ-мониторинга;
- сбор данных АЭ-мониторинга – непрерывно;

- обработка и анализ данных мониторинга – 3 раза в сутки (утром, днем и вечером);
- демонтаж системы мониторинга.

Проведенные расчеты на прочность по ГОСТ Р 52857-2007 [5] и трещиностойкость по нормам ПНАЭ Г-7-002-86 [11] показали:

- статическая прочность адсорбера с накладной латкой обеспечена;
- при циклическом нагружении сосуда выполнено условие существования докритической сквозной трещины (концепция «течь перед разрушением» по стандарту API 579-1/ASME FFS-1);
- в процессе эксплуатации адсорбера с накладной заплатой мгновенного гильотинного разрыва стенки не произойдет. Возможное разрушение аппарата будет проходить в 3 этапа:
 - этап 1 - зарождение усталостной трещины на внутренней поверхности аппарата;
 - этап 2 - подрастание усталостной трещины и образование докритической сквозной трещины (протечка);
 - этап 3 - рост сквозной трещины, закритическое развитие и гильотинный разрыв аппарата с выбросом опасных веществ с взрыв-пожар.

Таким образом, задачей непрерывного мониторинга являлось отслеживание возможного развития усталостных трещин на стадии 2.

Анализ результатов акустико-эмиссионного мониторинга адсорбера

Акустико-эмиссионный мониторинг проведен на базе АЭ-системы A-Line 32D производства фирмы «ИНТЕРЮНИС», г. Москва (рис. 5). Установка 4-х датчиков по периметру латки (рис. 4) позволила выполнить точную оценку местоположения и опасности дефектов.



Рис. 5. АЭ-система A-Line 32D в режиме стационарного мониторинга адсорбера



Рис. 4. Схема расположения датчиков АЭ при мониторинге адсорбера

Для проведения акустико-эмиссионного мониторинга была организована круглосуточная 3-х сменная работа. Сбор данных АЭ-мониторинга, проводили в постоянном режиме с последующей их компьютерной обработкой.

Обработку и анализ данных акустико-эмиссионного мониторинга проводили ежемесячно для принятия решения о необходимости аварийной остановки адсорбера.

На основании анализа результатов акустико-эмиссионного мониторинга адсорбера установлено:

- при работе адсорбера дважды (25.07.2013 г. и 28.07.2013 г.) зарегистрированы источники АЭ II-го и III-го классов (активные и критически активные в соответствии с классификацией ПБ 03-593, (рис. 6 и 7), что свидетельствует о наличии в сварных швах латки развивающихся дефектов;
- ввиду циклического режима эксплуатации сосуда возможно образование течи через сварные швы приварки латки;
- для решения вопроса о выводе сосуда из эксплуатации проведен мониторинг протечек – периодический осмотр зоны заплаты персоналом установки с обмыливанием сварных швов приварки латки. Сквозных трещин не обнаружено.

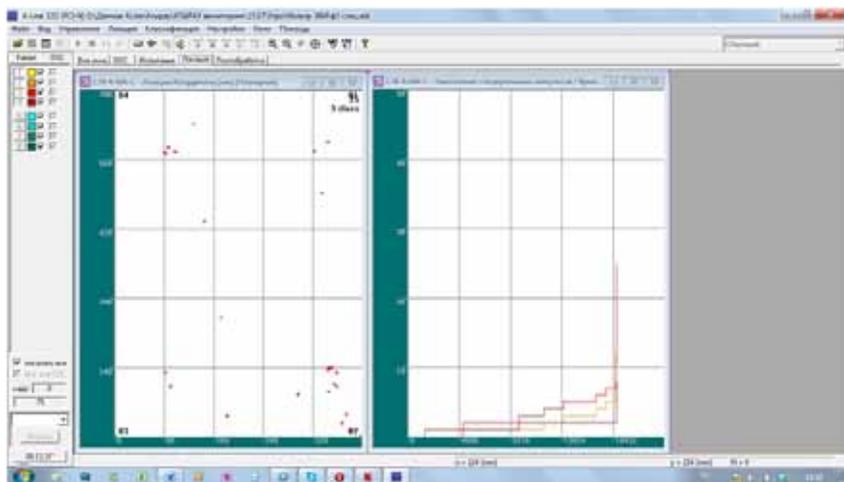


Рис. 6. Локализация и классификация источников АЭ при мониторинге (25.07.2013, 10 ч 50 мин)

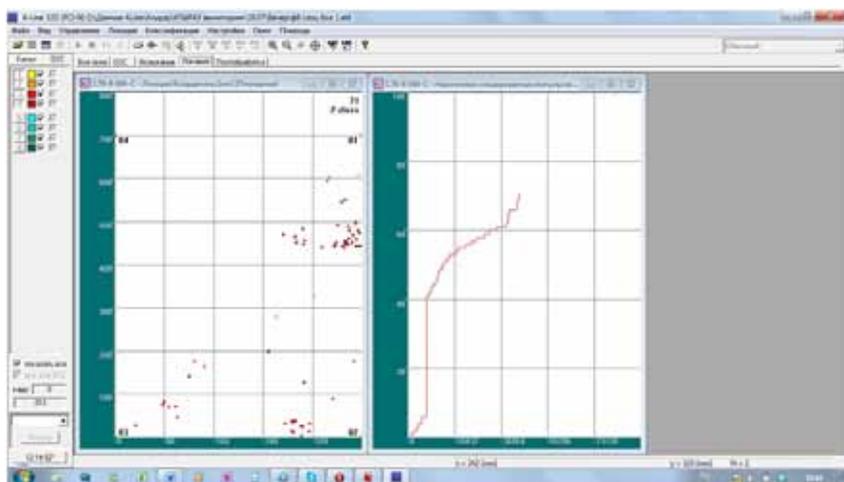


Рис. 7. Локализация и классификация источников АЭ при мониторинге (28.07.2013, 21 час 50 мин)

Выводы

1. Обеспечение безотказной, безопасной и безаварийной эксплуатации адсорберов КЦА после наработки более 500 тысяч циклов возможно только при внедрении акустико-эмиссионного мониторинга для отслеживания возможного развития усталостных трещин.
2. В процессе эксплуатации необходимо вести учет циклов и при приближении к наработке 500 тысяч циклов проводить обследование сосудов для выявления:
 - зарождения трещин (АЭ-контроль);
 - возможного развития выявленных дефектов (АЭ-мониторинг).
3. Убытки от простоя, инцидента, аварии не сравнимы с затратами на АЭ-мониторинг.
4. Внедрение акустико-эмиссионного мониторинга адсорберов КЦА позволит достигнуть правильного баланса интересов бизнеса и безопасности (оптимизации затрат на ремонт и замену оборудования при минимальном простое установок).

Список использованных источников

1. ОСТ 26.291-94. Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия.
2. ГОСТ Р 52630-2012. Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия.
3. ПБ 03-584-03. Правила проектирования, изготовления и приемки сосудов и аппаратов стальных сварных.
4. ГОСТ Р 52857-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.
5. ГОСТ 25859-83. Сосуды и аппараты стальные. Нормы и методы расчета на прочность при малоцикловых нагрузках.
6. Серенсен, С.В., Когаев, В.П., Шнейдерович, Р.М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. – М. : Машиностроение, 1975.
7. API 579-1/ASME FFS-1 Fitness-For-Service - 2007. USA Standard.
8. ПБ 03-576-03. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением.
9. ОТУ-3. Сосуды и аппараты. Общие технические условия на ремонт корпусов.
10. ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов.
11. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86) / Госатомнадзор СССР. – М. : Энергоиздат, 1989.

К НОВОЙ КОНЦЕПЦИИ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ. ОЦЕНКА РИСКА И МОНИТОРИНГ

Полонский Я.А., канд.техн.наук,
заместитель директора по НИР ООО «Экспертиза», г. Волгоград

Реформирование сложившейся системы промышленной безопасности (СПБ) есть свершившийся факт, о чем свидетельствуют принятые в последние два года изменения в 116-ФЗ и завершающийся процесс смены основных нормативных документов в отрасли. В этой связи имеет смысл обсуждать уже вопросы имплементации новой системы и ее динамическую адаптацию к имеющимся организационным и технологическим условиям, а не достоинства тех или иных принятых теоретических парадигм.

Как известно, истинной проблемой в большинстве случаев является не несовершенство закона (в широком смысле этого понятия), а неудовлетворительность процедур его исполнения. Таким образом, ставится вопрос по формированию эффективной поддержки нынешнего поколения СПБ.

Задача является в принципе решаемой. Прежде всего, имеется значительный опыт, приобретенный действующими специалистами (в особенности еще советского поколения) в развертывании Системы промышленной безопасности, практически не существовавшей ранее, и в дальнейшем преобразовании ее в Единую систему оценки соответствия.

Таким образом, есть вполне обоснованная возможность в ускоренном темпе и с опережающей эффективностью пройти период становления новой, в сущности (а не просто реформируемой), СПБ. Вместе с тем, имеют место и вновь сформировавшиеся объективные и субъективные причины, противодействующие проводимому реформированию. Что влечет за собой необходимость в превентивной разработке и внедрению мер по компенсации или устранению этих причин, то есть снятию будущих коллизий до момента их возникновения. Многие из предлагаемого уже функционирует в том или ином виде, многое достаточно очевидно и общеизвестно. Однако, ключевым элементом оптимизации прохождения этапа реформирования является абсолютизация функционала инфраструктуры обеспечения реформы; т.е. все ее элементы должны быть доведены до полного взаимоувязывания, унификации и максимального уровня работоспособности.

С учетом вышеприведенных соображений, предполагаемые обеспечительные мероприятия могут включать следующее.

1. Создание единого структурированного информационно-правового поля:
 - введение единых общедоступных и обязательных к применению в процедурах ПБ-реестров, баз данных и перечней по абсолютно всем элементам учета СПБ (от нормативных документов до объектов и субъектов ПБ);

- создание системы гиперссылочной актуализации элементов учета СПБ для исключения одновременного существования неидентичных данных;
- систематизацию и распространение полученных данных и извлеченных уроков по результатам всех происходящих инцидентов.

2. Устранение фактора произвольности оценивания объектов ПБ всеми без исключения субъектами СПБ (от владельца объекта до госрегулятора) – установление однозначного соответствия объектов ПБ:

- действующим НД;
- методам, методикам, приемам и способам, требованиям к приборному оформлению технического диагностирования;
- нормированным численным значениям характеристик предельного состояния и вероятностям наступления инициирующих и наступающих событий.

Конечной целью должно являться исключение возможности значимо различного оценивания одного и того же объекта ПБ разными инспектирующими субъектами.

3. Валидизация оценок риска объектов ПБ. Реформируемая СПБ отличается опорой на принципиально иной подход к оцениванию состояния ПБ – оценку риска. Будучи привязанной к текущему состоянию объекта ПБ, оценка риска должна в режиме реального времени иметь подтверждение своей верности, что приводит к необходимости сопровождения (мониторинга) рабочего цикла объекта ПБ. Таким образом, методологическое и НИОКР-поддержанное увязывание оценки риска (ОР) и мониторинга состояния (МС) является ключевой задачей.

4. Создание системы поддержки процедур ОР и МС, как основы СПБ. В этом новом качестве система поддержки процедур должна быть целенаправленно структурирована и должна гарантировать установленный минимальный уровень наукоемкости и высокотехнологичности, должную адекватность и эффективность функционирования систем ОР и МС как на организационном, так и техническом уровне. Это должно достигаться формированием и постоянной динамической актуализацией нормативных требований к системам МС, их методологии и может обеспечиваться только при условии независимой научно-технической поддержки и, в некотором роде, стороннего контроля.

5. Обратное масштабирование системы промышленной безопасности и системы ОР и МС от общегосударственного до объектового уровня, и далее – до уровня единичного технического устройства. Достижение этого является практически единственной гарантией реализации новых реформаторских подходов в системе ПБ. Введение понятийного и нормативного [1] концептуала «отклонение от норм ПБ как допустимое при оговоренных условиях состояния объекта ПБ» создает угрозу развития потенциальных уязвимостей техногенного характера для долгосрочного периода трансформации существующей на практике, хотя и реформируемой в организационно-нормативном плане системы ПБ России.

Основная часть приведенных соображений, скорее всего, самоочевидна (см., например, [2]) каждому имеющему достаточный опыт практической деятельности в СПБ специалисту (эксперту), тем не менее, имеет смысл остановиться на отдельных положениях развернуто.

Возвращаясь к оценке текущего состояния, с реформированием СПБ следует разделить задачи собственно обеспечения концептуального реформирования СПБ и задачи

обеспечения минимального соответствия общим требованиям к функционированию и адекватности субъектов СПБ — прежде всего экспертов и экспертных организаций. При этом нельзя упускать из виду интегральную природу средств и методов решения этих задач, объясняемую не только их собственной взаимосвязью, но и использованием одних и тех же субъектов для их решения. В общем случае как и эксперт, так и экспертная организация должны, по меньшей мере: а) перейти на новый концептуал обеспечения ПБ (на базе оценки рисков); б) перестроить внутреннюю парадигму процессинга и внешнюю парадигму взаимодействия с регулятором (РТН) и объектом промышленной безопасности (ОПО, ТУ). Тем не менее, управление исполнением каждой из задач имеет смысл осуществлять по раздельным целевым показателям.

Наиболее близким представлением для визуализации высказанного предложения может служить положение точки в ортогональной системе координат. Точка (как объект управления) — едина, однако граничные условия могут (и должны) назначаться по каждой координате отдельно; точно так же и функциональная зависимость, описывающая возможные сочетания численных значений переменных по каждой оси координат — едина для обеих осей.

Что касается обобщенного понятия граничных условий по координате «реформирование», то ими (для экспертной организации) может служить практическая готовность выполнять процедуры оценки соответствия установленным нормам ПБ объектов ПБ, прежде всего ТУ. Почему именно ТУ? В первую очередь из-за их объективной природы, ибо измерению (в строгом смысле этого понятия) все же может быть подвергнут только элемент объективной реальности. Учитывая внутреннюю логику предложенной «ортогональной модели», под «готовностью» имеет смысл понимать наличие норм промышленной безопасности применительно к данному ТУ, методологий и методик процедур оценки соответствия данного ТУ данным нормам, а также (второй компонент) организационно-технически обеспеченная возможность и компетентность данной экспертной организации к применению указанных методик.

Граничным условием для другой координаты — «адекватности экспертной организации» — является некий минимально-допустимый уровень «реализованной компетентности» при проведении процедур оценки соответствия. То есть степень достоверности получения и интерпретации сведений о фактическом состоянии ТУ вкупе с методической правильностью осуществления процедуры сравнения полученных результатов (как прямых измерений, так и результатов анализа этих измерений) с имеющимися нормами промышленной безопасности. На этой, второй оси координат, собственно, и располагается основной концептуальный камень преткновения всех систем оценивания экспертных организаций, как, в принципе и экспертов и специалистов-диагностов.

Проблема состоит в распространенной, интуитивно-интерпретируемой подмене понятий «адекватности» контроля фактического состояния понятием «методической правильности» этого контроля. В этой подмене нет злого умысла. Просто для каждого специалиста самоочевидно, что абсолютно точных и абсолютно полных по объему измерений быть не может (во всяком случае, на текущем уровне развития приборных методик и оборудования для измерений). Скажем, невозможно обеспечить измерение толщины на каждом квадратном миллиметре километровой длины трубопровода с точностью до 0,1 мм и достоверностью 99%. Единственным немифологическим вы-

ходом является установленная нормативными документами и обеспеченная метрологически достоверными процедурами система абстрагированного от контролируемого ТУ обеспечения косвенного самоконтроля специалиста при выполнении процедур измерений. Система эта достаточно развита, обоснованна, и в целом обеспечивает максимально достижимый в практическом плане уровень верификации измерений. Но не более того. Глубинное понимание, что — условно назовем — «зона адекватизации» полевых измерений безусловно и неизбежно смещена от непосредственно диагностируемого ТУ к некоему промежуточному, не являющемуся этим ТУ, элементу, — отсутствует. Следует подчеркнуть: отсутствует не у грамотных специалистов контроля, не у подлинно компетентных экспертов (им безусловно ясен смысл процедур самоверификации, калибровки на стандартных образцах, проверки и настройки приборов контроля), а отсутствует у некоего обобщенного субъекта промышленной безопасности. Сильно упрощая, можно сформулировать так: «Отрасль верит, что должным образом полученные данные объективного контроля 100%-но описывают фактическое состояние диагностируемых объектов ОПО, как и самих ОПО в целом». Следует еще раз подчеркнуть, что это — не вполне корректное — представление существует именно в виде коллективного мнения; при том, что каждый грамотный специалист, как технического, так и управленческого звена, в плане непосредственного решения поставленных перед ним задач такого мнения не разделяет.

Тем не менее, на уровне общепромышленной психологии это представление действует. Именно по этой причине, несмотря на произошедшее за последнее десятилетие 2-4-кратное увеличение межинспекционных интервалов, увязываемых с межремонтными пробегами, скажем, в нефтепереработке, не произошло повсеместного распространения систем диагностического мониторинга, равно как и не произошло какого-либо заметного изменения методик, практик и концепций обязательного технического диагностирования.

Прямое воздействие описанной отраслевой психологии «смещенной зоны адекватизации» на практическую нормативную и концептуальную позицию можно предположить и в двух базовых направлениях реформирования системы промышленной безопасности. С частью элементов этого реформирования можно согласиться, часть имеет смысл попробовать переосмыслить.

Первый элемент — собственно направление реформирования — переход от концепта эталонированного управления промышленной безопасностью на основе установленных регулятором частных количественных критериев технического состояния ТУ (и ОПО, кстати, в целом) к подходу, имеющему общее наименование «оценка рисков». Этот переход, как теперь можно понять, начат уже довольно давно, и, скорее всего, будет завершен также не в краткосрочной перспективе. Тем не менее, основной, как представляется, «идеологический» посыл подхода «оценка рисков» состоит все же в понимании безусловно вероятностной, принципиально недетерминированной природе любого объекта объективной реальности. В том числе и ТУ на опасном промышленном объекте, который, пусть и с исчезающе малой для обывателя вероятностью, но определенно может претерпеть нерегламентированное изменение своего состояния. И к этому надо быть готовым.

Другой элемент, в данном случае — именно элемент, хотя и основополагающий, и, как говорится, судьбоносный для создавшегося т.н. экспертного сообщества, и ко-

торый методологически проистекает из концепции верифицирующего оценивания, есть предлагаемая реформа системы оценки (аттестации, возможно – аккредитации) экспертных организаций и экспертов системы промышленной безопасности. Общеизвестно, что сложившаяся ситуация характеризуется неудовлетворительным с точки зрения как регулятора, так и значительной части «экспертного сообщества» практически достигаемым уровнем проведения оценок соответствия в виде экспертиз промышленной безопасности.

К числу наиболее критикуемого относится предполагаемая легкость получения квалификаций эксперта и экспертной организации, позволяющая принимать участие в формально законных процедурах оценки соответствия (экспертизах промышленной безопасности) заведомо некомпетентным (или практически некомпетентными, недобросовестными) экспертам и экспертным организациям, то есть субъектам экспертизы, заведомо не могущим обеспечить приемлемый уровень ее адекватности. С другой стороны, практически оцениваемый, выявляемый при разного рода проверках или расследованиях инцидентов, условный (оценочный) уровень компетентности изначально предполагаемых компетентными экспертами (экспертных организаций) воспринимается как недостаточный. Очевидным решением служит значительное повышение персональной ответственности субъектов экспертизы в лице экспертов и экспертных сообществ, а также барьеров вхождения в экспертное сообщество.

Что касается повышения ответственности, то оно уже введено и представляет собой беспрецедентную в постсоветские времена меру в виде уголовной ответственности экспертов. В настоящий момент рассматриваются предложения по повышению степени формализации и практическому усложнению системы требований к экспертам и системы аттестации экспертов промышленной безопасности, причем проведение процедуры этой аттестации предполагается возложить на государственные органы управления. Наряду с очевидными преимуществами такого реформирования, обращают на себя внимание и некоторые недоиспользованные возможности совершенствования системы, проистекающие из неосознанного аберрирования «зоны адекватизации» контроля как в отношении субъектов экспертизы, так и процедур ее проведения как такового.

Иными словами, фактическое установление зоны контроля на момент аттестации эксперта (исходная технологическая позиция экспертизы промышленной безопасности), а также на момент расследования произошедшего с подвергшимся ЭПБ объектом экспертизы инцидента (конечная стадия технологического процесса экспертизы) де-факто исключает промежуточные звенья контроля процесса экспертизы, причем звенья, имеющие непосредственное организационно-финансовое влияние на все аспекты ЭПБ, начиная от объемов и качества выполняемых экспертных работ до представления их результатов. речь идет о экспертной организации как абсолютизированной технологической платформе, вне и помимо которой никакая самостоятельная деятельность конкретного эксперта невозможна. а также о владельце объекта экспертизы (заказчике экспертизы), неограниченно распоряжающимся эксплуатацией этого объекта, начиная с предоставления документов и сведений эксплуатационно-технического и проектно-конструкторского характера, и кончая самим обеспечением предоставления объекта экспертизы для проведения контрольных мероприятий экспертизы. Кстати сказать, введение аналогичной ответственности за предоставление

заведомо ложных сведений о фактическом состоянии объекта экспертизы и за ограничение полноты проводимых экспертных мероприятий со стороны владельца объекта экспертизы представляется более, чем логичным, особенно с учетом отсутствия каких-либо рычагов воздействия на этого владельца со стороны выполняющего ЭПБ эксперта.

С другой стороны, рыночная природа товарно-денежных отношений в экспертной деятельности ставит в абсолютно зависимое положение проводящего ЭПБ эксперта — как от привлекающей его экспертной организации, так и от владельца объекта экспертизы. Простого решения этой проблемы нет; максимум, что можно (и что уже принято регулятором) — исключение прямой аффилированности при проведении ЭПБ, но это все, что можно сделать общепринятым путем. Вместе с тем разделение ответственности за порядок обеспечения, проведения экспертизы, за соответствие приводимых в заключении ЭПБ сведений и выводов фактическому состоянию объекта экспертизы может и должна быть осуществлено в отношении полномочного, абсолютно лимитирующего процессинг ЭПБ субъекта экспертизы (владельца ТУ, ОПО и проч.). Реализация этого подхода, безусловно, не проста, и конкретные, взаимоприемлемые форматы его осуществления, безусловно, требуют специальных обсуждений, но это — очевидно воспринимаемый и прагматичный подход.

Другой аспект проявления нежелательного смещения «зоны адекватизации» — вынесение контроля качества ЭПБ на ее начальный технологический этап — аттестацию потенциальных экспертов. С одной стороны, логистически (да и психологически) это решение понятно и оправданно. Это действительно первый этап, с него и надо бы начинать. Однако, в кажущейся простоте решения кроется опасность, прямо вытекающая из такого «начального» в прямом смысле слова положения. А именно: из-под регламентированного и оторганизованного контроля (хотя бы и путем упраздненного рассмотрения и согласования заключения ЭПБ Ростехнадзором) выводится собственно конечный результат. Непрерывно-постоянный контроль продукта «производства» замещается разовым контролем предполагаемого (и в этом надо отдавать полный отчет) «изготовителя» продукта. В этом свете совершенно объяснимы невероятно завышенные по сравнению с имеющимися требования к процедурам аттестации, как и собственно квалификационные требования к кандидатам в эксперты. И так же должно быть понятно, что прошедшие первоначально самый строжайший отбор кандидаты, как бы это ни было неприятно осознавать, никак абсолютно не гарантируются от любой степени падения качества своей работы в любой, в том числе и непосредственно последующий за аттестацией момент времени.

Из сказанного вполне логически вытекает, что выходом из объективно сложившейся к настоящему моменту ситуации с постановкой дела по проведению ЭПБ как таковой является смещение системы контроля от барьерно-разовой до рискоориентированной-мониторинговой [3, 4]. Иными словами, «зоны адекватизации» контроля должны быть максимально распределены как по вектору технологического процесса ЭПБ, так и по времени. Оценка качества экспертизы должна быть распределенной, постоянной, максимально независимой, что не исключает, а наоборот, требует поддержания высокого (но не формально-отвлеченного) уровня требовательности к квалификации персонала, к приборному обеспечению, к объемам и методике проведения работ по ЭПБ. Именно высокие уровни требований, условно говоря, субъектно-аппа-

ратных и организационно-методических компонент технологии ЭПБ могут служить как инструментом понижения риска ошибок, низкого качества или неадекватности экспертиз, так и — в этом их особая роль — инструментом «ненасильственной» стратификации и отбора и экспертов, и экспертных организаций. Другим верифицирующим аспектом должен служить комплексный и постоянный характер деперсонифицированного, но общедоступного (по предоставляемым результатам) мониторинга жизненного цикла экспертизы — от ее планирования и кадрового и организационно-технического обеспечения, до завершения процедуры последующей ЭПБ.

Предлагаемый подход имеет очевидные черты параллелизма с риск-ориентированным, поддержанным мониторингом техсостояния контролем жизненного цикла единичного ТУ; что естественно и неудивительно, так как основные методологические причины расхождения между ожидаемым и достигаемым уровнем управляемости промышленной безопасностью этих объектов схожи. Это чрезмерная локализация «зон адекватизации» контроля, неоправданное технологией менеджмента состояния контролируемых объектов смещение этих зон и замещение постоянного контроля (мониторинга) избыточным и функционально несвязанным пиковым усилением контроля, что с неотбрасываемой вероятностью может привести к утрате управляемости системой на длительных постконтрольных интервалах ее жизненного цикла.

Список использованной литературы

1. Приказ Ростехнадзора от 11.03.2013 N 96 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств» [Электронный ресурс] (Зарегистрировано в Минюсте России 16.04.2013 N 28138) // URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_145465/?frame=1#p33.
2. Гражданкин, А.И., Печеркин, А.С., Сидоров, В.И. Заменит ли количественная оценка риска выполнение требований промышленной безопасности? // Безопасность труда в промышленности. — 2012. — № 10. — С. 43–48.
3. Колесников, Е.Ю. Способы количественной оценки неопределенности параметров техногенного риска // Безопасность труда в промышленности. — 2013. — № 1. — С. 56–67.
4. Харебов, В.Г., Ладыгин, А.П., Черных, М.В. Автономные системы мониторинга трубопроводов // Федеральный деловой журнал “ТСП”. — 2012. — № 4 (63).

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ АЭ-СИСТЕМА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ SMART

Елизаров С.В., Барат В.А., Шиманский А.Г.
Группа компаний ИНТЕРЮНИС, Москва, Россия

Введение

Акустико-эмиссионный (АЭ) метод контроля имеет целый ряд преимуществ, выделяющих его из ряда других методов. Это пассивный метод контроля, обладающий высокой чувствительностью к обнаружению трещин, не требующий сканирования поверхности объекта, обеспечивающий дистанционное проведение контроля на участках от нескольких метров до сотен метров.

Метод имеет ряд недостатков: чувствительность к акустическим шумам, вызванным работой контролируемого оборудования, сложность количественной оценки параметров дефектов, высокие требования к квалификации персонала, поводящего акустико-эмиссионный контроль, обусловленные непростым интеллектуальным содержанием метода, как в части настройки аппаратуры для сбора данных, так и в оценке результатов обследования.

В настоящее время различными научными школами проводятся исследования, направленные на развитие акустико-эмиссионного метода контроля, расширение его возможностей, повышение достоверности и расширение практического применения.

В данной работе описываются принципы построения интеллектуальной акустико-эмиссионной системы, которая позволяет усовершенствовать процедуру АЭ контроля за счет автоматизации и интеллектуализации функций, которые традиционно выполняются оператором.

Характеристика интеллектуальной АЭ-системы

В интеллектуальной АЭ-системе предполагается автоматизация следующих функций: автоматический выбор частоты дискретизации, фильтрация АЭ-сигналов, позволяющая выполнять эффективное обнаружение АЭ-сигналов на фоне различных шумов технологического оборудования, а также автоматическая регистрация данных, не требующая задания оператором временных параметров, таких как порог, мертвое время и *sceto*.

Автоматический выбор полосы фильтрации и частоты дискретизации данных

Интеллектуальная АЭ-система SMART позволяет регистрировать данные с различной частотой дискретизации, а также осуществлять цифровую фильтрацию в настраиваемой полосе частот. Обычно значения частоты дискретизации и полоса частот

фильтра задаются оператором при настройке. Операция ручного определения этих параметров связана с риском потери или искажения диагностической информации. Частыми ошибками оператора при задании частоты дискретизации и полосы фильтра является несоблюдение теоремы Котельникова и несогласованность полосы перестраиваемого цифрового фильтра с полосой частот измерительного и акустического канала.

АЭ-система SMART позволяет определять параметры цифрового измерительного тракта в автоматическом режиме. Алгоритм основан на анализе отклика преобразователя акустической эмиссии (ПАЭ) на импульсное калибровочное воздействие. Анализируются сигналы, полученные при калибровке в воздухе и при установке ПАЭ на поверхность объекта контроля. По результатам обработки полоса фильтрации устанавливается максимально согласованной с амплитудно-частотной характеристикой первичного преобразователя и частотными характеристиками акустического тракта. Частота дискретизации задается таким образом, чтобы обеспечить необходимое временное и частотное разрешение для дальнейшей обработки данных.

Фильтрация данных

При традиционном пороговом способе сбора данных фильтрация шума происходит при помощи отсечения шумовой составляющей сигнала, лежащей ниже порогового уровня. В интеллектуальной системе SMART реализован беспороговый способ регистрации данных. Для обеспечения помехоустойчивой регистрации данных без применения пороговой отсечки необходимо применение современных методов фильтрации данных, которые помогут избежать ложных регистраций импульсов АЭ. В системе SMART применяется согласованный способ фильтрации данных. Импульсные характеристики согласованных фильтров схожи по форме с сигналами АЭ. Из-за изменчивости формы импульсов АЭ в приборе реализован банк согласованных фильтров, учитывающий возможный разброс параметров принимаемых сигналов.

Беспороговая регистрация данных

Основным блоком интеллектуальной АЭ-системы является блок беспороговой регистрации данных. Традиционным способом регистрации диагностических данных при акустико-эмиссионном контроле является пороговая регистрация. Пороговая схема регистрации данных надежна и проста в реализации, но имеет ряд существенных недостатков. Во-первых, выбор порогового значения находится в компетенции оператора, из-за влияния человеческого фактора, значение порога может быть установлено неверно. Во-вторых, при пороговой регистрации данных время прихода сигнала определяется не точно, а по моменту пересечения сигналом порогового значения. Погрешность определения времени прихода приводит к погрешности определения координат источников акустической эмиссии.

В качестве альтернативы пороговому методу может быть предложен интеллектуальный беспороговый метод, основанный на теории обнаружения сигналов. В рамках данного метода импульсы акустической эмиссии выявляются как фрагменты непрерывного потока данных, обладающие определенными временными и спектральными характеристиками. При реализации метода были использованы алгоритмы обнаружения разладки, работающие в режиме онлайн во время сбора данных. Применение

интеллектуального беспорогового метода регистрации данных позволяет точно определять время прихода импульсов акустической эмиссии.

Реализация системы SMART

На данном этапе реализации проекта интеллектуальная система SMART выполнена на базе портативного двухканального прибора UNISCOPE. Общий вид прибора показан на рис. 1.



Рис. 1 – Общий вид прибора UNISCOPE

UNISCOPE – портативный прибор с автономным питанием, позволяющий оперативно проводить АЭ-контроль малогабаритных объектов, а также протяженных объектов, для которых оказывается достаточно линейной локации. Реализация на базе UNISCOPE системы SMART предполагает существенное расширение области его применения за счет возможности эффективного подавления шумов.

В режиме SMART прибор позволяет проводить АЭ-контроль оборудования газокompрессорных станций: трубопроводов, аппаратов воздушного охлаждения газа, запорной арматуры. В зашумленных цехах нефтеперерабатывающих заводов возможен контроль технологических трубопроводов, а также сосудов давления малого объема.

Эффективная работа системы SMART АЭ подтверждается результатами многочисленных лабораторных экспериментов.

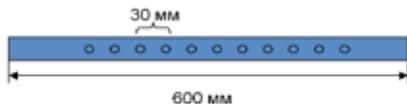
Результаты SMART-локации

Как известно, точность локации АЭ-событий зависит от точности определения времени прихода импульса АЭ. Поскольку система SMART позволяет точно определять время начала сигнала, ожидается, что ее точность локации будет выше, чем у стандартной АЭ-системы с пороговой записью данных.

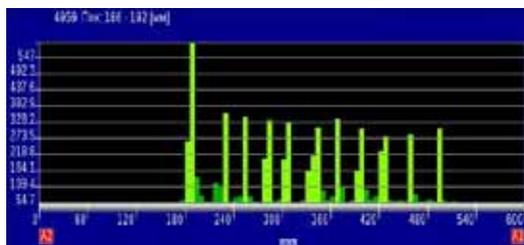
Для проверки точности локации был проведен следующий эксперимент. На пластине размерами 600x30x8 мм были выбраны 11 точек на расстоянии 30 мм друг от друга (рис. 2а). В каждой точке импульсы АЭ многократного излучались при помощи электронного имитатора. Результаты локации показаны на рис. 2б. Каждая точка излучения представлена на локации отдельной локализованной группой. Погрешность локации составила около 7 мм, что сопоставимо с диаметром преобразователя АЭ.

Локация на фоне источника помех

Для проверки помехоустойчивости системы был проведен эксперимент с локацией на фоне акустических шумов. Схема эксперимента показана на рис. 4. На короткой



а.



б.

Рис. 2 – Результат локации импульсов АЭ системой SMART

а. схема имитации импульсов АЭ; б. результат локации

металлической пластине длиной около 400 мм было установлено два преобразователя АЭ. В качестве источника импульсов АЭ был использован имитатор, установленный в центре пластины на расстоянии 125 мм от обоих преобразователей.

Для моделирования шума использовались приспособления имитирующие трение или вибрацию – наждачная бумага, шлиф-машина, дрель. Излучение импульсов АЭ осуществлялось с частотой 10 импульсов в секунду в течение 10 минут. Амплитуда импульсов АЭ составила порядка 50 дБ, уровень шумов – 45-50 дБ.

Результат локации источника АЭ на фоне шума показан на рис. 4. Для сравнения приведен результат локации, полученный при помощи стандартной системы АЭ (рис. 4а) и при помощи системы SMART АЭ (рис. 4б).

На карте локаций рис. 4а показано только 43 события из 600, локация системой SMART АЭ позволила зафиксировать 595 событий акустической эмиссии. Неудовлетворительный результат локации, полученный с использованием стандартной АЭ-системы, объясняется тем, что регистрация шумов вибрации приводит к неверному формированию АЭ событий и нарушает закономерность в определении разности вре-

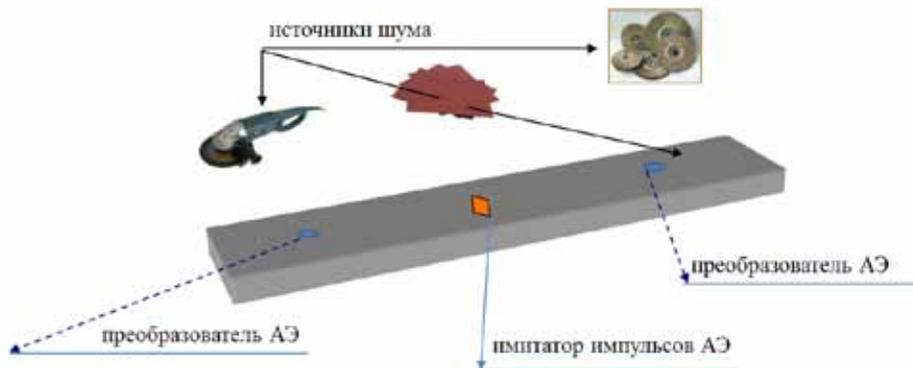
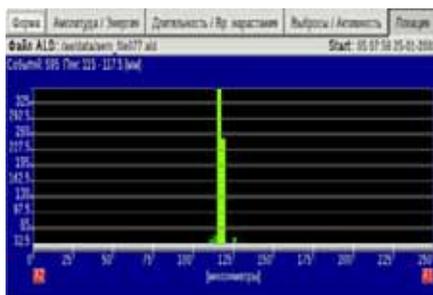


Рис. 3 – Схема эксперимента по локации импульсов АЭ источника шума



а.



б.

Рис. 4 – Результат локации источника АЭ на фоне шумов вибрации а. при помощи стандартной АЭ системы б. при помощи системы SMART АЭ

мен прихода сигналов. Система SMART не регистрирует шум вибрации за счет применения интеллектуальной схемы регистрации данных, обеспечивая локацию 99% излученных импульсов АЭ.

Заключение

Представленная АЭ-система имеет целый ряд преимуществ. Интеллектуальная АЭ-система позволяет повысить точность и достоверность результатов АЭ-контроля, так как прецизионное обнаружение импульсов акустической эмиссии позволяет уточнить результаты локации источников АЭ и скорректировать результаты их критериальной оценки.

Автоматическое определение настроечных параметров позволяет сократить время проведения процедуры АЭ-контроля и уменьшить влияние человеческого фактора на его результаты.

Список использованной литературы

1. Неразрушающий контроль : справочник. – Т. 7 / под общ.ред. В.В. Клюева. – Кн. 1. Иванов В.И., Власов И.Э.
2. Barat, V. Borodin, Y. Kuzmin, A. Intelligent AE Signal Filtering Methods // Journal AE. – 20110. – V. 28. – P. 109–119.
3. Харевов, В.Г., Попков, Ю.С. Автоматизированные системы комплексного коррозийного мониторинга и перспективы применения метода АЭ в их составе // В МИРЕ НК. – 2008. – № 3 [41] сентябрь.
4. Barat, V.A., Alyakritskij, A.L. Automated method for statistic processing of AE testing data // Journal AE. – 2008. – V. 28. – P. 132–141.

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

В.И. Эльманович,
ООО «ИНТЕРЮНИС»

Введение

В настоящее время на предприятиях нефтепереработки и нефтехимии проводится большой объем работ по техническому диагностированию оборудования, отслужившего проектный срок службы. Ключевыми моментами такого диагностирования являются неразрушающий контроль и оценка остаточного ресурса на основании прочностных расчетов.

Однако НК и наука о прочности применяются как бы независимо, и связь между ними является лишь качественной: нормирование дефектов проводят по НТД на изготовление новых изделий, оценку прочности выполняют для бездефектного материала. Для эксплуатируемых сосудов и аппаратов нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств такой подход утвердился в 70-е годы и был нормативно закреплён в действующих нормах и правилах.

Несмотря на большую актуальность в техническом, экономическом и экологическом аспектах, задача о нормировании дефектов методами механики разрушения, разработке таблиц допустимых в эксплуатации несплошностей (норм дефектов) для нефтезаводского оборудования на основе методов механики разрушения в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности не только не решена, но фактически и не ставилась.

Но уже в настоящий момент в части объединения НК и механики разрушения эффективно применение метода акустической эмиссии. Метод АЭ является интегральным методом экспериментальной оценки нагруженности промышленных конструкций как на стадии изготовления, так и в процессе эксплуатации. Эта интегральность и обуславливает потенциально высокую эффективность (по сравнению с традиционными методами НК) использования АЭ при оценке остаточного ресурса технологического оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств. Термин «потенциально высокая эффективность» здесь использован не случайно, т.к. сейчас в практике использования АЭ-метода превалирует традиционный «дефектоскопический уклон», когда АЭ-системы рассматривают как большую и дорогостоящую «приставку к дефектоскопу».

История вопроса

В 1956 г. профессор Зайцев Г.П. написал в журнале «Физика металлов и металловедение»: «В то время, как наши металловеды рассматривают в микроскоп структуру

металла и стараются сделать выводы о его свойствах, в Германии некий Кайзер (1950, Josef Kaiser) «подслушивает» металл и делает очень интересные выводы».

Что подслушал Кайзер [1]?

1*. В пределах упругой области нагружения импульсы акустической эмиссии не регистрируются.

2*. На выдержках постоянного напряжения импульсы АЭ не регистрируются.

3*. При разгрузке и повторном нагружении импульсы АЭ не регистрируются, пока не превышен достигнутый в начальном цикле наибольший уровень нагрузки.

В 80-е годы прошлого столетия совместными исследованиями Компаний Monsanto Chemical Company и Physical Acoustic Corporation эффекты Кайзера были уточнены и дополнены следующими положениями:

1. Эффекты Кайзера приближённо (0,85 – 0,9) справедливы только для бездефектного материала.

2. Для материалов с дефектами на выдержках постоянного давления регистрируется значительная АЭ-активность.

3. В материалах, имеющих трещины и трещиноподобные дефекты, АЭ возникает при меньшей величине напряжения, чем это определено эффектом Кайзера (эффект Фелисити – Felicity).

4. Чем ниже коэффициент Фелисити – отношение нагрузки, при которой регистрируется АЭ, к максимальной величине нагрузки предыдущего цикла нагружения – тем более опасен дефект.

5. АЭ регистрирует критический дефект начиная с нагрузки 30% от разрушающей.

Сопоставление эффектов Кайзера–Фелисити с законами пластического деформирования

Представляется естественным полагать, что эффекты Кайзера и Фелисити вполне объяснимы с позиций теории пластичности. По большому счёту, так оно и есть, однако необходимо учитывать, что сами модели пластического деформирования материала не вполне совершенны: в сложных ситуациях они нуждаются в более чётком осмыслении их соответствия реальности. В частности, объяснение описанных выше эффектов требует включения в анализ явлений длительной прочности и ползучести. Это обстоятельство побуждает обратиться к старым добрым представлениям о принципиальном единстве природы пластических деформаций, мгновенных и развивающихся со временем, которые только из соображений удобства математического описания оказались отнесёнными к разным наукам – теории пластичности и теории ползучести. Понимание этого единства было обнаружено, сохранялось и культивировалось, начиная с первых исследований явления пластичности.

Еще в первой четверти XIX века на основании испытаний образцов пластичных металлов Ф.И. Герстнером * был сформулирован закон, получивший его имя: **пластическое деформирование образца на повторном цикле нагружения (после первого нагружения до напряжений выше предела текучести и полной разгрузки) не происходит до тех пор, пока предварительно достигнутый уровень максимальных напряжений не будет превышен [2].**

Это положение выполняется приближенно: отклонение от линейно-упругого деформирования начинается вновь при нагрузке, равной 0,85 – 0,9 от предварительно достигнутого уровня напряжений.

Примечательны следующие экспериментально установленные факты:

- численные значения коэффициента Фелисити для бездефектного материала равные 0,85 – 0,9, т.е. практически совпадают с относительным уровнем отклонений от закона пластичности Герстнера;
- для промышленных объектов, содержащих трещиноподобные дефекты, выход на заметное пластическое деформирование при повторной нагрузке совершается ранее (вследствие концентрации напряжений вблизи дефекта) – уже на уровне 0,7 – и менее относительно достигнутого при первичном нагружении. В полном соответствии с этим, эксперименты с измерением сигналов АЭ также показывают малые значения коэффициента Фелисити.

Следует иметь в виду, что реальные процессы пластического деформирования, сопровождающиеся акустической эмиссией, происходят в материале конструкций локально, благодаря рассеянным или сосредоточенным разномасштабным структурным дефектам, в окрестности которых напряжения существенно превышают средний уровень. Вследствие этого величина истинного напряжения, если бы измерять его по состоянию малого объема материала из окрестности дефекта, оказалось бы совсем иной, нежели значение, полученное из кривой «нагрузка – перемещение» построенной по данным, средним по образцу. Появление акустической эмиссии до достижения средними напряжениями уровня предыдущего максимума (эффект Фелисити) естественно объяснить именно неоднородностью поля напряжений в зоне пластических деформаций в окрестности дефекта у вершины трещины: локальные напряжения достигают своих предельных значений много раньше, чем средние. В связи с этим, в вершине трещины должны генерироваться импульсы акустической эмиссии. Что и происходит: сигналы фиксируются, хотя при расчете по уровню средних напряжений всего этого быть не должно – налицо проявление эффекта Фелисити. Поскольку сосуды и трубопроводы нефтегазовой промышленности изготавливают из достаточно пластичных сталей, трещины в них, соответствуя известной «вязко-хрупкой» схеме, создают эффект «пластической волны», возбуждающей упругие волны более низкой частоты, чем при хрупком разрушении.

Обнаружена и причина иного рода, приводящая к нарушению закона Герстнера и эффекта Кайзера. Как показали специальные эксперименты, наиболее значительные отклонения от закона Герстнера возникают, когда на повторном цикле нагружения изменяется вид напряженного состояния и характер распределения микропластических деформаций в металлах [3]. Поскольку, сигналы акустической эмиссии вызываются динамическими структурными изменениями в процессах пластического течения, это может повлечь особенно низкие значения коэффициента Фелисити, что делает АЭ исключительно подходящим инструментом обнаружения и опознания дефектов, развивающихся при нагружении изделия. **Локальная смена вида напряженного состояния происходит, например, у вершины трещины при ее подрастании или образовании. Разнообразие в истории нагружения приводит к различию в форме и интенсивности энергии сигналов АЭ. Понимание учет этих особенностей способствует повышению диагностических возможностей.**

Метод АЭ-диагностики считается «пассивным», поскольку, в отличие от рентгенографического или ультразвукового, никаких воздействующих сигналов на объект исследователя не подаёт. Это позволяет производить ранжирование дефектов по степени

опасности в реальном рабочем режиме промышленного объекта (либо при специальном испытании), что существенно облегчает подготовку принятия управленческих решений [4]. Разумеется, АЭ-диагностика представляет собой лишь один из методов неразрушающего контроля, имеющий существенные недостатки, в частности, проблемы с правильным распознаванием «истинных» сигналов среди разнообразных помех. Эффект Кайзера нарушает одно из главных требований НК — повторяемость результатов. В рентгенографическом и ультразвуковом методах один и тот же объект можно контролировать в любое время, неограниченное число раз и получать один и тот же результат. В методе АЭ зависимость сигналов (читай — пластических деформаций) от истории нагружения создает видимость неоднозначности результатов. Необходимость объяснения причин вызывает регистрация сигналов АЭ на выдержках постоянной нагрузки. Большинство сталей при умеренных температурах и напряжениях не проявляют заметной пластичности или ползучести, поэтому, например, в оболочке, нагруженной постоянным давлением, не превышающем допустимое, казалось бы, не должно возникать акустической эмиссии. Однако в действительности её источники обнаруживают себя, что опять-таки может происходить из-за наличия в изделии трещиноподобных дефектов, создающих высокий уровень концентрации напряжений.

Статистические схемы для очагов повреждения. Если, при выполнении определенных условий, в единичном пространственно-временном объеме имеется n одинаковых элементов, с каждым из которых (независимо от поведения всех других) с вероятностью p может произойти случайное событие A , то вероятность того, что это событие в тех же условиях произойдет с i элементами, а с остальными $n-i$ не произойдет, определяется формулой биномиального распределения:

$$P_n(i) = C_n^i p^i q^{n-i}, \text{ где } q=1-p \quad (1).$$

Этот факт определяется элементарным подсчетом вариантов, благоприятных событию A .

Согласно центральной предельной теореме теории вероятностей, при условии, что числа i , n достаточно велики, а значения p , q не слишком близки к 0 и 1, оказывается, что

$$P_n(i) \cong \frac{1}{\sqrt{npq}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(i-np)^2}{2npq}} \quad (2).$$

Из этого следует, что дискретный биномиальный закон распределения вероятностей может быть приближен непрерывным нормальным (гауссовым) распределением вида $N(a, \sigma)$ с плотностью вероятностей:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} \quad (3),$$

где $a = np$, $\sigma = \sqrt{npq}$ — центр и среднеквадратическое отклонение от него, общие для биномиального и соответствующего нормального распределения.

Этот математический факт широко используется в статистической физике. Так, согласно Максвеллу, вероятность попадания в бесконечно-малый объем абстрактного пространства компонент скорости молекул v_1, v_2, v_3 подчиняется закону трехмерного нормального распределения и равна дифференциалу:

$$p(v_1, v_2, v_3) dv_1 dv_2 dv_3 = \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{mv_1^2 + mv_2^2 + mv_3^2}{2kT}} dv_1 dv_2 dv_3 = \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{u}{kT}} dv_1 dv_2 dv_3 \quad (4),$$

где T – абсолютная температура, m – масса молекулы, k – постоянная Больцмана.

Отсюда получают одномерную плотность распределения вероятностей кинетической энергии u поступательного движения молекул [5], функционально связанную с нормальным законом:

$$f(u) du = \frac{2}{\sqrt{\pi} (kT)^{\frac{3}{2}}} e^{-\frac{u}{kT}} \sqrt{u} du \quad (5).$$

Может показаться, что применение законов непрерывного распределения будет неправомерным для ситуации с движением дислокаций в поликристаллах при пластических деформациях, тем более – с дискретными импульсами АЭ. Однако, физической непрерывности для применения нормального закона не требуется: абстрактные пространства скоростей и энергии не связаны непосредственно с физическим пространством. Использовать нормальный (или иной) непрерывный закон можно там, где приближенно выполняются условия соответствующей предельной теоремы. Чисто математическая природа моделирующих зависимостей позволяет вообще не конкретизировать механизмы изменения элементарных структурных элементов: совершенно разные физические структуры при выполнении определенных условий могут быть описаны одним общим типом математических соотношений. Этим объясняется эффективность феноменологического подхода, применяемого при моделировании кинетических явлений, когда вместо доказательства предельных теорем опираются на экспериментальные факты для интересных в практическом отношении объектов.

Феноменологические модели ползучести и кинетическая теория прочности.

Описанный выше подход применяется в монографии Ю.Н. Работнова [6] к исследованию ползучести на основе экспоненциальной модели распределения вероятностей для энергии пластических деформаций, которая будет трактоваться здесь несколько более расширенно, впрочем, эта возможность тоже предусматривалась автором. Пусть мгновенное состояние материала определяется критическим значением u^* энергии его типовых структурных элементов, а вероятность того, что энергия определенного структурного элемента в определенный момент времени заключена между значениями u и $u+du$, выражается формулой показательного распределения:

$$p(u) du = \frac{1}{RT} \exp\left(-\frac{u}{RT}\right) du \quad (6).$$

Здесь применяется универсальная газовая постоянная $R=kN_A$, в связи с тем, что формула относится, в отличие от предыдущих, не к молекулам, а к молю вещества. Если энергия u элемента структуры материала превышает критическую величину u^* , называемую энергией активации, то этот элемент претерпевает элементарное структурное изменение, которое можно толковать как некоторое элементарное повреждение. Макроскопическим проявлением совокупности таких повреждений можно считать деформацию материала, или ее необратимую составляющую, либо, как и будет принято далее, часть деформации ползучести, линейно возрастающую со временем при постоянном напряжении (т.н. установившуюся ползучесть). Вероятность случайного события – пребывания выбранного наугад элемента в данный момент в активированном состоянии $u > u^*$ – или, что то же, относительное количество активированных элементов в моле вещества, определяется интегралом:

$$\int_{u^*}^{\infty} p du = \exp\left(-\frac{u^*}{RT}\right).$$

Если предположить, что скорость роста поврежденности материала v (далее понимаемая как скорость линейной по времени составляющей деформации ползучести) пропорциональна относительному количеству активированных элементов и некоторой возрастающей функции напряжения s , то при данном напряжении и данном структурном состоянии материала

$$v = \exp\left(-\frac{u^*}{RT}\right) f(\sigma) \quad (7).$$

«Во всех этих рассуждениях мы сознательно оставили в стороне вопрос, о каких именно структурных элементах идет речь. Разные физические теории конструируют различным образом эти структурные элементы – гипотетические или реально наблюдаемые» [6].

С феноменологической точки зрения соотношение (7) можно обобщить, заменив правую часть на возрастающую по обоим переменным функцию напряжения и температуры $v = f(s, T)$. В любом случае зависимость линейной по времени составляющей ползучести ϵ при постоянной температуре и напряжении описывается линейной формулой $\epsilon = vt$; t – время.

Допустив, как это нередко делается, что критерием прочности материала является условие достижения предельного значения деформации ϵ^* , получим, что соответствующая этому равенству прямая линия постоянной деформации $\epsilon = \epsilon^*$ на плоскости (t, ϵ) пересекает все наклонные прямые графиков линейной ползучести $\epsilon = vt$. В частности, для некоторых фиксированных троек значений времени, напряжения и температуры τ_0, σ_0, T_0 , и t, s, T накопленная ползучесть равна $\epsilon^* = v_0(\tau_0, \sigma_0, T_0)t = v(t, s, T)t$. Поделив обе части полученного равенства $v_0 t = vt$ на $v\tau_0$ получим соотношение для скоростей и времён разрушения при установившейся ползучести:

$$\frac{v_0}{v} = \frac{\tau}{\tau_0} \quad (8).$$

Цитируем далее [6]: «Ряд авторов (Dorn J.E., Tietz T., Kauzman W., Machlin E., Novic F.), отправляясь от различных гипотетических схем, получает зависимости скорости ползучести от напряжения и температуры следующего вида:

$$v = v_0 \exp\left(-\frac{u^* - \gamma\sigma}{RT}\right) \quad (9).$$

Здесь g – структурно-чувствительный коэффициент». В [6] приведена формула типа (8) по материалам С.Н. Журкова с сотрудниками, которые описаны в [7, 8] и проверены на широком круге материалов.

Логарифмируя обе части последнего равенства, приходим к зависимости:

$$\sigma = \frac{1}{\gamma} \left[u^* + RT \ln \frac{v}{v_0} \right] \quad (10).$$

Рассмотренные соотношения замыкаются в единую систему с основными положениями кинетической теории прочности С.Н. Журкова:

- разрушение металла не является мгновенным актом. Это протекающий во времени процесс, обусловленный тепловыми колебаниями атомов относительно равновесного положения в кристаллической решетке;
- разрушающие напряжения зависят от времени t , в течение которого металл находится под нагрузкой в соответствии с формулой:

$$\sigma = \frac{1}{\gamma} \left[u^* - RT \ln \frac{\tau}{\tau_0} \right] \quad (11).$$

При условии (8) последняя формула тождественна формуле (10), и они обе преобразуются к следующему виду:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{u^* - \gamma\sigma}{RT}\right) \quad (12).$$

Соотношение (12) используется в инженерной практике для определения временного ресурса прочности материала при постоянном напряжении s . Более того, как показано в [8] на множестве экспериментов с материалами разного рода, формулу (9) можно понимать не только как упрощенное эмпирическое соотношение, но как фундаментальную закономерность, связывающую процессы разрушения ползучести.

Основанием столь сильного утверждения служит приближённое (правда, обычно на уровне порядков) совпадение постоянных u^* и γ в формулах (9) и (12) для испытанных материалов в широких диапазонах напряжений и температур. Тем не менее, несмотря на то, что кинетическая теория прочности опирается на фундаментальные принципы статистической физики, в практике расчета на прочность деталей машин и элементов строительных конструкций она распространения не получила. Можно назвать конкретные препятствующие этому обстоятельства.

1. К настоящему времени имеются большие базы данных по механическим свойствам (пределу текучести, временному сопротивлению и т.п.) самых разнообразных материалов. Для практического использования необходимо создать такие же базы данных по u^* и γ .

2. Расчетное значение времени до разрушения τ по формуле (12) получается произведением очень малой величины τ_0 (порядка 10^{-13}) сек на очень большую (порядка 10^{20}) величину экспоненциального множителя, что предъявляет очень высокие требования к точности определяемых эмпирически значений энергии активации u^* и активационного объема γ .

3. Зависимость времени до разрушения от нагруженности в кинетической теории прочности существенна только при действующих напряжениях, близких к пределу прочности. Психологически трудно принять допустимость таких больших напряжений в конструкциях. Речь, однако, идёт о локальных концентрациях напряжений, но ведь они определяются с большими погрешностями.

Исследования MONSANTO и Physical Acoustics Corporation показали связь между активностью и интенсивностью акустической эмиссии на выдержках нагрузки, с одной стороны, и наличием развивающихся трещиноподобных дефектов в материале — с другой.

Результаты описанных здесь разных исследований в целом подтверждают кинетическую теорию прочности С.Н. Журкова. Связь между температурными флуктуациями на атомно-молекулярном уровне, развитием процессов неупругого деформирования и генерированием упругих волн развивающимися дефектами обусловлена единством математико-статистических схем, «управляющих» этими процессами. Элементарные акты структурных превращений, соответствующие определенной математической закономерности, при некоторых обстоятельствах могут определять общие системные свойствами ансамблей элементов, близкие для динамических структур разного масштаба и разной природы. В результате кинетическая теория длительной прочности и феноменологические теории ползучести, исторически восходящие к статистическим схемам 18 века и далее — к описаниям случайных флуктуаций молекул или иных структурных элементов в моделях физических сред последующего времени, оказываются непосредственно связанными между собой. Естественно, что эта связь распространяется на закономерности акустической эмиссии.

Дальнейшее обсуждение эффектов АЭ

Вышеописанные представления позволяют объяснить нарушение эффекта Кайзера 2. Поскольку при постоянном напряжении за время t , определяемое формулой (12), происходит разрушение материала, то этот процесс должен сопровождаться повреждениями структуры и, в частности, пластическими деформациями. Если эти деформации

могут улавливаться посредством прямого измерения, то они, безусловно, будут отнесены к явлению ползучести материала. Если же деформация ползучести, вследствие её узко локального характера и малости средних по объёму значений, не обнаруживается обычными механическими средствами измерения, то используются представления о длительной прочности. Однако для понимания смысла сигналов акустической эмиссии следует учитывать, что при этом в малых объёмах материала в местах концентрации напряжений вблизи дефектов, линий скольжения и иных источников концентрации скоростей необратимых деформаций происходит локальная ползучесть.

Поскольку процесс необратимой ползучести проявляет близкое родство с процессом разрушения материала, он сопровождается заметной акустической эмиссией. Последнее обстоятельство имеет не только прикладное, но и определенное познавательное значение, указывая на принципиальную возможность использования сигналов АЭ для измерения степени или хотя бы факта развития пластических деформаций или иных повреждений в условиях, когда другие методы окажутся несостоятельными.

Остается обсудить эффект, обозначенный как закономерность 4, возникающий вследствие длительного отдыха образца после первичного нагружения и последующей разгрузки. Принято отделять «мгновенные» пластические деформации, развивающиеся практически синхронно с напряжениями, от «временных» деформаций ползучести. Математически такое разделение удобно, поскольку позволяет строить два отдельных типа четко разграниченных хорошо формализуемых теорий деформирования – пластического и ползучего. Между тем, физические механизмы пластичности и ползучести металлов близки между собой и не имеют четкой границы, поскольку мгновенные, вневременные процессы суть идеализация реальных процессов, развивающихся с большими скоростями в течение малых интервалов времени и не поддающихся точному измерению в данных обстоятельствах. В общем случае говорят о спектре запаздывающих составляющих деформации, наиболее быстротекущие из которых в формальном моделировании относятся к «мгновенным», синхронным с напряжениями, а «замедленные» – к ползучим деформациям. В соответствии с этим созданы теории ползучести, использующие ядра наследственности в виде сумм или даже бесконечных рядов из членов с экспоненциальными ядрами.

Как показывают эксперименты, ползучие деформации (вообще говоря, – и нелинейные) могут быть, подобно мгновенным, также разделены на обратимые и необратимые. Обратимые деформации ползучести весьма характерны для полимеров, и обычно их называют вязкоупругими, при разгрузке они постепенно исчезают со временем (т.н. явление возврата). В металлах величина этих явно зависящих от времени составляющих обратимых деформаций обычно мала, так что ею нередко пренебрегают, у полимеров, напротив, чаще мала именно необратимая составляющая. Однако при высоких локальных напряжениях соотношения тех и других составляющих деформаций могут и не соответствовать тому, которое реализуется в обычных экспериментах на ползучесть.

Согласно формуле (9) и экспериментальным данным, зависимости скорости ползучести от параметров напряжения и от температуры качественно близки, что отмечается в работе [8]. При чрезвычайно высоких уровнях локальных напряжений длительный отдых образцов после нагрузки и разгрузки сопровождается активными процессами диффузии, способствующей релаксации внутренних напряжений, воз-

никших, в частности, за счет взаимодействия структурных элементов материала при пластических деформациях первичного нагружения. Релаксацию напряжений можно понимать как процесс локальной ползучести при убывающих во времени локальных напряжениях, так что в течение года этот процесс в основном завершается, и отдохнувший материал «забывает» о прежних нагрузках.

Таким образом, анализ всего накопленного опыта позволяет заключить, что закон Герстнера, а вместе с ним – и все эффекты Кайзера нарушаются при деформировании реальных материалов вследствие неоднородности структуры и полей напряжений, локального изменения вида напряженного состояния в процессе нагружения, а также влияния временных эффектов поведения материалов. Эти обстоятельства взаимодействуют между собой и различаются по вызывающим их механизмам. Отмечают два масштабных уровня соответствующих моделей описания поведения: макродефекты, моделируемые теорией магистральных трещин, и микродефекты в пластически деформируемом металле, случайная природа возникновения и движения которых может моделироваться кинетическими соотношениями и управляться статистическими свойствами материала. Изменение напряжений в окрестности вершины микротрещины за счет элементарных актов ее продвижения способно порождать собственную, локальную по времени и месту кинетику, которая налагается на общий процесс, обусловленный внешними воздействиями [9].

С развитием методов АЭ, по-видимому, можно будет использовать их в экспериментах, например, в целях уточнения деформационного критерия длительной прочности. В частности, представляет интерес проверка на конструкционных сталях утверждений, высказанных в [7, 8] о необратимой составляющей деформации установившейся ползучести как признаке накопления микроповреждений материала, способном определять количественный критерий разрушения. Разделение обратимой и необратимой составляющих ползучести (как линейных, так и нелинейных) практически осуществимо на основе процедур, описанных в [10, 11].

Выводы

1. Связи между структурными изменениями в металле и физическими эффектами сигналов акустической эмиссии, обнаруженные многолетней отечественной и зарубежной практикой, раскрываются и объясняются анализом моделей статистической физики, кинетики процессов разрушения, механики деформируемого твёрдого тела.

2. При оценке возможности, условий и сроков безопасной эксплуатации технологического оборудования из малоуглеродистых и низколегированных сталей сигналы акустической эмиссии следует рассматривать как диагностическую информацию о пластическом деформировании металла объекта экспертизы.

3. Отклонения от эффектов Кайзера суть следствия отклонений от закона пластичности Герстнера, вызываемых историей нагружения материала и локальными пространственно-временными неоднородностями поля скоростей пластических деформаций в окрестностях дефектов реального изделия.

4. Указанные выше факты служат основанием для признания критериальной адекватности метода АЭ, как средства обнаружения и оценки степени опасности дефектов металла. Критериями наличия развивающихся опасных дефектов в материале конструкций являются:

-
- величина коэффициента Фелисити менее 0,85;
 - акустико-эмиссионная активность на выдержках постоянной нагрузки.

5. Эффективное применение АЭ диагностики как инструмента прикладной механики разрушения позволило разработать и внедрить технические решения о возможности дальнейшей эксплуатации крупногабаритного дорогостоящего оборудования ряда нефтеперерабатывающих заводов.

Список использованной литературы

1. Kaiser, J. Untersuchungen über das Auftreten Geräuschen beim Zugversuch, 1953, Ph.D/Thesis, Technical Hochsch. – München, 1950.
2. Тимошенко, С.П. История науки о сопротивлении материалов. – М. : Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1957. – С. 124–256.
3. Кукса, Л.В., Ковальчук, Б.И., Лебедев, А.А., Эльманович, В.И. Влияние вида напряженного состояния на характер распределения микродеформаций в металлах // Проблемы прочности : сб. науч. тр. – 1976. – № 6.
4. Брызгалин, Г.И., Эльманович, В.И. Анализ смысла сигналов акустической эмиссии в механически нагружаемых стальных оболочках // Справочник. Инженерный журнал. – 2009. – № 5.
5. Физика : энциклопедия / под ред. Ю.В. Прохорова. – М. : Большая российская энциклопедия, 2003.
6. Работнов, Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. – М. : Наука, 1966. – 752 с.
7. Журков, С.Н., Нарзуллаев, Б.Н. Временная зависимость прочности твердых тел // ЖТФ. – 1953. – Т. 23. – № 10.
8. Кинетическая природа прочности твердых тел : монография/ В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. – М. : Главная ред. физ.-мат. лит. изд-ва «Наука», 1974. – 560 с.
9. Эльманович, В.И. Концентрация макро- и микронапряжений в поликристаллических оболочках с местными нарушениями геометрической формы : автореферат диссертации на соискание. уч. ст. канд. физ.-мат. наук. – Волгоград, 1989. – 24 с.
10. Брызгалин, Г.И. О ползучести при переменных напряжениях. – Волгоград : ПМТФ. – 1962. – № 3. – С. 73–77.
11. Брызгалин, Г.И. К проверке теории наследственного возврата // Ползучесть и длительная прочность : сборник статей. – Новосибирск. – 1963. – С. 145–147.

УСТОЙЧИВОСТЬ И РИСКИ КАТАСТРОФ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.М. Лепихин
СКТБ «Наука» КНЦ СО РАН

Проблема обеспечения безопасности техносферы приобретает все большую актуальность в современном обществе. Этой проблеме посвящены многие политические форумы и научные конференции, на которых рассматриваются природные, техногенные, социальные, природно-техногенные, природно-социальные и социально-техногенные угрозы. Как правило, эти угрозы рассматриваются в контексте факторов их усиления. К основным усиливающим факторам относят ускорение технического прогресса, социальные изменения общества, ускорение глобальный изменений климата и изменений природной среды.

На этом фоне в последние годы произошел ряд крупных техногенных катастроф: Чернобыльская катастрофа (1986 г.), авария на химическом комбинате в г. Тулуза (Франция, 2001 г.), авария на нефтеперерабатывающем заводе в Техасе (США, 2005 г.), авария на Саяно-Шушенской ГЭС (2009 г.) и др. Особо следует отметить природно-техногенную аварию на АЭС «Фукусима» (Япония, 2011 г.). В этом случае ярко проявился синергетический эффект реализации природных и техногенных угроз.

Как показывает анализ мировой статистики аварий и стихийных бедствий [1, 2], имеет место устойчивое для последних десятилетий распределение их числа (рисунок 1). Наиболее частыми являются наводнения, техногенные аварии, штормы, землетрясения и пожары.

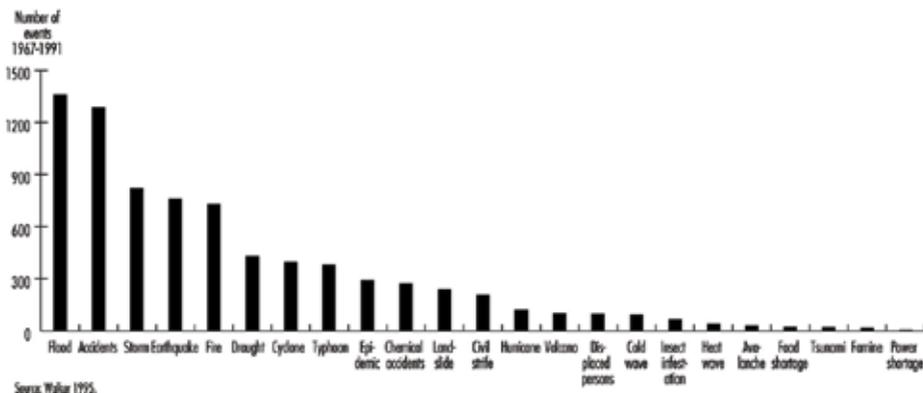


Рисунок 1 – Частота аварий и стихийных бедствий

Интересная картина выявляется при анализе динамики аварий и стихийных бедствий (рисунок 2). Несмотря на широкие научные исследования, инженерно-технические и организационные мероприятия по прогнозированию и предупреждению катастроф число аварий и стихийных бедствий неуклонно растет [3]. Как следствие этого, растут и страховые ущербы (рисунок 3).

На рубеже XX и XXI веков проблема безопасности техносферы приобрела качественно иной характер, определяемый новой структурой рисков [4]. К традиционному рассматриваемым природным и техногенным рискам добавились сингулярные и комплексные риски [5]. Сингулярные риски – это риски, не воспринимаемые органами чувств непосредственно, не компенсируемые и не имеющие конкретных виновников. К таким рискам можно отнести риски генной инженерии, биотехнологий, нанотехнологий, искусственного интеллекта. Комплексные риски – это риски порождаемые социумом (обществом), технологиями и природной средой. Фактически эти риски обусловлены созданием и расширением сферы действий нового класса систем – больших сложных стохастических систем, ключевыми элементами которых являются человек, природная среда и техника.

Анализ общих свойств больших сложных стохастических систем требует разработки новых концептуальных подходов, теорий и методов. В настоящее время они активно разрабатываются в рамках междисциплинарных исследований. Специфика: большие сложные стохастические системы имеют ряд характерных особенностей, связывающих понятия иерархичности, сложности, динамики и стохастичности:

- 1) они имеют иерархию масштабов и иерархию структур;
- 2) иерархия масштабов зависит от характера критических событий;
- 3) внутренние процессы взаимообусловлены, имеют разную физическую природу и стохастические рассеяния в пространстве и во времени;
- 4) предсказательная способность сохраняется только на коротких отрезках времени.

Сложность анализа таких систем заключается в том, что его необходимо проводить по иерархии и по времени (рисунок 4). В первом случае необходимо рассматривать экстремумы процессов изменения энергий на разных уровнях иерархии структуры. Во втором случае необходимо рассматривать разворачивание процессов во времени. Причем этот анализ должен быть взаимосвязанным.

Анализ общих закономерностей катастроф больших сложных стохастических систем позволяет сделать ряд важных выводов о необходимых и достаточных условиях реализации катастроф. Прежде всего следует отметить, что независимо от характера катастрофы обусловлены критическими событиями в структуре системы – скачкообразными изменениями состояния системы с опасными последствиями как для самой системы, так и для окружающей среды. При этом можно выделить необходимые и достаточные условия катастроф. К необходимым условиям относятся: многосвязность структуры; наличие исходных «повреждающих» событий разной природы (ошибки, дефекты, внешние воздействия и т.п.); локальная неустойчивость элементов структуры; образование кластера «поврежденных» элементов (самоорганизующийся кластер).

Достаточными условиями катастрофы являются: глобальная неустойчивость системы; разрушение критического элемента структуры системы. В связи с

этим вопросы оценки устойчивости систем приобретают особое значение. Под устойчивостью в данном случае следует понимать способность системы сохранять текущее безопасное состояние.

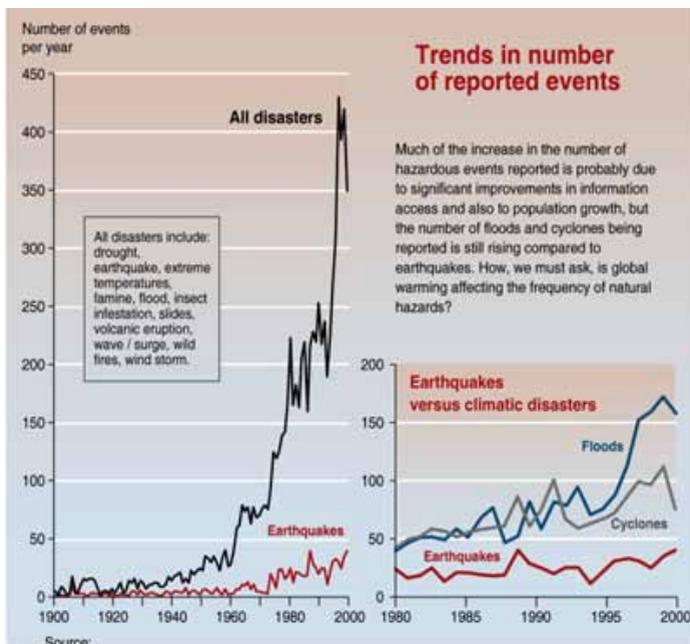
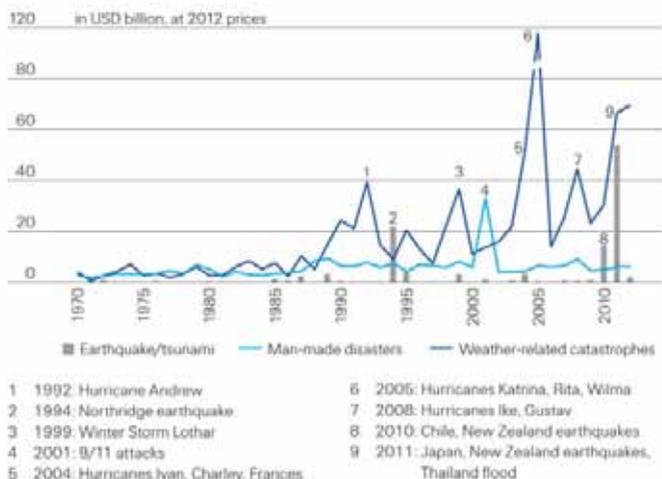


Рисунок 2 – Динамика числа аварий и стихийных бедствий

Insured catastrophe losses 1970–2012



Source: Swiss Re Economic Research & Consulting

Рисунок 3 – Динамика страховых ущербов

С учетом введения понятия устойчивости следует ввести и обобщенное определение понятия риска. Под ним следует понимать возможность возникновения опасных последствий из-за потери устойчивости системы. Следует особо отметить, что устойчивость системы и склонность к катастрофам связаны с природой самой системы, а не с тем, как внешние источники воздействуют на эту систему. Для каждой системы есть свое характерное время предсказуемости динамики состояний (рисунок 5). В пределах времени предсказуемости можно оценивать устойчивость системы. За пределами предсказуемости можно говорить только о риске катастроф.

Для стохастических систем устойчивость и риск должны характеризоваться вероятностными мерами. В качестве меры устойчивости можно рассматривать стохастический показатель чувствительности $S(t)$, определяющий изменение функции вероятностей $f(x, t)$ состояния системы при изменении ее параметров:

$$S_j(t) = \int \left| \frac{\partial f[x(\beta), t]}{\partial \beta_j} \right| f(x, t) dx \quad (1).$$

В качестве меры риска потери устойчивости можно использовать традиционно рассматриваемую вероятность ущерба:

$$R(x, t) = \int_x \int_t f(x, t) U(x, t) dx dt \quad (2),$$

где $U(x, t)$ величина ущерба, зависящая от параметра состояния x , $f(x, t)$ – плотность распределения вероятностей параметра состояния x .

Специфика обеих задач заключается в выборе класса вероятностных функций. Для характеристики устойчивости больших стохастических систем наиболее подходящим классом распределений можно считать распределения наименьших значений времени до появления критического события в структуре системы. Известно три типа таких распределений [6]:

тип 1
$$F(x) = 1 - \exp \left\{ -\exp \left(\frac{x - \delta}{\theta} \right) \right\} \quad (3),$$

тип 2
$$F(x) = 1 - \exp \left\{ -\exp \left(\frac{x - \delta}{\theta} \right)^{-\beta} \right\} \quad (4),$$

тип 3
$$F(x) = 1 - \exp \left\{ -\exp \left(\frac{x - \delta}{\theta} \right)^{\beta} \right\} \quad (5),$$

Для определений риска следует использовать функции распределений наибольших значений или степенные распределения с «тяжелыми» хвостами:

тип 1
$$F(x) = \exp \left\{ -\exp \left(\frac{x - \delta}{\theta} \right) \right\} \quad (6),$$

тип 2
$$F(x) = \exp \left\{ -\exp \left(\frac{x - \delta}{\theta} \right)^{-\beta} \right\} \quad (7),$$

тип 3

$$F(x) = \exp \left\{ -\exp \left(\frac{x - \delta}{\theta} \right)^\beta \right\} \quad (8),$$

распределение Парето

$$F(x) = 1 - \left(\frac{x_m}{x} \right)^\alpha \quad (9),$$

где $\delta, \beta, \alpha, \theta, x_m$ – статистические параметры.

В заключение следует отметить следующее. Проблема обеспечения безопасности неуклонно обостряется и глобализируется, охватывая социум, технологии и природную среду. Основным источником угроз становятся сложные социо-природно-техногенные большие системы. Для снижения угроз и рисков сложных больших систем нужны новые теории, модели, технологии риск-анализа и оперативные управленческие решения. Базисом обеспечения безопасности сложных больших систем должен стать комплексный анализ показателей устойчивости и риска аварий.

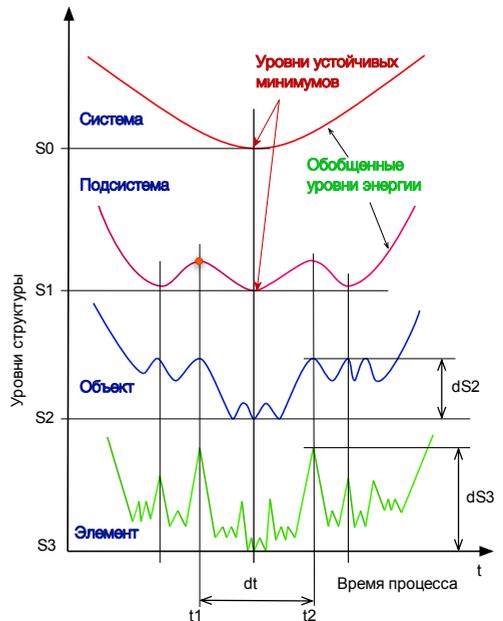


Рисунок 4 – Схема иерархической взаимосвязи процессов в сложных системах

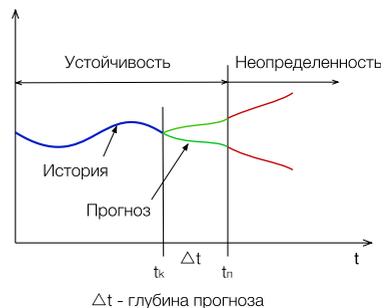


Рисунок 5 – Схема взаимосвязи устойчивости и неопределенности состояний системы

Список использованной литературы

1. Международное информационно-аналитическое агентство «Washington ProFile» [Электронный ресурс] // URL : <http://www.washprofile.org>.
2. Garrison, W.G. Large property damage losses in the hydrocarbon-chemical industries. A thirty-year review. – New York, 1998.
3. Annual Disaster. Statistical Review 2012. The numbers and trends / Debarati GuhaSapir, Philippe Hoyois and Regina Below. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), Institute of Health and Society (IRSS), Universit catholique de Louvain – Brussels. – Belgium, 2012.
4. Lepikhin, A.M. Modelling and Computing technologies in problems of risk analysis of complex engineering systems // *Mathematical and informational technologies*. – 2013. – P. 105.
5. Lepikhin, A., Lepikhina, I. Probabilistic models for risk assessment of disasters // *Safety and security engineering IV*. – WITpress, 2011. – P. 83–90.
6. Гумбель, Э. Статистика экстремальных значений. – М. : Мир, 1965. – 450 с.

ОСОБЕННОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ АЭК С ПОМОЩЬЮ АЭ СИСТЕМ СЕМЕЙСТВА A-LINE32D

А.Г. Комаров
ООО «ИНТЕРЮНИС»

1 Методика проведения АЭК с АЭ-системой A-Line32D

A-Line32D – мощная АЭ-система с достаточно сложным и постоянно развивающимся программным обеспечением.

В настоящий момент используются и выпускаются несколько поколений аппаратуры A-Line32D: РСІ-системы нескольких поколений (традиционной архитектуры типа звезда), ДДМ-системы, в которых модули АЦП соединяются последовательно.

Каждый из типов АЭ-систем имеет свои особенности конфигурации, настройки, подключения датчиков разного типа, действий в случае неполадок и отказов.

Программное обеспечение этих систем также имеет ряд особенностей:

Несколько видов фильтрации:

- пре-фильтрация;
- классический фильтр;
- фильтрация по региону;
- фильтрация по локации;
- фильтрация по характеристикам пачек от источников АЭ в окне локации.

Определение и формирование событий/пачек:

- при фильтрации;
- при локации различного типа.

Различные алгоритмы локализации:

- для листа может быть;
- треугольная;
- четырехугольная;
- рисунок;
- для сфер – четыре типа локации;
- секторная – треугольная;
- кубическая – треугольная;
- кубическая – четырехугольная;
- произвольная.

Диаграммы могут быть разного типа, сформированы различными способами и представлять различные данные АЭК.

Встроенная классификация:

- амплитудный критерий;
- локально-динамический критерий;
- диаграмма S-H;
- статистический критерий.

Автоматическое измерение скорости.

Автоматическая калибровка каналов.

Компания «Интерюнис» подготавливает методику проведения АЭ-контроля с использованием систем семейства A-Line32D.

Цель разработки «методики...»:

- продолжение формирования «экосистемы» A-Line;
- дальнейшее совершенствование АЭ-систем и ПО семейства A-Line32D;
- разработка методического документа, определяющего порядок работ по проведению АЭК с использованием оборудования и ПО A-Line32D;
- унификация проведения АЭК, обеспечение анализируемости и сопоставимости результатов.

Применение «методики...»

- как методический документ, определяющий порядок работ по проведению АЭК;
- как руководство по практическому использованию возможностей оборудования и ПО A-Line32D.

Целевая аудитория (группа):

- сотрудники ООО «ИНТЕРЮНИС», выполняющие практический АЭК;
- клиенты ООО «ИНТЕРЮНИС», приобретающие АЭ-системы;
- учебные центры, подготавливающие персонал по АЭ-методу контроля.

Предварительное содержание методики:

Общая часть:

- назначение, состав и область применения методики;
- действующие нормативные документы в области АЭК;
- терминология;
- порядок применения АЭ-метода контроля.

Аппаратура:

- эволюция АЭ-систем семейства A-Line32D;
- конструктивные особенности АЭ-систем семейства A-Line32D;
- архитектура (ISA, PCI-N, PCI-8, DDM, Ethernet Box);
- преусилители, модули, преобразователи;

-
- встроенные фильтры;
 - АЦП, параметры таймирования, их обоснованный выбор, коэффициент усиления, частота дискретизации, разрядность, формирование импульса АЭ, его параметров;
 - вычисление амплитуды;
 - поверка и проверка аппаратуры;
 - подключение дополнительных датчиков.

Программное обеспечение:

- различия в версиях;
- файлы, генерируемые и используемые системой;
- регистрация данных;
- параметры регистрации традиционных данных;
- меню, панель управления каналами, интерфейс управления окнами;
- диаграммы, общие принципы построения;
- локация;
- особенности локации в системах (ПО) A-Line32.

Организационные вопросы АЭК:

- схемы применения АЭК;
- общая организация АЭК;
- программа работ;
- технология;
- программа нагружения;
- схема размещения ПАЭ;
- проведение АЭК, рабочий протокол;
- предварительное заключение;
- протокол и заключение;
- отчет.

Подготовка АЭК:

- подготовка и настройка оборудования;
- неисправности аппаратуры, порядок и способы устранения;
- определение затухания;
- определение скорости звука;
- размещение преобразователей;
- испытательное давление;
- программа нагружения;
- особенности программ нагружения в сложных случаях контроля;
- помехи, способы устранения.

Порядок проведения АЭК:

- подготовка к испытанию и проверка АЭ-аппаратуры;
- проведение АЭК;
- режим записи и паузы;

-
- рабочий протокол АЭК;
 - завершение испытания и АЭК;
 - особенности проведения АЭК;
 - выполнение контрольной проверки АЭ-системы;
 - изменение порога;
 - скорость нагружения, ее изменение, эффект «свистка»;
 - выдержки давления;
 - сброс давления;
 - повторное нагружение;
 - нештатные ситуации.

Специальные случаи АЭК, особенности:

- сосуды, работающие под давлением;
- колонное оборудование;
- резервуары шаровые;
- трубопроводы технологические;
- РВС;
- баллоны.

Оценка данных АЭК в процессе проведения АЭК

Анализ, обработка и оценка данных АЭК:

- локализация;
- критерии оценки;
- планарная локация – EN 14584;
- зонная локация – EN 15495.

Вопросы работы со статистическими данными и данными формы волны:

- возможности работы с формой волны в программе A-Line32D;
- назначение, возможности и использование программы A-Line Stat;
- назначение, возможности и использование A-Line OSC processing.

2 Программа формирования текстового файла АЭ данных.

В рамках подготовки методики для изучения особенностей работы аппаратной и программной части АЭ-систем создана программа генерации АЭ-данных (рисунок 1).

Для чего нужна подобная программа:

1. Настройка и проверка ПО системы, критериев оценки на подготовленных данных.
2. Получение специально подготовленных данных для проверки работы АЭ-системы в сложных условиях.
3. Исследование возможностей и особенностей АЭ-системы.
4. Обучение специалистов НК.

Что программа может сейчас:

- генерировать файл данных для АЭ-систем PAC (с учетом имеющихся конвертеров – для систем Vallen Systeme) и ИНТЕРЮНИС;

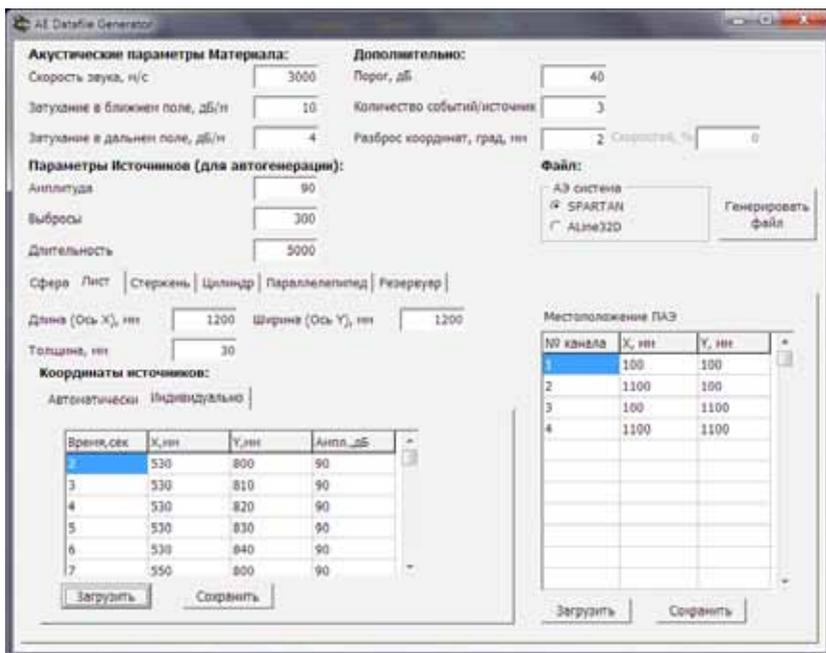


Рисунок 1. Программа генерации АЭ-данных

- генерировать файл для сферы или для листа (рисунок 2);
- расположение ПАЭ для этих объектов – произвольное: широта и долгота для сферы, координаты X и Y для листа;
- полуавтоматическое задание источников – по сетке, через заданное количество градусов широты и долготы или миллиметров, с постоянным интервалом по времени, количество событий в одной точке настраивается, возможен разброс событий по координатам и/или скорости. Амплитуда событий задается и постоянна для всех событий;
- ручное задание источников – в заданных координатах широты и долготы или миллиметров, в определенное время, в том числе с перекрытием, заданной индивидуально для события амплитудой;
- сохранение источников и координат ПАЭ;
- Запись амплитуды событий с учетом затухания в ближнем и дальнем поле.

Планируется:

- генерация файла данных для объектов типа:
 - резервуар;
 - параллелепипед;
 - стержень (линейная);
 - цилиндр с эллиптическими (полусферическими) днищами.

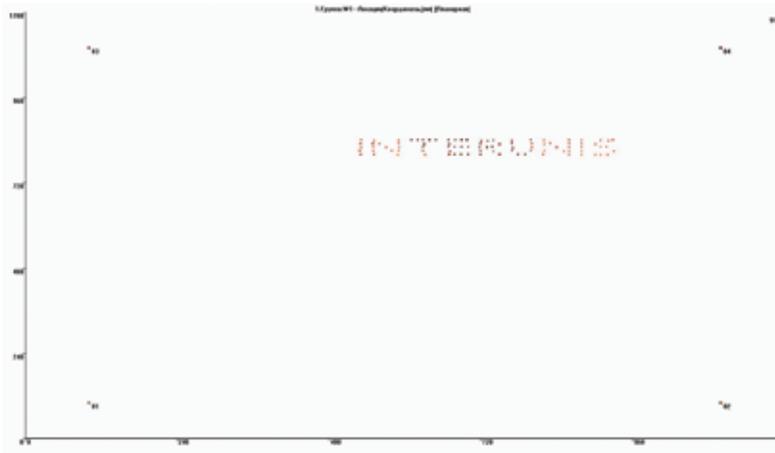


Рисунок 2. Пример генерации файла данных для листа

С использованием программы выявлена проблема с локацией в одной из прошлых версиях ПО: если источник расположен на границе между зонами ПАЭ, то он мог быть не залоцирован (рисунок 3). В последних версиях ПО ошибка исправлена.

Выводы

В докладе представлена разрабатываемая в ООО «ИНТЕРЮНИС» «Методика проведения АЭ-контроля с использованием систем семейства A-Line32D» и вспомогательное программное обеспечение для формирования АЭ данных.

Предложения по составу «методики...» принимаются разработчиком:
 Комаров Алексей Григорьевич (KomarovAG@interunis.ru).

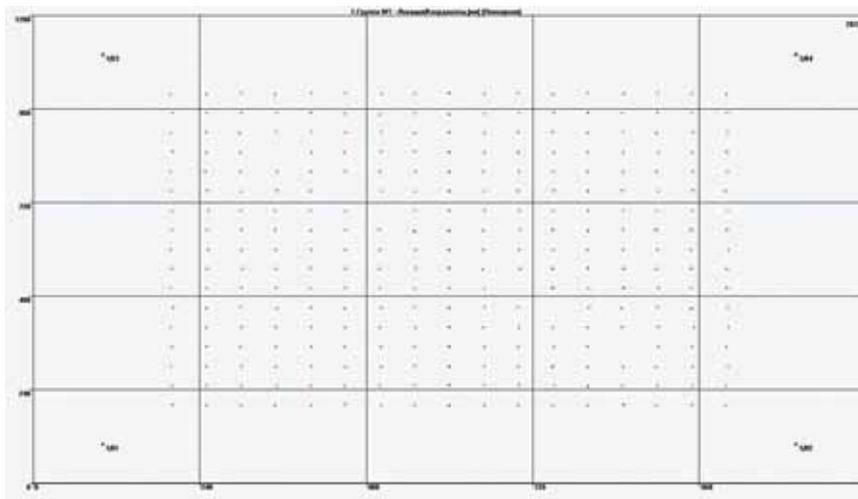


Рисунок 3. Незалоцированные источники на границе между зонами (ПАЭ 2-3)

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА АЭ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ РИСКА РАЗРУШЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

к.т.н. Петерсен Т.Б., НИЦ “Курчатовский Институт”,
ООО “ДИАПАК”

В общем случае неполноты знания о состоянии и уровне поврежденности материала объекта, основные трудности при анализе рисков, связанных с возможной угрозой выбросов опасных веществ ОПО, заключаются в оценке вероятности отказа. Технология RBI [1] сужает представление об отказе, рассматривая его исключительно как результат потери герметичности/целостности объекта. Это позволяет использовать кинетические подходы механики разрушения и накопления поврежденности для оценки вероятности отказа как функции времени. Методы НК, которые используются для определения фактического состояния поврежденности объекта и оценки вероятности отказа, одновременно относятся к факторам снижения риска отказа, т.к. после проведения процедуры обследования принимаются соответствующие защитные меры. Показатель снижения риска зависит от способа проведения обследования, при этом эффективность или достоверность конкретного метода контроля определяется чувствительностью метода к наиболее вероятным дефектам в текущих условиях работы.

АЭ считается высокоэффективным методом для обнаружения поверхностного и подповерхностного растрескивания, а также образования и развития макротрещин [1]. В отличие от механизмов, связанных, например, с потерей толщины, для которых существует обоснованная методология оценки вероятности отказа, расчет вероятности разрушения при трещинообразовании в общем случае базируется не на структурных моделях, а на использовании формальных технических коэффициентов. Даже в тех случаях, когда для оценки поврежденности используются вероятностные модели, такие модели, как правило, являются формальными, поскольку параметры модели подбираются путем подгонки и непосредственно не связаны с физическими/механическими параметрами процесса разрушения, например, с уровнем напряжения, КИН, размерами и плотностью дефектов, и другими.

Например, для трубного пучка, функция вероятности определяется с использованием двухпараметрической функции распределения Вейбулла [1]:

$$P_f = \beta / \alpha \cdot (t / \alpha)^{\beta-1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \right]$$

При этом показатель распределения β (для трубного пучка $\beta = 2.56$) – и характеристическое время α ($\alpha = 20.4$ г.) никак не связаны с перечисленными параметрами поврежденности.

Вышесказанное, в частности, свидетельствует о том, что оценка риска, основанная на произведении вероятности события, связанного с разрушением, на последствия данного события, носит достаточно условный и относительный характер.

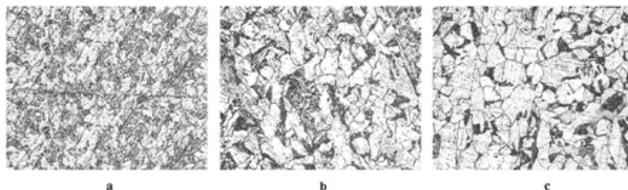
В то же время многочисленные механические испытания образцов различных типов, изготовленных из различных материалов, проведенные нами в лабораторных условиях с одновременной регистрацией АЭ, показывают, что данный метод является чрезвычайно структурно чувствительным и позволяет наблюдать и анализировать стадийность процесса разрушения в реальном времени. С целью обоснования того, какие параметры микроразрушения являются ключевыми для оценки степени поврежденности и, следовательно, вероятности разрушения, приведены результаты моделирования накопления и развития микротрещин [2], а также экспериментальные данные, полученные методом реплик и АЭ в процессе разрушения стальных образцов [3]. Ниже приведен пример исследованных материалов с различной микроструктурой.

Материалы

Образцы с инициаторами, углеродистая сталь Ст3;
Образцы типа ДКБ, низкоуглеродистая сталь 30Г2

Table 1. Chemical composition of St3 (in weight %)

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	As	N
0.14 – 0.22	0.15 – 0.30	0.40 – 0.65	≤0.050	≤0.040	≤0.30	≤0.30	≤0.30	≤0.080	≤0.010



а) Начальная структура Ст3: зерно $d = 27 \mu\text{m}$;
б) После отжига, $T = 950^\circ \text{C}$ (3h): $\langle d \rangle = 78 \mu\text{m}$;
в) После, $T = 1000^\circ \text{C}$: $\langle d \rangle = 97 \mu\text{m}$

Результаты аналитического расчета в соответствии с предложенной моделью, а также данные АЭ и микроскопии, полученные методом реплик, приведены на рис. 1.

Сходство полученных распределений свидетельствует о том, что в определенных случаях метод АЭ может использоваться для оценки динамики развития поврежденности материала и вероятности разрушения. Вероятность разрушения в данном случае должна оцениваться по интегральной/кумулятивной функции распределения/гистограммы как вероятность достижения микротрещиной определенного критического размера, который в рамках микромеханики разрушения рассматривается в качестве исходного размера макротрещины.

Для получения наиболее полного представления о состоянии материала применялись различные способы обработки данных экспериментов, в том числе – анализ потоков АЭ-событий, динамические и статистические характеристики распределений амплитуд АЭ, включая b -параметр, а также распределения интервалов между собы-

тиями [3]. Результаты демонстрируют принципиальную возможность использования метода АЭ для анализа стадийности и степени поврежденности материала и вероятности разрушения.

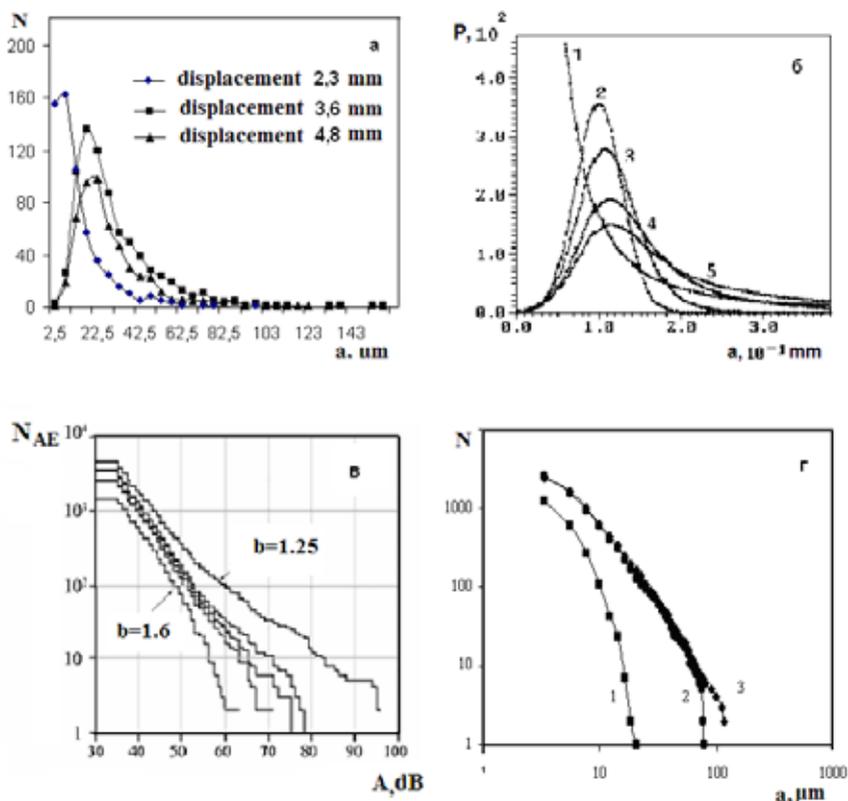


Рисунок 1. Плотности и кумулятивные функции распределения. а) гистограмма плотностей распределения микротрещин по размерам на различных стадиях разрушения (реплики), плотность распределения микротрещин по размерам на различных стадиях разрушения (вероятностная модель); гистограмма кумулятивного распределения сигналов АЭ; гистограмма кумулятивного распределения трещин по размерам

II. На практике АЭ используется не только как структурно-чувствительный метод НК, но и как метод интегральной оценки состояния целостности материала/объекта. В этом смысле прослеживается прямая аналогия между матрицей риска в технологии RBI и способами ранжирования объектов по степени опасности в технологиях АЭ, которые используются группой компаний MISTRAS Group.Inc., например, MONPAC, TANKPAC.

Дополнительные возможности метода АЭ применительно к задаче непрерывного АЭ мониторинга связаны с более детальным анализом акустических шумов, которые аппаратура регистрирует путем прореживания исходных оцифрованных данных.

Здесь особый интерес представляет продемонстрированная нами возможность наблюдать резонансы спектральных характеристик шума/вибраций, используя данные среднеквадратического значения (СКЗ) шума.

Исследования, проведенные на работающем реакторе [4], показали, что основной высокочастотный шум создается в результате соударения между собой и о стенки реактора массы твердых частиц полипропиленового (ПП) перемешиваемого порошка. Несмотря на применение низкочастотной фильтрации при регистрации (частота среза 100 кГц), на спектрах СКЗ шума наблюдаются отчетливые пики, связанные с частотой работы перемешивающего устройства, рис.2а,б, а также вибраций. При этом на спектрах оцифрованных сигналов пики на упомянутых частотах резонансы отсутствуют, что подтверждает факт низкочастотного модулирования высокочастотных шумовых сигналов и подчеркивает важность анализа СКЗ.

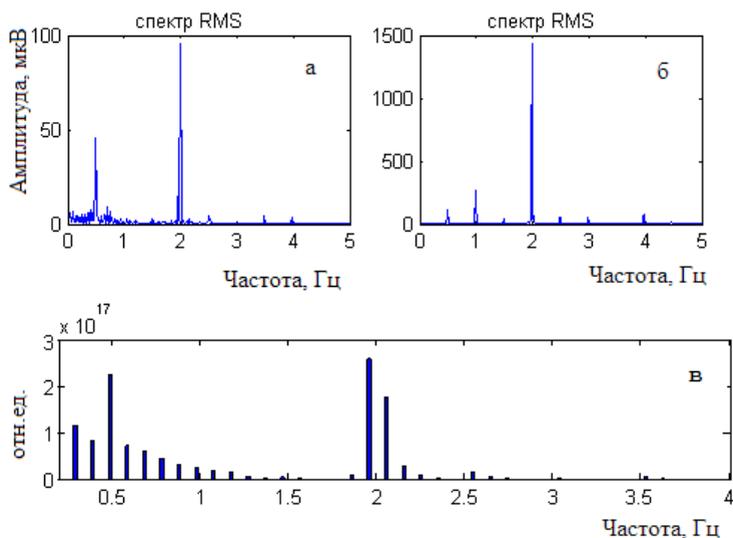


Рисунок 2. Низкие частоты, соответствующие вращению лопаткам мешалки. а-б) Гармоники с основной частотой 0,5 Гц выделены из СКЗ высокочастотного шума; в) Частоты получены в результате спектрального анализа автокорреляционной функции последовательности хитов АЭ

Кроме того, было установлено, что поиск периодически повторяющихся процессов и их частотный анализ может проводиться исключительно на основе информации об АЭ сигналах (хитах). На рис. 2в дано Фурье-преобразование квази-автокорреляционной функции, полученной специальным способом на основе анализа последовательности сигналов (хитов). Присутствие резонансов на тех же частотах, которые были получены в результате анализа СКЗ шума, свидетельствует об эффективности анализа потока хитов.

Как было установлено ранее, периодические помехи механического происхождения, схожие по своим характеристикам с реальными источниками, могут формировать кластера ложных событий и неправильно интерпретироваться как опасные источники. В связи с этим приведенный способ обработки данных, позволяющий уточнять,

относится зарегистрированный сигнал к истинному АЭ-источнику или к флуктуациям нестационарного механического шума, и т.о. повышать достоверность интерпретации данных АЭ, является особенно актуальным в условиях непрерывного мониторинга ОПО.

В результате проведенных исследований было установлено, что для диагностики возможных неполадок в работе объекта и вспомогательных механизмов можно использовать появление новых особенностей в СПМ шума, в том числе, возникновение новых гармоник и субгармоник, увеличение дисперсии и других признаков. При таком подходе к анализу АЭ-информации, данный метод может рассматриваться не только как метод контроля, но и как метод технической диагностики состояния ОПО.

III. В третьей части доклада показано, что метод АЭ позволяет решать некоторые задачи типичные для УЗК, связанные с оценкой механических и акустических свойств материалов.

Продемонстрированы результаты анализа АЭ от ударных воздействий имитатора ударов, а также ударов естественного происхождения - агломератов ПП, сформированных во время эксплуатации реактора. Показано, что, анализируя спектральные характеристики сигналов от нормальных и косых ударов по предложенным формулам, можно с хорошей точностью (до 2 знаков после запятой) рассчитать такие параметры, как скорости распространения продольной и поперечной волн, критический угол, толщину объекта, коэффициент Пуассона, акустическое сопротивление материала, плотность и другие. По данным, зарегистрированным в процессе эксплуатации реактора, были получены следующие значения параметры материала: $c_1 = 3,89$ мм/мкс; $c_2 = 3,18$ мм/мкс; $V = 0,295$; $q = 32,7^\circ$.

Выводы

Основной вывод, который можно сделать по совокупности проведенных исследований, заключается в том, что диагностика акустического шума, зарегистрированного АЭ-аппаратурой, в ряде случаев позволяет расширить спектр задач, которые АЭ решает в качестве метода НК, дополняя их возможностью диагностирования работоспособности контролируемого объекта и механизмов.

Кроме того, последние исследования, проведенные в период эксплуатации объекта, демонстрируют новые перспективы и возможности АЭ-метода по оценке механических и акустических свойств материала объекта.

Список использованной литературы

1. Risk-Based Inspection Technology // API RECOMMENDED PRACTICE 581, 2 Edition, 2008.
2. Petersen, T.B. The laws of defect-size distribution in the failure of materials // Doklady Physics. – 2001. – 46. – No 5. – P. 369–372.
3. Petersen, T.B., Botvina, L.R. b-value analysis of microcrack size and acoustic emission signal distributions // Proceedings of 18th European Conference on Fracture. – Dresden, 2010.
4. Petersen, T.B., Shemyakin, V.V. Chernigovsky. Noise diagnostics at AE monitoring of hazardous industrial assets // Proceedings of WCAE-2013 Shanghai. – China. – P. 28.

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ БЕТОНА ПРИ ТВЕРДЕНИИ ПО АЭ ДАННЫМ

Бардаков В.В., Терентьев Д.А., ГК «ИНТЕРЮНИС»;
Сагайдак А.И., ОАО НИЦ «Строительство», НИИЖБ им. А. А. Гвоздева

Введение

В последние десятилетия в строительной области произошел резкий скачок в сфере технического прогресса. Строятся все более высокие здания, проектируются многокилометровые мосты, тоннели, подземные и наземные переходы, возводятся сложные спортивные сооружения. Несмотря на все нововведения и индивидуальные конструкторские решения, наиболее распространенным материалом при строительстве, как и сто лет назад, является бетон. Бетон зарекомендовал себя как качественный, прочный и долговечный строительный материал, который морозоустойчив и не подвержен воздействию влаги. В современном мире существует большое разнообразие бетонных смесей, каждый год разрабатываются новые инновационные составы и совершенствуются уже известные. В зависимости от технологии изготовления и пропорций используемых компонентов, составы могут отличаться между собой рядом свойств и параметров. К основным параметрам бетонных материалов можно отнести прочность, водонепроницаемость, морозостойкость, подвижность. Однако важнейшей характеристикой является прочность на сжатие.

Все методы определения прочности твердого бетона можно разделить на две группы – это разрушающие, при проведении которых образцы бетона, контрольные или выбуренные из конструкций, подвергаются механическому сжатию под прессом, и неразрушающие, в которых оценка прочности основана на измерениях косвенных характеристик, коррелирующих с фактической прочностью бетона. Существующие разрушающие и неразрушающие методы зарекомендовали себя как достаточно эффективные и точные, однако имеют один существенный недостаток, который заключается в том, что они применимы только для измерения прочности бетона со сформировавшейся структурой.

В случае, если прочность контролируемой конструкции не будет соответствовать нормативным документам, контролируемое сооружение является потенциально опасным, поскольку может не выдержать рассчитанной на него нагрузки. При этом основной причиной неудовлетворительного значения прочностных характеристик является то, что бетон не набрал необходимую прочность еще на стадии твердения.

Таким образом, особый интерес представляет контроль прочности бетона в процессе твердения, когда текущая прочность еще не вышла на уровень, заданный нормативными документами. Перспективным методом, способным справиться с данной задачей, является метод акустической эмиссии (далее – АЭ).

Описание эксперимента

Для оценки эффективности метода АЭ для решения поставленной задачи был проведен эксперимент с тремя различными бетонными составами, отличающимися друг от друга марочной прочностью. В ходе эксперимента свежесмешанный бетон заливался в заранее изготовленные опалубки для придания цементной смеси необходимой формы в виде кубов. На опалубки, в свою очередь, с помощью специальных конструкций крепились преобразователи акустической эмиссии (ПАЭ) (рис. 1).



Рис. 1. Проведение эксперимента

Для сбора данных использовались АЭ-система A-Line 32D PCI-8 производства компании «ИНТЕРЮНИС» и ПАЭ DIS 30–300, имеющие рабочий частотный диапазон 30–300 кГц. Длительность эксперимента составила 28 суток, поскольку именно в течение этого срока бетон при нормальных условиях набирает 100% своей марочной прочности. Таким образом, были созданы все условия, воспроизводящие реальный процесс твердения. Обобщенные данные по проведению эксперимента представлены в табл. 1.

Табл. 1. Общая информация о бетонных образцах и настройках АЭ-системы

Номер бетонного куба	Класс бетона	Прочность относительно других образцов в ходе эксперимента	Размеры образца, см	ПАЭ	Порог аппаратуры, дБ	Фильтры, кГц
Куб №1	B25	Наименьшая прочность	20x20x20	DIS 30-300	40	30-500
Куб №2	B25	Средняя прочность	20x20x20	DIS 30-300	40	30-500
Куб №3	B40	Наивысшая прочность	20x20x20	DIS 30-300	40	30-500

Также использовались следующие временные параметры:
SCETO – 200 мкс; мертвое время – 32 мкс; максимальная длительность – 32000 мкс.

Во время экспериментальных исследований проводились замеры текущей прочности образцов (рис. 2), изготовленных из состава, аналогичного бетонным кубам, и заготовленных одновременно с исследуемыми образцами.

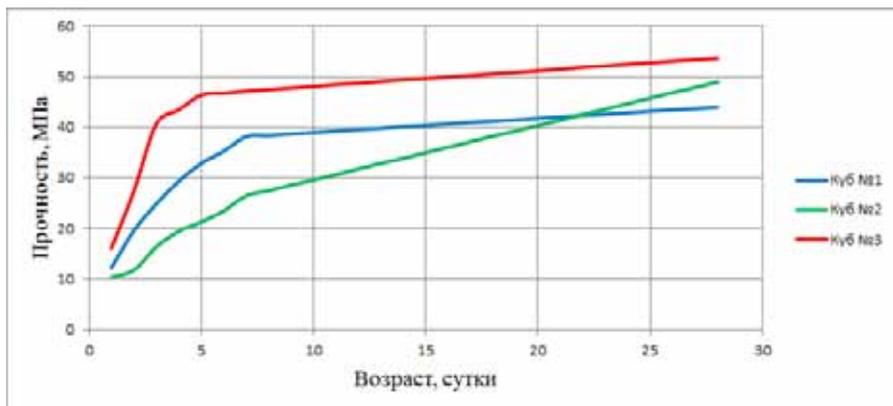


Рис. 2. Процесс набора прочности бетонных кубов

Анализ АЭ данных

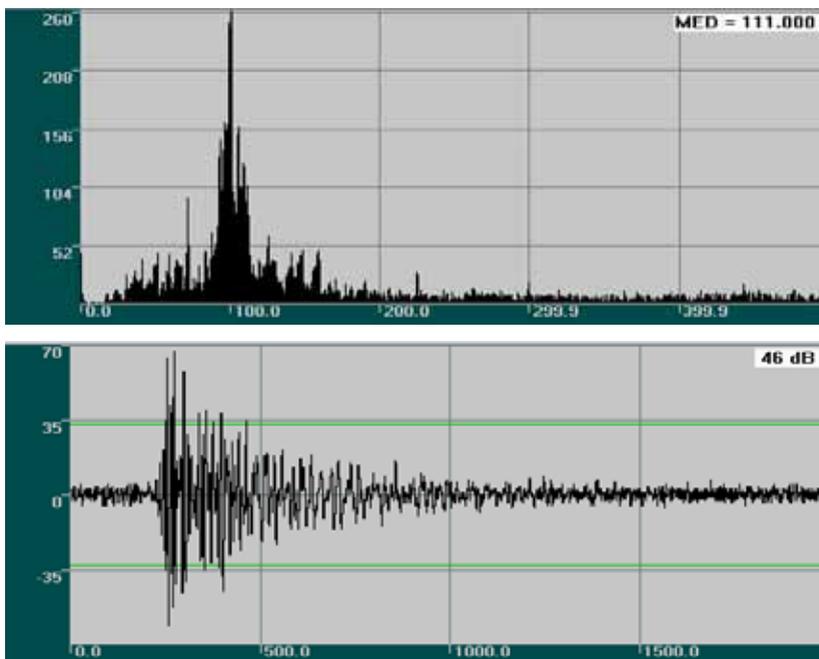


Рис. 3. Осциллограмма и спектр типичного АЭ-сигнала

За все время эксперимента на 3 кубах в общей сложности было зарегистрировано 1754 сигнала АЭ, их типичный вид приведен на рис. 3.

Излучение сигналов АЭ связано с процессом структурообразования бетона. Для бетона в раннем возрасте наиболее важным является процесс гидратации, отвечающий за упрочнение бетонного состава. При его протекании происходит химическая реакция цемента с водой, в результате чего образуются твердые новообразования – гидраты. Гидраты заполняют первоначально залитый цементом и водой объем плотным наслоением гелевых частиц, вызывая тем самым упрочнение. Данный процесс состоит из нескольких стадий и аналогичен кристаллизации.

Анализ АЭ-данных показал, что наблюдается постепенное уменьшение активности (рис. 4), которое сопровождается одновременным снижением скорости приращения прочности (рис. 2). Данный факт свидетельствует о переходе в результате гидратации жидкой фазы в цементный камень.

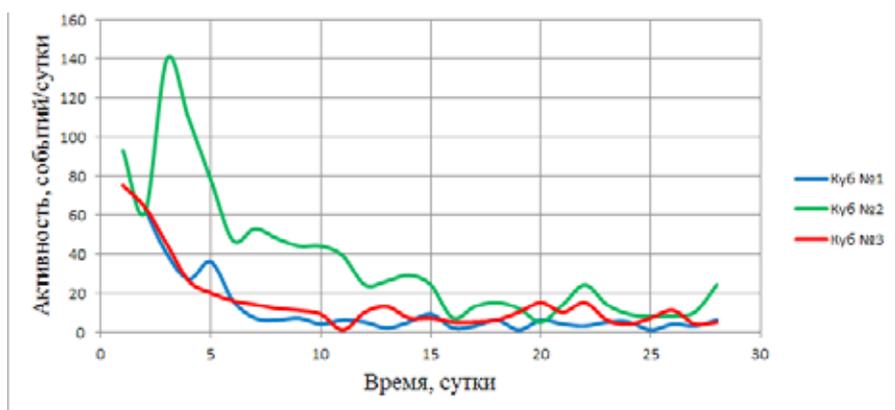


Рис. 4. Зависимость активность—время

Анализ точечной диаграммы значений АЭ-активности и текущей прочности бетона (рис. 5) выявил, что значения коэффициента корреляции между ними находятся в диапазоне от 0.84 до 0.94, что является достаточно высоким показателем и позволяет говорить о том, что с помощью одного параметра можно с хорошей точностью определить значение другого.

Заключение

Проведено исследование процесса твердения бетонной смеси при помощи АЭ. Выявлена взаимосвязь между АЭ-активностью и скоростью приращения прочности. Построенные калибровочные зависимости позволяют прогнозировать финальную прочность бетонного состава. Планируется проведение дальнейших экспериментов, целью которых является набор статистики для реализации прогноза прочности по первым 5 ч наблюдения.

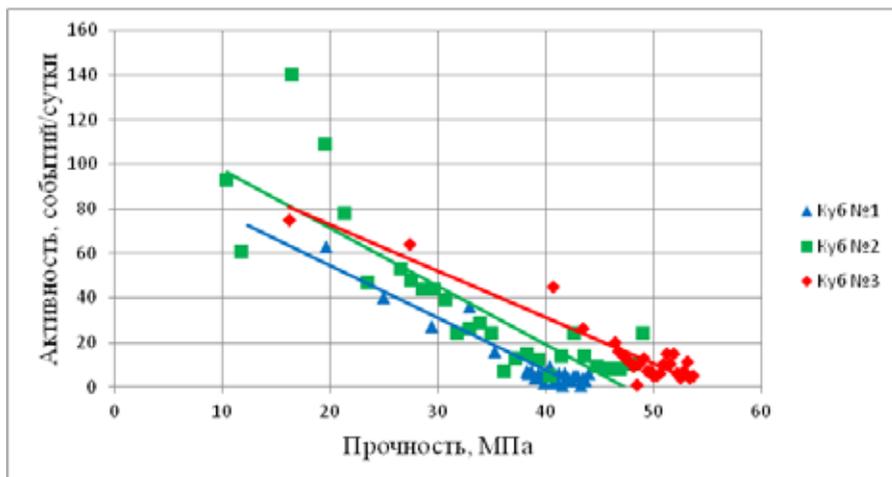


Рис. 5. Точечная диаграмма значений АЭ-активности и текущей прочности бетона

Список использованной литературы

1. Sagaidak, A., Bardakov, V., Elizarov, S., Terentyev, D. The Use of Acoustic Emission Method in the Modern Construction // Abstracts and Exhibition Catalogue «31 st Conference of the European Working Group on Acoustic Emission (EWGAE)», 3-5 September 2014. – Dresden, Germany. – P. 65.
2. Grosse, C. U. Acoustic Emission Testing. Concrete/ C.U. Grosse, M. Ohtsu. – Berlin : Springer, 2008. – 396 с.
3. Malhotra, V.M. HANDBOOK ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF CONCRETE. Second edition. Acoustic Emission Methods/ V.M. Malhotra, N.J. Carino – New York: CRC Press LLC, 2004. – 365 с.
4. Kishi, T. Acoustic Emission – Beyond the MILLENNIUM. Acoustic Emission Evaluation in Concrete/ T. Kishi, M. Ohtsu, S. Yuyama. – Elsevier Science Ltd, 2000. – 243 с.
5. Van Den Abeele, K. Non Destructive Online Evaluation of Concrete Hardening Using Acoustic Emission and Harmonic Wave Spectroscopy / K. Van Den Abeele, G. De Schutter, M. Wevers // ECNDT. – 2006.
6. McLaskey, G.C. Integrating Broad-Band High-Fidelity Acoustic Emission Sensors and Array Processing to Study Drying Shrinkage Cracking in Concrete / G.C. McLaskey, S.D. Glaser, C.U. Grosse.
7. Ohtsu, M. Acoustic Emission for Structural Integrity of Concrete from Fresh to Damaged / M. Ohtsu. – Korea, 2006. – С. 543–548.

РОЛЬ И МЕСТО АЭ-КОНТРОЛЯ В КОМПЛЕКСНОМ МОНИТОРИНГЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ИР ДЛЯ ХРАНЕНИЯ СЖИЖЕННЫХ ГАЗОВ

Ханухов Х.М., докт. техн. наук,
чл.-корр. АИН РФ, ген. дир. НПК «Изотермик»
Алипов А.В., канд. физ.-мат. наук,
нач. отд. НПК «Изотермик»

Хранение нефти, нефтепродуктов и сжиженных газов является неотъемлемой частью технологической цепочки – добыча–транспортировка–переработка–хранение. Хранение продуктов добычи и переработки осуществляется в емкостном оборудовании – резервуарах, которые относятся к особо опасным производственным объектам. В этой области резервуаростроения изотермические резервуары для хранения сжиженных газов занимают особое место как по сложности инженерных решений, гигантским габаритам, так и по роли в топливно-энергетическом снабжении страны и техногенной опасности регионального и планетарного масштаба.

Различные сжиженные газы отличаются своими физико-химическими свойствами – температурой кипения, плотностью, степенью сжатия, необходимыми для перехода газа в жидкое состояние и другими параметрами. Характеристики некоторых сжиженных газов приведены в табл. 1 [1].

Таблица 1. Физико-химические свойства сжиженных газов

№ п/п	Наименование газа	Хим. формула	Температура кипения (при 760 мм рт. ст.)		Плотность в жидком состоянии, кг/л	Объем жидкости, образующейся из 1 м ³ газа**, л	Соотношение объемного сжатия газ/жидкость
			°С	°К			
1	2	3	4	5	6	7	8
Низкотемпературные газы							
1	Бутан*	C ₄ H ₁₀	-0,50	272,7	0,60	4,07	246
2	Сернистый ангидрид	SO ₂	-10,0	263,2	1,46	1,797	556
3	Фреон - 12	CF ₂ Cl ₂	-29,8	243,4	1,48	3,33	300
4	Фреон - 13	CF ₃ Cl	-87,5	185,7	1,52	3,095	323
5	Фреон - 22	CHF ₂ Cl	-40,0	233,2	1,90	1,92	521
6	Аммиак**	NH ₃	-33,4	239,8	0,68	1,024	976
7	Хлор	Cl ₂	-34,0	239,2	1,47	2,006	498
8	Пропан*	C ₃ H ₈	-42,30	230,9	0,58	3,13	319
9	Пропилен*	C ₃ H ₆	-47,7	225,5	0,6	2,82	357
10	Сероводород	H ₂ S	-60,4	212,8	0,96	1,450	690
11	Двуокись углерода	CO ₂	-78,5	194,7	1,15	1,56	641
12	Ацетилен	C ₂ H ₂	-83,6	189,6	0,52	2,055	487
13	Этан*	C ₂ H ₆	-88,6	184,60	0,54	2,250	444
14	Этилен*	C ₂ H ₄	-103,9	169,3	0,56	1,882	531

Всемирный экономический форум в очередном обзоре, посвященном ТЭКу, прогнозирует, что в ближайшие 20–30 лет мировая экономика будет по-прежнему использовать

Криогенные газы							
15	Криптон	Kr	-163,2	110	2,16	1,451	690
16	Метан*	CH ₄	-161,5	111,7	0,42	1,55	645
17	СПГ*	CH ₄	-163	110,2	0,42	1,55	645
18	Кислород*	O ₂	-183,0	90,2	1,14	1,150	870
19	Аргон	Ar	-185,9	87,3	1,4	1,166	858
20	Оксид углерода	CO	-191,5	81,7	0,8	1,411	709
21	Азот*	N ₂	-195,8	77,4	0,8	1,421	704
22	Неон	Ne	-246,1	27,1	1,2	0,683	1464
23	Водород*	H ₂	-252,8	20,4	0,07	1,166	858
24	Гелий*	He	-268,9	4,3	0,12	1,311	763

*Промышленное хранение сжиженного газа в резервуарах

** Справочник по разделению газовых смесей методом глубокого охлаждения. Под общ. редакцией Н.И. Гельперина. Изд.-е переработанное. М.: Госхимиздат, 1963. - 512 стр.

преимущественно топливную инфраструктуру при опережающем росте потребления газа. А «сланцевая революция» предвещает коренным образом изменить баланс мировой торговли энергоресурсами. К 2040 году в структуре производства и потребления энергоресурсов, доля газа, по оценкам Echor Mobil, может возрасти на 65%. Помимо ТЭК, около половины добываемого газа (бутан, пропан, пропилен, аммиак, этилен, кислород, азот, водород) используется в химии и нефтехимии в качестве сырья [2].

Ускоренные темпы развития химической и нефтехимической промышленности дают основание предполагать, что рост потребления газа в этой отрасли также произойдет в ближайшие 20 лет. СПГ является также новым альтернативным топливом в ракетно-космической технике, о чем свидетельствуют работы, ведущиеся в России по созданию многоразовых ЖРД на основе смеси СПГ – жидкий кислород [3]. Реконструкция комплексов для этих целей предполагается в течение ближайших лет. Также имеются перспективы использования СПГ на железнодорожном транспорте [4].

Наиболее перспективным способом хранения и транспортировки газа является изотермический, при котором газы находятся в жидком состоянии при температуре, соответствующей температуре кипения при атмосферном давлении. Для этого используются изотермические (ИР), как правило, вертикальные цилиндрические резервуары объемом от 700 до 200000 м³.

Мировой опыт производства СПГ – около 40 лет. СПГ занимает 26% мирового потребления природного газа. В настоящее время запасы природного газа составляют около 210 триллионов кубометров. Согласно прогнозам специалистов потребление газа будет расти темпами порядка 1,5% в год и к 2025 году увеличится почти вдвое, что составит 4,3 трлн. м³ в год. Наибольший рост добычи газа ожидается в США, странах бывшего СССР, Ближнего Востока и Африки [1, 2].

Изотермический способ хранения и транспортировки газов является наиболее эффективным (при сжижении объем хранимого продукта уменьшается в 250–1500 раз), экономичным (в 3–4 раза уменьшается расход стали на 1 т продукта по сравнению с хранением под давлением, на 30 % уменьшается площадь резервуарного парка) и мобильным (не нуждается в трубопроводном транспорте).

Большинство запасов природного газа в развивающихся странах удалено от рынков сбыта и трубопроводных систем, поэтому в дальнейшем рост мировой торговли при-

родным газом будет происходить, в основном, за счет СПГ, т.е. морским путем. Сейчас 78 % мирового торгового оборота приходится на морские перевозки. К 2025 г. прогнозируется почти удвоение оборота – до 53 трлн. долл. Наступает время больших кораблей – гигантских газовозов СПГ, оборудованных изотермическими резервуарами [2].

Изотермические резервуары являются составной и самой дорогой частью терминалов для хранения сжиженных газов [1]. В зависимости от типа и емкости их стоимость может достигать 50% от общей стоимости терминала. ИР – весьма крупные и сложные в инженерном отношении сооружения диаметром 15...65 м, высотой 18...60 м, объемом 5...200000 и более тыс. м³, содержащие до 100 тысяч тонн легковоспламеняющихся, горючих, взрывопожароопасных и токсичных жидкостей, относятся к особо опасным объектам а соответствии со ст. 48.1 Градостроительного кодекса РФ.

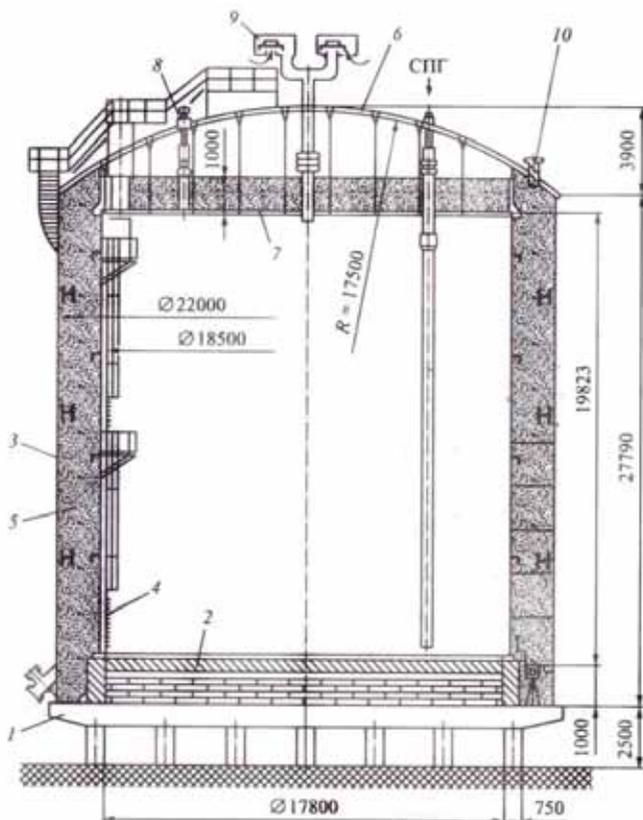


Рис. 1. Резервуар для хранения СПГ вместимостью 5000 м³

- 1 – опорная плита (ростверк);
- 2 – пеностекло;
- 3 – наружная оболочка;
- 4 – внутренняя оболочка;
- 5 – перлит;

- 6 – наружная крыша;
- 7 – подвесное перекрытие;
- 8 – технологические трубопроводы;
- 9 – предохранительные клапаны;
- 10 – люк для засыпки перлита.

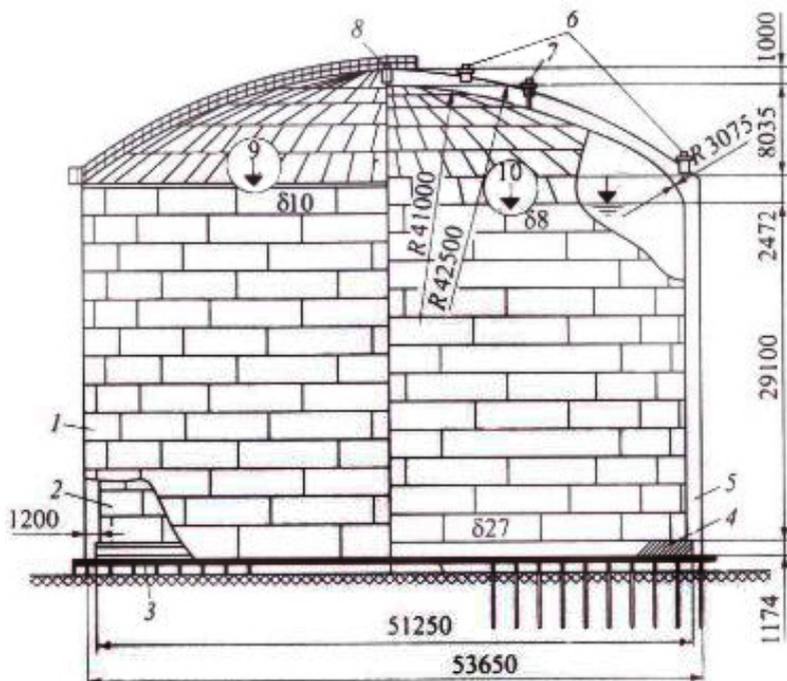


Рис. 2. Стальной резервуар СПГ с внутренней несущей оболочкой вместимостью 50 000 м³

- | | |
|--|--|
| 1 – наружная оболочка; | 6 – люки для загрузки перлита; |
| 2 – внутренняя оболочка; | 7 – ввод трубопроводов; |
| 3 – железобетонное основание (ростверк)
на сваях; | 8 – люк; |
| 4 – пеностекло; | 9 – толщина листов наружной оболочки; |
| 5 – перлит; | 10 – толщина листов внутренней оболочки. |

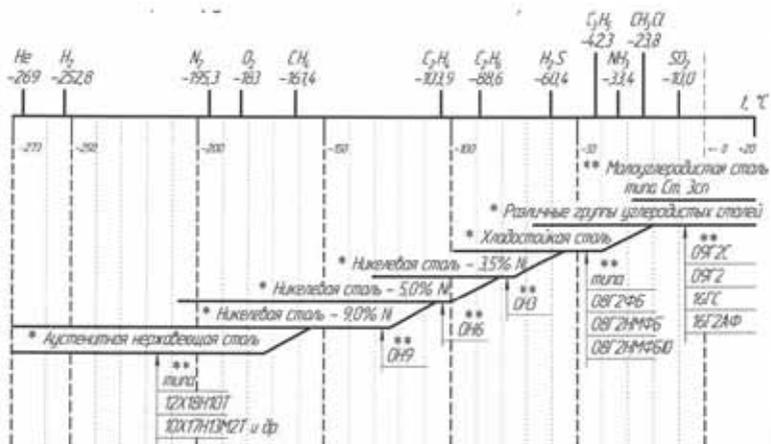
Для изготовления ИР с температурой хранения продуктов до $-63\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($210\text{ }^{\circ}\text{K}$) применяется низколегированная сталь, а с температурой хранения продуктов до $-104\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($169\text{ }^{\circ}\text{K}$) – сталь, содержащая 6% никеля, ниже $-104\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($169\text{ }^{\circ}\text{K}$) – сталь, содержащая 9% никеля, (как например, сталь ASTM A553 тип I или аналогичная российская сталь 0Н9), а также аустенитная нержавеющая сталь.

Группы сталей, рекомендуемые для применения в изотермических резервуарах сжиженных газов, по данным отечественных и зарубежных специалистов представлены на рис. 4 [1].

Проектирование резервуаров для хранения СПГ имеет следующие особенности [1]:

Резервуары должны быть оборудованы всеми необходимыми средствами контроля и противоаварийной защиты для их надежной и безопасной эксплуатации.

Внутренняя трубопроводная обвязка должна позволять производить загрузку СПГ через верх наружного резервуара. Жидкий продукт попадает в резервуар через деф-



Примечания * – по данным Klaus Thietz, Manager director, ADAPT GmbH, Германия (Международная научно-техническая конференция по резервуаростроению, Болгария, г. Варна, 06-10.06.2011 г.)
 ** – по данным кат. Швейцария ГР (ШВАЙЦХ им Мельникаба)

Рис. 4. Рекомендуемый диапазон применения различных групп сталей (по зарубежным и отечественным данным)

Для защиты от расслоения фаз жидкости изотермический резервуар для хранения СПГ должен быть оснащен следующими системами:

- системой верхнего налива с дефлектором (последний способствует лучшей дегазации азота, являющейся одной из причин перемешивания фаз жидкости внутри резервуара);
- системой рециркуляции с использованием загрузочных насосов или специально предназначенных насосов;
- системой нижнего налива с диффузором (эжекторный штуцер и (или) Т-образный штуцер либо аналогичный, обеспечивающей лучшее смешивание, чем обычный участок трубы);
- системой контроля плотности и температуры, способной автоматически с заданной периодичностью регистрировать плотность и температуру СПГ сверху до низу в любое время по требованию.

От превышения давления в резервуарах СПГ должна быть предусмотрена трехуровневая система защиты.

Первый уровень – регулировка давления в резервуарах путем изменения мощности компрессоров отпарного газа. Если количество образующейся газовой фазы в резервуаре превышает производительность компрессоров, и давление в резервуарах хранения СПГ начинает расти, то должна срабатывать защита.

Второй уровень – регулировка давления путем сброса избытка газа на портовый факел. При дальнейшем росте давления должна производиться остановка насосов и отсечка на линиях ввода СПГ в резервуары хранения.

Третий уровень – регулировка давления путем сброса избытка газа на портовый факел. При дальнейшем росте давления должна производиться остановка насосов и отсечка на линиях ввода СПГ в резервуары хранения.

Третий уровень — защиты от превышения давления должны обеспечивать предохранительные клапаны со сбросом газа в атмосферу. При проектировании системы защиты резервуара от превышения давления в качестве расчетного сценария для третьего уровня защиты рассматривается сценарий перемешивания слоев жидкого продукта, при котором первых двух уровней защиты может оказаться недостаточно.

Каждый резервуар хранения СПГ должен быть оборудован системой защиты от вакуума. При снижении давления предусмотрена подача в резервуар сухого топливного газа или азота.

Изотермический резервуар для хранения СПГ должен быть оборудован приборами контроля параметров технологического процесса и служащими для обеспечения:

- безопасного ввода в эксплуатацию;
- безопасной эксплуатации;
- безопасного вывода из эксплуатации;
- максимального уровня безопасности и надежности в случае возникновения внештатных ситуаций.

Изотермический резервуар для хранения СПГ должен быть оборудован обеспечивающими автоматический и непрерывный сбор данных:

- 1) приборами контроля уровня жидкости (уровнемерами);
- 2) приборами контроля давления паров СПГ;
- 3) температурными датчиками контроля температуры СПГ;
- 4) температурными датчиками контроля температуры фундаментной плиты;
- 5) приборами контроля плотности СПГ; детекторами протечек СПГ в межстенном пространстве.

Должна быть гарантирована надежность указанных групп приборов в следующих ситуациях:

- приборы должны контролировать технологические параметры при эксплуатации резервуара;
- результаты измерений и сигналы тревоги должны передаваться во все соответствующие служебные помещения;
- в случае чрезвычайной ситуации, например, превышения максимально допустимого уровня СПГ или давления сигналы тревоги должны передаваться также в центральный пункт управления.

Для обеспечения режима ввода в эксплуатацию (захолаживания), измерения температуры во время эксплуатации и вывода из эксплуатации внутренний резервуар должен быть оснащен температурными датчиками. Температурные датчики применяются также для контроля температуры фундаментной плиты.

Для оповещения оператора об утечке из внутреннего резервуара предусматривается система раннего обнаружения утечек, состоящая из датчиков температуры в межстенном кольцевом пространстве.

Система раннего обнаружения утечек проектируется таким образом, чтобы можно было определить место одиночной утечки в пределах +/- 10 - 15 угловых градусов и надежно отличить утечку через днище от утечки через стенку внутреннего резервуара.

В процессе эксплуатации ИР могут изменяться параметры технического состояния [5], по которым оценивается его работоспособность, и по динамике которых проводится расчет остаточного ресурса, а именно:

- неравномерность осадки основания;
- наличие дефектов сварных соединений;
- наличие дефектов формы;
- толщина стенки нижних поясов;
- механические и физические свойства материала несущих элементов конструкции;
- целостность и герметичность корпуса.

Повреждающие факторы, способные вызвать изменение определяющих параметров технического состояния ИР [5]:

- повышение избыточного давления выше расчетного;
- превышение уровня налива продукта хранения выше допустимого;
- колебания давления (уровня залива) и температуры;
- низкотемпературное охрупчивание и механическое старение стали;
- концентрация напряжений в местах примыкания к стенке ИР входных и выходных патрубков (в том числе их повышенная вибрация), а также в других местах;
- коррозия металла несущих элементов конструкции;
- нарушение теплоизоляции корпуса;
- подвижка грунта и развитие карстовых явлений в грунтах.

Основные эксплуатационные дефекты изотермического резервуара и зоны их возможного развития

Основные виды дефектов элементов ИР [5].

При эксплуатации ИР наиболее часто встречаются следующие дефекты:

- трещины в окрайках днища в сварных соединениях и основном металле (иногда трещины с окраек днища переходят на основной металл первого пояса стенки);
- трещины в нижнем уторном узле в сварных соединениях и основном металле (в ряде случаев трещины с углового сварного шва переходят на основной металл первого пояса стенки);
- выпучины, вмятины и гофры на днище;
- трещины в стенке в сварных соединениях и основном металле (в основном в нижних поясах); наиболее часто трещины в стенке резервуара возникают в вертикальных сварных швах с выходом или без выхода на основной металл, в местах пересечения сварных швов, в швах и околшовной зоне поперек шва; трещины образуются также в околшовной зоне вблизи люков-лазов, в местах врезки патрубков присоединения трубопроводов и резервуарного оборудования, в местах приварки ребер жесткости;
- трещины в монтажных вертикальных сварных швах, имеющих угловатость (характерно для укрупненной полистовой сборки);
- расслоение основного металла с выходом в сварные соединения;
- непровары, подрезы, поры, шлаковые включения и другие дефекты сварных соединений;
- негерметичность в сварных соединениях и основном металле стенки, днища и кровли;

-
- изменения геометрической формы верхних поясов стенки резервуара (местные выпучины, вмятины, горизонтальные гофры) и кровли резервуара;
 - наружные коррозионные повреждения внутренней оболочки;
 - значительные деформации и разрушения отдельных несущих конструктивных элементов покрытия резервуара;
 - раздробление и выколы бетона ростверка или железобетонной плиты фундамента;
 - разрушение анкерных креплений;
 - старение теплоизоляционного материала.

Наружные коррозионные повреждения внутренней оболочки ИР возникают по двум причинам:

- нарушение теплоизоляции, приводящее к обмерзанию;
- разгерметизация внутренней оболочки (появление сквозных дефектов), приводящее к испарению продукта хранения и обмерзанию стенок.

Снижение прочности внутренней оболочки ИР, а также образование трещин в сварных соединениях может быть обусловлено следующими факторами:

- дефектами сварочно-монтажных работ;
- охрупчиванием металла при низких температурах;
- чрезмерной концентрации напряжений вследствие дефектов формы и размеров внутренней оболочки ИР;
- нарушениями правил эксплуатации.

Иностранные производители гарантируют безопасную эксплуатацию ИР, основываясь на автоматическом и непрерывном приборном контроле технологических параметров – уровне, плотности и температуре жидкости, давлении паров, протечек в межстенное пространство. Это позволяет, как было отмечено выше, выявить и предотвратить расслоение СПГ или образование «теплых линз при хранении СУГ, в результате которых происходит мгновенное многократное возрастание давления газовой фазы.

Отечественные нормативные документы рекомендуют оснащать ИР системами комплексного мониторинга технического состояния (КМТС) конструкций [6], позволяющие в режиме реального времени определять параметры технического состояния ИР, по которым оценивается его работоспособность и по динамике которых проводится расчет остаточного ресурса. То есть контролируется процесс зарождения и распространения трещины до сквозного отверстия (т.е. утечки продукта). То есть обеспечивается контроль целостности оболочки ИР на всех стадиях эксплуатации (в первые годы, когда выявляются дефекты изготовления и сооружения, и через длительное время – 20–30 лет – дефекты, обусловленные эксплуатационными факторами и изменением физико-механических свойств материалов).

Системы комплексного мониторинга технического состояния (СКМТС) могут включать следующие средства и методы, обеспечивающие:

- акустико-эмиссионный (АЭ) контроль внутренней оболочки ИР (с целью выявления развивающихся дефектов);
- измерение уровня продукта в ИР (с целью определения превышения допустимого уровня налива, определения количества, параметров рабочих циклов и получения информации для расшифровки АЭ-данных);

-
- измерение вибраций в зоне трубопроводов приема и отпуска продукта ИР (с целью определения превышения допустимого уровня вибраций и получения информации для расшифровки АЭ-данных);
 - измерение температуры бетонного фундамента ИР;
 - измерение концентрации паров хранимого продукта в межстенном пространстве ИР (с целью косвенного контроля герметичности внутренней оболочки ИР);
 - измерение дополнительных параметров, необходимость мониторинга которых выявлена на этапе подготовки к внедрению СКМТС.

Для повышения информативности данных СКМТС проводят измерение метеорологических параметров (скорость и направление ветра, температура окружающего воздуха, наличие осадков), поступающих от метеостанции.

Цель системы АЭ-мониторинга – выявление скрытых дефектов монтажа, которые могут вызвать рост трещин, в основном в течение первых лет эксплуатации ИР. Далее выявленные дефекты, как правило, устраняются.

От внезапного разрушения, вызванного резким нарушением режима эксплуатации, связанным с пресловутым человеческим фактором, не предохранит никакая АЭ-аппаратура, хотя и в этом случае она может послужить дополнительным к штатным приборам средством оперативного контроля правильности функционирования ИР.

(Можно вспомнить единственную крупную аварию ИР в СССР – в Ионаве, вызванную именно грубым нарушением правил эксплуатации ИР).

Исследования, проведенные в ЦАГИ им. Жуковского, Академии им. Петра Великого (И.В. Гулевский, проф. А.И. Гнево и др.), показывают, что акустическая эмиссия проявляется при нагрузке, составляющей не менее 50% разрушающей.

В вертикальном резервуаре, в том числе и в изотермическом (при условии тщательного контроля качества изготовления и монтажа, и главное – качества сварных соединений) условия появления акустической эмиссии могут возникнуть только в местах концентрации напряжений: в нижнем и верхнем уторном узлах, вблизи врезок, в местах дефектов монтажа, например, угловатости сварных соединений, выпучин и вмятин.

В изначально бездефектной конструкции при соблюдении режима безопасной эксплуатации нет физических причин для роста трещиноподобных дефектов.

Поэтому сплошное покрытие стенки ИР датчиками АЭ излишне.

При рациональном подходе к этой проблеме места размещения датчиков АЭ могут быть указаны для вновь проектируемого ИР его конструкторами, а для ИР, бывшего в эксплуатации - после проведения обследования резервуара и выявления дефектных мест.

Иногда трактовка результатов работы системы АЭ-мониторинга выходит за рамки понятий, принятых в теории акустической эмиссии. Пример: в Дзержинске на ИР этилена интенсивные сигналы непрерывной АЭ, указывающие на возможную течь, были, по всей вероятности, вызваны не течью продукта через несплошность, а осыпанием перлита с крыши ИР. (При обследовании никакая несплошность, трещина и т.п. так и не была найдена.)

Поэтому для успешной работы системы АЭ-мониторинга необходимо сотрудничество между специалистами по акустической эмиссии и конструкторами ИР, как на этапе разработки этой системы, также во многих случаях и при трактовке результатов мониторинга.

Гармонизация зарубежного и отечественного опыта позволит повысить надежность и снизить риски эксплуатации ИР на территории РФ. При этом отечественным специалистам по оснащению ИР системами КМТС следует стремиться к удовлетворению некоторых требований: неповреждение конструкций (если внешняя стенка резервуара является силовой) и материалов (теплоизоляции); надежная работа первичных датчиков контроля в низкотемпературной газовой среде; дистанционная беспроводная поверка, калибровка и контроль технического состояния; увеличение срока службы первичных датчиков до срока гарантийной эксплуатации ИР.

Мероприятия по повышению надежности при эксплуатации и увеличению срока службы без остановки производственного процесса, повышению конкурентоспособности отечественных ИР, нормативно-техническому обеспечению изотермического резервуаростроения, а также организационно-технические мероприятия по снижению риска эксплуатации этих сооружений, относящихся к стратегически и критически опасным объектам изложены в [5, 6, 7].

На основе анализа систем мониторинга технологических параметров (уровне жидкости, давления паров, температуры, плотности) и параметров технического состояния (дефекты формы и сварных соединений, изменение свойств конструкционных материалов, сейсмические воздействия) предлагается инновационное объединение их в единую управляющую систему, которая на «выходе» должна определять риски эксплуатации в режиме реального времени и фактически управлять ими.

Список использованной литературы

1. Ханухов, Х.М. Безопасность труда в промышленности. – Вып. № 12. Особенности соблюдения требований промышленной безопасности при проектировании изотермических резервуаров. – М., 2011. – С. 57–64.
2. Ханухов, Х.М. Проектирование, сооружение и эксплуатация изотермических резервуаров для хранения сжиженных газов // Деловая слава России : межотраслевой альманах. – М. – 2013. – Вып. 4 (42). – С. 10–12.
3. Архаров, А.М., Кунис, И.Д. Криогенные заправочные системы стартовых ракетно-космических комплексов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 252 с.
4. Модернизация промышленности России : приоритеты развития : VIII Национальный конгресс. – М. – 2013. – 8-9 октября.
5. Инструкция по проведению комплексного технического освидетельствования изотермических резервуаров сжиженных газов (РД 03-410-01).
6. Методика комплексного мониторинга технического состояния изотермических резервуаров сжиженных газов. СТО-03-001-11.
7. Ханухов, Х.М., Алипов, А.В. Нормативно-техническое и организационное обеспечение безопасной эксплуатации резервуарных конструкций // Предотвращение аварий зданий и сооружений : сб. научных трудов. – Вып. 10. – М., 2011. – С. 384–422.

АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ – КОМПЛЕКСНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОДХОД

Председатель правления НПС «РИСКОМ»,
генеральный директор ООО «НТЦ «Нефтегаздиагностика»
Лещенко В.В.

Рано или поздно, но крупномасштабная добыча полезных ископаемых на арктерском шельфе неизбежна, и либо мы будем это делать сами – осознанно и планомерно, с приоритетом на интересы государства, либо это сделают за нас и без нас другие!

Условия российской Арктики уникальны:

Беспрецедентная протяжённость береговой линии и площадь арктических территорий.

Экстремальные природно-климатические условия. Критические температуры до -60°C , сложнейшая ледовая обстановка – лед до 1,5-2м, солёные туманы, большие глубины, сейсмическая активность.

И при этом – доказанное наличие крупнейших месторождений углеводородов, уникальная и крайне ранимая природа.



ОСНОВНЫЕ ПОТРЕБНОСТИ (помимо новых портов, судоверфей и городов):

- ледостойкие буровые суда и добывающие платформы (МЛСП – сложнейшие инженерные сооружения);

-
- подводно-добычные комплексы (ПДК) и подводная инфраструктура (райзерные блоки, трубопроводы, шлангокабели, подводный КИП и блоки управления, подводные ремонтные технологии);
 - ледоколы и специализированные суда ледового класса;
 - ROV (телеуправляемые подводные аппараты) тяжёлого рабочего класса;
 - глубоководные водолазные комплексы;
 - газотурбинные энергетические установки большой мощности с большим ресурсом, возможность работать в условиях соленых туманов и высоким КПД;
 - движительно-рулевые колонки большой мощности;
 - хладостойкие, коррозионно-устойчивые стали, высокотемпературные материалы;
 - технологии ликвидации аварийных разливов и утилизации нефтешламов в ледовых условиях;
 - арктическая авиация и средства спасения, инфраструктура транспорта нефти и газа;
 - а еще: заводы СПГ, обеспечение круглогодичной эксплуатации Северного морского пути, и при этом – огромные неизученные территории (2D и 3D сейсморазведка и моделирование), проектные организации, учебные институты...

Требования к оборудованию арктического исполнения на порядок жестче чем к сухопутному: компактное, сверхнадежное, необслуживаемое или только с дистанционным обслуживанием, с длительными сроками автономной эксплуатации.

Полномасштабное освоение Арктики – задача сравнимая и даже превосходящая по сложности освоение космоса или обуздание термоядерного синтеза. И именно «термояд» показывает, что одной стране справиться с задачей подобного масштаба в разумные сроки в одиночку невозможно ... тем более – поодиночке компаниям...

Как и в случае с освоением космоса необходимо создание целой отрасли!

Освоить арктический Север исключительно вахтовым методом не получится. Нужна сеть современных городов, которые станут кадровыми, технологическими и сервисными центрами освоения арктических территорий.

За освоение арктического шельфа стоило взяться только ради того, чтобы стимулировать развитие высокотехнологичного машиностроения.

Мы осознанно тратимся на космос, но коммерциализация космоса происходит пока только за счет внедрения космических технологий в других отраслях, а вот Арктика, помимо технологий, дает коммерческую отдачу непосредственно, через добываемые нефть и газ.

Очевидно, что эффективное решение всего комплекса задач и проблем, создание и освоение новейших технологий одной, даже самой крупной компанией в приемлемые сроки невозможно, да и неразумно (бессмысленно строить и содержать свой собственный ледокольный флот, свой завод по производству ПДК или турбин, в одиночку разрабатывать хладостойкие сплавы и жаропрочные материалы).

Решение: максимальная кооперация и снижение удельных затрат по каждой позиции для каждой из добывающих компаний.

Полномасштабная война за рынок «арктической» морской техники уже идет. Ведущие зарубежные машиностроители стараются оттеснить национальных игроков и структурировать потенциальный спрос под себя:

- общее отставание отечественной промышленности в технологиях;
- на «Западе» все дешевле и выгоднее для компании;
- иностранцы имеют доступ к «длинным» деньгам, лучше рекламируют и УБЕЖДАЮТ.

При этом возможность заработать — отнюдь не главный стимул для них. Самый серьезный мотив: на выходе непременно появится масса уникальных технологий и принципиально новых продуктов.

Именно за этими сложными задачами, которых нет больше ни у кого, стремятся на наш рынок мировые лидеры, они рассчитывают взять в своих областях новые технологические вершины, кардинально усовершенствовать свои продукты и упрочить позиции в глобальной конкуренции... **И все это — за наши деньги!**

Сейчас иностранные производители имеют колоссальные преимущества перед отечественными:

- «двойное» налогообложение по НДС при оплате импортных комплектующих;
- иностранцам — предоплата, а для отечественных компаний — кредитование компаний-заказчиков за счет исполнителя (работы в долг — практика отложенных платежей (до 90 дней) по актам выполненных работ);
- бесконечные платные переаттестации, проверки знаний ПБ, ТБ и многое другое...

При этом — бездарная тендерная политика на основе федерального закона, когда в идеологическую основу всей промышленности страны положен принцип выбора не самого передового, а самого дешевого и следовательно самого примитивного, но передовое и новое не может быть самым дешёвым!

НВ — один из основных принципов теории управления- каждый должен заниматься своим делом, бороться с коррупцией должны правоохранители, а не технари.

Позиция добывающих компаний такова: «Мы не против поддерживать отечественного производителя, но наша основная задача — обеспечить свою собственную экономическую эффективность добычи».

Очевидно противоречие между желанием каждой конкретной добывающей компании закупать более дешевое оборудование на Западе и потребностью государства развивать собственные технологические мощности и производство.

Опасность:

не только утрата шансов на освоение новых технологий, но привязка к импортным поставкам комплектующих и навязывание иностранных **СТАНДАРТОВ**, хотя зачастую никаких особых технологических преимуществ в технике арктического класса у иностранцев перед нашими машиностроителями нет.

Если вовремя не передать инжиниринг мегапроекта компании-интегратору, способной управлять процессом освоения шельфа как единым межотраслевым проектом с акцентом на интересы его российских участников и экономики России в целом, мы с гарантией получим повтор проектов «Сахалин -1» и «Сахалин -2».

Что делать?

По многим технологиям решений пока нет ни у одной страны.

Промышленная добыча каких бы то ни было ресурсов в столь сложных условиях не ведется нигде в мире. Соответствующего опыта и отработанных технологий по многим позициям пока ни у кого нет (т.к. нигде больше нет таких экстремальных требований). Следовательно, если эти уникальные условия и территории в России — **разумно создать условия, чтобы эти технологии создавались и оставались у нас!**

Как?

Создание мегарегулятора — интегратора арктического кластера

Если мы хотим, чтобы на волне спроса, который будет создан шельфовым мегапроектом, вырос пул серьезных игроков с преимущественно национальным капиталом и современным уровнем технологий, **этим процессом необходимо твердо управлять.**

Необходим интегратор **национальный интегратор**- инженерный менеджер арктического мегапроекта - структура, разрабатывающая и устанавливающая **правила игры** для большого количества участников процесса — государственных и частных игроков из разных стран и отраслей.

Следовательно, нужны **исключительные полномочия!!!**

Для эффективной реализации шельфовых проектов требуется внести коррективы, как минимум, в десяток законов находящихся в ведении различных думских комитетов, предложенные поправки наверняка будут противоречить друг другу.

Поэтому надо выбрать базовый комитет, который осуществит изменение законодательства с привлечением экспертов из других комитетов Госдумы. То же касается и правительства: там необходима координирующая структура, не подчиненная какому-либо министерству, а имеющая прямой выход на премьер-министра.

Концепция «Яйцо Кашея Бессмертного»

Для иностранных компаний **Россия может предоставить уникальный по объему рынок:**

- разместив ключевые технологические базы ведущих мировых компаний на своей территории обеспечим и контроль, и **ЛОЯЛЬНОСТЬ;**
- **преференции и стабильность в обмен на технологии.**

Хочешь зарабатывать — **милости просим**, но локализуешь полномасштабное производство, размещай проектные и исследовательские центры, готовь специалистов, создавай и передавай технологии, **ИНТЕГРИРУЙСЯ!**

Для отечественных игроков условия для развития и роста.

Подотрасли машиностроительной индустрии, где отечественные производители не утратили компетенций и технологий и сохранили инженерные школы потребуются жестко ограничить аппетиты иностранных игроков, а для компаний с национальным капиталом создать режимы максимального благоприятствования, в первую очередь предоставить им приоритет при распределении «арктических» контрактов.

У российских компаний должен быть вообще коэффициент 1:2, ведь даже если отечественная продукция дороже, зато деньги не покидают страну!

Тогда масштабный долгосрочный спрос сыграет роль технологического локомотива — запустит процесс совершенствования имеющихся агрегатов и систем, появления их новых поколений и создания принципиально новых продуктов «под шельф».

Мы можем и должны, пользуясь уникальностью ситуации и своего положения, занять мировые лидирующие позиции в арктических технологиях.

У России уникальный шанс, которого нет больше ни у кого — изобретая и осваивая новейшие или вообще пока отсутствующие технологии, сделать технологический рывок для всей страны!

Более того, вовлекая в «процесс» ведущие мировые компании и создав арктический кластер, мы получим уникальную структуру, которую можно организовать только в России.

По сути, **можно получить аналог ЦЕРН**, участие в котором не только почетно и дает доступ к арктическому рынку России, к консолидированным знаниям и разрабатываемым технологиям, но и финансируется самими участниками.

Предоставим уникальные условия — и все моментально забудут про санкции.

Ничто так не сближает, как общие проблемы и задачи, а тем более — **общий бизнес!**



Лучшая политика — это экономика!

АНАЛИЗ, ОБРАБОТКА И ОЦЕНКА ДАННЫХ АЭК С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА ПО АЕ WORKBENCH

А.Г. Комаров
ООО «ИНТЕРЮНИС»

При регистрации данных пользователь ограничен ПО используемой АЭ-системы. При обработке могут использоваться и другие программные продукты. В докладе рассмотрен пакет программ АЕWorkbench – пакет-компаньон для программного обеспечения ALine32D (как, впрочем, и для некоторых других АЭ-систем). Пакет АЕ Workbench предназначен для работы с зарегистрированными данными АЭ-испытаний (т.е. для пост-обработки). Пакет создан с учетом многолетнего опыта практического АЭ-контроля, в соответствии с требованиями АЭ-специалистов, которым необходимо быстро обрабатывать большие объемы данных.

Ключевые особенности:

- работа с данными наиболее распространенных АЭ-систем производства INTERUNIS, PAC;
- выявление и анализ связей основных параметров регистрируемых событий;
- классическая и графическая фильтрация;
- критериальная оценка регистрируемых данных;
- конверторы данных.

В пакет входят:

АЕ Correlation Expert – главная программа – анализ, протоколируемая обработка и оценка данных, диаграммы различного типа, связи между данными, быстрый выбор каналов, масштабирование, просмотр по событиям, гибкая группировка данных, графическая фильтрация (что выделил, то и удалил), задание программы испытания, оценка в соответствии с локально-динамическим критерием, критериями ASME, Severity, Historic index, протокол работы, отчеты...

АЕ Post Expert – программа фильтрации – гибкая и протоколируемая фильтрация, фильтрация по событиям, фильтрация «механических» событий, фильтрация по выражениям, сохранение фильтров...

АЕ Converter Expert – ALine32D to DiSP Data Converter – утилита преобразования файлов формата ALine32D в формат DiSP.

АЕ Converter Expert – Spartan 3000 to DiSP Data Converter – утилита преобразования файлов формата Spartan 3000 в формат DiSP.

В докладе рассматриваются примеры использования пакета для решения практических задач анализа/обработки/оценки данных.

АЕ Workbench – официальная история

Проект начинался в далеком 1992 г. Я работал с системой PAC SPARTAN 3000 и

нашел, наконец, ПО для работы с дискетами SPARTAN на PC. У меня были программы обработки от PAC Losap, но они имели достаточно ограниченные возможности. Было желание написать что-то, позволяющее, например, быстро просмотреть файл данных в текстовом или графическом виде. И тогда я написал простой просмотрщик файлов формата SPARTAN. Он позволял просматривать данные на нескольких предопределенных точечных графиках.

Потом возникла идея показать связи между различными параметрами одного импульса. Тогда-то и появилась программа и название «AE WorkBench - Enhanced Correlation Analysis» или **WBC**. Пользователь мог выделить на одном графике зону, и все импульсы, попавшие в эту зону, показывались на других графиках инверсным цветом. Это позволяло быстро оценить параметры характерных данных – тычков, помех, «истинной» эмиссии, значительно ускоряя процесс обработки информации.

Со временем программа обросла другими возможностями. Появилась возможность показывать лишь первые импульсы событий; стало возможным выбрать для просмотра не все, а диапазон каналов, определить для просмотра какую-то часть испытания, вывести на графики линии, определяющие характерные этапы испытания – выдержки, наборы давления, сбросы. Появилась возможность быстрого увеличения части испытания и графическая фильтрация. Это позволило увеличить скорость работы с данными на два порядка (по сравнению с пакетом SPARTAN 2000 или DiSP/ATPOST)! Алгоритм фильтрации позволял удалять (или оставлять) данные в удобном для пользователя темпе даже для достаточно больших файлов! «Механические» тычки можно было удалять практически мгновенно! Кроме того, пакет включал мощную программу традиционной фильтрации и программу статистического анализа данных (рисунок 1).

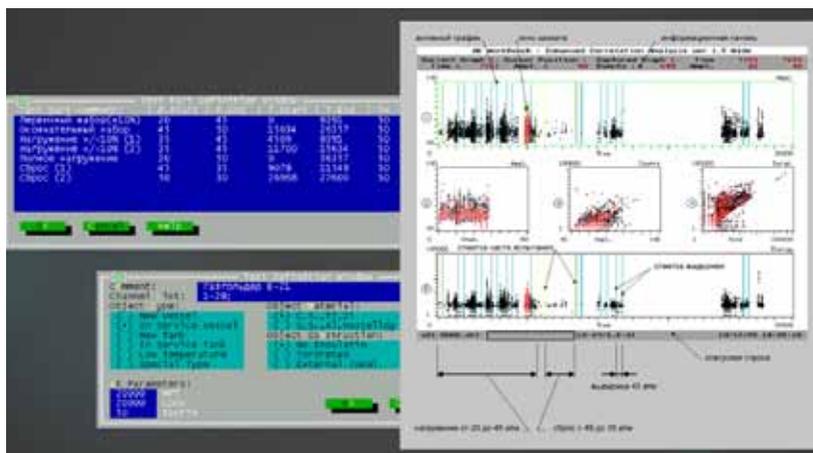


Рисунок 1. AE Workbench for DOS

Появление Windows предопределило необходимость появления полностью новой версии, которая и появилась в начале 2000-х..

AE Workbench – современное состояние

Итак, пакет AE Workbench предназначен для анализа, обработки и оценки данных АЭ-испытаний. Ключевые особенности:

- прозрачная работа с данными наиболее распространенных АЭ-систем: PAC, INTERUNIS;
- пакет работает с традиционными данными АЭК (время, канал, амплитуда...);
- выявление и анализ связей основных параметров регистрируемых импульсов;
- классическая и графическая протоколируемая фильтрация;
- критериальная оценка регистрируемых данных;
- наличие конвертеров данных.

АЭ Correlation Expert — обзор возможностей

Итак, после запуска программы пользователь видит набор страниц, переключаемых табулятором, с диаграммами различного типа и панель каналов (рисунок 2). Попробуем описать работу программы как набор правил и действий:

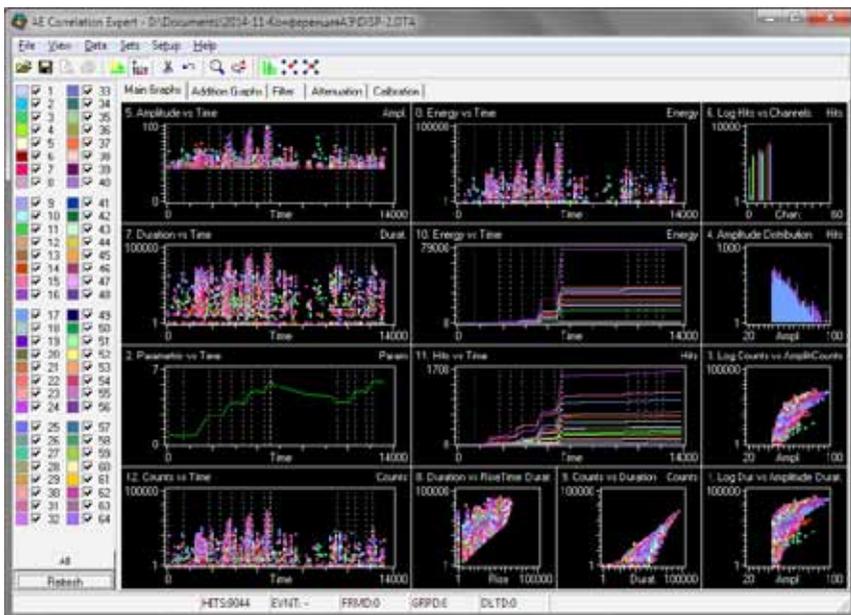


Рисунок 2. AE Correlation Expert

- Каждая страница разделена на определенное количество «графомест» (от 2x2 до 6x7, задаются в диалоге Options) и одна диаграмма может занимать любое «прямоугольное» количество таких «графомест» («графоместа» диаграмм не должны пересекаться).
- Диаграммы могут быть следующих типов: точечные, линейные и гистограммы.
- Для точечных диаграмм каждой АЭ-записи соответствует одна точка на диаграмме.
- Линейные диаграммы и гистограммы могут иметь различное количество интервалов по оси X, различные типы обчета в интервалах и различные типы суммирования интервалов.
- Диаграммы, горизонтальной осью которых является ось времени, называются «времязависимыми».

- Если курсор мыши находится в зоне построения диаграммы, то в левом нижнем углу статусной строки отображаются его координаты.
- Как правило, каждый АЭ-канал отображается индивидуально, индивидуальным цветом, соответствующим цвету на панели каналов.
- Если выбрано Data/Data Dependences, то разделение по каналам отсутствует, и все данные отображаются одним цветом.
- Если горизонтальной осью графика, на котором производится выделение данных, является ось времени, то при удержании во время выделения клавиши Ctrl (или выбор перед началом выделения пункта меню «View-Zoom/F2») вызовет увеличение масштаба по оси времени до размеров выделения. Если при выделении удерживается еще и клавиша Alt, то увеличение масштаба будет касаться лишь текущего графика, если же нет, то увеличение масштаба отразится на всех графиках – на всех графиках будут отображены только данные, попавшие в выбранный временной диапазон.
- Масштабирование может производиться в несколько этапов, с постепенным приближением к интересующим данным, вплоть до одной секунды. Выбор пункта меню «View/UnZoom/F3» вызовет возврат к предыдущему масштабу.
- Если выбран пункт меню «Data/Event view», то диаграмме отображаются только первые импульсы АЭ событий (файл данных должен быть упорядочен по времени).
- На панели каналов щелкните All. Отметки всех каналов будут сняты. Выберите каналы 3 и 4. Щелкните Refresh. Теперь на диаграммы выводятся данные только по каналам 3 и 4.
- Вернитесь к предыдущему представлению. Отмените режим масштабирования. Выделите на левой верхней диаграмме (мышью) область, содержащую некоторые данные. Теперь вы в режиме выбора данных и эти выделенные данные отображаются инверсным цветом на этой и других точечных диаграммах (рисунок 3).

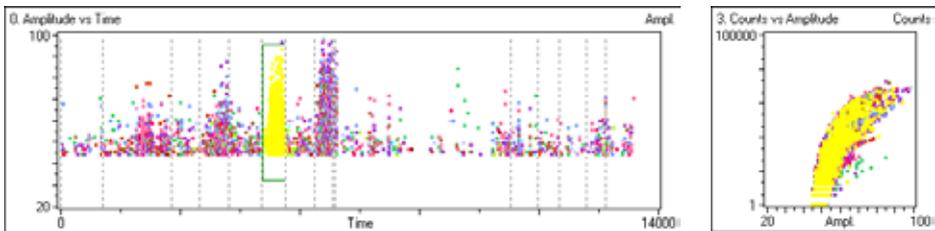


Рисунок 3. Выделение данных

- Выберите пункт меню Data/Colored channels. Теперь каждый канал опять отображается своим собственным цветом (соответствующим цвету на панели каналов), но выделенные данные по-прежнему отображаются инверсным цветом.
- Переместите курсор на правую нижнюю диаграмму. Зажав Shift, выделите данные так, чтобы часть данных, выделенная на предыдущем этапе, попала в новое выделение.

- Выберите пункт меню Sets/Add to grouped with AND. Выделенные данные теперь группированы, причем в «группированные» данные попали только те, которые присутствовали одновременно в обоих выделениях (по И) (рисунок 4а).
- Выберите пункт меню Sets/Clear grouped data. Группированные данные очищены, диаграммы находятся в первоначальном состоянии.
- Выделите на левой верхней диаграмме две области данных (с помощью Shift). Выберите пункт меню Sets/Add to grouped with OR. Выделенные данные, принадлежащие как первой, так и второй области теперь группированы (по ИЛИ).
- Выберите пункт меню Sets/Invert grouped data. Негруппированные данные станут группированными и наоборот. Еще раз выберите Sets/Invert grouped data. Программа вернется к прежнему состоянию.
- Выберите пункт меню Sets/Delete grouped data. Группированные данные будут удалены (рисунок 4б).
- Уникальная возможность – пункт меню View/Show deleted. Удаленные данные станут видимы, однако неактивны – выбрать их нельзя.

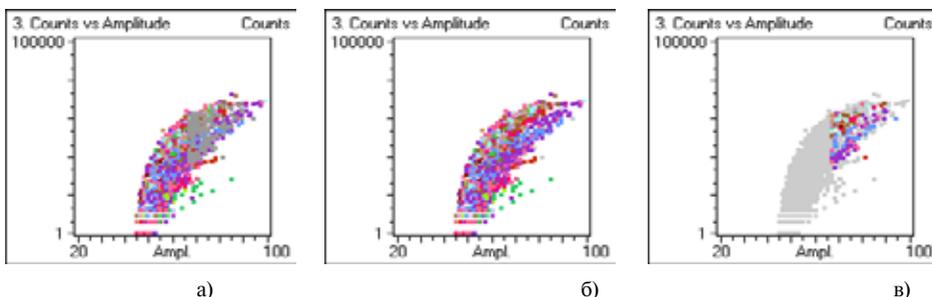


Рисунок 4. Выделенные данные группированы (а), удалены (б). Удаленные данные инвертированы (в)

- Выберите пункт меню Sets/Invert deleted data. Оставшиеся и удаленные данные инвертируются (рисунок 4в). Если сохранить файл в таком виде, то это будет своего рода протокол фильтрации – в результирующем файле будут присутствовать только удаленные импульсы. Повторите еще раз последнее действие.
- Выберите пункт меню Sets/Undelete data. Удаленные данные будут восстановлены (рисунок 5).

Add to grouped with OR	Ins
Add to grouped with AND	Ctrl+A
Delete all frames	Ctrl+D
Clear grouped data	Ctrl+C
Invert grouped data	
Delete grouped data	Del
Undelete data	Alt+BkSp
Invert deleted data	
Show framed data	Ctrl+Alt+D
Show sets statistic	Ctrl+Alt+S

Рисунок 5. Меню работы с выделенными данными

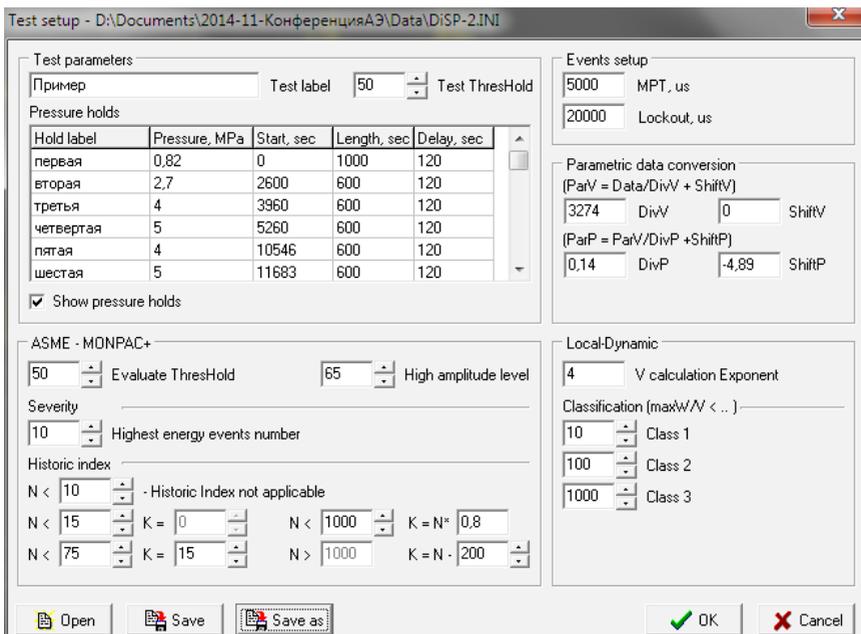


Рисунок 6. Определение параметров испытания

- Выберите представление данных по событиям, выберите на диаграмме Амплитуда/Время блок данных. Щелкните Sets/Show framed data – выбранные данные будут представлены в текстовом виде, причем возможно представление данных «вторичных» импульсов событий с разницей времени прихода (РВП).
- Предоставление статистической информации по испытанию: сформируйте или загрузите файл описания (меню Data/Test setup). Определите времена выдержек, порог оценки, уровень высоких амплитуд (рисунок 6). В этом же блоке определяются параметры событий (MPT и LOCKOUT).
- После этого на времязависимых диаграммах можно увидеть отметки выдержек. Выберите данные относящиеся к повторному нагружению. Выберите Sets/Show sets statistic. Вы получаете доступ к статистической информации по выбранной части испытания:
 - амплитудное распределение;
 - максимальное, минимальное, суммарное, среднее значение АЭ-параметра;
 - результаты оценки по локально-динамическому критерию;
 - количество событий на выдержках давления;
 - результаты оценки по критериям кода ASME, Historic Index, Severity;
 - диаграмма ZIP (рисунок 7).
- Сохранить файл можно через пункт «Fail/Save data as». Файл при этом остается полностью совместим с соответствующим ПО.
- Доступ к протоколу обработки – через пункт меню «Setup/Protocol view».
- И, наконец, Ctrl+Щелчок правой клавишей на диаграмме копирует ее в буфер обмена, причем с несколькими интересными настройками.

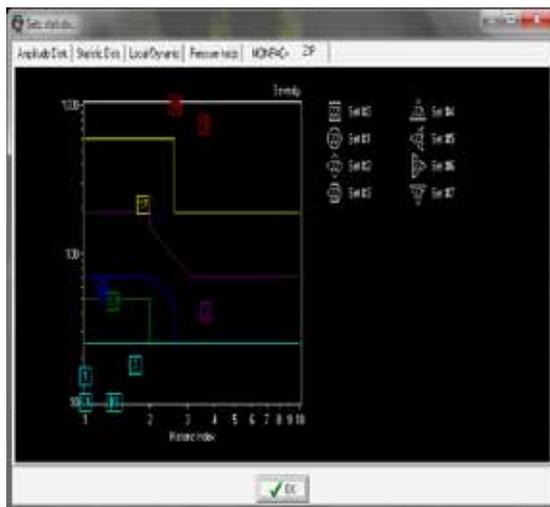


Рисунок 7. Диаграмма зональной интенсивности (ZIP)

AE Post Expert – обзор возможностей

AE Post Expert является программой фильтрации АЭ-данных, предназначенной для работы с файлами разных форматов. В настоящий момент реализована поддержка формата систем SPARTAN 3000, систем семейства DiSP (SPARTAN 2000, Locan AT и т.п.) (РАС), а также формата Aline32D (ИНТЕЮНИС).

Общий принцип работы программы состоит в определении того, соответствует ли данная запись АЭ-файла определенному набору условий. Эти условия задаются в т.н. Окнах фильтрации (рисунок 8). Окна фильтрации могут быть двух типов – мин-макс

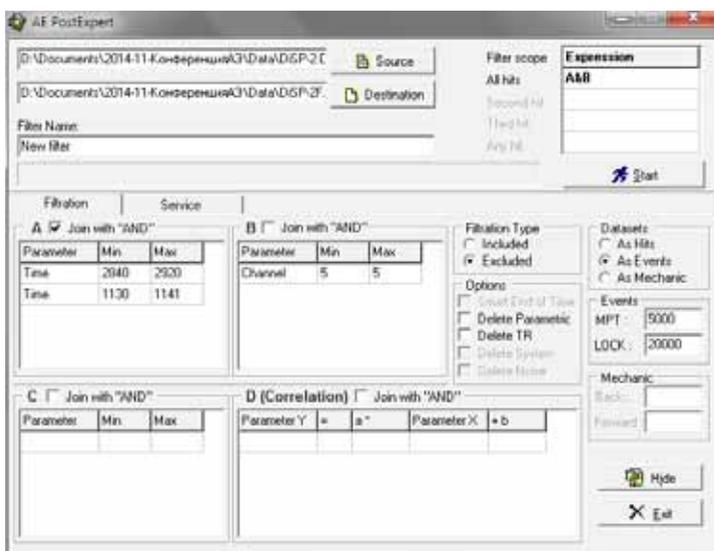


Рисунок 8. AE Post Expert

и соотношения. В окнах типа мин-макс назначается минимальное и максимальное значение какого-либо параметра записи АЭ-импульса, а в окнах соотношений определяется связь различных параметров одной АЭ-записи, например, Duration и Rise Time.

Набор условий каждого окна определяется в виде одной или нескольких записей фильтров соответствующего типа. Эти записи могут объединяться как по алгоритму логического «И», так и по «ИЛИ», определяя тем самым, достаточно ли АЭ-записи соответствовать условиям одной записи фильтра или же необходимо удовлетворить условиям всех записей окна.

Окна фильтрации, в свою очередь, должны быть связаны в выражение фильтрации также по алгоритму логического «И» или «ИЛИ».

Окончательное решение о том, будет ли АЭ-запись принята или отвергнута, принимается с учетом значения переключателя тип фильтрации (исключающая или включающая). Если тип фильтрации исключающий, то АЭ-запись, удовлетворяющая совокупности условий записей фильтров, окон фильтрации и выражения фильтрации будет исключена из результирующего файла, если же тип фильтрации включающий, то наоборот – записана в результирующий файл.

Кроме вышеперечисленных возможностей АЕ Post Expert позволяет обрабатывать группы АЭ-записей. Группы АЭ-записей могут быть обработаны по двум алгоритмам – по событиям и как механические сигналы. При обработке по событиям предполагается, что требуемые характеристики имеет первый (по времени прихода) импульс АЭ-события, при обработке сигналов по алгоритму механика допускается, что искомыми характеристиками может обладать и не первый импульс в группе (рисунок 9).

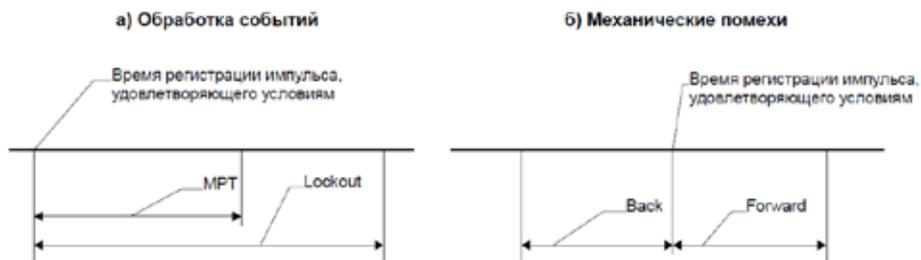


Рисунок 9. АЭ-события и события «механической» природы

Пример: Известно, что помеха имела место по каналу 5 в течение с 1130 по 1141 сек. испытания и в течение 2840 – 2920 сек. Необходимо удалить ее.

Заносим в окно А фильтрации две записи:

Parameter	Min	Max
Time	1130	1141
Time	2840	2920

Сбрасываем условие связи записей окна А (Join with «AND»).

Заносим в окно В фильтрации одну запись:

Parameter	Min	Max
Channel	5	5

Переключатель «Filtration type» устанавливаем на «Excluded».

В таблицу «Expression» записываем (A&B).

Старт. Импульсы по 5-ому каналу, зарегистрированные в течение с 1130 по 1141 и с 2840 по 2920 сек будут исключены.

Утилиты

В состав пакета входят утилиты конвертации данных:

- из формата SPARTAN в DiSP;
- из формата ALine в DiSP.

С учетом доступных конвертеров Vallen Systeme конвертеры пакета позволяют использовать при обработке данных ПО не только производителя оборудования, но и стороннее ПО. Так, например, данные ALine могут быть обработаны ПО VisualAE (Vallen Systeme), в том числе – локационными алгоритмами (рисунок 10).

Практический пример

Пневматическое испытание АВО (рисунок 10). Регистрация данных проводилась системой ALine32D DDM (версия ПО 4.99).



Рисунок 10. Испытываемый аппарат воздушного охлаждения

Испытание проводилось в два нагружения, до давления 87 бар, по программе, приведенной на рисунке 11. Файл довольно большой – 52 Мб, 686 тыс. импульсов)

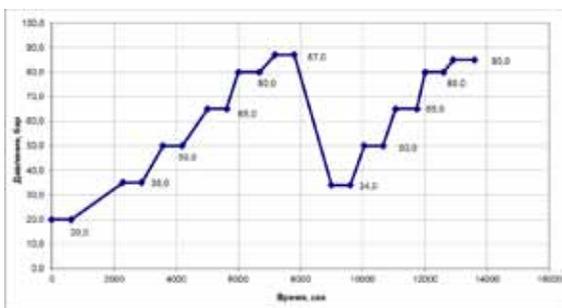


Рисунок 11. Программа испытания

Описание испытания:

Испытание сопровождалось пропусками через шаровые краны в течение всего контроля и «свистом» через кран, в который подавался газ при нагружении, во время периодов нагружения.

Обработка данных:

1. Файлы испытания объединены (т.к. нагружение включало более одного файла). Имя файла: aem08_11_13#23.ald (686483 импульса, 52 Мб).
2. Удалены шумы и синфазные помехи. Имя файла aem08_11_13#23-NS.ald (673772 импульса, 37 Мб).
3. Задана для всех каналов локационная группа зонного типа. Для файла, получившегося на этапе 2, выполнена фильтрация по локации для этой группы с сохранением незалоцированных импульсов. Файл при этом получается упорядоченным по времени. Имя файла aem08_11_13#23-NST.ald (673772 импульса, 37 Мб).
4. Файл загружен и обработан в программе AE Workbench. На рисунке 12 показан исходный файл, на рисунке 13 – удаленные данные, на рисунке 14 – те данные, по которым анализировалось состояние объекта. Лоцированные события на выходном коллекторе АВГ при повторном нагружении приведены на рисунке 15, на рисунке 16 – зона дополнительного НК (УЗК), по результатам которого сварной шов коллектора АВО был забракован.

Заключение

В докладе показано практическое применение пакета AE Workbench при обработке данных испытаний реальных объектов.

По вопросам приобретения пакета AE Workbench обращайтесь к разработчику – Комарову Алексею Григорьевичу (KomarovAG@interunis.ru).

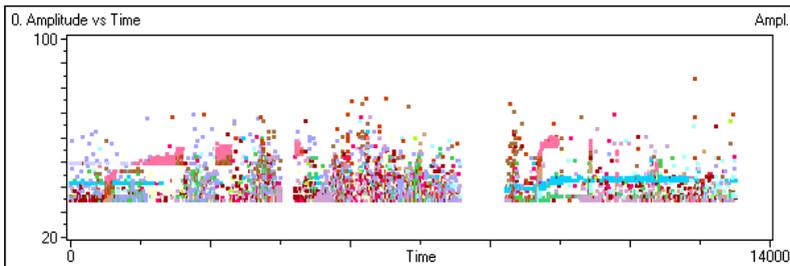


Рисунок 12. Исходные данные

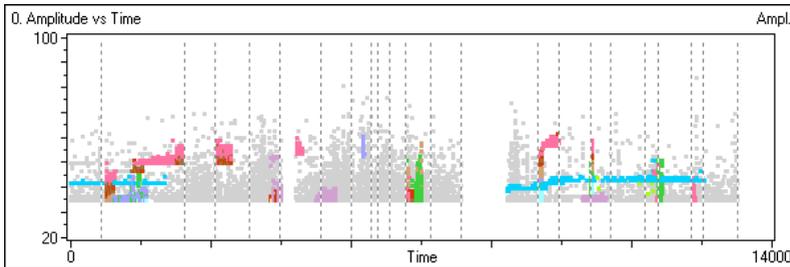


Рисунок 13. Удаленные данные

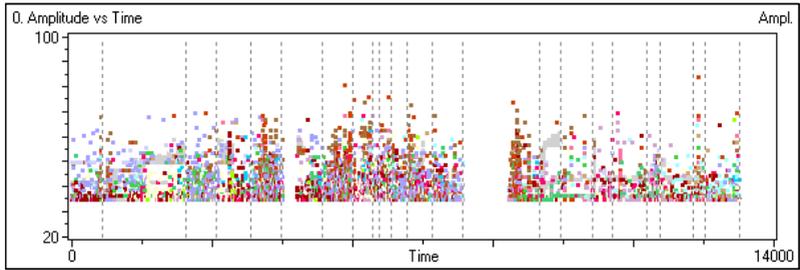


Рисунок 14. Результаты обработки

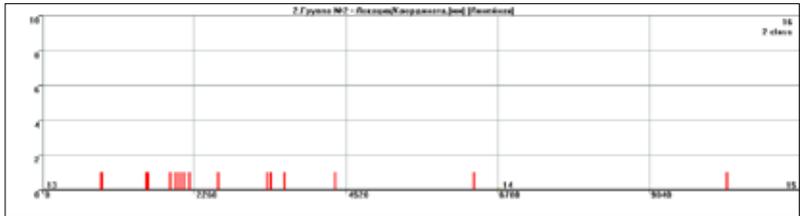


Рисунок 15. Лоцированные события на выходном коллекторе АВГ при повторном нагружении

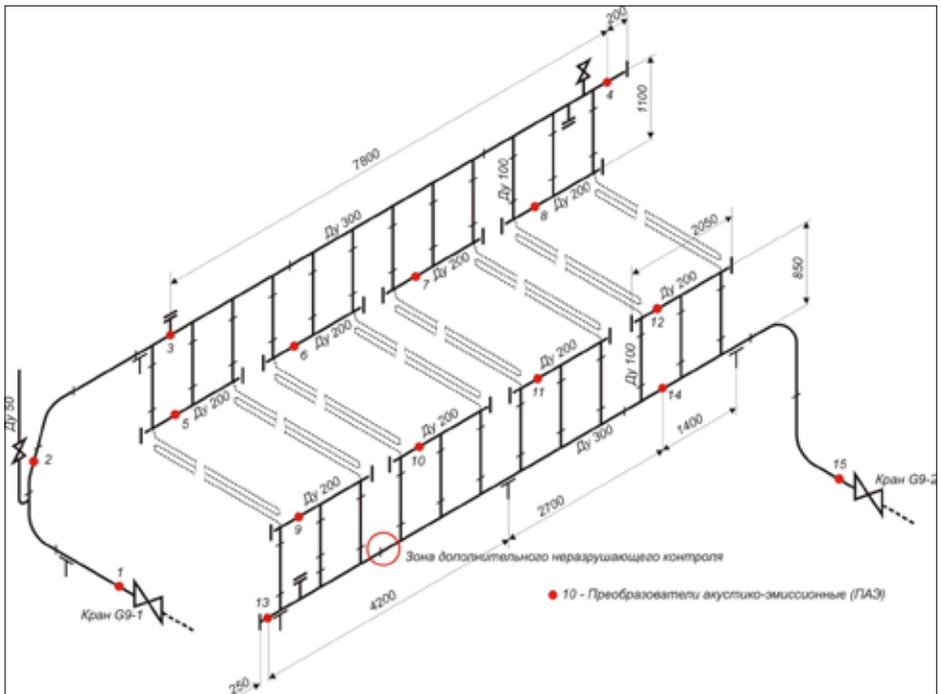


Рисунок 16. Местоположение зон дополнительного неразрушающего контроля на элементах АВГ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ОБНАРУЖЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ОБРАЗЦАХ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ СТАЛИ 20, ИМЕЮЩИХ ЛИТУЮ СТРУКТУРУ.

Г.А. Бигус, д.т.н., проф. кафедры «Технологии сварки и диагностики»
МГТУ им. Н.Э. Баумана; А.А. Травкин, руководитель группы оценки соответствия
организаций в области промышленной безопасности и неразрушающего контроля
ФГАУ «НУЦСК при МГТУ им. Н.Э. Баумана»

Приведены результаты экспериментальных исследований поведения усталостных повреждений в процессе циклических и статических испытаний с помощью метода акустической эмиссии. При проведении исследовательских работ образцы с концентратором напряжения, имеющие литую структуру стали 20, подвергались воздействию циклической нагрузки. Процесс распространения усталостной трещины фиксировался двумя преобразователями акустической эмиссии. При проведении исследований был определен состав волнового пакета сигнала акустической эмиссии, генерируемого ростом трещины, зафиксированы изменения его спектральных характеристик. Образцы с усталостными повреждениями подвергались статическим испытаниям. Были сформулированы дефектоскопические признаки обнаружения усталостной трещины в процессе статических испытаний. Проведен фактографический анализ изломов, устанавливающий связь с данными акустической эмиссии.

Ключевые слова. Акустическая эмиссия, усталостная трещины, отливка, литейный дефект, микроструктура, образец, деформация.

Большинство ответственных технических устройств опасных производственных объектов в процессе эксплуатации испытывают циклические нагрузки. В этих условиях критерием наступления предельного состояния объекта является нарушение его целостности за счет развития усталостных повреждений. Таким образом, одним из необходимых условий обеспечения эксплуатационной живучести конструкции, работающей в условиях циклического нагружения, является своевременное обнаружение усталостных повреждений с размерами, не превышающими критические значения.

Среди методов неразрушающего контроля, используемых для определения наличия усталостных повреждений в эксплуатируемых конструкциях при проведении работ по оценке возможности дальнейшей безопасной эксплуатации технических устройств, особое место занимает метод акустической эмиссии [1]. Метод акустической эмиссии, основанный на регистрации ультразвуковых колебаний, генерируемых развивающимися дефектами, позволяет с высокой чувствительностью обнаруживать повреждения, оказывающие влияние на целостность конструкции, во всем объеме контролируемого объекта без значительных трудозатрат.

Целью проведенной работы являлось определение дефектоскопических признаков обнаружения усталостных повреждений методом акустической эмиссии при статическом нагружении литых объектов, изготовленных из стали 20. Литую структуру стали 20 имеет большое количество машин и механизмов, в т.ч. и ответственных, сре-

ди которых следует выделить литые детали тележки грузового железнодорожного вагона и крупногабаритную трубопроводную запорную арматуру.

Для разработки дефектоскопических признаков обнаружения усталостных повреждений были проведены экспериментальные исследования, в задачи которых входило выращивание усталостных трещин в образцах под действием циклических нагрузок и испытание образцов с усталостной трещиной в условиях квазистатического нагружения. Экспериментальные работы проводились на базе кафедры «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана на установке, в состав которой входила разрывная машина Instron 300DX, акустико-эмиссионная система ALine-32D, экстензометр для определения локальных деформаций (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид испытательной установки

ная машина Instron 300DX, акустико-эмиссионная система ALine-32D, экстензометр для определения локальных деформаций (рис. 1).

Первый этап экспериментальных исследований – циклические испытания образцов – моделировал процесс развития усталостных трещин в конструкции под действием эксплуатационных нагрузок. Образцы для испытаний были вырезаны из объекта, имеющего литую структуру, и подвержены механической обработке. В рабочей области образца эрозионным способом был нанесен концентратор напряжения, моделирующий металлургический дефект в объекте, изготовленном литьем (рис. 2).

На образец на расстоянии 60 мм. от концентратора напряжений были установлены широкополосные преобразователи акустических эмиссии марки GT300, принимающие сигналы в процессе испытаний (рис. 3).

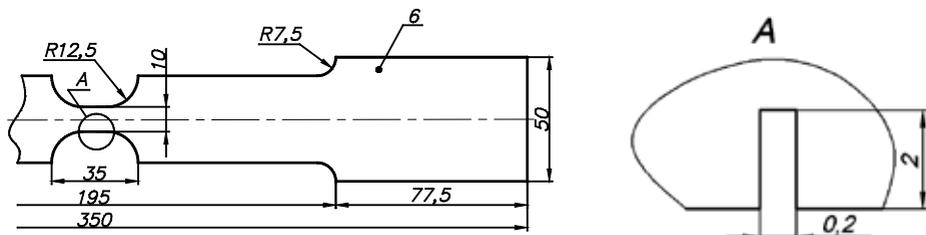


Рис. 2. Образец для испытаний

Начальный этап циклических испытаний соответствовал накоплению повреждений в области концентратора. Данные процессы генерируют акустико-эмиссионные сигналы с амплитудами не превышающими амплитудного порога дискриминации. Начиная с некоторого количества циклов, система фиксирует сигналы с амплитудами выше амплитудного порога дискриминации (рис. 4).

Детальный анализ этих сигналов показал, что они регистрируются каждые 15 секунд, что соответствует времени одного цикла при значении нагрузки, составляющей 80% от максимального значения нагрузки цикла. На основании данных фактографи-



Рис. 3. Образец, зажатый захватами испытательной машины, с установленным экстензометром и преобразователями акустической эмиссии

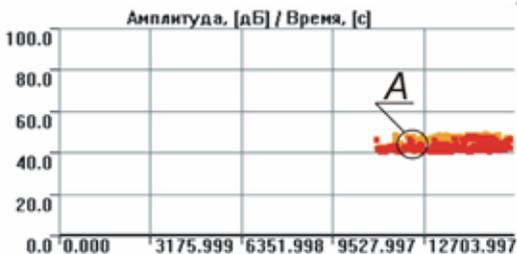
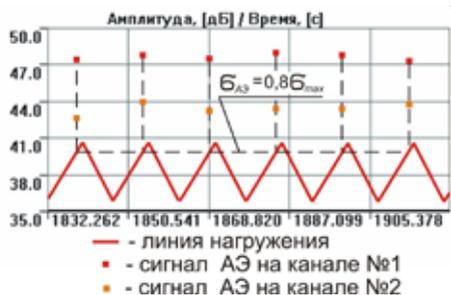


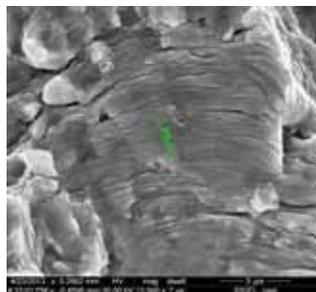
Рис. 4. Появление сигналов акустической эмиссии после 3000 циклов нагружения

ческого анализа было обнаружено, что данные сигналы соответствуют процессу распространения усталостной трещины на величину усталостной бороздки, составляющей 0,25 мкм. (рис.5).

Таким образом, подсчет количества сигналов позволяет контролировать приращение усталостной трещины в режиме реального времени. Регистрация сигналов акустической эмиссии от роста трещины позволила определить пороговый



а)



б)

Рис. 5. Процесс регистрации сигналов акустической эмиссии при циклических испытаниях (вид А на рис. 4) (а) и электронная топограмма усталостной зоны излома образца, показывающая бороздчатый микрорельеф (б)

коэффициент интенсивности напряжений. Значение коэффициента интенсивности напряжения $K_{AЭ}$, определяемое значением нагрузки, при которой регистрируются сигналы акустической эмиссии, соответствует пороговому коэффициенту интенсивности напряжений K_{th} [2]. Оценка порогового коэффициента интенсивности напряжений по результатам эксперимента дает следующие результаты: $K_{th} = 16,5 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$.

Второй этап экспериментальных исследований, включающий статические испытания образцов с усталостными трещинами, моделировал создание локально напряженно-деформированного состояния в вершине усталостной трещины, возникающе-

го при проведении акустико-эмиссионного контроля. В процессе проведения акустико-эмиссионного контроля эксплуатационные циклические нагрузки заменяются статическим нагружением. Максимальное напряжение при статических испытаниях, как правило, на 25% превышает максимальные напряжения при рабочих нагрузках. Было обнаружено, что минимальный размер усталостного повреждения в образце из стали 20, выявляемого при статических испытаниях методом акустической эмиссии, составляет 0,25 мм (рис. 6).

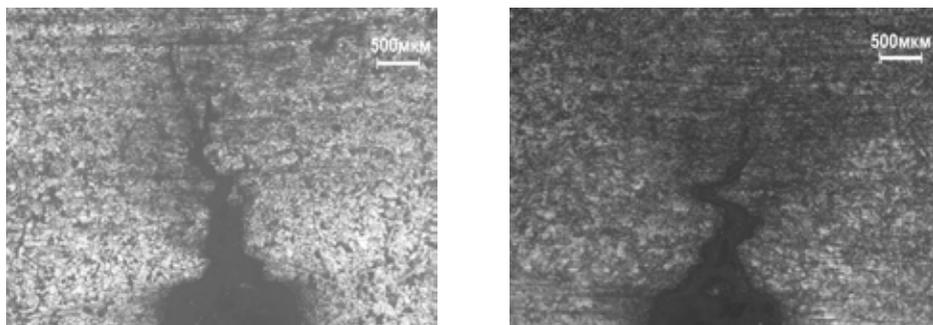


Рис. 6. Усталостная трещина в образце (1 и 2 сторона образца) перед проведением статических испытаний

Были определены дефектоскопические признаки определения усталостной трещины минимального размера в условиях статических испытаний (рис. 7.). К ним относится регистрация сигналов акустической эмиссии в процессе предварительного статического нагружения, регистрация сигналов акустической эмиссии при превышении статических напряжений уровня, соответствующего циклическим испытаниям, наличие сигналов при сбросе нагрузки (таблица 1).

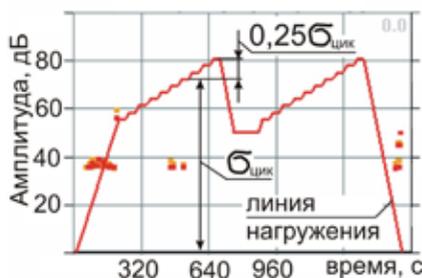


Рис. 7. График изменения амплитуды сигналов акустической эмиссии от времени с наложенным графиком нагружения при статическом испытании образца с усталостной трещиной

Таблица 1. Дефектоскопические признаки обнаружения усталостной трещины длиной 0,25 мм в образце, имеющем литую структуру стали 20

№	Дефектоскопический признак	Амплитуда, дБ	Количество сигналов
1.	Наличие сигналов в процессе предварительного нагружения.	37,5	19
2.	Наличие сигналов в процессе превышения эксплуатационной нагрузки.	37,5	3
3.	Наличие сигналов на сбросе нагрузки	41	4

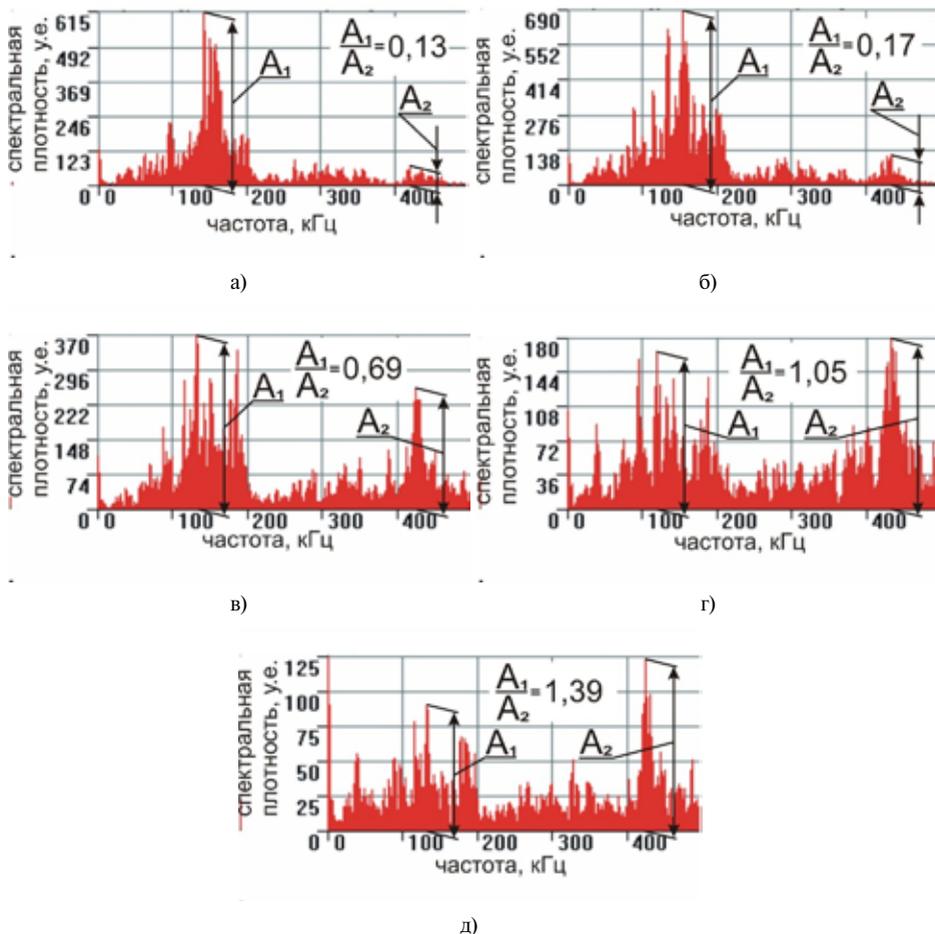


Рис. 8. Спектральная плотность сигнала акустической эмиссии от процесса развития усталостной трещины на различных этапах её роста: а) после 6500 циклов, длина трещины 0,15 мм; б) после 7600 циклов, длина трещины 0,45 мм; в) после 8200 циклов, длина трещины 0,55 мм; г) после 9000 циклов, длина трещины 0,7 мм; д) после 9200 циклов, длина трещины 0,9 мм

В процессе проведения экспериментальных исследований на основании данных спектрального анализа сигналов акустической эмиссии от роста усталостной трещины при статических испытаниях на разных этапах ее развития было обнаружено увеличение доли высокочастотной составляющей по мере развития усталостного повреждения (рис. 8).

Таким образом, определив коэффициент равный отношению спектральной плотности сигнала акустической эмиссии, приходящейся на высокочастотную составляющую, к спектральной плотности сигнала приходящейся на низкочастотную составляющую, представляется возможным определять размер усталостного повреждения.

Следует отметить, что абсолютные значения спектральной плотности сигнала акустической эмиссии во многом определяются каналом передачи объект-преобразова-

тель, но её изменение обусловлено только изменениями, связанными с источником сигналов акустической эмиссии (рост усталостной трещины). Повышение высокочастотной составляющей в спектре сигнала акустической эмиссии при росте усталостной трещины связано с изменением положения её вершины, рассматриваемой в качестве источника акустической эмиссии, относительно свободных поверхностей. При росте усталостной трещины от концентратора вглубь образца происходит перераспределение энергии излучения между ассимметричными и симметричными волнами Лэмба в сторону последних, распространяющихся на частоте порядка 450 кГц. Данное явление согласуется с результатами численного моделирования процесса излучения сигналов акустической эмиссии источниками, занимающими различное положение относительно свободных поверхностей пластины, приведенного в [4].

Аналогичное изменение спектральных характеристик сигналов акустической эмиссии было зафиксировано в работе [5] по исследованию развития коррозионных повреждений с применением метода акустической эмиссии. В процессе проведения экспериментальных работ было установлено, что при нахождении коррозионного дефекта на поверхности объекта преобладает энергия антисимметричной волны Лэмба нулевого порядка с более низкой частотой, а при нахождении дефекта на глубине, равной половине толщины объекта, преобладает симметричная волна Лэмба нулевого порядка с более высокой частотой.

При разрушении образцов из стали 20, имеющих усталостную трещину длиной 0,25 мм, в результате статических испытаний максимальная амплитуда сигнала акустической эмиссии составила 74 дБ (рис. 9а). Разрушение при этом происходит по механизму слияния микропор. Разрушение образца из стали 20 в результате циклических испытаний происходит по усталостному механизму с образованием бороздчатой структуры, при этом каждый скачок трещины генерирует сигнал акустической эмиссии (рис. 9б).

Следует отметить многоочаговость развития разрушения при циклических нагрузках в испытуемых образцах. Наряду с магистральной трещиной, происходит зарождение и развитие множества усталостных повреждений. Это связано с большим количеством металлургических дефектов в виде пор, являющихся локальными концентраторами напряжений, равномерно распределенными в объеме металла (рис. 10).

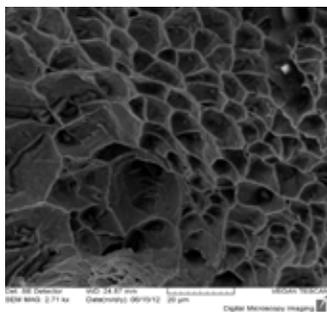
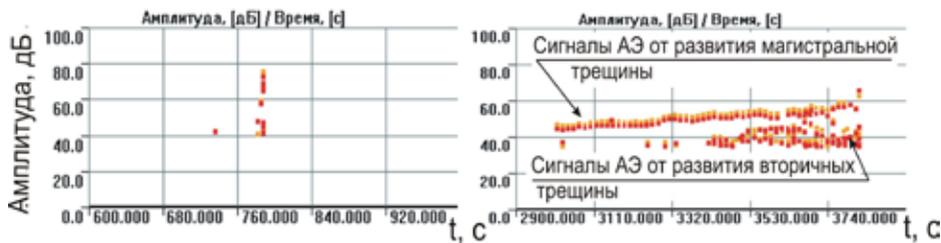
ВЫВОДЫ

При проведении работы получены следующие основные результаты:

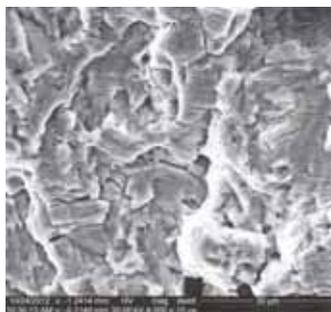
1. С помощью данных акустической эмиссии была произведена регистрация процесса распространения трещины. Для усталостного механизма распространения повреждения (приращение длины трещины на величину шага бороздки за каждый цикл) для образца, имеющего литую структуру стали 20, характерно генерирование по одному сигналу акустической эмиссии амплитудой 45 – 47 дБ в пределах каждого цикла при достижении коэффициента интенсивности напряжений значения $K_{th} = 16,5 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$.

2. При проведении экспериментальных исследований было установлено появление и постепенное преобладание высокочастотной составляющей в спектре сигнала акустической эмиссии от усталостной трещины по мере увеличения её длины.

3. Было исследовано поведение образцов с усталостными трещинами, подвергавшихся статическим нагружениям. Определен минимальный размер усталостного повреждения, выявляемого в условиях статических испытаний. Определена связь между



а)



б)

Рис. 9. Графики изменения во времени амплитуды сигналов акустической эмиссии при разрушении образца с усталостной трещиной длиной 0,25 мм при статическом нагружении (а), при циклических испытаниях (б) и соответствующие электронные топограммы изломов

усталостным повреждением, характеризуемым линейными размерами, и параметрами процесса излучения акустических волн от усталостной трещины в процессе статических испытаний. Получены критерии обнаружения усталостной трещины в процессе статических испытаний.

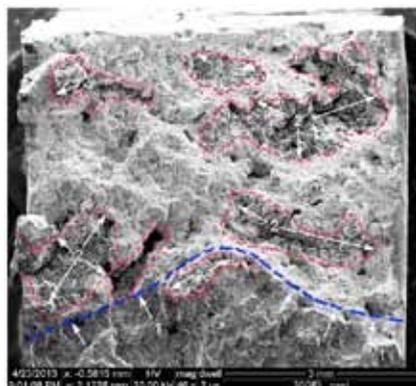
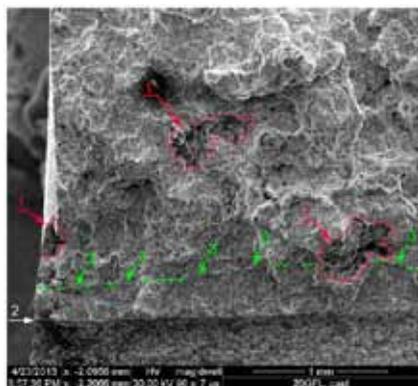


Рис. 10. Электронная топограмма фрагмента усталостной зоны (а) и зоны долома (б)

Обозначения на рис. 11 (а): 1 – поры; 2 – вершина надреза; 3 – линия фронта усталостной трещины.

Обозначения на рис. 11 (б): 1 – линия фронта усталостной трещины, являющейся границей между зоной усталости (снизу) и зоной долома (сверху), 2 – поры

Список использованной литературы

1. Бигус, Г.А., Даниев, Ю.Ф. Техническая диагностика опасных производственных объектов. – М. : Наука, 2010. – 415 с.
2. Иванов, В.И., Куранов, В.Н., Рябов, А.Н. Об акустической эмиссии при малоцикловой усталости // Доклады АН СССР. – 1986. – Т. 288. – № 6. – С. 134.
3. Бигус, Г.А., Травкин, А.А., Даниев, Ю.Ф. Вейвлет-анализ сигналов акустической эмиссии при диагностике конструкций // Сварка и диагностика. – 2012. – № 4. – С. 34–38.
4. Hamstad, M.A., O’Gallarher, A., Gary, J. Examination of the application of a Wavelet transform to the acoustic emission signals; Pt 1. Source identification; Pt 2. Source location // Journal of the acoustic emission. – 2002. – V. 20. – P. 39–81.
5. Харебов, В.Г., Попков, Ю.С. Автоматизированные системы комплексного коррозионного мониторинга и перспективы применения метода АЭ в их составе // В мире неразрушающего контроля. – 2008. – № 3(41). – С. 18–21.

МИКРОМЕХАНИКА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКА РЕСУРСА ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Носов В.В.

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»,
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Основным методическим противоречием АЭ-контроля является несоответствие конкретной формы предоставления сведений о сигналах АЭ их абстрагированному содержанию. Устранение противоречия должно проводиться методологически строго на основе систематизации процедуры абстрагирования.

В основе разработки физических моделей лежат следующие представления о происходящих в конструкционных материалах процессах накопления повреждений и явлениях АЭ:

1. Характеристики прочности, параметры процесса разрушения и АЭ конструкционных материалов зависят от результата конкуренции одновременно протекающих в материале процессов разрушения и пластического деформирования структурных элементов.
2. Ресурс большинства длительно нагруженных материалов, конструкций и сооружений определяется процессом микротрещинообразования, протекающим в условиях упругого деформирования.
3. Разрушение состоит из двух стадий. На первой стадии происходит мелкодисперсное (рассеянное по объёму объекта либо локально сгруппированное в области дефекта) накопление концентрации микротрещин, состоящее из кинетически неоднородного и однородного этапов. На второй стадии возникает укрупнённый локализованный разрыв сплошности (образование или роста трещины), протекающего упруго либо пластически.
4. Акустическая эмиссия упруго деформированных материалов связана, главным образом, с процессом микротрещинообразования. Количество сигналов от пластической деформации перенапряжённых структурных элементов относительно невелико. Для уменьшения их дестабилизирующего влияния на результаты прогнозирования ресурса следует применять частотную, временную и амплитудную фильтрации.

Значения АЭ аналогов повреждаемости материала $\xi(t)$ (информативных параметров АЭ) пропорциональны величине концентрации $C(t)$ микротрещин

$$\xi(t) = k_{\text{АЭ}} C(t) \quad (1),$$

где t – текущее время, $k_{\text{АЭ}}$ – акустико-эмиссионный коэффициент подобия (АЭК).

$$k_E = V \iiint_{\Delta t, f, u} \hat{O}(\Delta t, f, u) dudfd\Delta t,$$

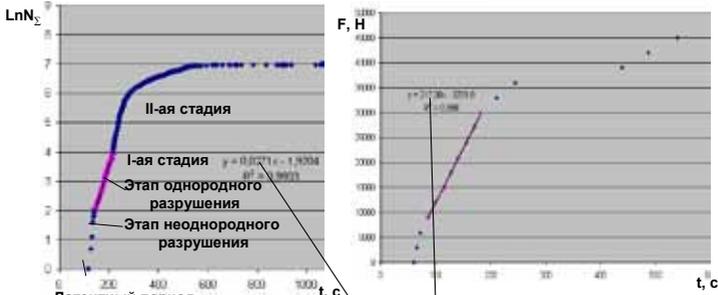
где V – контролируемый объём материала, $\Phi(Dt, f, u)$ – плотность вероятности распределения сигналов АЭ по интервалам Dt (паузам) между ними, амплитуде u и частоте f. Существенно, что значение АЭК может быть принято постоянным в пределах одного корректно проведённого (оперативно с постоянной скоростью и подобно рабочему нагружению) эксперимента, а количество сигналов от пластической деформации структурных элементов материалов на первой стадии невелико. В качестве АЭ-аналогов повреждаемости материала могут выступать число импульсов, суммарная АЭ, суммарная амплитуда или энергия сигналов АЭ.

Уравнение (1) представляет собой микромеханическую модель временных зависимостей параметров акустической эмиссии, регистрируемой на стадии мелкодисперсного разрушения любого масштабного уровня в условиях неоднородности механического состояния материала контролируемого объекта, позволяющую оценить остаточный ресурс (рис. 1, 2, табл. 1–5).

Связывая параметры АЭ с параметрами микроскопического разрушения, модель позволяет формулировать соответствующие микро- и нано- уровням энергетические, структурные и временные характеристики прочности, сформулировать ряд диагностических АЭ-показателей прочностного состояния, лежащих в основе алгоритмов диагностирования и оценки ресурса. Алгоритмы апробированы на образцах сварных соединений, изделиях из композиционных материалов – металлополимерных втулках и органопластиковых корпусах, сосудах давления, заготовках для производства горячекатаной полосы методом прокатки; сложно нагруженных сварных конструкциях, горнодобывающих предприятиях для оценки степени удароопасности участка горного массива.

Алгоритм оценки АЭ-показателя прочности kY_{AE} сложно нагруженных конструкций

$$N_{\Sigma}(t) = k_{AE} C_0 K T \exp[(\gamma \sigma t - U_0)/(KT)] / (\tau_0 \gamma \sigma) \quad d \ln N_{\Sigma} / \sigma \quad dt = \gamma / KT = Y_{AE}$$



$$kY_{AE} = \ln(\xi_j / \xi_i) / (F_j - F_i) = X_{AE} / (dF / dt) = 0,0271 / 217,38 = 0,000125 \text{ H}^{-1}$$

где $X_{AE} = d \ln N_{\Sigma} / dt$, $k = \sigma / F$, σ – номинальные напряжения; $\xi = N_{\Sigma}$; F – нагрузка, H; t – время, с; $Y_{AE} = \gamma / (KT)$

$$\text{При } F=1 \text{ H } kY_{AE} = W_{AE} = \omega, Y_{AE} = \gamma / (KT) = kY_{AE} F / \sigma = 0,000125 \cdot 1/0,008225 = 0,015 \text{ МПа}^{-1}$$

Рис.1

Корреляция значений различных прочностных АЭ показателей образцов нахлесточных сварных соединений с величиной расчётных напряжений

Тип обр.	Число отверстий в шве	Максимальные напряжения (по Мизесу), Па	Номинальные напряжения, Па	Число сигналов АЭ $N_{\Sigma}^{АЭ}$ (ПБ-03-593-03)	Средняя амплитуда сигнала АЭ на этапе упругого нагружения $U_{\text{ср}}^*$ дБ (ПБ-03-593-03)	Средняя энергия сигнала АЭ $E_{\text{ср}}^*$ мВ ² ·с (ПБ-03-593-03)	kY_{AE}^* 10^{-6} П-1	Показатель m Иванова-Быкова (ПБ-03-593-03)
1	0	85679	52964	188	65,7	46,9	53	0,16
	1 (в нагр. зоне)	191562	59175	28	64,7	24,4	227	0,67
	1 (в разгр. зоне)	180963	59175	26	71,7	167,2	91	0,26
	2	267166	66163	38	67,6	111,2	349	1,05
	4	272232	73386	8	70,7	1475	387	1,19
2	0	66045	8225	48	69,8	198,4	125	5,78
	3 (в нагр. зоне)	76696	8985	22	67,9	155,6	44	1,14
	3 (в разгр. зоне)	71085	8903	51	67,2	49,7	65	3,67
	6	75532	9800	62	65,8	88,8	78	3,62
	12	77589	11718	26	71,7	174,4	89	2,44
3	0	24504	1701	27	70,1	209,4	19	2,41
	2 (в нагр. зоне)	25591	1823	79	70,1	131,1	11	1,27
	2 (в разгр. зоне)	25464	1823	27	67,4	179,3	15	6,43
	4	25713	1965	41	79,4	782,1	42	2,06
	8	25847	2328	50	63,9	7,2	66	1,74
Коеф. кор.			0,93	-0,24	0,23	0,38	0,93	0,48

Таблица 2

Описание используемых информативных параметров АЭ ξ для расчёта разрушающего усилия F_p

Показатель	Описание	Комментарий
N_{Σ} , уравнение регрессии	Суммарное число импульсов АЭ	$F_p = a + b \exp(-hN)$
$N_{\Sigma \text{БУАР}}$	Суммарное число импульсов АЭ	
N_{Σ}'	Активность АЭ	Учет ампл. распр.
$N_{\Sigma \text{СУАР}}$	Суммарное число импульсов АЭ	Учет ампл. распр.
$N_{\Sigma}'_U$	Суммарная амплитуда в ед. врем.	Учет ампл. распр.

Сравнение диагностических параметров АЭ и полезной площади $A_{\text{пол}}$ поперечного сечения образцов по представительности оценки разрушающей нагрузки

Показатели точности оценки	Диагностический параметр для расчёта F_p						$A_{\text{пол}}$
	N_{Σ} , Уравнение регрессии	kY_{AE}^*					
		Используемый информативный параметр ξ					
		по $N_{\Sigma \text{БУАР}}$	по N_{Σ}'	по $N_{\Sigma \text{СУАР}}$	по $N_{\Sigma}'_U$	по $N_{\Sigma \text{СРСП}}$	
отн. ошибка, %	56,532	20,812	20,483	18,020	17,422	14,089	9,886
Коеф. кор. $F_{pд-}$ $F_{pд}$	0,382	0,636	0,781	0,703	0,725	0,759	0,914
$K_{\text{ПРЕДСТ}}$	0,156	0,693	0,864	0,884	0,943	1,220	2,096

Оценка ресурса и стандартных показателей прочности с помощью показателя Y_{AE}

Показатели прочности	Формула оценки показателя прочности
Коэффициент запаса статической прочности	$S_{ст} = \frac{\sigma_{в} Y_R}{\sigma_{раб} Y_{AE}}$
Коэффициент снижения предела выносливости	$K_{ПП.В} = \frac{\sigma_R}{\sigma_{RD}} = \frac{(\ln N_B - \ln N_B) / Y_R}{(\ln N_B - \ln N_B) / Y_{AE}} = \frac{Y_{AE}}{Y_R}$
Исходный ресурс (от начала эксплуатации до образования трещины)	$N_q = \omega_N C * \tau_0 / C_0 \exp\left(\frac{U_0}{KT} - Y_{AE} \sigma\right) = N_B / \exp(Y_{AE} \sigma)$
Остаточный ресурс	$N_{ост} = N_B / \exp(Y_{AE} \sigma) - N_{ПП}$

Y_R -параметр кривой усталости эталонного образца;

Y_{RD} -параметр кривой усталости диагностируемого образца, оцениваемого из уравнения

$$Y_{RD} = Y_{AE}$$

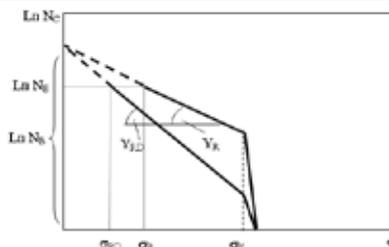


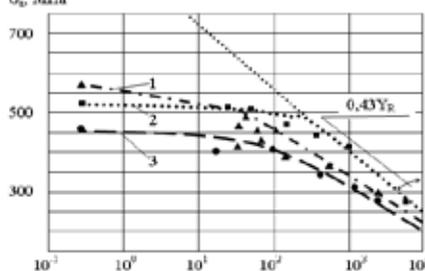
Таблица 4

Диагностика состояния и классификация источников АЭ по их активности

Вид состояния и класс источника АЭ	Значение параметра Y_{AE}	Характеристика работоспособности изделия и источника АЭ
I	$Y_{AE} \leq 0$	Работоспособное, пассивный
II	$0 < Y_{AE} < Y_R$	Работоспособное, активный
III	$Y_R \leq Y_{AE} \leq [S] Y_R$	Ограниченная работоспособность, критически активный
IV	$Y_{AE} > [S] Y_R$	Неработоспособное, катастрофически активный

[S]-нормативный коэффициент запаса прочности

Способы определения Y_R

№	Способ (формула)	Комментарий
1		Кривые усталости образцов из данного материала с данным видом дефекта или без него.
2а	$Y_R = m / \sigma - \text{многоцикловая усталость} (\sigma^m N_C = \text{const})$	Справочные данные о показателе степени кривой усталости и амплитудных напряжениях
2б	$Y_R = 1 / (\sigma * m_N) - \text{малоцикловая усталость} (\sigma N^m_C = \text{const})$	
3	$Y_R = M / \sigma_B$, где $M = \sum_i Y_{AEI} \sigma_i / n$	Разрушающие АЭ-испытания эталонных бездефектных образцов из данного материала
4	$Y_R \approx 5.5 / \sigma_B$	Бездефектные стальные сварные соединения
5	$Y_R \approx 2 / \sigma_B$	Органопластики

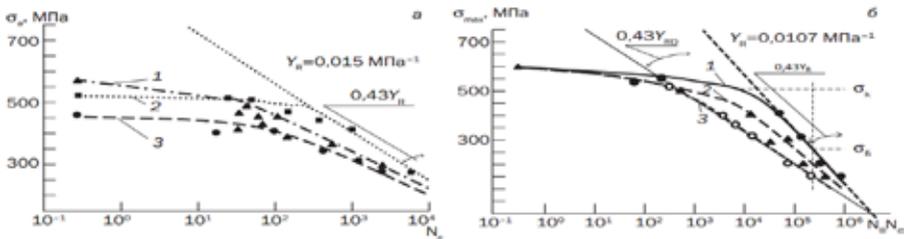


Рис. 11. Кривые малоциклового усталости сварных соединений (по данным [9]): а — результаты малоцикловых испытаний различных зон бездефектных сварных соединений стали ВМСтЗсп (1 — металл углового шва; 2 — металл зоны термического влияния стыкового соединения; 3 — основной металл); б — результаты малоцикловых испытаний стыковых соединений стали 10ХСНД толщиной 20 мм (1 — качественное соединение; 2 — угловатость 8 мм на длине 1 м; 3 — непровар 4 мм)

9. Махутов Н.А., Воробьев А.З., Гаденин М.М. и др. Прочность конструкций при малоцикловом нагружении. — М.: Наука, 1983. — 271 с.

Рис. 2. Кривые малоциклового усталости сварных соединений:

- а) Результаты малоцикловых испытаний различных зон бездефектных сварных соединений стали ВМСтЗсп: 1 — металл углового шва; 2 — металл зоны термического влияния стыкового соединения; 3 — основной металл;
- б) Результаты малоцикловых испытаний стыковых соединений стали 10ХСНД толщиной 20 мм: 1 — качественное соединение; 2 — угловатость (8 мм на длине 1 м); 3 — непровар 4 мм [по данным работ Махутова Н.А. и др].

Среднее значение параметра Y_{AE} образцов АЭ-испытаний составляло 0,00912 МПа⁻¹

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОМПЛЕКСНЫХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ОБОРУДОВАНИЯ НЕФТЕГАЗОХИМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

В.Н. Костюков, А.П. Науменко
ООО «НПЦ «Динамика», г. Омск

Актуальность. Безопасная и безаварийная эксплуатация технологического оборудования опасных производств нефтегазохимического комплекса, существенным образом влияющая на технико-экономические показатели производства и снижение риска техногенных инцидентов, невозможна без обеспечения наблюдаемости объективного технического состояния оборудования в реальном времени.

Наблюдаемость технического состояния реализуется путем мониторинга, т.е. контроля за техническим состоянием объектов мониторинга с целью определения текущего технического состояния и предсказания момента перехода в предельное состояние. Результатом мониторинга является совокупность диагнозов, получаемых на неразрывно примыкающих друг к другу интервалах времени, в течение которых состояние объекта мониторинга существенно не изменяется. Такой мониторинг технического состояния часто называют диагностическим. В то же время системы мониторинга, обеспечивающие контроль состояния динамического и статического оборудования опасных производств называют комплексными системами мониторинга.

Целью работы является представление опыта эксплуатации комплексных систем мониторинга в реальном времени статического и динамического оборудования нефтегазохимического комплекса.

Исходными данными являются результаты мониторинга состояния реакторов установки «Изомеризация» ОАО «Ачинский НПЗ ВНК». В процессе строительства установки на три реактора были установлены системы мониторинга состояния КОМПАКС® по параметрам акустико-эмиссионных (АЭ) и температурных датчиков, а также параметрам технологического процесса, передаваемых из системы АСУ ТП установки. Кроме того, датчики системы мониторинга были установлены на 60 насосных агрегата и два поршневых компрессора.

В данном случае в результате адекватного подхода к проектированию установки и использование соответствующих программно-аппаратных средств была преодолена мировая тенденция к узкопрофильной специализации организаций по разработке технологий и стационарных средств диагностики конкретного типа оборудования, которая приводит к появлению систем, выпускаемых различными компаниями и несовместимых между собой ни по электрическим, ни по информационным параметрам, что не позволяет интегрировать их в единое информационное пространство АСУ ТП предприятия.

Следует отличать системы мониторинга состояния (condition monitoring) от систем мониторинга «здоровья» (health monitoring). Системы мониторинга состояния изме-

ряют параметры физических процессов, которые определяют техническое состояние объекта мониторинга, однако они не определяют причины изменения технического состояния.

Системы мониторинга «здоровья» определяют не только изменение технического состояния объекта мониторинга, но и определяют причины его изменения. Эти системы используют алгоритмы экспертной системы поддержки принятия решений реального времени с автоматическим диагностированием неисправностей узлов оборудования. При этом системы автоматически определяют степень опасности неисправностей, автоматически указывают персоналу, какие действия он должен произвести, чтобы устранить неисправности. Иногда такие системы в России называют системами диагностического мониторинга. Такие системы, как правило, являются системами 1 класса согласно ГОСТ Р 53564 [1]. Термин «реальное время» (*real-time*) свидетельствует о том, что диагностирование осуществляется в темпе измерения диагностических сигналов. Таким образом, следует различать системы мониторинга состояния (*condition monitoring*) и системы мониторинга технического состояния (*health monitoring*).

Системы мониторинга технического состояния первого класса, реализованные согласно принципам, определенным в [1, 2, 3], и удовлетворяющие требованиям [1], позволяют достаточно просто конфигурировать её программно-аппаратные средства для мониторинга ТС как динамического, так и статического оборудования, а также интегрировать с известными системами АСУ ТП предприятия.

В России системы компьютерного *real-time* мониторинга технического состояния для предупреждения аварий и контроля состояния оборудования, отвечающие требованиям [1, 2, 3, 4], типа КОМПАКС[®], разработанные и производимые НПЦ «Динамика» (г. Омск), эксплуатируются в 12 отраслях промышленности, в том числе, на более чем 250 производствах теплоэнергетического комплекса (ТЭК) таких компаний как ОАО «Газпромнефть – Омский НПЗ», ОАО «Астраханский ГПЗ», ОАО «Лукойл-Волгограднефтепереработка», «РПК Высоцк-Лукойл-П», ОАО «ЛУКОЙЛ-Ухтанефтепереработка», ОАО «Ангарская НХК», ОАО «Ачинский НПЗ ВНК», ОАО «Сызранский НПЗ», ООО «РН-Юганскнефтегаз», ОАО «Тобольскнефтехим», ОАО «Саратовский НПЗ», ОАО «Славнефть-ЯНОС», ОАО «Энел ОГК-5» Филиал «Рефтинская ГРЭС», ОАО «ТАИФ-НК», ОАО «Хабаровский НПЗ» и др., а также на 8 предприятиях ТЭК Украины, Казахстана, Беларуси, Узбекистана, Болгарии.

В настоящее время на производствах ТЭК в эксплуатации находится около 600 систем компьютерного *real-time* мониторинга технического состояния для предупреждения аварий и контроля состояния, стационарные, стендовые, персональные системы автоматической диагностики и системы диагностической сети.

Системы мониторинга проводят измерения более чем по 25 000 измерительных каналов, осуществляют мониторинг почти по 75 000 основных параметров сигналов. Всего под контролем систем мониторинга находится около 17 500 диагностируемых объектов, агрегатов и механизмов.

В конце 2007 г. на установке «Изомеризация» ОАО «Ачинский НПЗ ВНК» внедрена система мониторинга КОМПАКС[®], которая кроме мониторинга более 60 единиц центробежного насосного оборудования и двух поршневых компрессоров, осуществляет мониторинг состояния трех реакторов 100R1, 200-R-A, 200-R-B по параметрам акустико-эмиссионных (АЭ) сигналов, температуре и технологическим параметрам.

Обсуждение результатов эксплуатации. В середине ноября 2012 г. система зафиксировала рост трендов энергетического параметра АЭ-сигналов по нескольким датчикам с амплитудой свыше 100 дБ. Вместе с этим значительно увеличилось количество импульсов с амплитудой более 80 дБ. Кроме того, тренды среднего квадратического значения сигнала (СКЗ) по некоторым датчикам имеют пики в момент пуска установки после текущего ремонта в июне 2012 г., а также в период с 14 по 17 ноября 2012 г. Характер трендов АЭ-параметров свидетельствовал об активизации АЭ-источников в период с 14 по 17 ноября 2012 г. и о появлении акустического излучения газодинамическими процессами. Учитывая локальный характер источников, было высказано предположение о локальном изменении характера течения газов, что возможно было связано с нарушением конструктивной целостности отдельных элементов реактора.

Схема расположения датчиков АЭ-системы КОПАКС® на реакторах 200-R1-A, 200-R1-B приведена на рис. 1.

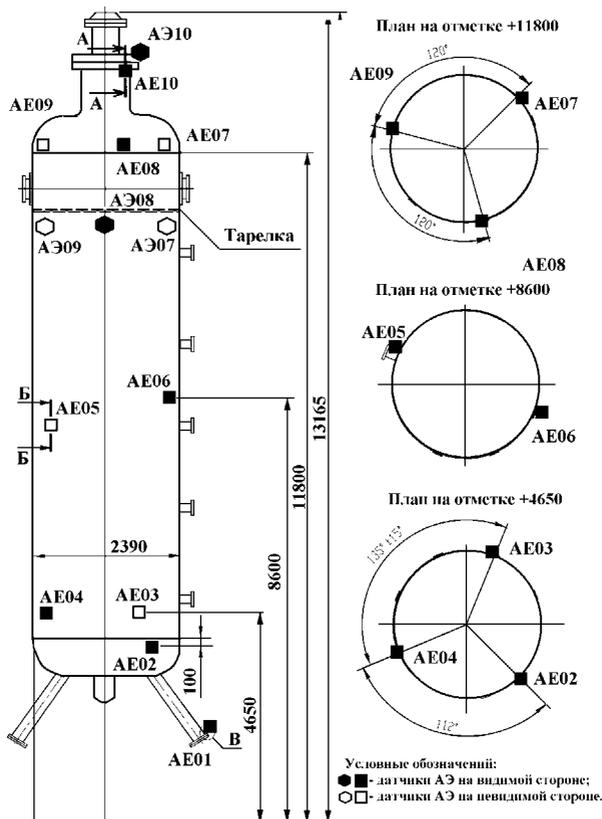


Рис. 1. Схема расположения датчиков на реакторах 200-R-1А, 200-R-1В

Система на реакторе 200-R1-A обнаружила активность АЭ-источников в месте установки датчиков АЕ7 и АЕ9 (Рис. 2), на реакторе 200-R1-B – АЕ8 и АЕ10 (Рис. 3).

По трендам (Рис. 4) видно, что с 19.11.2012 г. АЭ-активность возросла – наблюдается нелинейный рост накопленной энергии всех обнаруженных АЭ-импульсов (EsF),

импульсов с амплитудой от 80 до 99 дБ (Es80) и импульсов с амплитудой от 60 до 79 дБ (Es60) (рис. 5). С 14.12.2012 г. начался рост тренда накопленной энергии импульсов с амплитудой свыше 100 дБ (Es99) (Рис. 5). При этом происходило переполнение максимально допустимой величины накопленной энергии параметров EsF и Es80. В тоже время наибольшее количество импульсов было зафиксировано с амплитудой от 80 до 99 дБ (Ns80) и суммарного количества импульсов NsF (данный параметр включает



Рис. 2. Датчики АЕ9 и АЕ7 реактора 200-Р1-А в состоянии НДП по количеству импульсов с амплитудой от 60 до 80 дБ



Рис. 3. Датчики АЕ10 (НДП) АЕ8 (ТПМ) реактора 200-Р1-В по количеству импульсов с амплитудой от 60 до 80 дБ

сумму всех обнаруженных импульсов с амплитудой от минимально порога до величины импульсов, превышающей 100 дБ). Количество импульсов с амплитудой от 60 до 79 дБ (N_{s60}) и с амплитудой свыше 100 дБ (N_{s99}) – достаточно мало.

Значительные пики на тренде СКЗ АЭ-сигнала (R_a) рис. 4), свидетельствуют об активизации АЭ-источников в период с 14 по 17 ноября 2012 г., которые соответствуют

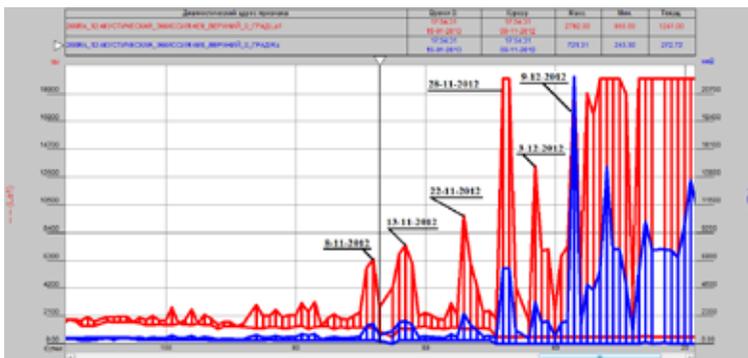


Рис. 4. Датчик АЕ9. Тренды СКЗ АЭ-сигнала (R_a) и порога выделения импульсов (L_{a1})

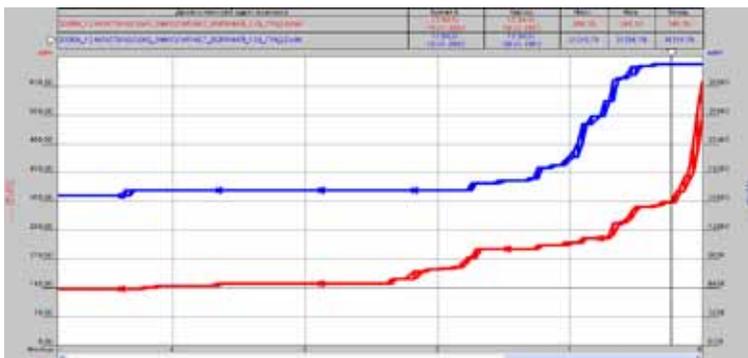


Рис. 5. Датчик АЕ7 (200-R1-A). Тренды накопленной энергии импульсов Es_{60} и Es_{99}

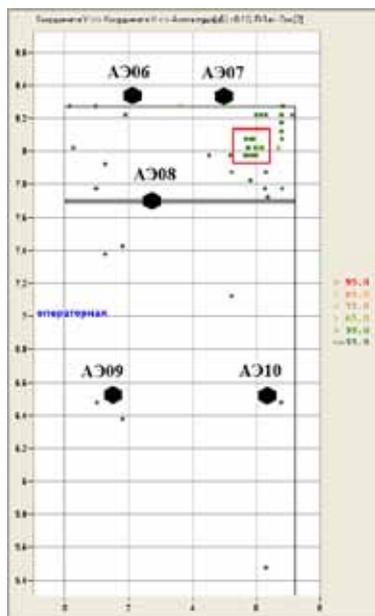


Рис. 6. Датчик АЕ9 (200-R1-A) – тренд накопленного количества импульсов N_{s80} имеет экспоненциальный характер

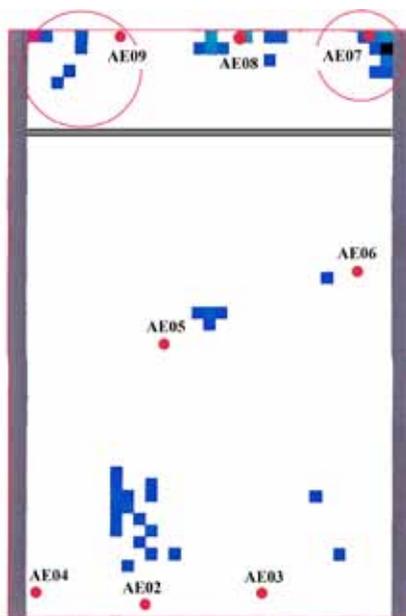
акустическому излучению газодинамических процессов. Отдельные тренды показывают, что АЭ-активность изменяется во времени, и тренды имеют локальные участки с достаточно высокой скоростью изменения, что свидетельствует о зависимости АЭ активности от внешних факторов. Тренды суммарного количества импульсов NsF, Ns80 и Ns60, накопленной энергии импульсов Es80 и Es60, мгновенной величины амплитуды импульсов АЭ (AaF) всех зафиксированных импульсов, которая не превышает 100 дБ, а, в основном находится на уровне 85 дБ. Характер отдельных трендов АЭ-параметров свидетельствовал об изменении технологического режима работы реактора. Такой характер трендов Es80, Es99 и EsF соответствовал при достаточно небольшом количестве импульсов наличию шумов от потоков газа, эпизодическим протечкам или утечкам. Учитывая локальный характер источников, можно было предположить о локальном изменении течения газов, что могло быть связано с нарушением конструктивной целостности отдельных внутренних элементов реактора в зоне расположения датчика АЕ8.

Исследование АЭ-сигналов показало, что форма волны импульсов и параметры фиксируемых импульсов совпадают с формой волны сигналов, записанных системой Disp-24, с помощью широкополосных (D9215 ф. РАС) и полосовых (R15 ф. РАС) датчиков при ударе катализатора и фарфоровых шариков диаметром 6 мм (второй слой над катализатором в реакторах 200-R1-A, 200-R1-B) о поверхность металла толщиной 45 мм (толщина стенки реакторов равна 45 мм). Аналогично, форма волны сигналов, записанных системой Disp-24 с помощью широкополосных датчиков, установленных в верхней части реакторов, совпадает с формой волны сигналов, записанных системой КОМПАКС®.

С целью уточнения местоположений, причин появления АЭ-сигналов и их характера проведен АЭ-контроль с помощью системы Disp-24. По пять высокотемператур-



а)



б)

Рис. 7. Карта локации из системы Disp-24 (а), с датчиков, установленных на реакторе 200-R1-A (б)

ных широкополосных датчиков было установлено в верхней части реакторов выше (АЭ6, АЭ7, АЭ8) и ниже (АЭ9, АЭ10) тарелки отбойника (рис. 1). Наблюдение за АЭ-активностью реакторов в стационарном режиме и при незначительном режиме их эксплуатации позволило локализовать источники АЭ-сигналов и их характер (рис. 7 а). Местоположение источников совпадает с данными системы КОМПАКС и данными постобработки другими алгоритмами (рис. 7 б). Параметры принятых сигналов, формы волны свидетельствуют о механическом источниках АЭ-сигналов, которые появились после 9.11.2012 г.

Анализ данных АСУ ТП показал, что именно после 9.11.2012 г., когда в течение 12 часов была прекращена подача ВСГ в реакторы и реакторы работали на циркуляции (рис. 9, рис. 10), произошло увеличение АЭ-активности (рис. 4). В связи с этим и с учетом локального характера источников было выдвинуто предположение о локальном изменении течения газов, что могло быть связано с нарушением конструктивной целостности отдельных элементов реактора в зоне расположения датчиков АЕ7, АЕ8, АЕ9.

По результатам ремонта в июне 2014 г. предположения подтвердились: на поверхности тарелки обнаружен катализатор и фарфоровые шарики, которые не должны там находиться, а также повреждение вводных патрубков, которые и создавали поток газа. По направлению потока газа катализатор и фарфоровые шарики ударились о стенку реактора в областях расположения датчиков.

Таким образом, можно констатировать:

1. Система КОМПАКС®-АЭ на всех трех реакторах 100R1, 200-R-A, 200-R-B установки «Изомеризаци» ОАО «Ачинский НПЗ ВНК» функционирует, достаточно адекватно реагирует на изменения напряженно-деформированного состояния и ведение техпроцесса.

2. Данные АЭ-контроля с помощью высокотемпературных широкополосных датчиков системы Disp-24 в течение 72 часов с кратковременным в течение 2 часов изменением режима работы реакторов совпадают с данными системы КОМПАКС®.

3. Данные по лоцированию АЭ-источников системы Disp-24 совпадают с местоположениями источников, обнаруженными системой КОМПАКС®.

4. Учитывая характер источников АЭ-сигналов (амплитуда, энергия, длительность, форма волны) было сделано предположение об источниках АЭ-сигналов, которые возбуждают в металле в результате направленных ударов в стенку реакторов твердыми



Рис. 8. Катализатор и фарфоровые шарики на поверхности тарелки (фото в процессе ремонта)

частицами – катализатора и/или фарфоровыми шариками. Данная ситуация возникла после 9.11.2012 г. и могла быть результатом нарушения целостности раскатателя на горловине, повреждением тарелки-отбойника или её уплотнения с заносом твердых частиц в полость между горловиной и тарелкой. В ходе ремонта в июне 2014 г. данные предположения подтвердились.

Выводы.

Опыт внедрения и эксплуатации комплексных систем **компьютерного *real-time* мониторинга технического состояния для предупреждения аварий и контроля состояния** [1, 2, 3, 4, 5] в различных отраслях промышленности показывает, что:

- методология ***real-time*** мониторинга и диагностирования основана на измерении параметров косвенных процессов (виброакустических колебаний), предусмотрено также измерение прямых структурных и термодинамических параметров [1, 2];

- реализованы алгоритмы *экспертной системы поддержки принятия решений реального времени с автоматическим* определением (постановкой диагноза в темпе измерения диагностических сигналов) неисправностей узлов оборудования, степени их опасности и выдачи целеуказующих предписаний персоналу по приведению компенсирующих мероприятий;

- научно обоснованный период постановки диагноза позволил получить величину статической и динамической ошибок распознавания состояния оборудования менее 5%, что дает возможность осуществлять мониторинг состояния ответственного оборудования всех категорий и производственного объекта в целом [1, 3];

- имеют распределенную параллельно-последовательную структуру, требуют во много раз меньше датчиков и кабеля и, соответственно, затрат на монтаж и обслуживание, обеспечивают низкую стоимость владения, перевод оборудования на эксплуатацию по фактическому техническому состоянию и высокую экономическую эффективность внедрения [4].

Практические данные, полученные при эксплуатации систем компьютерного ***real-time*** мониторинга технического состояния для предупреждения аварий и контроля состояния, показывают, что используемые системы обеспечивают надежное диагностирование дефектов подшипников, нарушение режимов смазки, кавитационных режимов работы насосов, нарушения центровки валов и балансировки вращающихся частей, ослаблений креплений насосов и электродвигателей, отказов торцовых уплотнений, более 70% которых вызвано недопустимо высокими уровнями вибрации насосов и электродвигателей, а также контроль состояния технологических объектов по параметрам АЭ сигналов, температуре, технологических параметров.

Проведенный анализ статистики отказов показал, что благодаря внедренным и используемым системам ***real-time*** мониторинга [2, 5, 6]:

- более чем в 12 раз снижается число внезапных для персонала отказов;
- более чем в 4 раза сокращается число и соответственно затраты на ремонтные работы, при этом происходит качественное перераспределение объемов ремонтов от капитальных и средних в сторону текущих ремонтов и текущего обслуживания;
- более чем 10 раз сокращается количество дорогостоящих капитальных ремонтов;
- в 12 и более раз увеличивается межаварийный пробег комплекса машинных агрегатов;

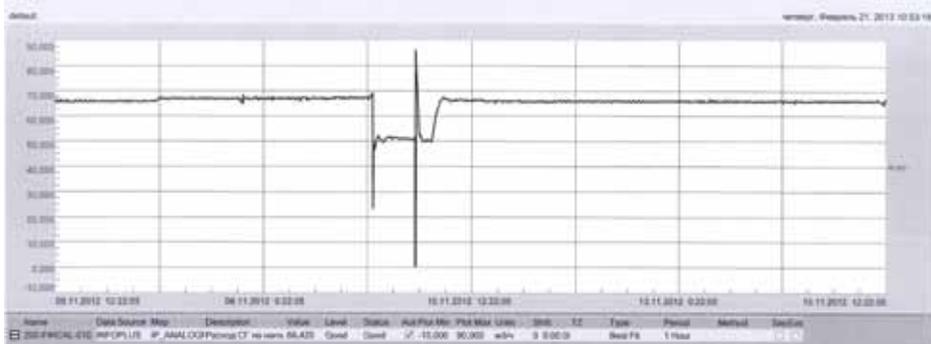


Рис. 9. Расход ВСГ. 9.11.2012 г. в течение 12 часов наблюдается изменение расхода

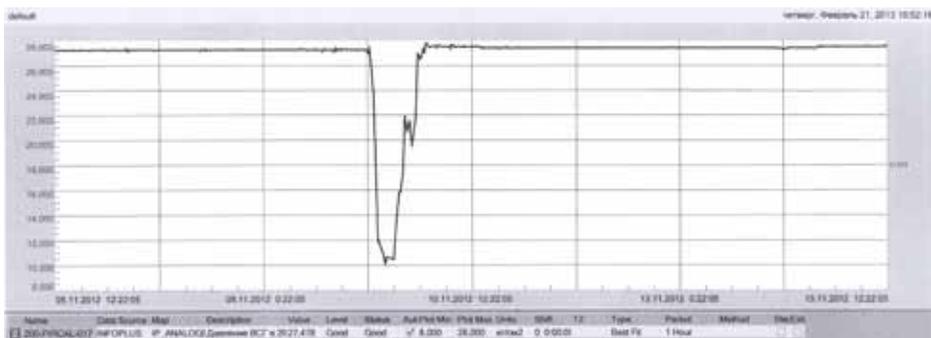


Рис. 10. Расход ВСГ. 9.11.2012 г. в течение 12 часов наблюдается изменение давления

- в 2 и более раз увеличивается межремонтный пробег;
- в 4 и более раз снижаются эксплуатационных затрат.

Экономический эффект за счет снижения эксплуатационных расходов, потерь прибыли, простоев по самым скромным подсчетам составляет не менее 10 рублей на 1 рубль затрат.

Общий экономический эффект определяется суммой вышеперечисленных статей экономии и уже в первый год применения превышает сумму годового бюджета предприятия на ремонт оборудования. Затраты на оснащение предприятия комплексом компьютерного *real-time* мониторинга технического состояния для предупреждения аварий и контроля состояния, которые удовлетворяют требованиям [1, 2, 3, 4] управляющих фактическим техническим состоянием оборудования, многократно окупаются в первый год эксплуатации.

Внедрение систем комплексного *real-time* мониторинга технического состояния оборудования установок и переносных систем автоматической диагностики, систем в ремонтных производствах, реализующих технологию автоматизированных систем управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатацией оборудования [2, 3, 5], реализующих принципы и отвечающих требованиям [1, 2, 3] позволяет предприятию перейти на эксплуатацию по фактическому техническому состоянию как машинного, так и технологического оборудования установок, существенно повысить эффективность и экономичность производства [5, 6].

Список использованной литературы

1. ГОСТ Р 53564-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Требования к системам мониторинга. – М. : СТАНДАРТИНФОРМ. 2010. – 20 с.
2. Костюков, В.Н. Мониторинг безопасности производства. – М. : Машиностроение, 2002. – 224 с.
3. ГОСТ Р 53563-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Порядок организации. – М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2010. – 8 с.
4. Костюков, В.Н., Бойченко, С.Н., Костюков, А.В. Автоматизированные системы управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатацией оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств (АСУ БЭР - КОМПАКС ®) / под ред. В.Н. Костюкова. – М. : Машиностроение, 1999. – 163 с.
5. Стандарты в области технического состояния оборудования опасных производств / В.Н. Костюков, А.П. Науменко, Ан.В. Костюков, С.Н. Бойченко, Ал.В. Костюков // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – №7. – С. 30–36.
6. Костюков, А.В., Костюков, В.Н. Повышение операционной эффективности предприятий на основе мониторинга в реальном времени. – М. : Машиностроение. 2009. – 192 с.

ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТЬЮ ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ РИСКОВ (RBI) С ПРИМЕНЕНИЕМ ПО PCMS

К.т.н. Ржевкин В.Р., Кузнецов С.Ю., к.т.н. Самохвалов А.Б., Золотарёв И.Л.
ООО «ДИАПАК»

В настоящее время планирование обследования оборудования на основе оценки рисков (RBI) находит все большее применение в нефтеперерабатывающей отрасли промышленности. Применение анализа рисков может сыграть большую роль в процессе перехода технологических установок на увеличенный межремонтный пробег. Проведя оценку рисков, можно с определенной уверенностью говорить о сроках безаварийной работы оборудования.

Специалистами ООО «ДИАПАК» проделана большая работа по внедрению систем управления надежностью оборудования на основе оценки рисков с использованием специального программного обеспечения PCMS.

Внедрение началось в 2010 году с пилотного проекта в ООО «Нижегороднефтеоргсинтез», с тех пор системы внедрены на всех российских и болгарском заводах ОАО «ЛУКОЙЛ», а также на Московском НПЗ ОАО «Газпромнефть».

Программное обеспечение (ПО) PCMS/RBI создано на базе стандартов, рекомендаций и других признанных инженерным сообществом методик, предназначенных для управления техническим состоянием различного оборудования, определения механизмов его разрушения, расчёта вероятности нарушения целостности аппаратов и трубопроводов, последствий этого разрушения и определения целевой даты проведения технического освидетельствования (инспекции) оборудования с учётом риска. Для управления состоянием динамического оборудования (насосы, компрессоры и т.д.) предусмотрен модуль RCM.

ПО PCMS – “Plant Condition Management System” – включает заводскую базу данных и многопользовательский интерфейс доступа, предназначенный для специалистов и руководителей, ведающих вопросами технического надзора и надёжности. PCMS может применяться для различных отраслей промышленности: добыча и транспортировка органического сырья, нефтепереработка, нефтехимия, энергетика, фармацевтика, бумажная промышленность и др. В системе PCMS присутствуют блоки управления рисками и надёжностью объектов, мониторинга ключевых показателей эффективности (КПЭ), планирования и документирования инспекций и др. (рис. 1).

Центральное хранилище данных PCMS содержит реестр объектов контроля, архив инспекций, результаты расчётов, нормативные и сопроводительные документы. Преимущество – отсутствие избыточной информации и хранение её в единой безопасной среде, интегрированной в общую информационную систему предприятия. Иерархическая структура объектов допускает неограниченное количество уровней вложен-

ности и настраивается по индивидуальным параметрам конкретного производства. В перечень основного оборудования входит стационарное оборудование, электрооборудование, предохранительные клапаны, трубопроводы и др. Для каждой единицы оборудования и его компонентов сохраняются расчётные (проектные) характеристики, эксплуатационные параметры, а также информация обо всех действиях, осуществляемых с объектом.



Рис. 1. Система управления надёжностью PCMS

ПО PCMS рассчитывает скорости коррозии (долгосрочная и краткосрочная), ресурс безаварийной работы. Эти данные автоматически передаются в модуль RBI. Вычислительный модуль PCMS обеспечивает следующие основные виды расчётов:

- **расчеты коррозии (более 20 различных сценариев):**
 - долгосрочные/краткосрочные расчеты скорости коррозии;
 - статистический анализ;
 - остаточный ресурс эксплуатации;
- **инженерные вычисления:**
 - минимальная (отбраковочная) толщина;
 - максимально допустимое рабочее давление;

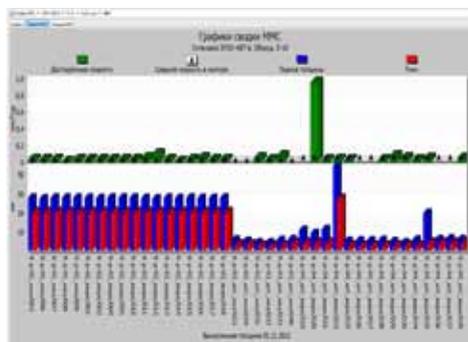
- **расчёт требуемых сроков и периодичности инспекций:**
 - традиционный график инспекций (нормативный интервал);
 - инспекции с учетом скоростей коррозии;
 - целевая дата проведения инспекций с учетом риска;
- **RBI (инспекции с учетом факторов риска):**
 - автоматизированное отслеживание механизмов разрушения;
 - вероятность отказа;
 - последствия отказа.

Модуль RBI на основе расчётов в ПО PCMS определяет вероятности нарушения целостности аппаратов, последствий этой аварии в рублях или долларах, ранжирует коррозионные контуры каждой единицы оборудования по степени риска.

При внедрении PCMS качественно улучшается процедура планирования инспекций и технического освидетельствования технологического оборудования. Инспекции планируются в соответствии с нормативными требованиями, однако у предприятия появляется возможность широкого манёвра ресурсами в целях оптимизации работ по инспектированию с учётом факторов риска. План мероприятий обосновывается расчётами и включает как инспекции соответствия, так и задачи по техническому обслуживанию. При планировании делается акцент на инспекции объектов с высокой вероятностью повреждения. Инспекции разделяются по типам: внутреннее обследование (интрузивный тип), наружное обследование, экспертиза и т.д. PCMS автоматически рассчитывает требуемый (рекомендуемый) объём инспекций (процент охвата) по различным компонентам оборудования и коррозионным контурам в зависимости от эффективности применяемых методов контроля. Для обеспечения надлежащей эффективности инспекций с учётом характерных механизмов повреждения система предоставляет рекомендации по применению соответствующих методов контроля: УЗТ, акустико-эмиссионный контроль, магнитно-порошковый метод, радиографический и т.д. Окончательный выбор, тем не менее, может быть скорректирован специалистом с учётом всей имеющейся информации. Методика способствует, помимо традиционного неразрушающего контроля, более широкому внедрению передовых высокоэффективных методов и аппаратуры.

ПО PCMS снабжено рядом внешних интерфейсов, благодаря которым оно органично интегрируется в информационную среду предприятия, включая такие системы управления, как SAP (в первую очередь модуль TOPO). PCMS легко совмещается с программами MS Office – Excel и Access. Особенно привлекает пользователей PCMS возможность совместной работы с распространёнными чертёжными пакетами, в первую очередь – AutoCAD. Используются также интерфейсы для соединения с цифровыми автоматизированными толщиномерами и регистраторами данных, а также с оборудованием для анализа составов металлов и сплавов.

PCMS обладает развитой и гибкой системой отчётности, легко конфигурируемой под нужды компаний и отдельных пользователей, благодаря чему обеспечивается прозрачность работы служб, ответственных за техническое состояние оборудования и его безопасную эксплуатацию. Помимо встроенных средств формирования отчётов, широко используется набор инструментов Business Objects и Web-отчёты. За счёт этого как руководство предприятия, так и специалисты, ведающие вопросами надёжности, всегда имеют представление о текущем состоянии оборудования и прогноз его изменения с любой желаемой степенью детализации.



Для успешного внедрения систем управления надёжностью на базе PCMS должен использоваться системный подход, т.е. акцент должен делаться не собственно на внедрение ПО (что, конечно, является необходимой частью проекта), а на помощь заказчику в построении комплексной системы управления надёжностью с использованием передовых высокоэффективных подходов, включая организационные и технические мероприятия. Особое внимание должно уделяться выработке соответствующих требований и корпоративных процедур, раскрытию профессионального потенциала и повышению ответственности сотрудников. Внедрение сопровождается анализом существующей практики, восполняются пробелы и устраняются противоречия в документации, вырабатываются новые технические решения, например, относительно расположения точек контроля толщины.

Основные этапы внедрения системы управления надёжностью – анализ химического состава рабочих сред технологической установки, определение границ действия возможных механизмов повреждения, сбор и внесение в базу данных информации по оборудованию (материальное исполнение, рабочие и расчетные параметры, конструктивные особенности, наличие изоляции, футеровки, плакировки и пр.). Помимо первоначального сбора данных, должна вестись своевременная работа по внесению информации о проведенных обследованиях и ремонтах, замене оборудования, изменении технологических режимов.

Внедрение PCMS начинается с пилотной установки (цеха), затем выработанное решение тиражируется на других технологических установках предприятия. В начале проекта на предприятии создается рабочая группа, состоящая, с од-

Рис. 2. Примеры графического отображения данных в PCMS



Рис. 3. Процесс внедрения PCMS

ной стороны, из специалистов предприятия, а с другой – из специалистов ДИАПАК. Рабочая группа состоит из экспертов предметной области: технологов, коррозионистов, специалистов по механической прочности и оценке рисков. В дальнейшем эта группа может продолжать функционировать на предприятии, координируя деятельность по управлению надёжностью, поддерживая базу данных и выполняя необходимые расчёты в PCMS. Перспективным, в то же время, представляется иной подход, когда работы по внедрению и ведению PCMS распределены между всеми сотрудниками ОТН с выделением ответственных по направлениям. Преимуществом такого подхода является то, что каждый инженер занимается своим направлением, т.е. получает минимум новых обязанностей, но, в то же время, отвечает персонально за свои объекты. В процесс освоения и использования PCMS при этом вовлекается более широкий круг специалистов.

В ходе работы по внедрению PCMS на российских предприятиях выполнена локализация ПО, добавлены возможности прочностных расчетов по российским нормам, заполнена базы данных программы российскими сталями и их прочностными характеристиками и многое другое.

Как показывает накопленный нами опыт, внедрение PCMS решает задачи комплексной автоматизации управления техническим состоянием оборудования на основе оценки рисков. Применение систем управления надёжностью оборудования позволяет эффективно планировать необходимый объем обследований и рекомендовать наиболее целесообразные методы неразрушающего контроля. Планирование обследований выполняется на основе фактического состояния оборудования, условий эксплуатации и всех вероятных механизмов повреждения.

Список использованной литературы

1. Лапкин, С.А., Кузнецов, С.Ю., Петерсен, Т.Б., Ржевкин, В.Р., Самохвалов, А.Б. Анализ результатов применения программы RCMS/RBI на примере типовой технологической установки НПЗ // Проблемы эксплуатации оборудования и пути повышения надёжности технологических установок риформинга, гидроочистки и гидрокрекинга : материалы совещания. – М. : ООО «НТЦ при Совете главных механиков», 2013. – С. 64–67.
2. Ржевкин, В.Р., Самохвалов, А.Б., Шемякин, В.В. PCMS – программное обеспечение для управления состоянием завода на основе оценки риска // В мире НК. – 2012. – № 1 (55), март. – С. 26–30.

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ

Чернов Д.В., Барат В.А, Елизаров С.В.

Введение

В настоящее время критериальная оценка технического состояния объектов проводится на основе стандартных критериев, описанных в ПБ 03-593-03. К стандартным критериям относятся: амплитудный, интегральный, локально-динамический, интегрально-динамический, критерий кода ASME, технология MONPAC, критерий непрерывной акустической эмиссии (АЭ) [1]. Применение стандартных критериев не всегда приводит к удовлетворительным результатам при контроле промышленных объектов. Их недостатки связаны с требованиями предварительных экспериментов и особенностями нагружения. Таким образом, требуется применить дополнительные критерии для более информативной оценки состояния объекта. В работе было рассмотрено применение двух критериев: 1) критерий, основанный на микромеханической модели АЭ; 2) критерий, основанный на инвариантных соотношениях.

Исследование микромеханической модели АЭ

Критерий, основанный на микромеханической модели, АЭ был применен при испытаниях образцов из композиционного материала. Композиционные материалы обладают высокими прочностными характеристиками, низкой плотностью и технологичностью при изготовлении конструкций сложной аэродинамической формы. Для оперативного наблюдения за состоянием авиационных композитных материалов применяют индикаторные тензопокртия.

Индикаторные тензопокртия позволяют выявлять зоны с высоким уровнем напряжений. Тензопокртие представляет собой анодированную алюминиевую фольгу с толщиной оксидной пленки 10–40 мкм, наклеенную на исследуемый элемент конструкции. Разработка тензопокртий осуществляется таким образом, чтобы предел прочности покрытия не превышал предела упругости основного материала. При превышении допустимого уровня механических напряжений тензопокртие начинает разрушаться задолго до начала разрушения основного композитного материала.

Для автоматизации процесса слежения за состоянием тензопокртия и основного композиционного материала используется акустико-эмиссионный (АЭ) мониторинг. Использование АЭ-мониторинга позволяет оперативно следить за состоянием объекта, определять местоположение дефектов, а также на основании АЭ-параметров различать сигналы от разрушения тензопокртия и от основного композитного материала.

В данной работе описана методика, позволяющая оценивать состояние многослойного материала, состоящего из композитного основания, на которое наносится хрупкая оксидная пленка. Методика основана на аппроксимации зависимости суммарного счета АЭ аналитической микромеханической моделью акустической эмиссии (ММАЭ). Изменение параметров модели с течением времени позволяет судить о процессе разрушения многослойного гетерогенного материала.

При разработке методики проводились экспериментальные исследования - испытания образцов на разрыв. При испытаниях использовалась установка INOV АИК-6033, АЭ-мониторинг проводился при помощи системы A-Line 32D компании "ИНТЕРЮНИС".

Для определения состояния основного материала была исследована и применена микромеханическая модель акустической эмиссии (ММАЭ), основанная на кинетической концепции прочности С.Н. Журкова. Модель связывает суммарный счет АЭ – $N_{\Sigma}(t)$ и концентрацию микротрещин $C(t)$, которые в соответствии с теорией Журкова представляют собой разрушенные структурные элементы (1).

$$N_{\Sigma}(t) = k_{AE} C(t) \quad (1),$$

где k_{AE} – акустико-эмиссионный коэффициент пропорциональный объему деформации.

$$N_{\Sigma}(t) = k_{AE} \cdot C_0 \int_q^{q1(\varepsilon(t))} \Psi_{\gamma}(\gamma, \varepsilon(t)) \left(1 - \exp \left(- \int_0^t \frac{d\bar{t}}{\tau_0 \exp \left(\frac{U_0 - \gamma \sigma(\bar{t})}{RT} \right)} \right) \right) d\gamma \quad (2),$$

ММАЭ задается выражением (2), где $\Psi_{\gamma}(\gamma, \varepsilon(t))$ – распределение структурно-чувствительного параметра, γ , $q1(\varepsilon(t))$ – предельное значение $\Psi_{\gamma}(\gamma, \varepsilon(t))$, R – газовая постоянная, T – температура, $\sigma(\bar{t})$ – напряжение, приложенное к объекту.

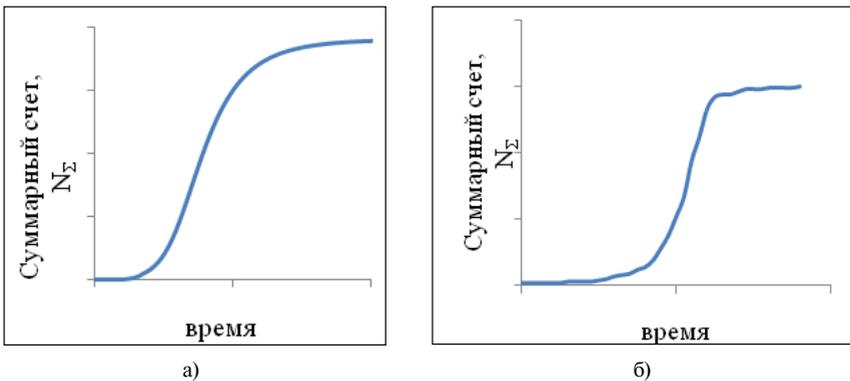


Рис.1 Суммарный счет акустической эмиссии, полученный: а) при помощи ММАЭ; б) в экспериментах по разрушению композиционного материала

На рис. 1 показан суммарный счет АЭ, полученный теоретически, при помощи ММАЭ и экспериментально – при разрыве композитного образца. Идентичный вид зависимостей доказывает состоятельность исследуемой модели.

При переходе определенном уровне приложенной нагрузки, в соответствии с ММАЭ, происходит активация процесса разрушения структурных элементов. Вначале разрушаются элементы с большим значением структурно-чувствительного параметра γ . Оценкой текущего состояния объекта контроля может быть предельное значение структурно-чувствительного параметра q_1 [2].

На рис. 2 показана зависимость величины q_1 от времени, при разрушении многослойного образца. Начальный участок зависимости, на котором значение q_1 остается неизменным, соответствует разрушению тензопокрывтия, уменьшение значения q_1 свидетельствует об ограничении распределения параметра γ и разрушении основного композитного материала образца.

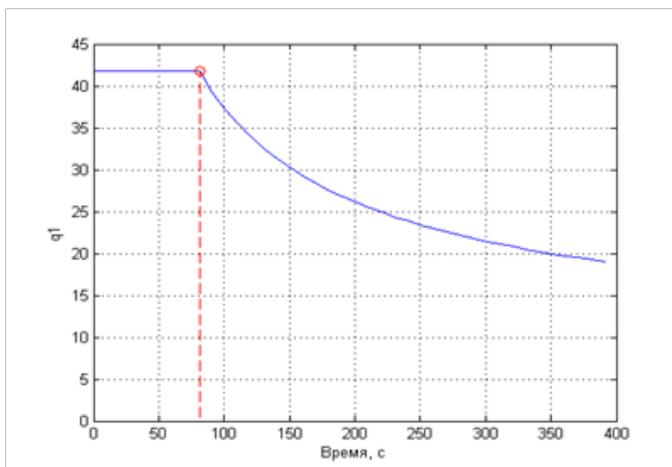


Рис. 2. Определение начала пластической деформации с помощью ММАЭ

Исследование инвариантных соотношений пуассоновской модели накопления повреждений

Известно, что на стадии предразрушения поток импульсов АЭ можно считать пуассоновским. Процессы зарождения и роста трещины приводят к отклонению параметров потока АЭ-данных от пуассоновского, индикатором этого могут служить инвариантные соотношения – статистики, позволяющие определить соответствие данных определенному закону распределения.

В данной работе анализируется также возможность применения инвариантных соотношений для анализа данных промышленного АЭ-контроля, исследуется помехоустойчивость метода, приводятся методические рекомендации по применению инвариантных соотношений. Большинство публикаций, описывающих применение инвариантов, относится к лабораторным исследованиям. Применение данного математического аппарата в условиях промышленного АЭ-контроля дает возможность исследовать вопросы его помехоустойчивости и чувствительности.

Случайной величиной, которая используется в расчете инвариантного соотношения, является длительность временного интервала между импульсами АЭ. Пуассоновскому потоку данных соответствует экспоненциальное распределение значений временного интервала (3).

$$f_{\chi}(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (3),$$

где $f_{\chi}(x)$ – плотность вероятности случайной величины, λ – параметр распределения, x – случайная величина

На основании моментов экспоненциального распределения первого и второго порядков определяется временной инвариант (4).

$$I_{1\Delta t} = \frac{\overline{S_{1\Delta t}}}{\overline{(\Delta t)}} \quad (4),$$

где $\overline{\Delta t}$, $\overline{S_{1\Delta t}}$ – выборочные значения среднего и стандартного отклонения.

Отношение стандартного отклонения $S_{1\Delta t}$ к среднему значению $\overline{\Delta t}$ выборки случайной величины является временным инвариантным первого рода. Для пуассоновского потока данных значение инварианта равно единице – $I_{1\Delta t}^* = 1$ [3].

При образовании или росте трещины происходит отклонение потока данных от пуассоновского, а инвариантные соотношения выступают в качестве индикатора этого отклонения.

Инвариантные соотношения были применены к данным, полученным при гидроиспытании участка трубопровода длиной 61,3 м и диаметром 1,42 м (рис. 3). Целью испытаний было доведение трубопровода до разрушения. При этом диагностировались предразрушающие состояния и анализировались инвариантные отношения потока данных АЭ перед разрушением.



Рис. 3. Объект контроля – участок трубопровода

График нагружения трубопровода показан на рис. 4. Участки подъема нагрузки сопровождались участками выдержки, в течение которых происходила релаксация механических напряжений. Общее время испытания составило два часа. При нагрузке 10 МПа произошло образование магистральной трещины и разрушение трубопровода.

Еще до начала нагружения в материале трубопровода были обнаружены дефекты – коррозионные язвы, трещины и расслоения. В процессе нагружения проводилось визуальное наблюдение за ростом дефектов.

При проведении акустико-эмиссионного контроля использовалась система A-Line32D с двенадцатью измерительными каналами. При достаточно высоком пороге дискриминации 40 дБ было зарегистрировано более 600000 импульсов АЭ, соответствующих развитию и росту различных дефектов, что является достаточным для расчета статистических параметров потока данных АЭ.

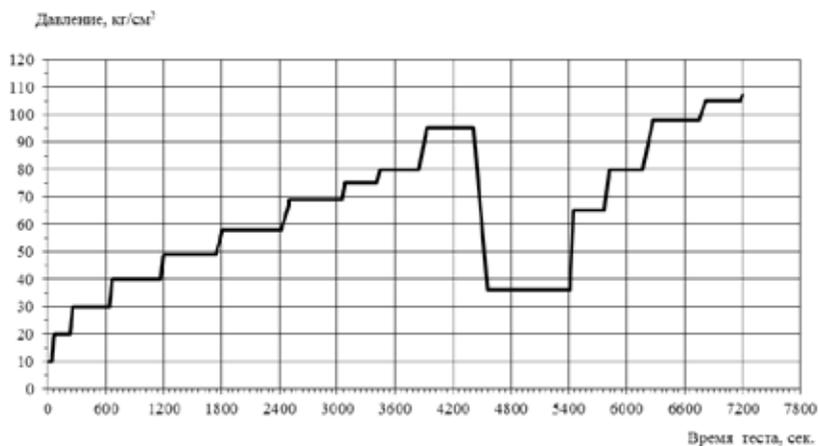


Рис. 4. График нагружения

На рис. 5 показан вид сигнала, зарегистрированный преобразователем акустической эмиссии. Диагностический сигнал содержит импульсы АЭ, длительностью порядка сотен микросекунд, вызванные повреждением контролируемого материала, которые наблюдаются на фоне стационарного шума.

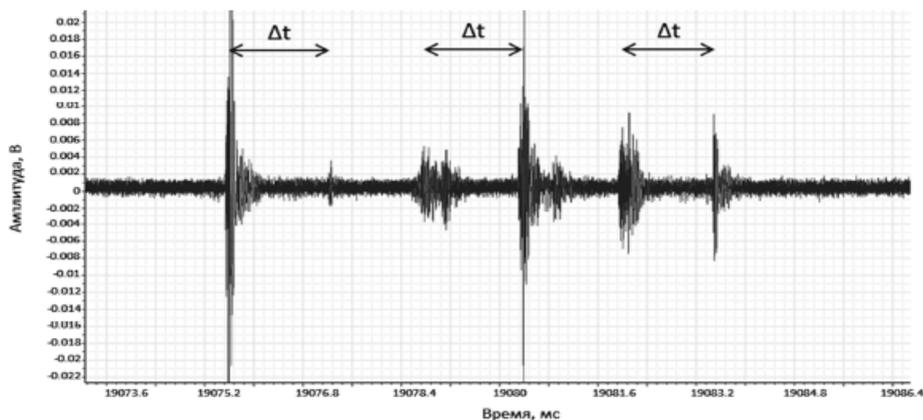


Рис. 5. Сигнал акустической эмиссии

Для построения инвариантных соотношений используется распределение временных интервалов между соседними импульсами. Частотные гистограммы, соответствующие распределению временных интервалов, показаны на рис. 6.

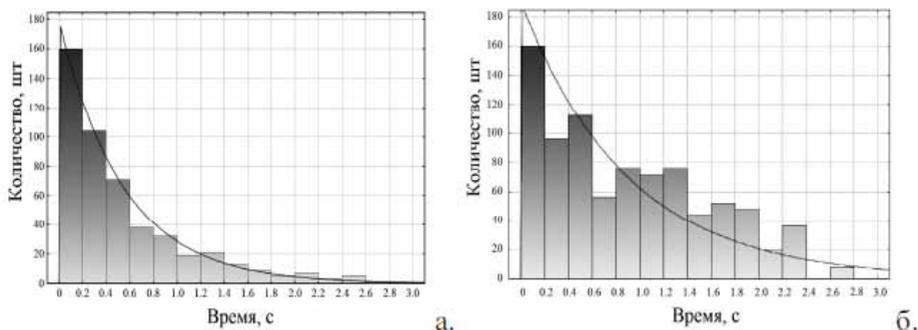


Рис. 6. Гистограммы распределения значений временных интервалов Δt участков выдержки нагрузки а) 3 МПа и б) 6 МПа

Гистограмма рис. 6а построена для начального участка выдержки нагрузки – 3 МПа. Гистограмма соответствует экспоненциальному распределению. Значение инвариантного отношения $I_{1\Delta t} = 0,97$ на рассматриваемом временном интервале, говорит о том, что наблюдается стадия накопления повреждений, а образование микродефекта ещё не произошло.

При повышении нагрузки до 6 МПа характер распределения Δt меняется. Гистограмма, приведенная на рис. 6б, показывает отклонение данных от экспоненциального распределения, при этом значение инвариантного отношения падает до значения 0,77. Изменение закономерности в интервалах возникновения импульсов АЭ может свидетельствовать о том, что стадия накопления микроповреждений материала сменилась стадией образования макродефекта. В рассматриваемом случае рост трещины на выдержке давления $P_{исп} = 6$ МПа подтверждается результатами визуального осмотра.

Традиционно состояние объекта контроля оценивается при помощи гостированных критериальных оценок [1], основанных на эмпирической модели развития дефекта, согласно которой рост трещины сопровождается возрастанием амплитуд импульсов АЭ и увеличением активности – количества импульсов, излучаемых в единицу времени. Несмотря на достоверность эмпирической модели, критериальные оценки иногда бывают ошибочными. При высоком уровне шумов критериальная оценка опасности будет завышенной, а при низкой эмиссивности материала – заниженной.

Инвариантные отношения основаны на анализе распределения временных интервалов, при их расчете не используются ни амплитуды импульсов АЭ, ни акустическая активность [4]. Следовательно, инвариантные отношения позволяют оценить состояние контролируемого объекта вне зависимости от характеристик контролируемого материала.

Несмотря на то, что расчет инвариантных отношений основан на одном из самых устойчивых параметров АЭ – длительности временного интервала между импульса-

ми, при их расчете необходимо учитывать действие возможных влияющих факторов, таких как, наличие технологических помех или неверный выбор окна наблюдения. Особенности акустического тракта также могут влиять на вид гистограммы распределения временных интервалов.

Гистограммы рис. 7а-в построены для начального этапа подъема давления при отсутствии роста дефектов. Теоретически все гистограммы должны соответствовать экспоненциальному закону распределения. Нарушение теоретического закона объясняется в случае, показанном на рис. 7а, грубым выбросом значения Δt , в случае 7в – действием течевого помехи нагружающего устройства.

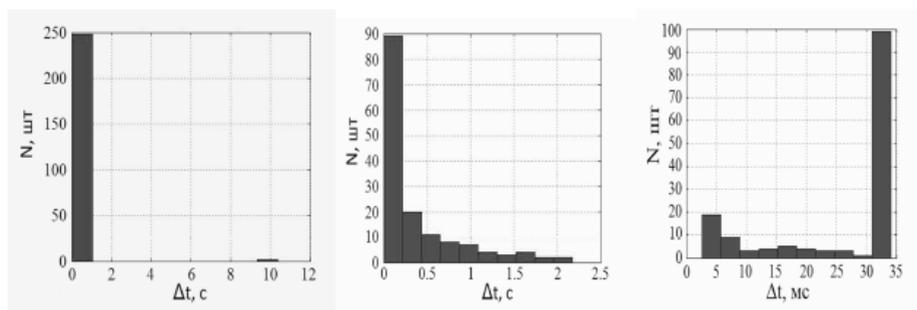


Рис. 7. Гистограммы распределения Δt в условиях действия мешающих факторов

Гистограмма, показанная на рис. 7в, не соответствует экспоненциальному распределению в области малых значений $\Delta t < 0,2$ с. Непропорционально большое значение наблюдений в этом интервале связано с дисперсионным многомодовым распространением импульсов АЭ, при котором минимальные значения Δt соответствуют интервалам времени между различными модами одного и того же импульса АЭ.

Для минимизации действия перечисленных выше факторов можно предложить две эффективные меры: ограничение интервала наблюдения Δt и использование наряду с классическим инвариантным отношением, статистических критериев проверки соответствия распределения экспоненциальному закону.

Ограничение диапазона Δt сверху позволяет избежать влияния грубых выбросов, при ограничении снизу устраняется влияние особенностей акустического тракта при распространении сигнала. Верхней границей интервала наблюдения Δt предлагается выбрать 95% квантиль экспоненциального распределения (5). Нижняя граница интервала определяется сложнее, она зависит от нескольких параметров – характерного размера объекта контроля D , толщины стенки h и координат дефекта x_0, y_0 (6).

$$\Delta t_{high} = F_{0,95}(\Delta t) \quad , \Delta t_{low} = f(x_0, y_0, h, D) \quad (5, 6).$$

Для исключения влияния периодических помех оказывается эффективным использовать вместо традиционного инвариантного отношения (4) критерий согласия χ^2 (7), который определяет относительное отклонение эмпирического закона распределения от теоретического – экспоненциального.

$$\chi^2 = \sum_{i=1} \frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i} \quad (7),$$

где n_i – частота наблюдений эмпирического распределения, n'_i – частота наблюдений для экспоненциального закона распределения.

Соотношение (8) – модифицированный критерий χ_{mod}^2 (8), который предполагает вычисление только в тех интервалах, в которых различие между наблюдаемым и ожидаемым законом распределения не превышает установленного порога a , как правило, $a=2$, что соответствует различию в 200%.

$$\chi_{mod}^2 = \sum_{i=1}^N \begin{cases} \frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i}, & \left| \frac{n_i - n'_i}{n'_i} \right| \leq a \\ 0, & \left| \frac{n_i - n'_i}{n'_i} \right| > a \end{cases} \quad (8).$$

Результат обработки данных гидроиспытаний участка трубопровода представлен в таблице 1.

Таблица 1

Нагрузка, МПа	Инвариантное отношение	Инвариантное отношение с фильтром Δt	Наличие локационных кластеров	Суммарная АЭ, шт
3	1,79	0,97	-	755
4	2,01	0,94	-	1054
5	2,39	0,99	-	1139
6	1,96	0,77	+	925
7,5	1,82	0,98	-	1071
8	1,74	0,88	+	1020

Для уменьшения влияния шумов анализировались участки выдержек давления от 3 до 8 МПа. Для каждого участка выдержки были рассчитаны инвариантные соотношения с ограничением диапазона наблюдения Δt , и без. В таблице также приведено количество импульсов, зарегистрированных на каждой выдержке нагрузки, также отмечается наличие слоцированных дефектов.

Анализ представленных в таблице данных подтверждает информативность инвариантных соотношений. Для выдержек давления в 6 и 8 МПа, на которых зарегистрирован рост дефекта, отмечается падение значений инварианта. Расчет инвариантного соотношения с ограничением диапазона Δt показывает более достоверные результаты. Инвариантное отношение лежит в диапазоне от 0 до 1 и согласуется с данными локации дефектов.

Список использованной литературы

1. ПБ 03-593-03 Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов.
2. Попов, А.В. Система оценки эксплуатационной пригодности силовых элементов конструкций на основе инвариантов акустико-эмиссионных процессов /Тезисы

докладов XX Всероссийской научно-технической конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике. – М., 2014. – С. 421.

3. Буйло, С. И. Физико-механические и статистические аспекты повышения достоверности результатов акустико-эмиссионного контроля и диагностики. – Ростов н/Д. : Изд-во юФУ, 2008. – 192 с.

4. Буйло, С.И. Диагностика стадий деформации и разрушения по интегральным параметрам потока актов акустической эмиссии // Дефектоскопия. – № 8. – 2004. – С. 66–78.

ПРИНЦИПЫ БЕСПОРОГОВОЙ РЕГИСТРАЦИИ ДАННЫХ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Барат В.А., Елизаров С.В., Шиманский А.Г.

Введение

Акустико-эмиссионный (АЭ) метод контроля имеет целый ряд преимуществ, выделяющих его из ряда других. Это пассивный метод контроля, обладающий высокой чувствительностью к обнаружению трещин, не требующий сканирования поверхности объекта, обеспечивающий дистанционное проведение контроля на участках от нескольких метров до сотен метров [1].

Однако данный метод имеет ряд недостатков: чувствительность к акустическим шумам, вызванным работой контролируемого оборудования, сложность количественной оценки параметров дефектов, высокие требования к квалификации персонала, поводящего акустико-эмиссионный контроль, обусловленные непростым интеллектуальным содержанием метода.

Также в качестве недостатка следует отметить пороговый способ регистрации данных. Пороговый способ является простейшим способом обнаружения импульсов АЭ на фоне непрерывного шума [4].

При сборе данных по пороговой схеме вся ответственность за получение достоверных результатов контроля ложится на оператора. Занижение или завышение порога может привести к неправильной интерпретации результатов.

Перечисленные выше факторы обуславливают низкую востребованность АЭ-контроля по сравнению с остальными методами неразрушающего контроля.

Для преодоления сложившейся ситуации различными научными школами проводятся исследования, направленные на развитие акустико-эмиссионного метода контроля, расширение его возможностей, повышение достоверности и расширение практического применения.

В данной работе рассматривается возможность построения АЭ-системы, реализующей беспороговый принцип регистрации данных. При таком способе сбора данных фильтрация и обнаружение импульсов АЭ происходит за счет применения интеллектуальных средств обработки сигналов, работающих в автоматическом режиме и не требующих вмешательства оператора. Предполагается, что построение такой системы может стать радикальным решением вопроса субъективности и недостоверности результатов АЭ-контроля. В статье рассматривается возможность применения различных методов обработки сигналов, анализируются результаты их применения.

Применение интеллектуальной фильтрации данных

Набор фильтров, реализованных в АЭ-системах промышленного применения, включает, как правило, частотную фильтрацию и аппаратные фильтры подавления импульсных электромагнитных помех. При этом основным способом подавления шумов является пороговое ограничение АЭ-сигналов. При отказе от использования пороговой регистрации данных необходимо разработать альтернативный способ фильтрации.

Основная проблема фильтрации АЭ-данных заключается в неопределенности формы полезных сигналов и характеристик шума. Импульсы акустической эмиссии могут различаться по амплитуде в тысячи раз и в сотни раз по длительности, их частотные характеристики во многом определяются параметрами акустического тракта. Характеристики шумовых сигналов могут также изменяться в широких пределах в зависимости от условий проведения контроля. Шум может быть белым или окрашенным, коррелированным или нет, уровень шума может также варьироваться в широких пределах. Кроме того, частотные диапазоны АЭ-импульсов и шумов, как правило, пересекаются.

Учитывая все вышесказанное, эффективная фильтрация АЭ-данных возможна, только при известных допущениях о форме импульсов АЭ или параметрах шума. Сложность алгоритма фильтрации зависит от степени априорной неопределенности решаемой задачи.

Фильтрация стационарного шума

Распространенным на практике является частный случай, когда источники шумов, сопровождающих АЭ-контроль, создают сигнал с известными и неизменными, стационарными характеристиками.

При этом оказывается возможным записать «образцовый» шумовой сигнал. Для фильтрации стационарного коррелированного шума с известными параметрами можно применить оптимальный фильтр Винера [2]. На рис. 1а показан сигнал, в котором импульс акустической эмиссии наблюдается на фоне шума трения, на рис. 1б показан результат фильтрации. После фильтрации отношение энергии сигнала и шума увеличилось в десять раз.

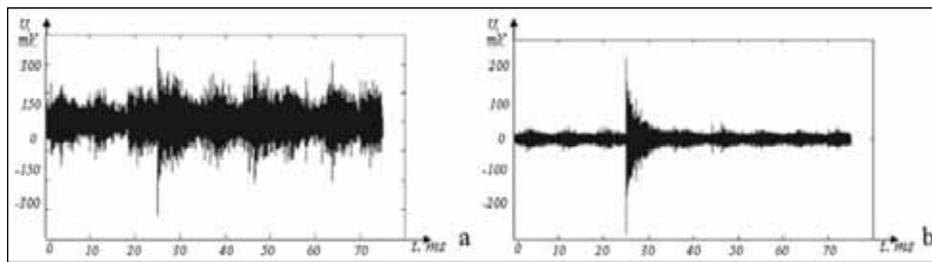


Рис. 1. Результат фильтрации шумов трения в сигнале АЭ

Для фильтрации белого шума с неизменными характеристиками оказывается эффективным применение пороговой вейвлет-фильтрации. Результат применения показан на рис. 2. На рис. 2а показан исходный АЭ-сигнал длительностью 5 секунд, в

котором импульсы акустической эмиссии наблюдаются на фоне стационарного белого шума, на рис. 2б показан результат фильтрации, в результате которого уровень шума снизился более чем на порядок.

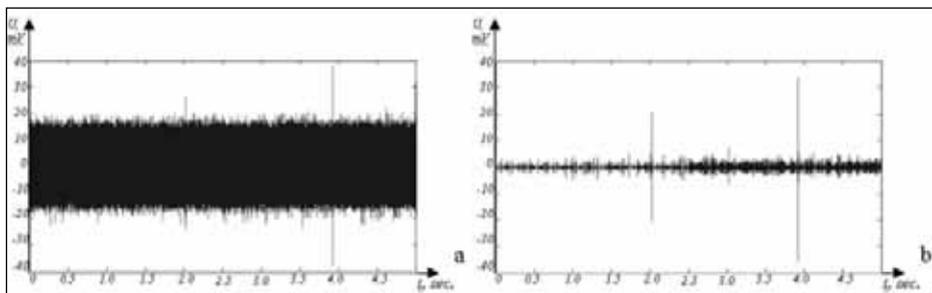


Рис. 2. Результат фильтрации шумов вибрации в сигнале АЭ

Беспороговое обнаружение импульсов АЭ

При решении задачи обнаружения импульсов АЭ на фоне шума сигнал может быть рассмотрен как стохастический шумовой процесс с разладкой свойств. Точками разладки являются АЭ-импульсы, которые создают кратковременное изменение свойств шумового процесса. Следовательно, задачу детектирования импульсов АЭ в общем потоке данных можно рассматривать как задачу обнаружения точки разладки временного ряда.

Существует целый ряд методов обнаружения разладки, которые успешно применяются для анализа сигналов АЭ – это отношение максимального правдоподобия, информационный критерий Акаике, метод моментов высшего порядка, метод пересечения доверительных интервалов. Все перечисленные методы были подробно исследованы в работе [8], анализировались особенности их применения и точность обнаружения при различном уровне шума и различных параметрах импульсов АЭ.

Для повышения достоверности обнаружения следует применять последовательно несколько алгоритмов обнаружения, причем методы с меньшим количеством вычислительных затрат целесообразно применять для приближенного выделения временного интервала, содержащего импульс АЭ, а затем при помощи более сложных и прецизионных методов точно определять время начала сигнала внутри этого временного интервала.

Особенности применения методов обнаружения сигналов к АЭ-данным

Методы не требуют задания пороговых значений, однако для их применения необходимо задать размер временного окна, определяющий масштаб рассмотрения сигнала. Достоверность обнаружения импульсов и точность определения времени его начала зависит от правильного выбора масштаба рассмотрения сигнала.

Не существует единственного правильного значения длительности временного окна. Масштаб рассмотрения определяется в основном частотным диапазоном преобразователя АЭ. Низкочастотные сигналы требуют более длительного интервала рассмотрения, чем высокочастотные.

На рис. 3 показаны АЭ-сигналы, измеренные при помощи преобразователей АЭ в диапазонах частот 30-500 кГц и 3-60 кГц, частота дискретизации в обоих случаях составила 2 МГц.

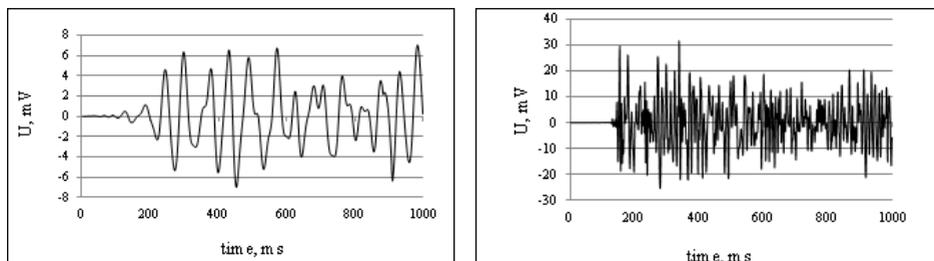


Рис. 3. АЭ-сигналы низкочастотного и высокочастотного преобразователей АЭ

Сигналы имеют разную частотную структуру, и, следовательно, разный масштаб. Время нарастания сигнала рис. 3а составляет 35 мкс, а сигнала, показанного на рис. 3б – примерно в десять раз больше. Для эффективного обнаружения импульсов АЭ длительность анализируемого участка сигнала должна быть согласована с его частотным спектром. Поскольку АЭ-контроль может осуществляться при помощи различных sensors в достаточно широком диапазоне частот, возникает проблема адаптивного выбора длительности временного скользящего окна.

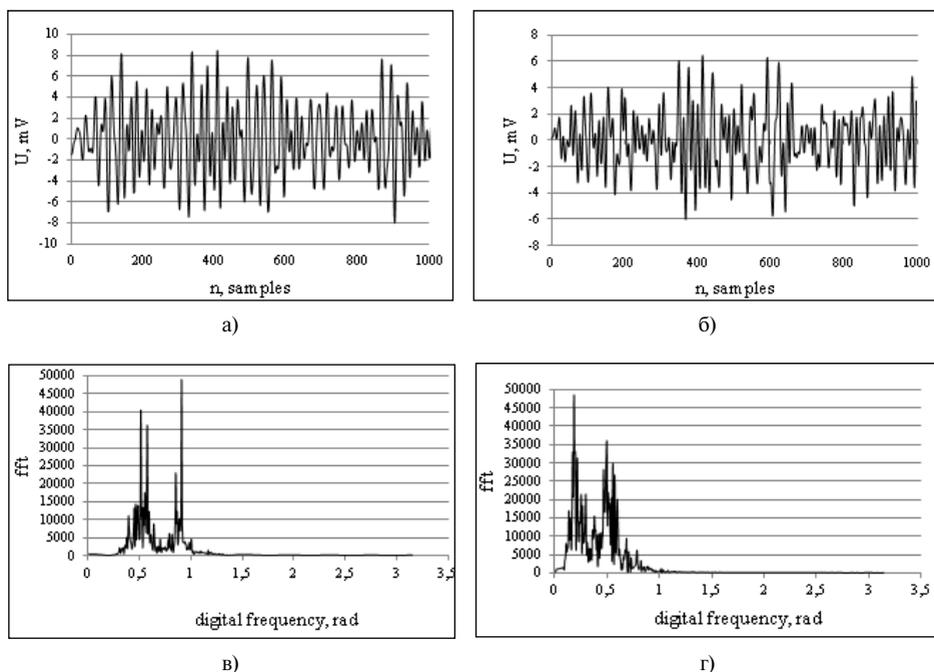


Рис. 4. Результат передискретизации сигналов, приводящий их к одному и тому же дискретному диапазону частот: а); б) – исходные сигналы; в); г) – спектры сигналов

Избежать необходимости решения этой проблемы можно за счет согласования значения частоты дискретизации с частотными характеристиками электронного и акустического тракта системы. При помощи импульсного калибровочного воздействия получают амплитудно-частотные характеристики измерительного канала АЭ-системы, затем частоту дискретизации и диапазон цифровой фильтрации настраивают таким образом, чтобы вне зависимости от свойств объекта контроля и характеристик первичного преобразователя, спектр дискретного сигнала лежал в одном и том же диапазоне дискретных частот. На рис. 4 показан результат процедуры калибровки. Сигналы, показанные на рис. 4, дискретизированы с различной частотой. Частота дискретизации низкочастотного сигнала снижена до 250 кГц, при этом спектры дискретных сигналов оказались в одном и том же диапазоне частот.

Общая схема беспороговой регистрации данных

На рис. 5 показана общая схема беспорогового обнаружения импульсов. Алгоритм основан на методе сравнения свойств сигналов на разных масштабах наблюдения [6], длинное временное окно используется для анализа непрерывной составляющей сигнала. Статистические усредненные параметры сигналов анализируются для идентификации опасных состояний контролируемого объекта, таких как течь или непрерывная эмиссия перед разрушением.

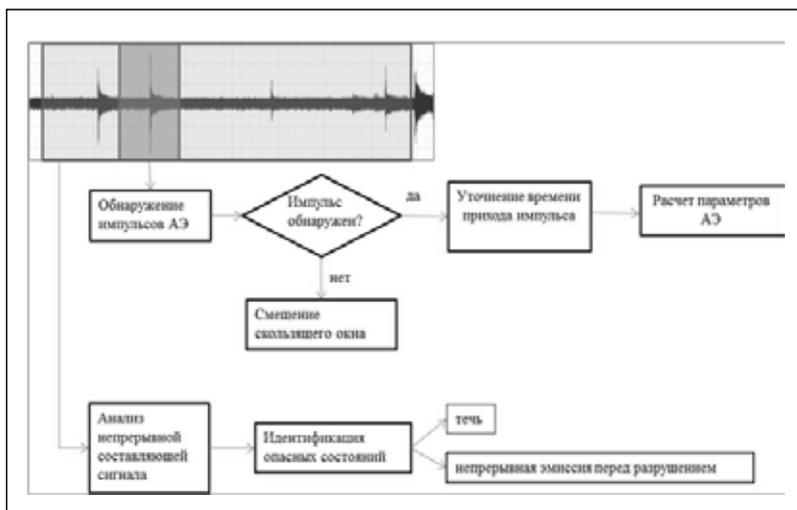


Рис. 5. Блок-схема беспороговой регистрации данных

Короткое временное окно предназначено для выявления импульсов АЭ, при обнаружении импульсов АЭ, уточняются времена их прихода, рассчитываются амплитуда, энергия, время нарастания, выбросы и остальные АЭ-параметры.

Список использованной литературы

1. Неразрушающий контроль : справочник. – Т. 7 / под общ.ред. В.В. Клюева. – Кн. 1. Иванов В.И., Власов И.Э.
2. Barat, V., Borodin, Y., Kuzmin, A. Intelligent AE Signal Filtering Methods // Journal AE. – 2010. – V. 28. – P. 109–119.
3. Харебов, В.Г., Попков, Ю.С. Автоматизированные системы комплексного коррозионного мониторинга и перспективы применения метода АЭ в их составе // В МИРЕ НК. – 2008. – № 3 [41], сентябрь.
4. Barat, V.A., Alyakritskij, A.L. Automated method for statistic processing of AE testing data // Journal AE. – 2008. – V. 28. – P. 132–141.
5. Rodgers, J.M. The “Use of a Floating Threshold for Online Acoustic Emission Monitoring of Fossil High Energy Piping. –AE Consulting, 1994.
6. Karen, Holford, M. Eaton, M. Recent Advances in Acoustic Emission // Proceedings of World Conference of Acoustic Emission. – 2011. –Beijing. – P. 58–66.
7. Sedlak, P., Hirose, Y., Khan, S.A., Enoki, M., Sikula, J. New Automatic Localization Technique of Acoustic Emission Signals in Thin Plates // Ultrasonics. – 2009. – 49. – P. 254–62.
8. Barat, V., Elizarov, S., Bolokhova, I., Bolokhov, E. Application of ICI Principle for AE Data Processing // Journal AE. – 2010. – V. 30. – P. 124–136.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РИСКА ВЫБОРА НОРМАТИВНЫХ ВЕЛИЧИН ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ

В.Н. Костюков, А.П. Науменко
ООО «НПЦ «Динамика», г. Омск

Актуальность. В общем случае на основе совокупности диагностических признаков (ДП), каждый из которых с определенной вероятностью характеризует состояние диагностируемого объекта, необходимо построить решающее правило, с помощью которого предъявленная совокупность признаков была бы отнесена к одному из возможных состояний (диагнозов) [1, 2, 3, 4]. В частном случае необходимо провести выбор одного из двух диагнозов (дифференциальная диагностика или дихотомия) – например, «исправное состояние» и «неисправное состояние» [5, 6, 7].

Основное преимущество статистических методов распознавания состоит в возможности одновременного учета признаков различной физической природы или механизмов формирования, так как эти методы оперируют безразмерными величинами – вероятностями их появления при различных состояниях системы. Среди методов технической диагностики метод, основанный на обобщенной формуле *Байеса*, занимает особое место благодаря простоте и эффективности. Однако, этот метод обладает одним существенным недостатком: «угнетение» редко встречающихся признаков, что недопустимо в случае мониторинга состояния опасных производственных объектов. В условиях реальных производств метод *Вальда* (последовательного анализа) также не обеспечивает безопасную эксплуатацию в связи с возможностью превышения интервала постановки диагноза.

Целью работы является выявление методов оценки нормативных значений *ДП* на основе теории принятия статистических решений и рисков, которые можно использовать в системах вибродиагностического мониторинга [8, 9].

Предпосылки решения проблемы. Методы статистических решений, такие как, методы минимального риска, минимального числа ошибочных решений, минимакса, *Неймана-Пирсона*, наибольшего правдоподобия, позволяют выбрать решающее правило исходя из условий оптимальности, например, из условия минимального риска, минимизация одной из ошибок постановки диагноза при заданном уровне другой.

Оценки стоимости ошибок часто неизвестны, а их достоверное определение часто связано с большими трудностями. Вместе с тем ясно, что во всех случаях желательно при определенном (допустимом) уровне одной из ошибок минимизировать значение другой. Поэтому центром проблем является обоснованный выбор допустимого уровня ошибок на основе, предыдущего опыта или интуитивных соображений. Анализ отказов и ремонтов поршневых компрессоров нефтегазохимического комплекса (*НХК*) показывает [1, 8], что отказы клапанов составляют 36% от всего объема отказов, а сто-

имость ремонта – до 50% от общей стоимости. Таким образом, дальнейшее решение задачи следует провести именно для клапанов.

Для оценки стоимости вероятностей пропуска дефекта и ложной тревоги в качестве исходных данных примем следующее:

1. Технологический комплекс – установка гидроочистки дизельных топлив производительностью 250 т./ч., установка работает 8000 часов в год.

2. Отпускная цена дизельного топлива Евро-3 (Евро-4) – 9300 руб./т.

3. Объект – два непрерывно работающих четырехцилиндровых компрессора, имеющих по две полости нагнетания в каждом цилиндре, при этом каждая полость нагнетания имеет по одному всасывающему и нагнетательному клапанам, в случае отказа одного из клапанов – нагнетание газа в данной полости не происходит. Производительность одной полости нагнетания – 6,25 % от общей производительности двух компрессоров.

4. Стоимость одного клапана – 16 тыс. руб., наработка на отказ – 8000 час.

Оценка стоимости принятия решений:

1. Стоимость перебраковки клапана: 16000 руб./8000 ч.=2 руб./ч., т.е. при перебраковке клапана (клапан отправили в ремонт за один час до его поломки) стоимость недовыработки его ресурса составит 2 руб./ч.

2. Стоимость недобраковки (клапан не работает в течение часа эксплуатации компрессора, при этом производительность технологической установки снизилась на 6,25%) 145 312 руб.

3. Отношение стоимостей – 72 656, что позволяет с учетом всех неучтенных факторов, уменьшающих данное отношение, принять относительную стоимость пропуска дефекта $C_{12}=1$, а стоимость ложной тревоги – $C_{21}=0,001$.

Решение задачи. Вероятность принятия ошибочного решения складывается из вероятностей ложной тревоги и пропуска дефекта. Если приписать «цены» этим ошибкам и принять, что цены правильных решений есть C_{11} и C_{22} , которые для сравнения со стоимостью потерь (ошибок) принимаются отрицательными, то получим выражение для среднего риска (ожидаемая величина потери) [5, 10, 11]:

$$R = C_{11}P_1 \int_{-\infty}^{x_0} f(x / D_1) dx + C_{21}P_1 \int_{x_0}^{\infty} f(x / D_1) dx + C_{12}P_2 \int_{-\infty}^{x_0} f(x / D_2) dx + C_{22}P_2 \int_{x_0}^{\infty} f(x / D_2) dx \quad (1),$$

где $f(x_0/D_1)$ – плотность вероятности для исправного состояния; $f(x_0/D_2)$ – плотность вероятности для неисправного состояния; диагноз D_1 соответствует исправному состоянию, D_2 – дефектному состоянию объекта; C_{21} – цена ложной тревоги; C_{12} – цена пропуска дефекта (первый индекс – принятое состояние, второе – действительное); $P_1 = P(D_1)$ и $P_2 = P(D_2)$ – априорные вероятности соответственно диагнозов D_1 и D_2 , которые считаются известными на основании предварительных статистических данных. В данном случае эти вероятности описывают функции распределения вероятностей диагностических признаков для различных состояний объекта диагностирования [1].

Величина x – текущее (измеренное) значение диагностического признака, – является случайной и потому приведенные равенства представляют собой среднее значение (математическое ожидание) риска.

По методу минимального риска граничное значение x_0 определяется из условия минимума среднего риска [5, 11]. Дифференцируя (1) по x_0 и приравнявая производную нулю, получим сначала условие экстремума

$$\frac{f(x_0 / D_1)}{f(x_0 / D_2)} = \frac{(C_{12} - C_{22})P_2}{(C_{21} - C_{11})P_1} \quad (2),$$

которое в общем случае дает два значения x_0 ; одно из них соответствует минимуму, второе – максимуму риска (рис. 1). Соотношение (2) является необходимым, но недостаточным условием минимума. Для существования минимума R в точке $x=x_0$ вторая производная должна быть положительной $\frac{d^2R}{dx_0^2} > 0$, что приводит к следующему условию:

$$\frac{f'(x_0 / D_1)}{f'(x_0 / D_2)} < \frac{(C_{12} - C_{22})P_2}{(C_{21} - C_{11})P_1} \quad (3).$$

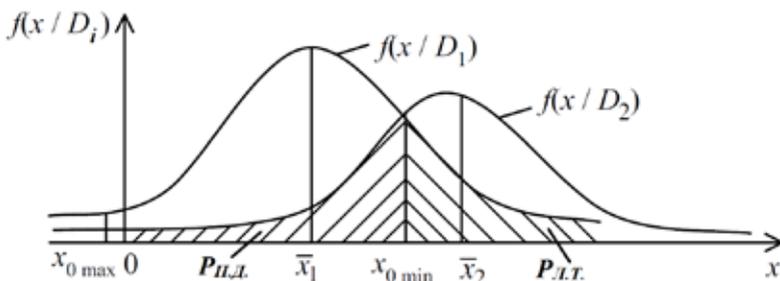


Рис. 1. Точки экстремума среднего риска ошибочных решений, $P_{п.д.}$ и $P_{л.т.}$ – соответственно, вероятности пропуска дефекта и ложной тревоги

Если функции распределения $f(x/D_1)$ и $f(x/D_2)$ являются одномодальными, то при $\bar{x}_1 < x_0 < \bar{x}_2$ (4),

условие (3) выполняется.

По методу минимального риска принимается следующее решение о состоянии объекта, имеющего данное значение параметра x :

$$x \in D_1, \text{ если } \frac{f(x_0 / D_1)}{f(x_0 / D_2)} > \frac{(C_{12} - C_{22})P_2}{(C_{21} - C_{11})P_1} \quad (5),$$

$$x \in D_2, \text{ если } \frac{f(x_0 / D_1)}{f(x_0 / D_2)} < \frac{(C_{12} - C_{22})P_2}{(C_{21} - C_{11})P_1} \quad (6).$$

Эти условия вытекают из соотношений (3) и (4).

Отношение

$$\frac{f(x_0 / D_1)}{f(x_0 / D_2)} = \check{e} \quad (7)$$

называют *отношением правдоподобия* [10]. В теории обнаружения сигналов решение принимается в виде

$$\check{e} > \frac{(C_{12} - C_{22})P_2}{(C_{21} - C_{11})P_1} = \check{e}_0 \quad (8),$$

и решение задачи обнаружения сигнала (в нашем случае – заданного состояния объекта по величине *ДП*) сводится к нахождению отношения правдоподобия по текущему измерению и сравнению его значения с постоянным пороговым значением λ_0 , зависящим от априорных вероятностей P_1 и P_2 [10].

Метод минимального числа ошибочных решений предполагает, что вероятность ошибочного решения складывается из вероятностей ложной тревоги и пропуска дефекта [5, 11]:

$$P_{i\sigma} = P_1 \int_{x_0}^{\infty} f(x / D_1) dx + P_2 \int_{-\infty}^{x_0} f(x / D_2) dx \quad (9).$$

Из условия экстремума этой вероятности получаем

$$\frac{dP_{i\sigma}}{dx_0} = -P_1 f(x_0 / D_1) + P_2 f(x_0 / D_2) = 0 \quad (10).$$

Условие минимума дает

$$f'(x_0 / D_1) / f'(x_0 / D_2) < P_2 P_1 \quad (11).$$

Для одномодальных распределений неравенство (11) выполняется, и минимум вероятности ошибочного решения получается из соотношения (10)

$$f(x_0 / D_1) / f(x_0 / D_2) = P_2 / P_1 \quad (12),$$

где, как и раньше, $P_1 = P(D_1)$, $P_2 = P(D_2)$ – априорные вероятности диагнозов.

Решение о состоянии объекта принимается исходя из условий:

$$x \in D_1 \text{ при } f(x / D_1) / f(x / D_2) > P_2 / P_1 \quad (13),$$

$$x \in D_2 \text{ при } f(x / D_1) / f(x / D_2) < P_2 / P_1 \quad (14).$$

Очевидно, что соотношения (12), (13), (14) являются частным случаем условия минимального риска, если стоимости решений одинаковы. Условия выбора граничного значения (12) часто называется *условием Зигерта-Котельникова* (условием идеального наблюдателя) [5, 10, 11]. К этому условию приводит также метод *Байеса*.

В практических задачах метод **минимального числа ошибочных решений** применяется, если цена пропуска дефекта приблизительно равна цене ложной тревоги (для дефектов с ограниченными последствиями, для некоторых задач контроля и др.), то применение метода вполне оправдано.

Метод наибольшего правдоподобия можно рассматривать как частный случай метода минимального риска [5, 11]. Правило решения принимается следующим:

$$x \in D_1, \text{ если } \frac{f(x/D_1)}{f(x/D_2)} > 1 \quad (15),$$

$$x \in D_2, \text{ если } \frac{f(x/D_1)}{f(x/D_2)} < 1$$

где x – значение параметра для диагностируемого объекта.

Граничное значение находится из условия:

$$f(x_0/D_1) = f(x_0/D_2) \quad (16).$$

Сопоставляя условия (2) и (16), легко установить, что они совпадают, если положить

$$\frac{(\tilde{N}_{12} - \tilde{N}_{22})P_2}{(\tilde{N}_{21} - \tilde{N}_{11})P_1} = 1 \quad (17).$$

В большинстве практических случаев цены правильных решений C_{11} и C_{22} не используются, и тогда для **метода наибольшего правдоподобия** следует считать

$$\frac{\tilde{N}_{12}P_2}{\tilde{N}_{21}P_1} = 1 \quad (18).$$

Для задач надежности вероятность неисправного состояния обычно представляет собой малую величину, но цена пропуска дефекта значительно больше цены ложной тревоги ($C_{12} \gg C_{21}$). Тогда условие (18) дает решение, не требующее знания точных значений стоимостей ошибок и качественно отражающее указанные обстоятельства ($P_2 \ll P_1, C_{12} \gg C_{21}$).

Метод минимакса используется в ситуации, когда предварительные статистические сведения о вероятности диагнозов D_1 и D_2 отсутствуют. Рассматривается «наихудший случай», т.е. наименее благоприятные значения P_1 и P_2 , приводящие к минимизации максимального риска [5, 10, 11].

Если считать, что величина риска зависит от x_0 и P_1 , а вероятность второго диагноза $P_2 = 1 - P_1$, то

$$R(x_0, P_1) = C_{11}P_1 \int_{-\infty}^{x_0} f(x/D_1)dx + C_{21}P_1 \int_{x_0}^{\infty} f(x/D_1)dx + \\ + C_{12}(1 - P_1) \int_{-\infty}^{x_0} f(x/D_2)dx + C_{22}(1 - P_1) \int_{x_0}^{\infty} f(x/D_2)dx \quad (19).$$

Для нахождения экстремума приравняем нулю частные производные по x_0 и P_1 и получаем:

$$\frac{f(x_0 / D_1)}{\tilde{N}(x_0 / \tilde{D}_2)P} = \frac{(\tilde{N}_{12} - \tilde{N}_{22})(1 - P_1)}{\begin{pmatrix} 21 & - & 11 \\ & & 1 \end{pmatrix}} \quad \text{при} \quad \frac{\partial R}{\partial x_0} = 0 \quad (20),$$

$$\begin{aligned} \tilde{N}_{21}P_1 \int_{x_0}^{\infty} f(x / D_1) dx + C_{11}P_1 \int_{-\infty}^{x_0} f(x / D_1) dx &= \quad \text{при} \quad \frac{\partial R}{\partial P_1} = 0 \quad (21). \\ = C_{12} \int_{-\infty}^{x_0} f(x / D_2) dx + C_{22} \int_{x_0}^{\infty} f(x / D_2) dx \end{aligned}$$

Теперь требуется определить значения x_0 и P_1 , удовлетворяющие уравнениям (20) и (21). Если x_0^* и P_1^* являются корнями указанных уравнений, то точка $R(x_0^*, P_1^*)$ является экстремальной.

Граничное значение x_0 определяем из уравнения:

$$C_{21}(1 - F(x_0 / D_1)) - C_{12}F(x_0 / D_2) = 0.$$

Можно показать для одномодальных распределений, что величина риска становится минимаксной (т.е. минимальной среди максимальных значений, вызванных «неблагоприятной» величиной P_1). Отметим, что при $P_2=0$ и $P_1=0$ риск принятия ошибочного решения отсутствует, так как ситуация не имеет неопределенности. При $P_1=0$ (все изделия неисправны) из условия (2) вытекает $x_0 \rightarrow -\infty$, и все объекты действительно признаются неисправными; при $P_2=0$ и $P_1=0$ $x_0 \rightarrow -\infty$, и в соответствии с имеющейся ситуацией все объекты классифицируются как исправные.

Для промежуточных значений $0 < P_1 < 1$ риск возрастает и при $P_1 = P_1^*$ становится максимальным. Рассматриваемым методом выбирают величину x_0 таким образом, чтобы при наименее благоприятных значениях P_1 потери, связанные с ошибочными решениями, были бы минимальными.

По методу *Неймана-Пирсона* минимизируется вероятность пропуска дефекта при заданном допустимом уровне вероятности ложной тревоги [5, 10, 11]. Таким образом, вероятность ложной тревоги:

$$P_{\bar{E}. \dot{O}} = P_1 \int_{x_0}^{\infty} f(x/D_1) dx \leq A \quad (22),$$

где $P_{л.т.}$ – вероятность ложной тревоги; A – заданная допустимая величина вероятности ложной тревоги; P_1 – вероятность исправного состояния; $f(x/D_1)$ – плотность вероятности диагноза D_1 при величине ДП x ; x_0 – величина ДП при минимальной вероятности пропуска дефекта.

Минимум величины пропуска дефекта соответствует условию:

$$\text{MIN} [P_{\bar{E}. \dot{O}}] = A,$$

и (22) определяет величину x_0 и величину риска R .

Выбор величины вероятности ложной тревоги A определяют из следующих условий:

$$A = k \cdot P_2 \quad (24),$$

где k – коэффициент избыточности, зависящий от разрешающей способности диагностических средств, опасности дефекта, экономических потерь и других обстоятельств; P_2 – вероятность определения неисправного состояния при значении диагностического признака $[x_0; -\infty]$ при условии, что величина $ДП$ x при исправном состоянии меньше величины $ДП$ при неисправном состоянии.

Коэффициент избыточности при неисправностях с ограниченными последствиями принимают $k=1...3$, при опасных дефектах $k=3...10$, для редко встречающихся ($P_2 < 0,01$), но опасных дефектах и неисправностях коэффициент избыточности может иметь и значительно большие величины.

Задаваясь величиной A , можно определить пороговое значение x_0 , для чего необходимо решить уравнение:

$$P_1 \int_{x_0}^{\infty} f(x/D_1) dx - A = 0 \quad (25).$$

Для его решения целесообразно использовать метод *Ньютона*, согласно которому корень уравнения рассчитывается по формуле [11]:

$$x_{i+1} = x_i - \frac{\varphi x_i}{\dot{\varphi} x_i} \quad (26).$$

Обозначим возможные решения по правилу (гипотезы) через H_j , где индекс i соответствует принятому диагнозу, j – действительному диагнозу. Тогда:

- H_{21} – ложная тревога (ошибка первого рода);
- H_{12} – пропуск неисправности (ошибка второго рода);
- H_{11} – правильный диагноз (исправное состояние);
- H_{22} – правильный диагноз (неисправное состояние).

В [1] рассчитаны параметры функций распределений $ДП$ неисправностей клапанов поршневых компрессоров для состояний «требуется принятия мер» (ТПМ) и «недопустимо» (НДП). Функции распределения для одного из признаков $Apr2$ приведены ниже.

ТПМ:
$$F(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{28,93} \right)^{7,333} \right];$$
 НДП:
$$F(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{42,3977} \right)^{10,755} \right].$$

Расчеты для диагностического признака **Abd 2** (амплитуда виброускорения после прохождения поршнем нижней мертвой точки характеризует возникновение гидроударов в полости нагнетания и позднем закрытии нагнетательных клапанов) (табл. 2) показывают, что минимальный риск R при принятии решений и наименьшую вероятность пропуска дефекта $P(H_{12})$ дают метод минимакса, минимального риска и *Неймана-Пирсона*, что соответствует граничному значению $x_0=(33,5...37,8)$ м/с². Для остальных методов величина среднего риска составляет 0,0039...0,0043. В то же время минималь-

ную вероятность ложной тревоги $P(H_{21})$ дают оценки методами минимального числа ошибочных решений $P(H_{21})=0,0034$ и *Неймана-Пирсона* $P(H_{21})=0,015$.

Таблица 2

Метод	$x_0, \text{ м/с}^2$	$P(H_{21})$	$P(H_{12})$	R
Минимального риска	37,8	0,051	0,000037	0,00010
Минимального числа ошибочных решений	43,3	0,0034	0,0043	0,0043
Наибольшего правдоподобия	42,6	0,63	0,0032	0,0039
Минимакса	33,5	0,118	0,000053	0,00017
Неймана-Пирсона	33,8	0,015	0,000010	0,00016

Анализ полученных результатов. Расчет средних значений вероятности пропуска дефекта $P(H_{12})$, ложной тревоги $P(H_{21})$ и риска пропуска отказа *Risk* (см. (1) при $C_{11}=0$, $C_{22}=0$) для диагностического признака *Abd 2* позволил провести сравнение различных методов выбора граничных величин *ДП* (рис. 2).

Методы *Неймана-Пирсона*, **минимакса** и **минимального риска** показали наименьшую вероятность пропуска дефекта $P(H_{12})$ и величину риска пропуска отказа *Risk*, однако, вероятность ложной тревоги $P(H_{21})$ для метода **минимакса** составляет 0,118, для **минимального риска** – 0,051, что ведет к перебраковке исправных клапанов.

Метод **минимального числа ошибочных решений** дает сопоставимые величины вероятности пропуска дефекта ($P(H_{12})=0,0043$) и риска пропуска отказа ($Risk=0,0043$), при достаточно низкой величине вероятности ложной тревоги ($P(H_{21})=0,0034$).

Метод **наибольшего правдоподобия** дает максимальную величину вероятности ложной тревоги ($P(H_{21})=0,63$).

Метод *Неймана-Пирсона* имеет почти в три раза меньшие значения величины вероятности пропуска дефекта ($P(H_{12})=0,00001$) и риска пропуска отказа ($Risk=0,00016$) по сравнению с методом минимального числа ошибочных решений, но при этом имеет в четыре с половиной раз большую величину вероятности ложной тревоги ($P(H_{21})=0,015$).

Но применение метода минимального числа ошибочных решений оправданно в том случае, если цены ложной тревоги и пропуска дефекта соизмеримы [5]. В данном случае цена пропуска дефекта значительно больше цены ложной тревоги.

В методе *Неймана-Пирсона* задается допустимая вероятность ложной тревоги и тем самым минимизируется вероятность пропуска дефекта [5], что и необходимо.

Расчеты методом *Неймана-Пирсона* для анализа эффективности принятия решения о состоянии объекта диагностирования по полученным функциям распределения показывают (рис. 3), что минимум риска пропуска отказа соответствует вероятности (квантиля) *ДП* в пределах от 0,93 до 0,95.

Выводы. Анализ использования статистических методов принятия решений для оценки граничных величин диагностических признаков показал, что при сравнимых ценах ложной тревоги и пропуска дефекта целесообразно использовать метод минимального числа ошибочных решений. Если же стоимость пропуска дефекта значительно выше стоимости ложной тревоги, то целесообразно использовать метод *Неймана-Пирсона*. Выбор граничных значений диагностических признаков по их функциям распределения для различных состояний объекта диагностирования следует выбирать при величине вероятности от 0,93 до 0,95.

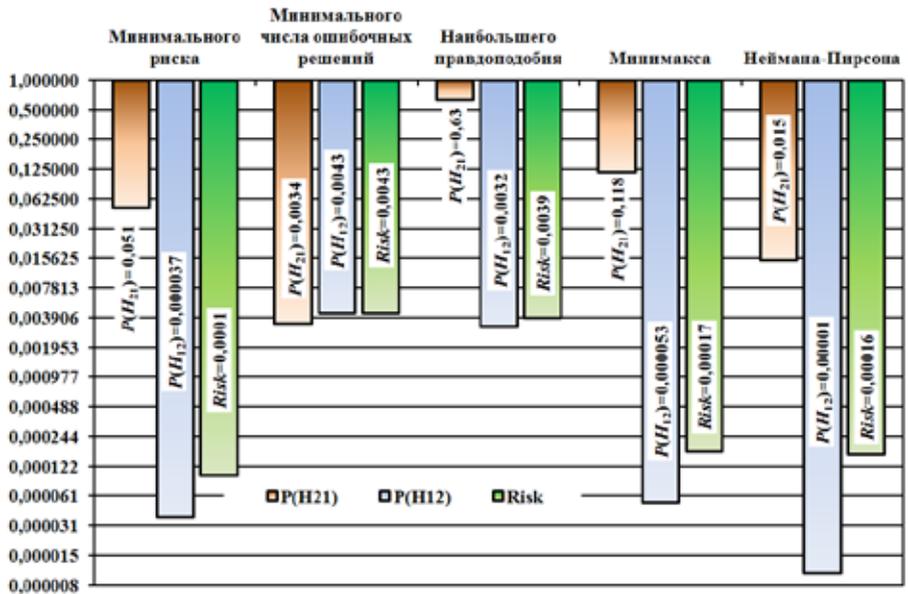


Рис. 2. Величины риска пропуска отказа R с учетом стоимостей пропуска дефекта и ложной тревоги, вероятности пропуска неисправности $P(H_{12})$ и ложной тревоги $P(H_{21})$ при оценке граничного значения диагностического признака различными методами

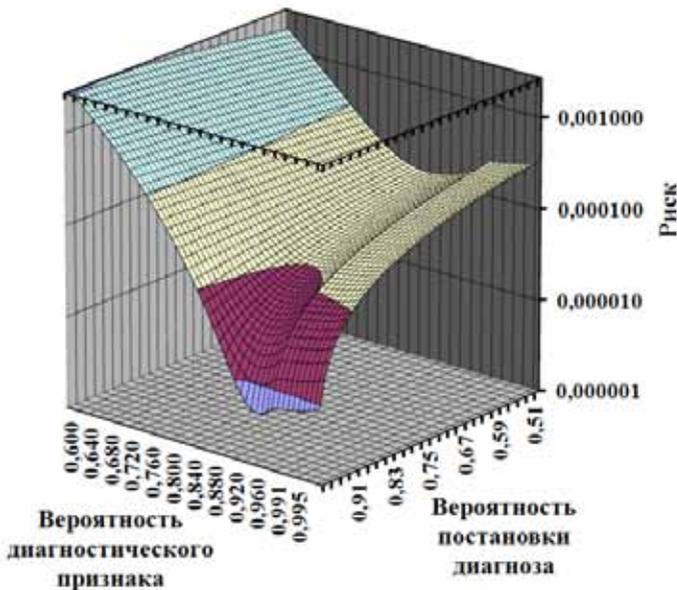


Рис. 3. Зависимости величины риска пропуска отказа с учетом стоимостей пропуска дефекта и ложной тревоги от вероятности правильности постановки диагноза и вероятности ДП

Список использованной литературы

1. Науменко, А.П. Научно-методические основы вибродиагностического мониторинга поршневых машин в реальном времени : дисс. ... д-ра техн. наук. — Омск : ОмГТУ, 2012. — 423 с.
2. Костюков, В.Н., Науменко, А.П. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин : учебное пособие. — Омск : ОмГТУ, 2011. — 360 с.
3. Способ вибродиагностики технического состояния поршневых машин по спектральным инвариантам: пат. 2337341 Рос. Федерация / Костюков В.Н., Науменко А.П., Бойченко С.Н.; №2007113529; заявл. 11.04.07; опубл. 27.10.08 // Бюл. №30.
4. Костюков, В.Н., Науменко, А.П. Вибродиагностика поршневых компрессоров // Компрессорная техника и пневматика. — 2002. — № 3. — С. 30.
5. Биргер, И. А. Техническая диагностика. — М. : Машиностроение, 1978. — 240 с.
6. Стандарты в области технического состояния оборудования опасных производств / В.Н. Костюков, А.П. Науменко [и др.] // Безопасность труда в промышленности. — 2012. — № 7. — С. 30–36.
7. Костюков, В.Н., Науменко, А.П. Нормативно-методическое обеспечение диагностики и мониторинга поршневых компрессоров // Безопасность труда в промышленности. — 2013. — № 5. — С. 66–70.
8. Костюков, В.Н., Науменко, А.П. Проблемы и решения безопасной эксплуатации поршневых компрессоров // Компрессорная техника и пневматика. — 2008. — №3. — С. 21–28.
9. Костюков, В.Н., Науменко, А.П. Система контроля технического состояния машин возвратно-поступательного действия // Контроль. Диагностика. — 2007. — № 3. — С. 50–58.
10. Харкевич, А.А. Борьба с помехами. — 2-е изд. — М. : Наука, 1965. — 276 с.
11. Богдан, Н.В., Жилевич, М.И., Красневский, Л.Г. Техническая диагностика гидросистем : научное издание. — Мн. : Белавтотракторостроение, 2000. — 120 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА КАК АТРИБУТ КОМПЛЕКСА РАБОТ ПО ВНЕДРЕНИЮ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

MODELING OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE OBJECT AS AN ATTRIBUTE OF RANGE OF WORKS ON INTRODUCTION OF MONITORING SYSTEM

А.Е. Журавлев, А.А. Чурилов, М.В. Черных,
специалисты Группы компаний “ИНТЕРЮНИС”
A.E. Zhuravlev, A.A. Churilov, M.V. Chernykh,
specialists of “INTERUNIS” group of companies

Описаны основные возможности и преимущества применения интеллектуальной системы мониторинга на опасных производственных объектах.

Выбраны места установки датчиков системы мониторинга на примере ректификационной колонны и проанализированы преимущества и недостатки выбранных мест. Предложены критерии для их правильного определения.

Введено понятие индикаторных интервалов на основе фактического технического состояния объекта, и предложены варианты их применения.

The primary possibilities and advantages of using intelligent monitoring system on hazardous production facilities are described.

The places of sensors installation of monitoring system are chosen by the example rectification column and the advantages and disadvantages of chosen places are reviewed. Criteria are suggested for correct determination of these places.

The idea of indicator intervals based on the actual technical state of object is introduced and variants of their using are suggested.

Ключевые слова: ректификационная колонна, интеллектуальная система мониторинга, индикаторные интервалы, напряженно-деформированное состояние, тензодатчик, распределения напряжений, обратная связь.

Key words: rectification column, intelligent monitoring system, indicator intervals, strain-stress state, strain gauge, stress distribution, feed-back.

Введение

В XX и XXI веке нефть является одним из важнейших для человечества полезных ископаемых. Для получения из неё технически ценных продуктов, главным образом моторных топлив, растворителей и сырья для химической промышленности, нефть подвергают переработке. Переработка включает в себя очистку (от нефтяного газа, солей, воды и механических примесей) и ректификацию (процесс разделения нефти на фракции). Для процессов ректификации применяются аппараты различных конструкций, среди которых наибольшее распространение получили вертикальные аппараты колонного типа.

Конструктивные особенности аппаратов таковы, что они имеют значительную высоту и располагаются на открытых площадках. Как следствие, в процессе эксплуата-

ции на колонный аппарат действует широкий спектр нагрузок: внутреннее давление, собственный вес колонны и усилия от трубопроводов, а также ветровые и температурные воздействия. В результате действия этих нагрузок аппарат находится в сложном напряженно-деформированном состоянии (НДС), что может стать причиной аварий.

Гарантией безопасной эксплуатации таких объектов является установка специальной системы, которая позволит оценивать НДС, техническое состояние и прогнозировать ресурс объекта в реальном времени без вывода его из эксплуатации — системы мониторинга.

Система мониторинга обеспечивает получение информации о состоянии оборудования в необходимом количестве и качестве для принятия дальнейших решений. По полученным результатам система мониторинга заблаговременно сигнализирует оператору о необходимости принятия мер с целью обеспечения требуемого запаса устойчивости технологической системы, качества ее функционирования, а также создает необходимый запас ее техногенной, экологической и экономической безопасности.

При создании базы данных и обратной связи с исполнительным оборудованием становится возможным автоматическое управление рабочими параметрами, что переводит систему из разряда поддержки принятия решений в интеллектуальную систему мониторинга.

Структура системы мониторинга

Рассмотрим одну из возможных структурных схем такой системы на примере ЛельМ /ALine 32D (DDMM)/, предлагаемой Группой компаний «ИНТЕРЮНИС» (рис. 1).

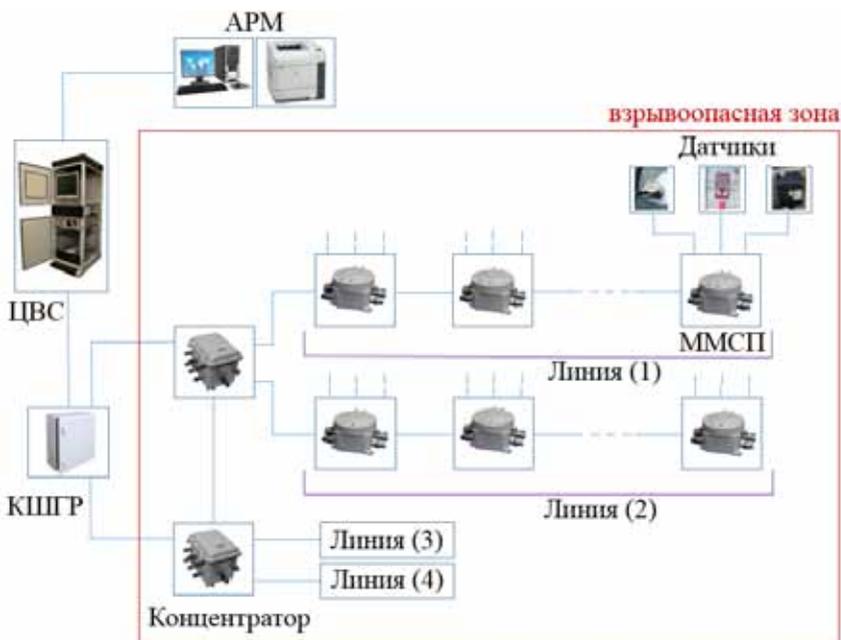


Рис. 1. Структурная схема системы мониторинга

Структурная схема содержит в себе следующие основные элементы:

- 1) диагностические и параметрические датчики — предназначены для сбора первичной информации об объекте;
- 2) многофункциональный модуль сбора и передачи данных (ММСП) — производит оцифровку сигналов, полученных от датчиков, предварительную обработку и передачу сигналов далее в цифровом виде;
- 3) концентратор — организует измерительные линии из ММСП, а также собирает информацию от всех ММСП и направляет ее далее на обработку;
- 4) коммутационный шкаф гальванической развязки (КШГР) — обеспечивает измерительные линии питанием, ретранслирует данные, полученные от концентраторов в центральную вычислительную станцию;
- 5) центральная вычислительная станция (ЦВС) — обрабатывает и отображает информацию оператору, архивирует данные, обеспечивает управление исполнительным оборудованием;
- 6) автоматизированное рабочее место оператора (АРМ) — служит для ввода и вывода информации оператором.

Одним из наиболее широко распространенных способов измерения напряжений является установка тензометрических датчиков.

выводные
проводники

узел пайки

чувствительный
элемент

подложка

защитный
элемент

связующее

исследуемый
элемент



Устройство и принцип работы. Основной составляющей тензодатчика является чувствительный элемент, преобразующий деформацию твердого тела в электрический сигнал. Чувствительный элемент, имеющий выводные проводники для присоединения в сеть, помещается на упругую подложку и закрывается защитным элементом, а затем закрепляется с помощью связующего (клей, цемент) на исследуемой детали (рис. 2).

Рис. 2. Тензодатчик

Под действием силы происходит деформация упругой подложки вместе с чувствительным элементом, и за счет изменения его удельного сопротивления (тензорезистивный эффект) можно судить о величине этой деформации.

Определение мест установки тензодатчиков



Рис. 3. Ректификационная колонна

В качестве примера аппарата колонного типа для установки системы мониторинга рассмотрим ректификационную колонну (далее – колонна).

Для контроля максимальных напряжений, возникающих в колонне, рассмотрим варианты установки тензодатчиков в трех зонах – верхней, средней и нижней (рис. 3).

Куда бы вы установили тензодатчик на колонну высотой более 80 метров и диаметром 3,5 метра для контроля максимальных напряжений (рис. 3)? Для ответа на данный вопрос рассмотрим наиболее характерные варианты установки тензодатчиков в верхнюю, среднюю и нижнюю зоны (рис. 4).

Для оценки выбранных мест установки датчиков с целью определения их возможности отслеживать напряжения в опасной зоне проведем уточненные расчеты методом конечных элементов (МКЭ).

Для этого в системе трехмерного твердотельного и поверхностного проектирования Autodesk Inventor LT

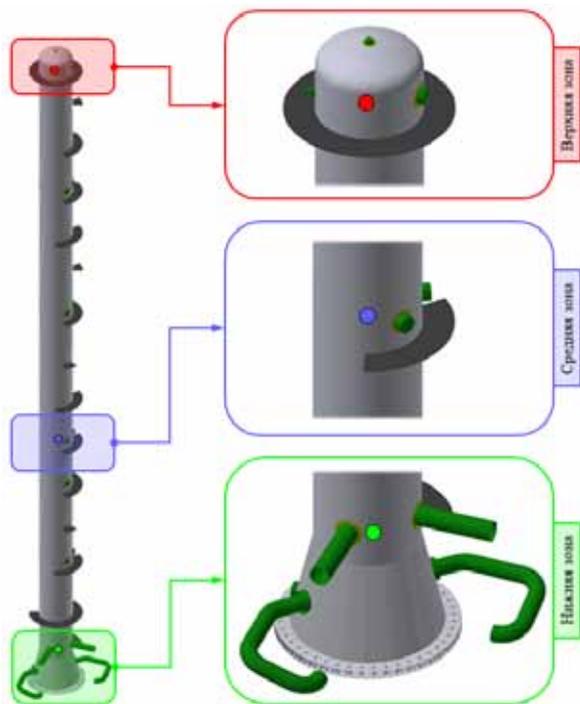


Рис. 4. Зоны установки датчиков

// - места установки тензодатчиков в верхней/средней/нижней зонах

создается поверхностная модель колонны. Поверхностная модель импортируется в универсальную программную систему конечно-элементного анализа ANSYS v.14.0, где на ее основе создается конечно-элементная сетка. Приложив расчетные нагрузки и воздействия, действующие на колонну, получаем расчетную модель.

Результатом расчета являются карты распределения напряжений.

Т.к. датчики ориентированы по оси колонны и измеряют напряжения только вдоль данной оси, рассмотрим карту распределения продольных напряжений по оси OY (рис. 5).

Из карты распределения напряжений видно, что тензодатчики (№№ 1.1, 2.1) в верхней и средней зоне установлены в однородное поле напряжений, а тензодатчик в нижней зоне – в неоднородное. Поскольку при установке датчика в нижней зоне на реальном объекте есть вероятность неточного позиционирования, то рассмотрим различные варианты установки датчика (№№ 3.1-3.3).

Рассмотрим карту распределения эквивалентных напряжений и выделим на ней зону максимальных напряжений (рис. 6) с целью определения критического элемента (MX) – элемента, который первым достигает допустимых напряжений при увеличении нагрузки.

Оценим каждую выбранную зону установки датчиков. Для этого построим графики зависимости напряжений от нагрузки для каждого установленного датчика и критического элемента (рис. 7).

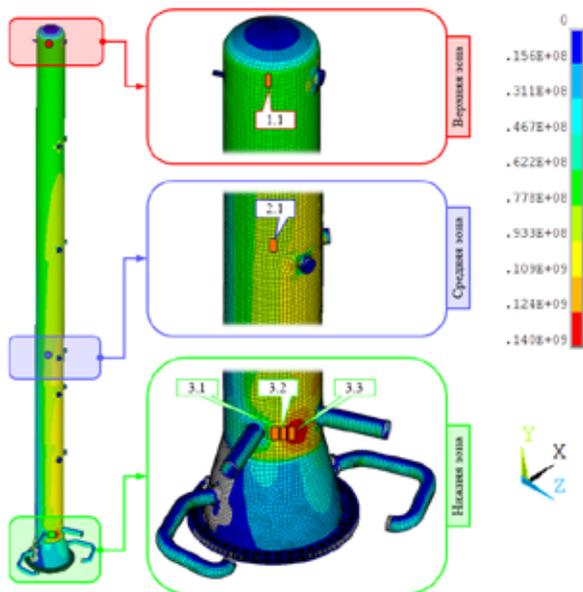


Рис. 5. Карта распределения напряжений по оси OY, Па

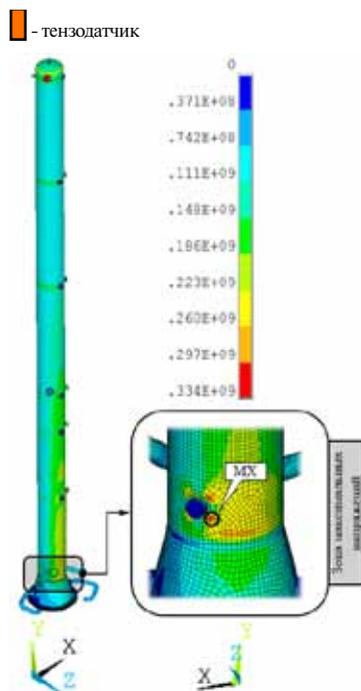


Рис. 6. Карта распределения эквивалентных напряжений, Па
– критический элемент

Из рис. 7 следует, что:

- в верхней зоне показания датчика почти не меняются при увеличении нагрузки (низкий отклик датчика на внешнюю нагрузку);
- в нижней зоне из-за неоднородности поля напряжений невозможно с высокой достоверностью однозначно определить напряжения;
- в средней зоне однородное поле напряжений и удовлетворительный отклик на внешнее воздействие.

Как следствие, наилучшим местом установки из выбранных зон является средняя зона.

Определение индикаторных интервалов

У выбранной зависимости напряжений тензодатчика в средней зоне выделим две характерные точки, значения напряжений в которых определяются следующим образом:

- 1) желтая – напряжения, показываемые датчиком при действии расчетных нагрузок;
- 2) красная – напряжения, показываемые датчиком при достижении критическим элементом допускаемых напряжений.

На основании полученных точек введем индикаторные интервалы, основанные на фактическом техническом состоянии колонны (рис. 8).

Применение индикаторных интервалов

Согласно [1] данные интервалы можно характеризовать следующим образом:

- 1) зеленый – состояние допустимо;
- 2) желтый – состояние требует принятия мер;
- 3) красный – состояние недопустимо.

На основании полученных интервалов создается инструкция действий персонала. В случае наличия автоматической обратной связи на исполнительное оборудование, система становится способна сама выполнять ряд необходимых действий (например, снижать рабочие параметры или полностью отключать аппарат) без участия оператора. Алгоритм функционирования такой системы представлен на рис. 9.

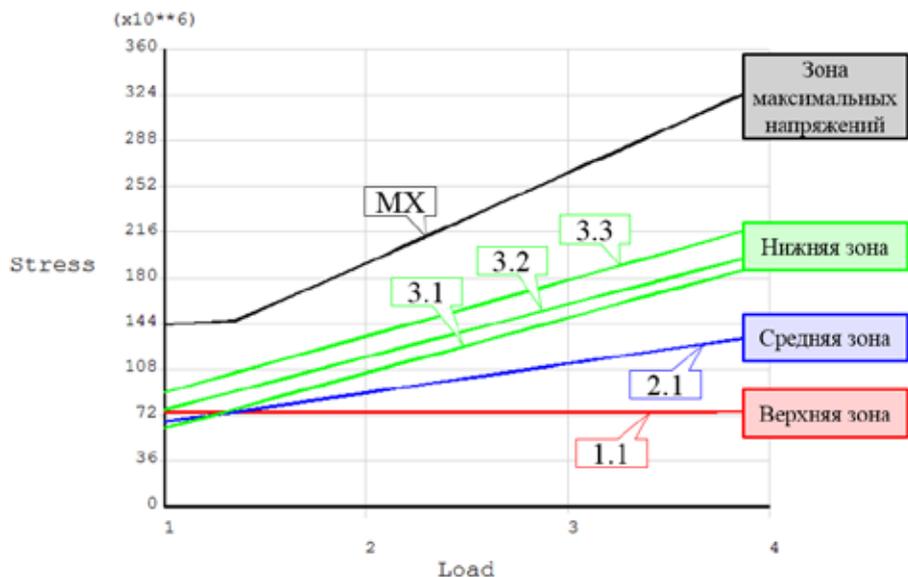


Рис. 7. Зависимость напряжений от нагрузки, Па/-

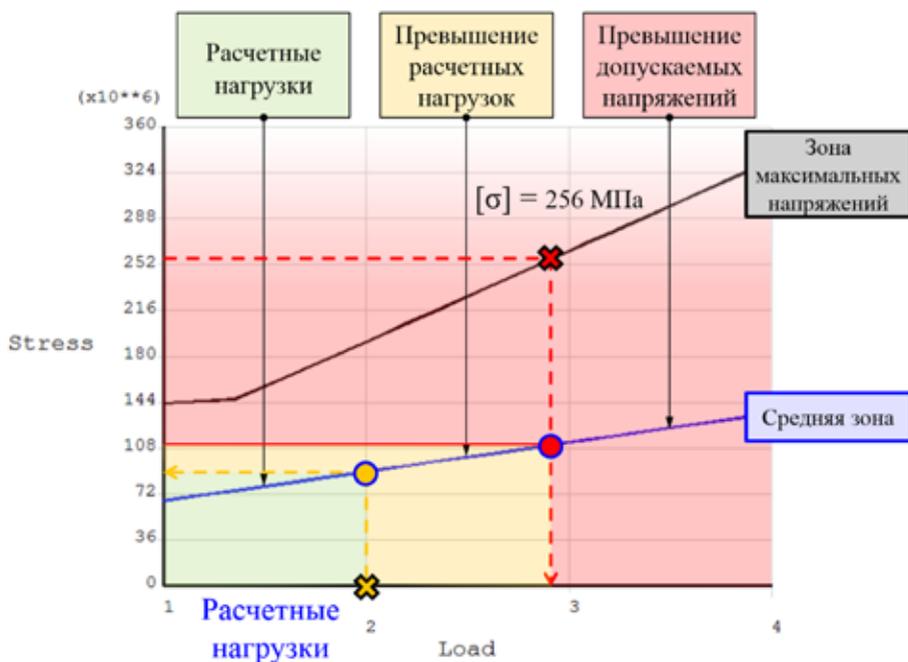


Рис. 8. Индикаторные интервалы, Па/-

● / ● - характерные точки

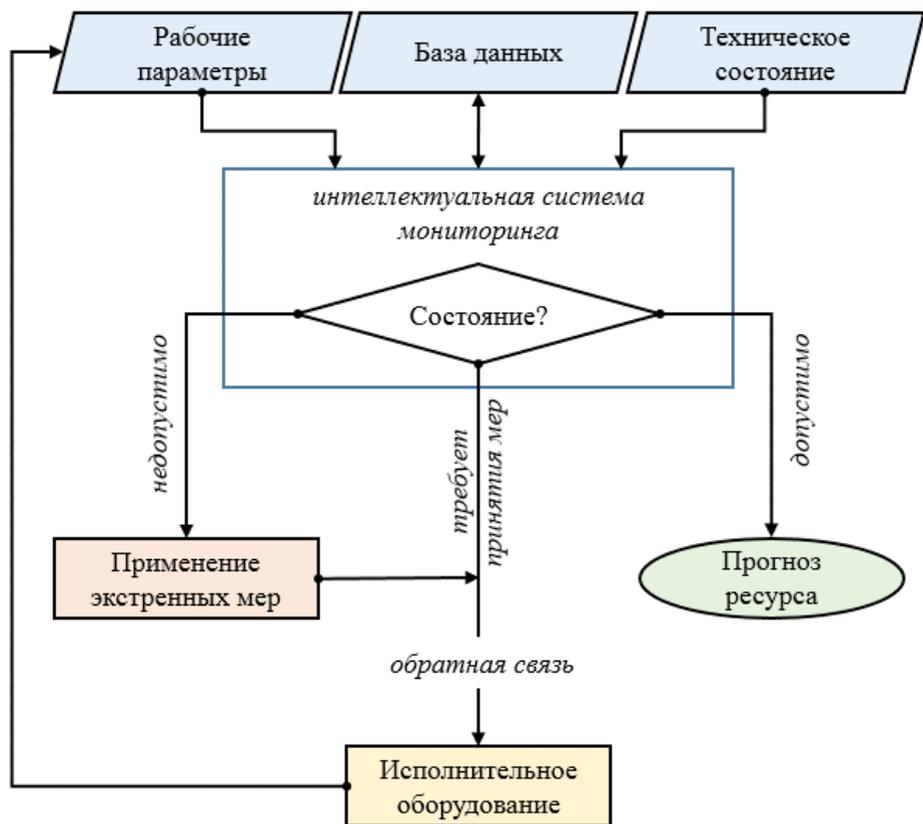


Рис. 9. Алгоритм функционирования интеллектуальной системы мониторинга

Заключение

В данной статье был рассмотрен пример определения индикаторных интервалов для одного из датчиков системы мониторинга при увеличении действия одной из расчетных нагрузок. При монтаже системы мониторинга на реальном объекте используется значительно большее количество различных типов датчиков, что позволяет получать более полную информацию об объекте. Для всех датчиков определяются индивидуальные индикаторные интервалы, которые затем объединяются в единые критерии безопасной эксплуатации оборудования.

Выводы

- 1) Для определения правильных мест установки датчиков системы мониторинга необходимо провести предварительный расчет. На основании проведенного расчета определяются места:
 - с наилучшим откликом на внешние воздействия. Наилучший отклик достигается в местах, где диапазон изменения измеряемого параметра наибольший;

- с однородным полем напряжений. В зонах концентрации напряжений или в зонах с неоднородным полем невозможно достоверно определить зависимость между показаниями тензодатчиков и НДС контролируемой зоны.

- 2) Для каждого датчика вводятся индивидуальные индикаторные интервалы, характеризующие фактическое техническое состояние объекта.
- 3) Для каждого индикаторного интервала регламентируется комплекс мер и действий для обслуживающего аппарат персонала. При наличии обратной связи эти действия могут носить автоматический характер, что предотвращает возникновение опасных состояний объекта.

Список использованной литературы

1. ГОСТ Р 53564-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Требования к системам мониторинга.
2. Бигус, Г.А., Даниев, Ю.Ф. Техническая диагностика опасных производственных объектов. – М. : Наука, 2010. – 415 с.
3. Ферапонто, в А.В. [и др.] Новые подходы к регулированию промышленной безопасности // Безопасность труда в промышленности. – 2013. – № 3. – С. 9–11.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ С ПОМОЩЬЮ ПРИБОРА «UNISCOPE»

Барат В.А., Елизаров С.В.

Введение

Одной из тенденций развития современных приборов акустической эмиссии (АЭ) является расширение их функциональных возможностей, автоматизация контроля и количественная оценка его результатов. Одной из дополнительных функций приборов АЭ-контроля, реализованной в автоматическом режиме, может быть проверка герметичности запорной арматуры.

Главным требованием, предъявляемым к запорной арматуре любого типа, является обеспечение герметичности. Герметичность по отношению к внешней среде обеспечивает защиту от попадания в атмосферу взрывоопасных, пожароопасных и токсичных веществ. В то же время, внутренняя герметичность арматуры гарантирует точное соблюдение технологического процесса и позволяет избежать потерь при транспортировке продукта потребителю.

Нарушение герметичности запорной арматуры возникает из-за дефектов конструктивных элементов арматуры, их износа, неполадок в работе запорного органа и нарушения уплотнений. Если дефектная арматура находится в эксплуатации, на входном и выходном патрубке создается разность давлений, при этом происходит истечение продукта (жидкости или газа) из имеющихся несплошностей. Малые размеры дефектов обуславливают турбулентный характер истечения продукта, даже при сравнительно небольших перепадах давления. Турбулентный поток создает акустический шум, который регистрируется акустическими преобразователями, установленными на корпусе арматуры.

Методика проверки герметичности предполагает обнаружение характерных течевых акустических сигналов, позволяющих установить факт утечки и оценку ее расхода на основании эмпирически установленной зависимости.

Проверка герметичности запорной арматуры реализована в двухканальном многофункциональном приборе «UNISCOPE» (ООО «ИТЕРЮНИС»). Она представляет собой автоматизированную методику контроля, и позволяет производить экспресс-проверку герметичности различных видов запорной арматуры подземной и наземной установки в различных условиях эксплуатации.

Экспериментальные исследования

Разработка методики проверки герметичности разрабатывалась на основании многочисленных экспериментальных данных, полученных при контроле запорной

арматуры в рамках проведения экспертизы промышленной безопасности оборудования газокompрессорных и нефтеперекачивающих станций, теплопроводов и теплоэлектроцентралей (рис. 1).

Были обследованы шаровые и конические краны, клиновые и шиберные задвижки, клапаны и дисковые затворы с проходными диаметрами от 50 до 1000 мм. Всего — более двухсот единиц запорной арматуры наземной и подземной установки.

В результате диагностирования арматуры были исследованы форма и спектр характерных «течевых» сигналов, определены требования к первичным преобразователям и измерительным каналам аппаратуры, выбраны схемы сбора данных, обеспечивающие максимальную чувствительность к обнаружению утечек.



Рис. 1. Объекты экспериментальных исследований

Одной из наиболее важных целей эксперимента было установление эмпирической зависимости между расходом утечки и параметрами акустического «течевого» сигнала. Схема эксперимента для установления данной зависимости изображена на рис.2. Его цель состояла в измерении расхода утечки независимым прямым методом и сопоставлении результатов с параметрами зарегистрированного акустического сигнала. На основании значений расходов утечек, параметров АЭ-сигналов и характеристик эксплуатации запорной арматуры была сформирована представительная выборка данных, для косвенного определения расхода рабочей среды через утечку по параметрам акустического сигнала.

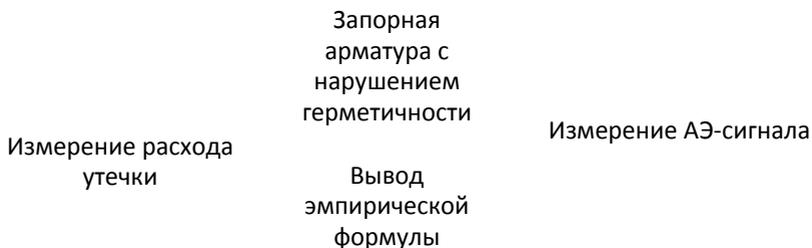


Рис. 2. Схема проведения экспериментальных исследований.

Существует несколько методов прямого измерения расхода утечек. Например, при гидроиспытаниях запорной арматуры в лабораторных условиях расход продукта через утечку оценивается путем сбора вытекающей жидкости и измерения ее количества. В условиях эксплуатации, в зависимости от технических условий, расход может быть измерен как по скорости истечения жидкости или газа из дренажных патрубков и свечей, так и манометрическим способом, по изменению давления на участке трубопровода за арматурой.

Расход утечки на основании измерения скорости истечения газа проводится по формуле (1), где U – скорость истечения газа, F – площадь патрубка, ρ – плотность вытекающего газа:

$$G = F \cdot U \cdot \rho \quad (1).$$

При манометрическом методе оценки расхода газа через утечку, дефект, вызвавший негерметичность, рассматривается как турбулентный пневматический дроссель (рис. 3).

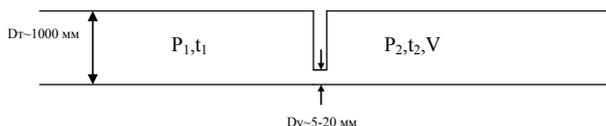


Рис. 3. Модель негерметичности запорной арматуры

$$\alpha = \frac{V}{RT_1} \ln \frac{P_1}{P_1 - P_2}, \quad G = \alpha \sqrt{\frac{2}{RT}} P_1 (P_1 - P_2) \quad (2, 3).$$

Поскольку размеры дефекта, как правило, неизвестны, расход G определяется на основании эмпирического коэффициента проводимости дросселя α , по формулам (2) и (3), где P_1 и P_2 – давление на входном и выходном патрубках, T – температура газа, V – объем контура со стороны выходного патрубка, t_1 время нарастания давления до P_1 , R – универсальная газовая постоянная.

Предложенные прямые схемы измерения позволяют достаточно точно определить значения расхода рабочей среды через утечку, но следует отметить также ряд их существенных недостатков. Во-первых, прецизионные методы измерений предполагают использование прецизионных измерительных приборов – манометров, термометров и анемометров, которые не всегда могут быть смонтированы на оборудовании в штатном режиме эксплуатации. Во-вторых, сам процесс прямых измерений может быть затруднен из-за необходимости слива или стравливания дополнительных объемов нефти или газа. Кроме того, точные прямые методы измерения расхода могут требовать больших временных затрат. Например, из-за медленного роста давления, время измерения расхода малых утечек манометрическим способом может достигать десяти – двадцати часов.

Оценка расхода утечки по эмпирической формуле, на основании свойств акустического сигнала является косвенной и менее точной, но с ее помощью можно получить экспресс-оценку величины утечки, погрешность которой позволит определить класс герметичности запорной арматуры, и принять решение о возможности дальней-

шей эксплуатации. Время измерения расхода утечки акустическим методом не превышает 15 минут.

Экспериментальное исследование герметичности запорной арматуры при контроле АВО газа

Блок аппаратов воздушного охлаждения (АВО) газа является одним из основных объектов компрессорной станции. Он предназначен для охлаждения газа, необходимого для обеспечения работы магистральных газопроводов.

Каждый аппарат состоит из горизонтально расположенных трубных секций, составленных из оребренных биметаллических труб. Секции монтируются на металлической конструкции – трубной доске. Привод колеса вентилятора размещается на отдельной раме. Колесо вентилятора, вращаясь в полости коллектора, прогоняет воздух через межтрубное пространство секций, охлаждая продукт.



Рис. 4. Секция АВО газа

На входном и выходном коллекторах АВО установлены шаровые краны, предназначенные для отсечения агрегата при выключении системы охлаждения. Для проверки герметичности запорных кранов АВО газа измерялась амплитуда сигнала акустической эмиссии при перепаде давления на закрытом затворе крана. Факт утечки устанавливался по превышению амплитудой АЭ-сигнала фонового значения, и по характерному виду акустического «течевого» сигнала.

Работы по проверке герметичности кранов были совмещены со стандартной процедурой АЭ-контроля АВО газа и включали следующие стадии: измерение фонового шума при открытых входном и выходном кранах; закрытие кранов, стравливание газа через свечу; измерение скорости истечения газа через свечу, для проверки герметичности кранов; двухступенчатый подъем давления в контуре АВО с выдержками в течение 30 минут; выравнивание давления открытием одного из кранов.

Изменение характера «течевого» сигнала при изменении давления в контуре АВО газа является важным диагностическим признаком, который может быть использо-

ван, например, для определения вида негерметичности. В случае внутренней негерметичности (негерметичности по затвору) амплитуда течевого АЭ-сигнала будет падать, т.к. перепад давления на затворе уменьшается. Если утечка происходит во внешнюю среду, то при подъеме давления уровень «течевого» сигнала будет увеличиваться.

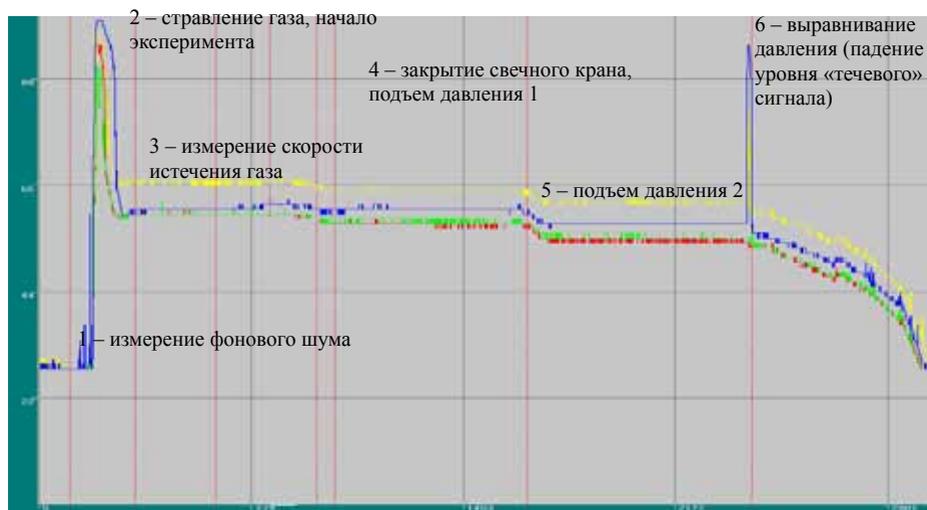


Рис. 5. Изменение среднего значения амплитуды АЭ-сигнала на различных стадиях

На рис. 5 показано изменение амплитуды АЭ-сигналов, соответствующих течам, на всех стадиях эксперимента. На первом этапе, при открытых входном и выходном кранах, фоновый шум равен 28дБ, при стравливании газа через свечу амплитуда АЭ-сигналов достигает максимального значения около 100 дБ. После стравливания газа, в случае герметичности запорных кранов, уровень регистрируемых АЭ-сигналов возвращается к фоновым значениям. Если герметичность нарушена, то, как в случае рис 5, регистрируется высокий и постоянный уровень АЭ-сигналов. При подъеме давления в контуре АВО газа уровень АЭ-сигнала падает, следовательно, в данном случае, имеет место нарушение герметичности по затвору.

Эмпирическая оценка расхода утечки

Эмпирическая оценка расхода строится в аналитической форме, в виде регрессионного уравнения (4):

$$r = f(A_p, p, D, type) \quad (4).$$

Регрессионное уравнение – статистическая модель, устанавливающая связь между зависимой переменной (расходом, r) и несколькими независимыми регрессионными переменными (параметрами АЭ-сигнала A_p , перепадом давлений на затворе арматуры Δp , проходным диаметром D , типом арматуры $type$).

Регрессионная формула определяется при помощи аппроксимации зависимости между известными значениями расходов утечек и некоторым функционалом, построенным на основании выборочных данных, включающим характеристики «течевых» аку-

стических сигналов и параметры запорной арматуры. При правильном выборе параметров модели, погрешность оценки оказывается низкой, а ее достоверность — высокой.

В данной работе предложена модель множественной линейной регрессии, обеспечивающая для расходов от 1 до 300 л/мин среднюю погрешность оценки расхода утечки порядка 20%.

Режим проверки герметичности запорной арматуры прибора UNISCOPE

Методика проверки герметичности запорной арматуры реализована в портативном многофункциональном приборе UNISCOPE. Процедура включает три основных этапа — задание характеристик запорной арматуры, сбор данных, анализ данных с целью установления факта утечки и оценки ее расхода. По желанию оператора, для проверки работоспособности прибора может быть дополнительно проведена самокалибровка измерительных каналов.

Диалоговое окно «установка параметров» показано на рис. 6б, оно позволяет задать тип запорной арматуры, способ ее установки, типоразмер и параметры эксплуатации.

Эскизный чертеж исследуемой арматуры отображается в форме сбора данных, (рис. 6в) на корпусе арматуры обозначаются точки измерения. Сбор данных производится путем последовательной перестановки ПАЭ в точки, обозначенные на схеме. Протокол сбора данных отображается в таблице, расположенной в нижней части диалогового окна. Поскольку функция проверки герметичности реализуется на базе двухканального прибора UNISCOPE, измерения могут проводиться как в одноканальном, так и в двухканальном режиме.

Обработка измерительных данных происходит автоматически. Алгоритм включает следующие этапы — поиск характерных «течевых» сигналов, расчет информативных параметров сигнала, оценка расхода при помощи регрессионной модели.

Результатом анализа является:

- установление герметичности / негерметичности арматуры;
- оценка расхода утечки;
- определение класса герметичности запорной арматуры (по ГОСТ или отраслевым стандартам);
- рекомендации о возможности дальнейшей эксплуатации арматуры.

Программа, реализующая функцию проверки герметичности, имеет дружелюбный, интуитивно понятный интерфейс и не требует предварительного обучения оператора.

Заключение

В данной работе описана автоматизированная методика проверки герметичности запорной арматуры, реализованная на базе портативного многофункционального прибора UNISCOPE. Прибор позволяет обнаружить утечки запорной арматуры величиной от 1 л/мин. Объектом контроля может быть любая запорная арматура (краны, задвижки, клапаны, дисковые затворы) с проходным диаметром от 50 до 1000 мм.

Методика обработки данных позволяет оценить величину утечки жидкости или газа с точностью порядка 20%.

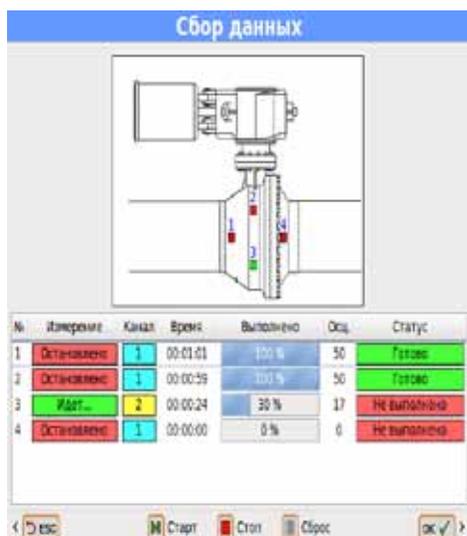
Также возможна проверка герметичности арматуры подземной установки, чувствительность к обнаружению утечек, в этом случае, составляет не менее 5л/мин.



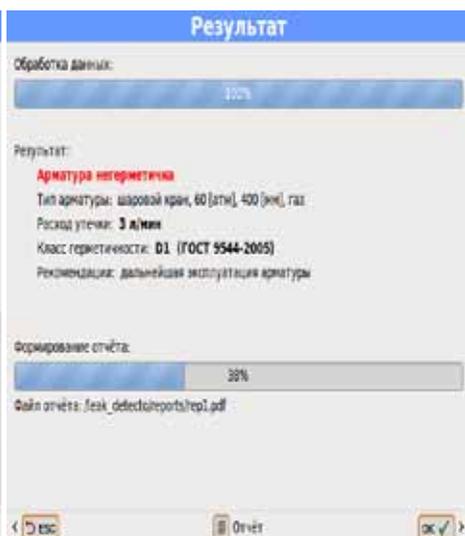
а.



б.



в.



г.

Рис. 6. Интерфейс программы проверки герметичности

Список использованной литературы

1. Елизаров, С.В., Алякритский, А.Л., Кольцов, В.Г., Барат, В.А., Ростовцев, М.Ю. Новый портативный инструмент «UNISCOPE» для неразрушающего контроля // Химическая техника. – 2011. – № 8. – С. 34–35.
2. Запунный, А.И., Фельдман, Л.С., Рогаль, В.Ф. Контроль герметичности конструкции. – Киев : Изд-во «Техника», 1976.
3. Барабанов, В. Г. Исследование временных зависимостей схемы контроля герметичности по способу сравнения // Известия ВолгГТУ № 1 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2004. – С. 17–19.

