

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И ОЦЕНКА РИСКА АВАРИИ

Модератор: Иванов В.И., ЗАО «НИИИИИ МНПО «Спектр»

Круглый стол «Техническая диагностика и оценка риска аварии» был проведен 02.03.2016 г. с 15 по 18 часов в соответствии с деловой программой Форума "Территория NDT 2016". На заседании присутствовало 30÷35 специалистов из 22 организаций. Было запланировано 12 докладов, состоялось 10 докладов.

На круглом столе обсуждались следующие проблемы:

- Анализ состояния и перспектив развития общих подходов к техническому диагностированию с целью использования результатов технического диагностирования для оценки промышленной безопасности;
- Использование результатов неразрушающего контроля при оценке риска аварии;
- Методики использования моделей механики разрушения для оценки риска;
- Возможность и ограничения использования статистики аварий при оценке риска;
- Влияние состояния материала объекта на его безопасность;
- Требования к показателям неразрушающего контроля, используемым при оценке вероятности аварии.

Из докладов участников видно, что за последнее время развиты методики неразрушающего контроля и технического диагностирования (НК-ТД), которые позволяют, используя информацию о дефектности объектов и состояния конструкционных материалов, оценить вероятность разрушения объекта и адекватно оценить риск аварии. С другой стороны, требование оценки риска аварии инициирует ускорение развития новых подходов при использовании НК и ТД.

Во нормативных и методических документах, связанных с обеспечением промышленной безопасности, начиная с ФЗ от 21.07.1997 №116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», в качестве показателя промышленной безопасности используется величина риска аварии. Методы оценки риска начинают играть все большую роль и знание методик оценки риска, их достоинств и ограничений становится важным фактором в адекватной оценке безопасности.

Действующие методики анализа риска в качестве основных операций используют показатели статистики аварий, выбор сценариев развития аварий, оценку возможных последствий по рассматриваемым сценариям. Однако количественная оценка риска с использованием принятых методик в настоящее время затруднительна. Современные требования промышленной безопасности не могут быть обеспечены без данных о реальном состоянии технических устройств, которые можно получить только при выполнении комплекса работ по ТД, НК, использовании расчетных моделей механики разрушения (МР), анализа коррозии и учета состояния диагностируемых материалов.

Доклад Чл.-корр. РАН Н.А. Махутова и к.т.н. М.М.Гаденина (ИМАШ РАН) «Штатное и аварийное диагностирование состояния опасных объектов» посвящен анализу фундаментальной проблемы достижения опасных, предельных состояний объектов техносферы, приводящих к возникновению чрезвычайных ситуаций. Для разрешения этих проблем необходима разработка обобщенных моделей сложных технических систем с учетом их взаимодействия с окружающей средой, операторами, персоналом и населением. На их основе может быть выполнен анализ соответствующих сценариев возникновения и развития аварий и катастроф. Такие модели характеризуются многоуровневой структурой, затрагивающей как крупномасштабные планетарные, глобальные и национальные, так и региональные, местные, объектовые и локальные аспекты безопасности.

Информационным источником для анализа условий возникновения ЧС по указанным моделям являются адекватные данные многоуровневого комплексного мониторинга рассматриваемых объектов и территорий, в связи с чем одной из важных научных задач в проблеме обеспечения безопасности является развитие методов и создание систем комплексной диагностики и мониторинга как штатно функционирующих, так и находящихся

в аварийных ситуациях и поврежденных состояниях технических систем.

В докладе представлена структура диагностики и мониторинга состояния объектов техносферы и рисков аварийных и катастрофических ситуаций, общая структура обеспечения работоспособности объектов техносферы. Описаны традиционный и новый алгоритмы определения и обеспечения защищенности опасных объектов. Приведены методы расчетов, критериев и параметров прочности и ресурса для обоснования живучести и безопасности объектов техносферы в условиях эксплуатационных режимов нагружения. Рассмотрены возможности методов диагностики и мониторинга параметров состояния объектов техносферы.

Из доклада следует, что рассмотрение целей, роли и места технической диагностики и мониторинга состояния объектов техносферы требуется увязывать с одной из важнейших задач – обеспечением их защищенности от аварий и катастроф с тяжелыми последствиями на базе критериев риска. Это является основой постановки новой фундаментальной задачи – мониторинга рисков. Решение такой задачи возможно в ближайшей перспективе на основе совместных фундаментальных научных исследований и прикладных разработок РАН, МЧС России, Минэнерго России, Ростехнадзора.

В докладе В.И. Иванов (НИИИИ МНПО «Спектр»), В.В. Мусатов, А.А. Сазонов (ЗАО «ГИАП-ДИСТцентр») «Анализ риска аварии с использованием методов неразрушающего контроля и технического диагностирования» показано, что адекватные оценки техногенной безопасности с использованием риск-ориентированных подходов невозможны без выполнения технического диагностирования. Участие неразрушающего контроля (НК) в оценке риска позволяет выполнить количественное определение, а в некоторых случаях и расчет риска аварии и придает гигантский импульс для использования новейших достижений НК и его дальнейшего развития.

Для оценки риска аварии R предложена новая формула:

$$R = A \cap P_f(t) \cap (E \cap L),$$

где A – включает в себя пред-эксплуатационные действия и оценки риска аварии в процессе проектирования и изготовления объекта; $P_f(t)$ – вероятность аварии; E – отображение процесса развития аварии (escalation); L – величина потерь в результате аварии. Знак \cap представляет логическую операцию умножения (произведения) классов.

Показано, что использование существующих методик оценки риска дает существенный разброс результатов, достигающий 2-х ÷ 4-х порядков величины. Используемые методики оценки риска имеют существенное принципиальное ограничение, связанное с применением данных статистики аварий, которую либо трудно, либо невозможно установить. Кроме того, статистика аварий содержит данные о свершившихся событиях. Тогда как более важное значение имеет информация о текущем техническом состоянии объекта. Адекватную оценку риска аварии можно выполнить только с использованием информации о техническом состоянии объекта, получаемой с применения комплекса методов Неразрушающего Контроля и Технического Диагностирования (НК→ТД→ R).

Применяемые методы оценки риска повышают культуру эксплуатации и способствуют уменьшению вероятности аварии. Однако они имеют большие неопределенности, что существенно ограничивают возможность количественной оценки риска аварии.

Новейшие разработки в области НК и ТД позволяют извлечь существенно больше информации о дефектности объектов и оценить влияние обнаруженных и необнаруженных дефектов на вероятность аварии. Это требует использования методик оценки промышленной безопасности, которые ранее практически не использовались (например, калибровочные диаграммы $a \rightarrow \hat{a}$, вероятности обнаружения дефектов ВОД-PoD, информационные диаграммы - ROC, показатели достоверности). Использование методов НК→ТД улучшает точность оценки риска на несколько порядков величины. Это позволяет при оценке промышленной безопасности придать этому процессу статус измерения промышленной безопасности.

Полученные в последнее время зависимости вероятности аварии от размера дефекта, рассчитанные с использованием моделей вероятностной механики разрушения (ВМР), позволяют, используя результаты неразрушающего контроля, непосредственно оценить вероятность разрушения конкретного объекта. В докладе показаны возможности использования показателей точности измерения параметров дефектов и вероятностей их обнаружения, характеризующих качество НК, уточнить расчеты вероятности разрушения объекта.

Тихонов Д.С. (ООО «НПЦ «ЭХО+») в докладе «Методики автоматизированной ультразвуковой диагностики с новыми информационными критериями оценки качества сварных соединений» рассмотрел возможность перехода от старых критериев оценки качества сварных соединений, таких как эквивалентная площадь - $S_{экв}$, количество отражателей зафиксированных на заданном уровне чувствительности (количество точечных дефектов) - Nt , условные протяжённость - $L_{усл}$ и высота - $H_{усл}$ и прочие параметры, к новым информационным критериям дефектности при использовании информации, получаемых при выполнении современного автоматизированного УЗК.

Трёхмерная визуализация областей контроля, получаемая с использованием современных когерентных методов восстановления изображений, представляет возможность получить новые информационные параметры. Такими параметрами являются габаритные размеры дефектов, профиль внутренней поверхности шва, а также визуальный, приближенный к оптическому, образ дефекта, получаемый за счёт использования нескольких схем прозвучивания с применением технологии фазированных антенных решеток. Приводятся примеры действующих методик с размерными критериями по новым нормам оценки качества.

При контроле большинства элементов атомных электростанций в настоящее время используются аттестованные методики с возможностью определения размеров дефектов в локальных областях контроля. К объектам контроля относятся аустенитные сварные соединения (СС) малого диаметра Ду200-Ду400, аустенитные СС большой толщины, разнородные СС приварки к корпусу парогенератора ВВЭР-440, роторов паровых турбин. Большой объем контроля выполнен на КоАЭС и НВАЭС.

Новые технологии и методики УЗК позволяют получить большой объем информации, включая:

- Дифракционные размеры дефекта по всем размерным проекциям;
- Построение профиля дефекта (изменение высоты вдоль оси шва);
- Ориентация габаритного параллелепипеда дефекта;
- Количество и распределение этих параллелепипедов по всей области контроля для всех несплошностей выше уровня структурных шумов;
- Профиль сварного соединения (толщинометрия под валиком усиления);
- Учет изменений состояния (результатов мониторинга).

Сигнальные контуры дефекта по всем трем осям СК позволяют сформировать 3D-контур (габаритный параллелепипед) дефектной области с разрешающей способностью 1-2 мм. Ориентация 3D-контура дефекта может быть полезна при использовании информации о вероятной дефектной ситуации в данном объекте контроля. Автоматическое оконтуривание на максимальном уровне чувствительности может давать множество отражателей, массив размеров которых может быть передан для программы расчета прочности.

При контроле используются разнообразные сканеры. Разработаны специальные схемы контроля с использованием антенных решёток и сканеров. Точность измерений дифракционных размеров подтверждена на эталонных отражателях и вскрытием более 500 реальных дефектов. Погрешность измерения высоты дефектов в диапазоне измерения 1-12 мм составляет 1,9 мм.

Применение описанных средств УЗК позволяет выполнить:

1. Формирование информационного массива данных контроля для программ расчёта остаточной прочности.

2. Расчёт прочности конкретного объекта.

3. Срок очередного обследования (индивидуальная программа контроля).

В докладе Е. П. Лукьянов, А. А. Овчинников, К. О. Аллогулова, П. В. Божик (ЗАО «ГИАП-ДИСТцентр») «Практика применения RBI на территории РФ» рассмотрены особенности использования риск-ориентированного подхода при оценке промышленной безопасности на предприятиях подконтрольных Ростехнадзору. Отмечены недостатки применяемой в РФ методики технического диагностирования, ориентированной на планово-предупредительный ремонт:

- Фактическое состояние оборудования не влияет на сроки и объемы проведения технического диагностирования
- Отсутствует системный подход к проведению неразрушающего контроля
- Большое влияние экспертного мнения на результаты диагностирования
- Отсутствует связь технического диагностирования с вероятностью отказа и последствиями, вызвавшими этот отказ.

Все это является аргументом необходимости использования риск-ориентированных подходов. Перечислены нормативные документы, регламентирующие необходимость использования анализа рисков, а также документы, описывающие методику оценки риска. Показано, что в указанных документах присутствует теоретическое описание методов оценки риска, практические рекомендации, а также необходимые справочные данные.

Однако можно отметить общие недостатки:

- Отсутствует связь анализа рисков с техническим диагностированием.
- Отсутствует анализ причин возникновения аварии.
- Риск оценивается только социальными показателями.

Проведен анализ наиболее распространенного документа, описывающего методику проведения технического диагностирования с учетом анализа рисков (Risk-Based Inspection) - стандарт Американского института нефти API 581. Показано, что фактор повреждения, используемые в данном документе в качестве основного элемента риска, отражает относительный уровень технического обслуживания, базирующийся на статистических характеристиках. Факторы повреждения не предназначены для отражения текущей вероятности отказа для целей анализа надежности.

Авторы доклада констатируют, что допустимый риск, используемый в качестве уровня приемлемого риска, устанавливается в целях планирования выполнения экспертных работ. Допустимый риск определяет предприятие-владелец оборудования на основании тяжести последствий аварии (или отказа оборудования) и затрат, необходимых для ее ликвидации. В качестве одного из основных инструментов риск-анализа является матрица рисков, применяемая во многих документах, а также в API 581.

Показано, что препятствиями в применении методики технического диагностирования на основе анализа рисков являются:

- Трудоемкая адаптация нормативной документальной базы, идентификации элементов, типов материалов и пр.
- Трудоемкость и сложность расчетов
- Нехватка квалифицированного персонала, занятого анализом рисков
- Не выполнение рекомендованных мероприятий по снижению риска
- Отсутствие нормативной базы документов, устанавливающих ответственность за соблюдение методики.

Авторы формулируют следующие необходимые условия для применения методик технического диагностирования на основе анализа рисков:

- Модернизация системы нормативных документов, в том числе по техническому диагностированию
- Подготовка квалифицированного персонала по анализу рисков
- Достоверный и централизованный сбор статистики отказов и причин, вызвавших отказы

- ПО адаптированное под специфику предприятия
- Людские ресурсы для сбора и внесения данных в ПО.

Доклад А.А. Сазонов, В.А. Колпаков, Е.П. Лукьянов, Л. В. Ремезкова, Н. А. Лукьяненко (ЗАО «ГИАП-ДИСТцентр») «Причины разрушения теплообменных трубок, изготовленных из латуни, в аппаратах воздушного охлаждения установок первичной переработки нефти» посвящен исследованию причин аварий теплообменных аппаратов нефтеперерабатывающих заводов. Установлено, что основными факторами причин отказов являются отложения в элементах теплообменных аппаратов, включая отложения на трубной решетке аппарата воздушного охлаждения со стороны входа парогазовой смеси на одном из НПЗ, отложения осадка на трубной решетке и теплообменных трубках АВО со стороны входа парогазовой смеси и стороны, противоположной входу/выходу и ряд других причин.

Металлографические исследования материала латунных трубок со стороны технологической среды выявили крупные язвы, заполненные, губчатой медью, что приводит к пробочному обесцинкованию, микрорастрескиванию внутренней поверхности латунных трубок.

На основании проведенных исследований авторы делают следующие выводы:

- Обнаруженные при обследовании аппаратов воздушного охлаждения установки АВТ белые отложения представляют собой смесь серосодержащих сложных углеводов. Отсутствие белых отложений в АВО, где в качестве нейтрализатора применяют аммиачную воду, свидетельствует о том, что в реакциях термодеструкции продуктов взаимодействия сероводорода с поглотителями на основе альдегида принимают участие компоненты органических нейтрализатора и ингибитора.

- Разрушение отрезков теплообменных латунных трубок, выступающих над трубной решеткой, трубных решеток и крышек АВО в месте входа парогазовой смеси обусловлено несколькими причинами: это механическое разрушение металла за счет удара парогазовой среды, а также результат электрохимической коррозии в кислой среде. Отсутствие разрушения может быть обусловлено снижением ударного воздействия парогазовой среды за счет изменения трассы и диаметра трубопровода подвода парогазовой смеси в АВО.

- Скорость разрушения конденсаторных латунных трубок по длине обусловлена электрохимической коррозией в кислой среде, представляющей собой растворы сероводородной и соляной кислот. Наравне с общей коррозией протекает специфический вид разрушения – обесцинкование латуни.

В докладе Ханухов Х.М., Алипов А.В., Червертухин Н.В., Чернобров А.Р. (НПК «ИзоТермик») «Особенности мониторинга технического состояния изотермических резервуаров для хранения сжиженных газов» проведен анализ риска аварий изотермических резервуаров. Было установлено, что наиболее опасный из всех возможных сценариев аварий – разрушение резервуара с купольными покрытием от повышения внутреннего давления при отказе компрессоров, либо предохранительных клапанов. Для предупреждения аварии должна использоваться система акустико-эмиссионного мониторинга (САЭМ).

Установка САЭМ на внутреннем резервуаре при контроле двустенного ИР, выполненного в виде открытого стакана без стационарной крыши, с усиленным корпусом по мнению авторов лишена смысла поскольку применен повышенный коэффициент надежности $\gamma_n = 1,2$. При качественно выполненном монтаже резервуара и квалифицированном контроле качества сварных соединений причин для роста усталостных трещин в корпусе внутреннего резервуара нет. Корпус внутреннего резервуара, выполненный без грубых дефектов, способен выдержать десятки тысяч циклов полного налива-слива жидкого аммиака.

На основе анализа риска и с учетом расчета напряженного состояния наружного резервуара при повышении давления авторы считают целесообразным установку преобразователей САЭМ на внешней поверхности наружного резервуара. Как в процессе эксплуатации ИР, так и при аварийном повышении давления большая часть поверхности наружной стенки, кроме узких зон высотой по 0,5 м от днища и крыши, находится в слабо

напряженном состоянии. Из этого следует, что контролировать нужно только узкие зоны сопряжения стенки с днищем и крышей.

Причина опасного состояния для наружного резервуара – развитие пластических деформаций на линии стыка крыши (днища) и стенки при повышении давления. Поэтому для идентификации источника эмиссии в этом случае достаточно зонной локации, что вполне обеспечивается одним слоем ПАЭ по высоте. Установка ПАЭ на наружной крыше (также, как и на днище в межстенном пространстве) не требуется.

Доклад В. В. Мусатов, А. Н. Сазонов, А. А. Овчинников, П. В. Божик (ЗАО «ГИАП-ДИСТцентр») «Техническое диагностирование в рамках систем контроля технических устройств» посвящен рассмотрению различных аспектов ТД. В первую очередь проанализированы действующие системы контроля и диагностики технических устройств, включая системы документов ППР (ФНИП, ПБ, РД, ГОСТ, ОСТ и др.), отечественная методология на основе анализа рисков (РД 03-418-01 и др.), зарубежная методология по анализу рисков RBI, RCM (API 581, API 580 и др.), системы мониторинга (вибродиагностика динамического оборудования, АЭ-контроль сосудов, трубопроводов и резервуаров).

Рассмотрены подходы, используемые в ТД, включая: системный подход к проведению ТД, с учетом всех факторов, влияющих на безопасную эксплуатацию технических устройств; индивидуальный подход к ТД конкретного технического устройства (ТУ), в зависимости от степени опасности обрабатываемых в нем сред и фактического состояния ТУ; применение современных подходов и методик при назначении объема и методов контроля технических устройств; применение наиболее современных средств контроля, для выявления дефектов.

Проработаны алгоритмы выполнения ТД, включая проведение ранжирования технических устройств по их фактическому техническому состоянию и степени опасности; определение зон и объема технического диагностирования технических устройств технологических установок; проведение неразрушающего и разрушающего контроля; анализ результатов ТД и разработка компенсирующих мероприятий; актуализация информационной базы результатов контроля технического состояния объектов. Приведена форма матрицы выбора уровня ТД. Уровень ТД отображает объем и периодичность контроля за состоянием ТУ

В качестве факторов, определяющих ранг ТУ и, соответственно уровень ТД выбраны конструктивные особенности ТУ; параметры эксплуатации ТУ; наличие агрессивных компонентов технологических сред, воздействующих на ТУ; фактор коррозионного воздействия технологической среды и виды коррозии, вызываемые обрабатываемыми средами в ТУ и условиями эксплуатации;

Отмечены фактор продолжительности эксплуатации; фактор выявленных дефектов; возможные последствия, вызванные наличием дефекта; склонность к развитию дефектов. С учетом этих факторов определяется периодичность и объем ТД.

В докладе Т.Б. Петерсен, В.В. Шемякин, (ООО ДИАПАК) «Проблемы оценки рисков аварий сложных уникальных объектов» отмечено, что увеличение в последние годы производственных мощностей промышленных объектов, объема содержащихся в них опасных веществ, эксплуатация вновь введенных уникальных ОПО, с одной стороны, и изношенных объектов, отработавших назначенный срок службы, с другой, приводят к значительному повышению риска аварий и фокусируют внимание на задаче оценки риска и, в частности, оценке вероятности отказа.

Рассмотрены две составляющие вероятности отказа: P_{gen} и $P(t)$, первая представляет собой характерную относительную частоту отказа, которую получают статистически, и используют в качестве начальной расчетной вероятности, например, в дереве отказов/событий при анализе аварийных сценариев. Вторая – это вероятность отказа, изменяющаяся со временем в результате разрушения/ деградации материала объекта. Оценка P_{gen} представляет особую сложность в случае малой статистики, например, для уникальных объектов. Задача определения вероятности $P(t)$ образования и накопления начальных дефектов и оценка времени их роста до размера сквозных макродефектов, приводящих к выбросу опасного вещества, как правило, сводится к формальному решению, не связанному с фактическим

состоянием конкретного объекта. Другой фактор, затрудняющий оценку вероятности отказа, связан с недостаточной эффективностью (в терминах технологии RBI) используемых методов неразрушающего контроля/мониторинга.

На примере опыта АЭ мониторинга химического реактора продемонстрированы новые функциональные возможности АЭ метода, который, может применяться не только в качестве метода контроля целостности объекта, но также для диагностирования его работоспособности. Для данного уникального объекта событие отказа имеет особенность, поскольку включает в себя не только протечку/выброс содержимого, но также останов в результате временной потери работоспособности вспомогательных механизмов.

Дубов А.А. (ООО «Энергодиагностика») «Мониторинг рисков на основе ранней диагностики состояния металла оборудования и конструкций в зонах концентрации напряжений – источников развития повреждений» установил, что в настоящее время при оценке рисков в эксплуатации опасных производственных объектов (ОПО) в основном используется детерминированный подход. Оценка вероятности аварийных ситуаций осуществляется на основе имеющейся статистики повреждений, которая накопилась за прошедший период эксплуатации ОПО. Такой подход является несовершенным и недостаточно объективным, так как оценка рисков делается на будущий период времени, когда техническое состояние ОПО может существенно измениться и усталостные повреждения отдельных узлов оборудования могут произойти (и, как правило, происходят) в тех зонах, которые не совпадают с расчетными.

В докладе рассматривается возможность оценки рисков ОПО на основе ранней диагностики состояния металла оборудования и конструкций в зонах концентрации напряжений – источников развития повреждений

Автор утверждает, что основными источниками повреждений оборудования и конструкций являются зоны концентрации напряжений (ЗКН), в которых процессы коррозии, усталости и ползучести металла развиваются наиболее интенсивно. ЗКН – это не только заранее известные области, где особенности конструкции создают различные условия для распределения напряжений, создаваемые внешней рабочей нагрузкой, но и случайно расположенные области, где в силу начальной неоднородности структуры металла в сочетании с нерасчетными дополнительными рабочими нагрузками возникли большие деформации.

В докладе отмечено, что при оценке показателя вероятности возникновения опасных ситуаций (повреждений, отказов, аварий) в настоящее время используется «вероятностный детерминированный подход», основанный на статистике уже случившихся повреждений и аварий. Применение методов ранней диагностики оборудования и конструкций, к которым относится метод МПМ, позволит выполнять оценку рисков более определенной.

Доклад В.Н. Костюкова, А.В. Костюкова, С.Н. Бойченко. (НПЦ "Динамика") «Технологии «Больших данных» в системах мониторинга состояния оборудования в реальном времени» зачитал д-р техн. наук, профессор А.П. Науменко. В докладе отмечено, что при мониторинге технического состояния объектов, в том числе при вибромониторинге, возникает проблема «Больших данных». Большие данные характеризуются: большим объемом информации; ее разнообразием и необходимостью быстрой обработки. Современные автоматические системы мониторинга и диагностики технического состояния оборудования генерируют гигантские объемы данных. Так 30 установок Омского НПЗ генерируют 54 ТБ в год только первичной измерительной информации. Возникает проблема их сохранения без существенных потерь информации при обеспечении быстрого доступа.

Решением этой проблемы является применение сжатия данных. В НПЦ «Динамика» разработаны форматы файлов для представления сигналов и трендов на основе XML. Важной целью сохранения данных систем мониторинга является обеспечение проведения научных исследований.

По результатам проведенного круглого стола можно констатировать, и это отражено почти во всех зачитанных докладах, что существующие методы оценки риска аварии

обладают низкой достоверностью. Это приводит к большим разбросам в оценке риска аварии и дискредитирует риск-ориентированные подходы. Низкая достоверность связана во многом с несовершенством методических документов. Но главным недостатком является отсутствие учета технического состояния объекта, риск аварии которого определяется. Информация, получаемая при выполнении технического диагностирования, позволит на несколько порядков увеличить точность оценки риска аварии и перейти в ближайшем будущем от качественной оценки риска аварии к количественному расчету риска.

Отчет предоставил: Иванов Валерий Иванович, д-р техн. наук, проф. ЗАО «НИИИИИ МНПО «Спектр», Москва