

Обоснование безопасности промышленных объектов по критериям рисков и ранней диагностики

Н.А. Махутов, гл. научный сотр.¹, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор²

Н.В. Новосёлов, ректор, д-р техн. наук, профессор²

В.Н. Пермяков, заведующий кафедрой, д-р техн. наук, профессор²

В.М. Спасибов, советник ректора, д-р техн. наук, профессор²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН)»

² Тюменский государственный нефтегазовый университет

e-mail: v.n.permyakov@mail.ru

Ключевые слова:

безопасность,
риск,
разрушение,
ущерб,
повреждения,
диагностика,
акустическая эмиссия,
тензочувствительные покрытия.

Рассматриваются комплексные вопросы безопасности и рисков объектов техносферы. Отмечается важность одновременного учета техногенных, природных и антропогенных факторов инициирования и развития чрезвычайных ситуаций. Для потенциально опасных критически и стратегически важных объектов нефтегазохимического комплекса особую актуальность приобретают проблемы многокритериальной ранней диагностики (с применением методов акустической эмиссии, хрупких тензочувствительных покрытий и аэрозолей). Такая диагностика позволяет предупредить аварии и катастрофы.

1. Постановка проблемы

Страны с высокоразвитой экономикой, к которым относится и Россия, характеризуются высокой концентрацией сложных технических объектов: ядерные, военные, нефтегазохимические объекты, гидротехнические сооружения, металлургия, трубопроводный транспорт и т.п. Дальнейшая индустриализация сопровождается расширением спектра опасностей, вызовов, угроз, кризисов, чрезвычайных ситуаций и катастроф, увеличением размера ущерба, причиняемого человечеству, обществу, государству и среде жизнедеятельности. В последние десятилетия резко возросли риски природно-техногенных катастроф. Наибольший ущерб создают опасные природные процессы (землетрясения, вулканические извержения, ураганы, затопления), опасные процессы в техногенной сфере и опасные антропогенные воздействия на природную среду и инфраструктуру, катастрофические ситуации на потенциально опасных объектах, связанные с природными, техногенными и антропогенными факторами. К потенциально опасным, стратегически и критически важным для национальной безопасности объектам инфраструктуры

относятся уникальные объекты нефтегазохимического, энергетического, транспортного, оборонного и ракетно-космического комплексов.

В первом случае, с точки зрения природной безопасности, можно говорить только о снижении ущерба, так как полноценный прогноз и, тем более, предотвращение опасных природных явлений пока невозможны. Во втором случае риски техногенных катастроф не могут быть исключены полностью, но их можно минимизировать. В третьем случае речь идет о разработке теории, методов и критериев оценки и снижения роли человеческого фактора в возникновении чрезвычайных ситуаций.

В начале XXI в. промышленно развитые страны, в первую очередь Россия и США, в качестве одного из основных элементов государственной политики в области национальной безопасности выдвинули задачу защиты критически важных объектов от угроз и чрезвычайных ситуаций техногенного, природного и антропогенного характера, включая чрезвычайные ситуации, обусловленные террористическими действиями. Один из основных факторов повышения рисков в России и за рубежом связан с тем, что наи-

более опасные инфраструктуры и технические системы оказались размещенными в местах значительной концентрации населения и протекания опасных природных процессов. Вторым фактором рисков — сложные технические системы, обладающие высокой потенциальной опасностью для людей, техносферы и окружающей среды, в большинстве случаев создавались и создаются с использованием традиционных правил проектирования и простейших инженерных методов расчета и испытаний без количественного анализа безопасности по критериям рисков.

Применительно к нефтегазовому комплексу (НГК) задача минимизации рисков возникновения чрезвычайных ситуаций и катастроф исключительно важна.

2. Анализ рисков и чрезвычайных ситуаций и категорирование объектов

Универсальной количественной мерой при оценке вероятности возникновения и реализации неблагоприятных событий и процессов признаны риски. Эти подходы нашли свое выражение в принятых «Основах стратегического планирования в Российской Федерации» [1].

Опасные ситуации (включая чрезвычайные ситуации — ЧС: повреждения, отказы, аварии и катастрофы) возникают на различных стадиях жизненного цикла τ , наносят разномасштабный ущерб $U(\tau)$ операторам, объектам техносферы и окружающей среде. Этот ущерб $U_i(\tau)$ связан с вероятностью (P) возникновения различных указанных опасных ситуаций. Величины $U_i(\tau)$ и $P_i(\tau)$ в целом определяют интегральные риски $R_{и}(\tau)$ создания и функционирования объекта любого уровня опасности [2, 3]:

$$R_{и}(\tau) = \sum_i P_i(\tau) \cdot U_i(\tau). \quad (1)$$

Для критически и стратегически важных объектов эти риски $R_{и}(t)$ имеют стратегический уровень $R_{СИ}(t)$.

Обобщение большого числа информации о возникновении ЧС на опасных объектах инфраструктуры показало, что для выбора мер и средств, повышающих безопасность, исключительную важность имеет категорирование как самих объектов, так и возникающих чрезвычайных ситуаций [2, 4]. По результатам этого обобщения все виды опасных ситуаций для основных типов потенциально опасных объектов сведены в семь классов К1–К7 (рис. 1).

Классы катастроф характеризуются следующими параметрами:

- К1 — локальные опасные ситуации, возникающие в отдельных зонах объектов с ущербом $U_i(\tau)$ в пределах $10^4 \dots 10^5$ руб.;

- К2 — объектовые опасные ситуации, возникающие на отдельных участках объектов с ущербом $U_i(\tau)$ в пределах $10^5 \dots 10^6$ руб.;
- К3 — местные опасные и чрезвычайные ситуации, возникающие на объектах с загрязнением окружающей природной среды и ущербом $U_i(\tau)$ $10^6 \dots 10^7$ руб. и более;
- К4 — региональные чрезвычайные ситуации, возникающие на объектах, с угрозой жизни и здоровью операторов, персонала и населения, а также окружающей среде и ущербом $U_i(\tau)$ $10^7 \dots 10^8$ руб. и более;
- К5 — национальные чрезвычайные ситуации, возникающие в опасных зонах, с разрушением объектов, пожарами и взрывами, гибелью операторов, персонала и населения, разрушением соседних инфраструктур и повреждением объектов природной среды и ущербом $U_i(\tau)$ $10^8 \dots 10^9$ руб. и более;
- К6 — глобальные чрезвычайные ситуации, возникающие на крупных объектах международного значения с причинением ущерба населению, объектам инфраструктуры и окружающей природной среде и нарушением условий жизнеобеспечения в регионах и государствах, использующих эти системы. Экономические потери могут составлять $10^9 \dots 10^{10}$ руб. и более;
- К7 — планетарные чрезвычайные, катастрофические ситуации, угрожающие жизни на континентах и на Земле в целом

$$R_s(\tau) = \sum_{k=1}^7 [P_k(\tau) \cdot U_k(\tau)]. \quad (2)$$

Как показал анализ аварийных и катастрофических ситуаций во всех промышленно развитых государствах, в НГК можно и необходимо анализировать классы К1–К6. К классам К5, К6 можно отнести катастрофы на морских платформах, мощных танкерах

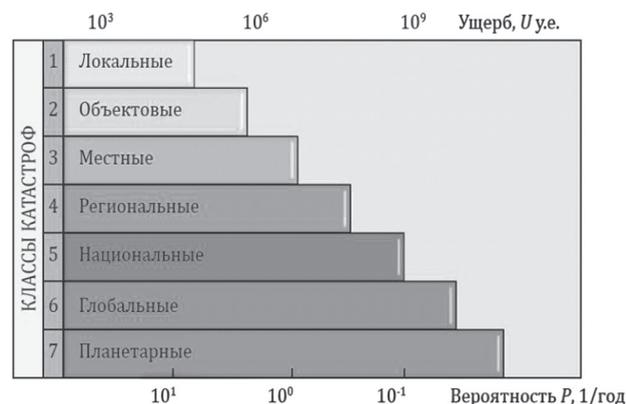


Рис. 1. Класс, ущерб и периодичность природных и техногенных катастроф

и заводах по сжижению природного газа. Таким образом, при оценке рисков $R_{II}(\tau)$ функционирования всех систем объектов можно использовать выражение (2) с величинами $U_k(\tau)$ и $P_k(\tau)$ при $k = 1, 2, \dots, 7$.

В соответствии с действующими в Российской Федерации федеральными законами о безопасности, о защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций, о техническом регулировании, о промышленной безопасности опасных производственных объектов, о безопасности гидротехнических сооружений, о пожарной безопасности и решениями Совета Безопасности Российской Федерации с учетом, как отмечено в [2–5], опасных ситуаций К1...К7 (рис. 1) в анализ безопасности объектов вводятся четыре группы (Г01...Г04) потенциально опасных объектов. Каждый вид потенциально опасных объектов имеет свою специфику.

Рассмотрим особенности групп на примере объектов нефтехимического комплекса (НХК), включающего магистральные нефтепроводы (МП):

- Г01 — объекты технического регулирования (ОТР) — отдельные трубы и соединения труб, элементы перекачивающих станций, элементы антикоррозионной защиты. ОТР могут исчисляться сотнями тысяч;
- Г02 — опасные производственные объекты (ОПО) — опасные участки МП, перекачивающие станции, нефтепродуктохранилища. ОПО могут исчисляться десятками тысяч;
- Г03 — критически важные для безопасности регионов и страны объекты (КВО) — пересечения МН с крупными водными преградами, железными дорогами и автомобильными магистралями, высоковольтными линиями электропередач и другими МТ, коридоры ряда МТ; крупные нефтепродуктохранилища. КВО могут составлять сотни;
- Г04 — стратегически важные для национальной безопасности объекты (СВО) — международные наземные и морские МТ, пересечения МТ с крупнейшими водными артериями страны и других стран, близкое расположение по отношению к важнейшим объектам гражданского и оборонного назначения, сообщение крупнейших производств с нефтепродуктопроводами. СВО могут исчисляться десятками.

Интегральные риски для всех групп $k = 1, 2, 3, 4$ опасных объектов на заданной территории (или в заданной отрасли) будут оцениваться суммированием

$$R_i(\tau) = \sum_{k=1}^4 [P_k(\tau) \cdot U_k(\tau)]. \quad (3)$$

Интегральные риски $R_{II}(\tau)$ и (τ) при функционировании всех систем МТ будут складываться соответственно из рисков для четырех типов объектов — ОТР, ОПО, КВО и СВО при $k = 1, 2, \dots, 4$.

При анализе безопасности и рисков объектов следует учитывать три основных фактора (Ф1...Ф3), создающих чрезвычайные ситуации: Ф1 — природный П; Ф2 — техногенный Т; Ф3 — антропогенный Ч (человеческий). Эти факторы обусловлены опасными условиями для человека на всех стадиях жизненного цикла объекта (проектирование, изготовление, контроль, эксплуатация) в штатных и нештатных ситуациях (включая несанкционированные, террористические и военные воздействия). Интегральные риски $R_{II}(\tau)$ по выражению (1) будут связаны с ущербом $U_j(\tau)$ и вероятностью $P_j(\tau)$ проявления каждого из трех указанных источников ($j = 1, 2, 3$), как

$$R_{II}(\tau) = \sum_{j=1}^3 [R_{\Phi_j}(\tau) + R_{\Psi_j}(\tau) + R_{\Omega_j}(\tau)]. \quad (4)$$

Интегральные $R_{II}(\tau)$ и стратегические $R_{СИ}(\tau)$ риски тяжелых катастроф по выражению (4) в общем случае обусловлены не только отдельными 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 возникновении и развитии аварийных и катастрофических ситуаций на объектах можно выделить ряд последовательных стадий S (С1–С5). Так, для МТ это будут следующие стадии:

- С1 — появление и накопление рассредоточенных многоочаговых повреждений при штатных и нештатных режимах эксплуатации несущих элементов трубопроводных систем;
- С2 — возникновение отказов в зонах максимального накопления дефектов или в зонах максимального накопления повреждений, обусловленных образованием течей, нарушением исходных геометрических форм за счет пластической деформации;
- С3 — частичное разрушение несущих элементов с образованием малых и ограниченных течей при штатных и нештатных режимах;
- С4 — аварии на МТ с образованием магистральных разрушений, выходом рабочего тела за пределы компонентов МТ, загрязнением окружающей среды, возникновением взрывов и пожаров;
- С5 — тяжелые катастрофы с крупномасштабными разрушениями и выводом из эксплуатации важных трубопроводных систем, гибелью людей и причинением трудновосполнимого ущерба окружающей среде.

Тогда по аналогии (2)–(4) на основе (1)

$$R_g(\tau) = \sum_{s=1}^5 R_s(\tau). \quad (5)$$

Общий анализ $R_M(\tau)$ и стратегических $R_{СИ}(\tau)$ рисков для указанных ситуаций, факторов, групп и классов катастроф может проводиться на основе выражений (1)–(5). При этом причинами возникновения опасных состояний объектов нефтегазового комплекса, в первую очередь, могут быть экстремальные внешние природно-техногенно-социальные воздействия на критически и стратегически важные объекты НГК и их компоненты, а также экстремальные повреждения несущих элементов.

Выражения (1)–(4) позволяют провести категорирование объектов техносферы в целом по величине относительного риска $\bar{R}_o(\tau)$, определяющего класс аварий и катастроф К1–К7 в соответствии с рис. 1 и выражением (2) для населения $\bar{R}_N(\tau)$, техносферы $\bar{R}_T(\tau)$ и природной среды $\bar{R}_S(\tau)$. При этом предполагается, что одна и та же авария или катастрофа может характеризоваться различными уровнями ущерба и риска для населения, объектов и техносферы при их общей вариации от 1 до 7.

Величину относительного риска $\bar{R}_o(\tau)$ можно оценить по одному из следующих соотношений:

$$\bar{R}_o(\tau) = \sqrt{\bar{R}_N^2(\tau) + \bar{R}_T^2(\tau) + \bar{R}_S^2(\tau)}, \quad (6)$$

$$\bar{R}_o(\tau) = \bar{R}_N(\tau) \cdot \bar{R}_T(\tau) \cdot \bar{R}_S(\tau). \quad (7)$$

Аналогичный подход к оценке опасностей и категорирования объектов можно использовать, если исходить из того, что основными источниками и поражающими факторами аварий и катастроф будут неконтролируемые потоки энергии E (кинетической, ударных волн, электромагнитной, тепловой, звуковой, сейсмической, ветровой), веществ W (химически, радиационно и биологически опасных) и информации I (в системах контроля, регулирования, управления, защиты). Этим потокам в случае аварий и катастроф соответствуют риски $\bar{R}_E(\tau)$, $\bar{R}_W(\tau)$, $\bar{R}_I(\tau)$, тогда

$$\bar{R}_o(\tau) = \sqrt{\bar{R}_E^2(\tau) + \bar{R}_W^2(\tau) + \bar{R}_I^2(\tau)}, \quad (8)$$

$$\bar{R}_o(\tau) = \bar{R}_E(\tau) \cdot \bar{R}_W(\tau) \cdot \bar{R}_I(\tau). \quad (9)$$

В общем случае для аварий и катастроф всех классов от К1 до К7 каждая составляющая рисков в выражениях (6)–(9) может варьировать в пределах от 1 до 7. В этом случае по выражениям (6) и (8) относительная величина рисков $\bar{R}_o(\tau)$ будет изменяться

в пределах от 1,73 до 12,1, а по выражениям (7) и (9) — в пределах от 1 до 343. Выражения (7) и (9) дают возможность более дифференцированно оценивать риски аварий и катастроф и категорировать объекты техносферы по рискам.

3. Стратегические риски и повышение безопасности

Как показано в [2–6], для обеспечения национальной безопасности страны и реализации основ стратегического планирования в области создания и функционирования потенциально опасных объектов с формирующимися $R_{СИ}(\tau)$ и приемлемыми стратегическими интегральными $[R_{СИ}(\tau)]$ рисками необходимо удовлетворить следующему обобщенному базовому выражению на заданной стадии τ их жизненного цикла

$$\begin{aligned} [R_{СИ}(\tau)] &= \sum P_i(\tau) U_i(\tau) \leq [R_{СИ}(\tau)] = \\ &= \frac{R_{КСИ}(\tau)}{n_R} = m_z \cdot Z_{RC(\tau)}, \end{aligned} \quad (10)$$

где: $\tau R_{КСИ}(\tau)$ — критические стратегические интегральные риски наиболее тяжелых катастроф; n_R — запас по рискам ($n_R \geq 1$); $Z_{RC(\tau)}$ — необходимые затраты на анализ и снижение рисков $R_{СИ}(\tau)$ до приемлемого уровня $[(\tau)]$; m_z — коэффициент эффективности затрат ($m_z \geq 1$).

Оценка величин $R_{СИ}(\tau)$ является результатом научных исследований академических и отраслевых организаций. Назначение уровней входит в компетенцию государственных органов управления и надзора с учетом результатов научных и прикладных исследований и обоснований. Критические риски $R_{КСИ}(\tau)$ оцениваются научными и отраслевыми организациями, надзорными и следственными органами на базе анализа вероятности (частоты) и ущерба от возникавших тяжелых катастроф, имевших место в отечественной и зарубежной практике на соответствующих типах объектов.

Стратегическим приоритетом создания и функционирования потенциально опасных объектов в нефтегазовом комплексе становится удержание формирующихся вероятностных интегральных составляющих рисков $R_{СИ}(\tau)$ в пространстве приемлемых рисков $[R_{СИ}(\tau)]$ для заданной стадии жизненного цикла τ и указанных выше классов К7–К1 опасных состояний и ситуаций. Так, для всех объектов трубопроводных систем (ОТР, ОПО, КВО, СВО) в самом общем случае в диапазоне К7–К1 величина относительного риска $\bar{R}_o(\tau)$ по выражениям (6)–(9) изменяется в указанных выше пределах. На современном этапе создания и функционирования таких критически и стратегически важных трубопроводных си-

стем, как ВСТО, «Голубой поток», «Северный поток», «Южный поток», величина $\bar{R}_o(\tau)$ может составлять 8,7–10,3 по выражениям (6), (8) и 100–180 по выражениям (7) и (9).

Величина n_R в выражении (10) устанавливается органами государственного управления и регулирования с учетом соответствующих обоснований научных и отраслевых организаций для различных инфраструктур. Затраты $Z_{RC}(\tau)$ на снижение рисков в обязательном порядке должны увязываться с величиной самих рисков $R_{CI}(\tau)$ и $[(\tau)]$ и предусматриваться на всех стадиях жизненного цикла объекта. При научно обоснованном подходе к анализу, мониторингу, регулированию и обеспечению безопасности для магистральных трубопроводных систем и с учетом отечественного и зарубежного опыта можно достичь величин n_R и m_z на уровне 5–10.

Анализ рассмотренных выше стадий С1–С5 развития аварийных ситуаций и катастроф показывает, что каждая последующая стадия становится результатом суммирования дефектов и повреждений, накопленных на предыдущих этапах эксплуатации τ_i объекта. Поэтому для повышения безопасности принципиально важно раннее обнаружение дефектов и предаварийных состояний потенциально опасных объектов. Это позволит на ранней стадии остановить развитие аварийных ситуаций, не допустить ситуацию до уровня тяжелых катастроф с гибелью людей и причинения трудновосполнимого ущерба окружающей среде. Для этого требуется в приоритетном порядке разработать и использовать новые методы и системы контроля и диагностики предаварийных состояний на критически и стратегически важных объектах (ГОЗ, ГО4), а также проводить мониторинг состояния и рисков несущих, наиболее критичных элементов конструкций и систем.

4. Комплексная диагностика предаварийных состояний

Используемые в объектах технические системы и технологические установки становятся все сложнее, и вероятность повреждений, разрушений, отказов оборудования неминуемо возрастает. Обычно обнаружить аварию удастся лишь по ее последствиям. Как правило, регистрация таких событий ведется датчиками, фиксирующими отклонение процесса по какой-либо характеристике от его нормального хода. При этом, как было указано выше, ущерб от аварии тем больше, чем на более поздней стадии она обнаружена, что диктует необходимость создания систем контроля и диагностики, способных зафиксировать нештатную работу оборудования в самой ранней, предаварийной фазе, и тем самым предотвратить катастрофическое событие.

Перед подобными системами стоит сложная задача: распознать начало сбоя в работе техники или определить предельное состояние конструкции на фоне флуктуирующего и подверженного периодическим изменениям сигнала. Надо учитывать, что немотивированная остановка контролируемого процесса чревата неоправданными экономическими потерями и возрастанием ущерба $U_i(\tau)$, входящих в риски $R_i(\tau)$. Выход видится в сочетании различных методов, чтобы разные факторы, принципиальные для метода контроля и диагностики, оказывали слабое влияние на результаты, полученные другим методом. Такой подход в сочетании с адекватной обработкой и анализом информации по рискам на основе выражений (1)–(10) позволят получить надежные данные в начале аварийного развития опасного процесса, сопряженного с большими рисками.

Если ущерб $U_i(\tau)$ от аварии или катастрофы действительно очень высокий (до десятков и сотен миллионов рублей), то для диагностики и принятия решения желательно использовать не один, даже самый распространенный метод диагностики (ультразвуковой, рентгеновский, магнитный, вибрационный, акустический), а, по крайней мере, два-три метода, основанные на различных физических принципах. Выбрать оптимальную комбинацию сложно, поэтому поиски новых методов контроля в этой области не прекращаются при постановке фундаментальных исследований и прикладных разработок по анализу рисков $R_i(\tau)$, вероятности $P_i(\tau)$ и ущерба $U_i(\tau)$ по (1)–(10). Особые перспективы для ранней диагностики аварийных состояний имеет сочетание таких методов, как метод акустической эмиссии, тензочувствительных покрытий и аэрозолей. Анализ возможностей этих методов — как по отдельности, так и в сочетании — проводился в последние годы в Институте машиноведения РАН, Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» и Тюменском государственном нефтегазовом университете [8–11].

Метод акустической эмиссии. Для диагностирования предельного состояния и раннего предупреждения о возникновении предаварийного состояния объектов применяют различные методы технической диагностики (ТД) и неразрушающего контроля (НК): локальные, интегральные и расчетно-экспериментальные [2–6]. Среди интегральных методов диагностики на практике наибольшее распространение получил акустико-эмиссионный метод [4]. Сигналы акустической эмиссии (АЭ) излучаются в процессе локальной динамической перестройки структуры материала конструкции (переход в область пластической деформации, образование микротрещин, их слияние, развитие макротрещины). Данный метод

позволяет получать интегральную картину напряженно-деформированного состояния в зоне исследования, своевременно обнаруживать зарождение повреждения и его развитие, определять пространственные координаты очагов разрушения, устанавливать их характер и степень опасности. Анализируя эти процессы, аппаратура обеспечивает непрерывное слежение за динамикой их развития. В случаях критического развития трещин и возникновении опасности разрушения конструкции включаются системы раннего предупреждения об опасности возникновения аварии и аварийной защиты.

Однако при всех достоинствах метода средствами АЭ контроля присущи определенные недостатки. Как правило, в эксплуатационных условиях в диагностируемой конструкции и окружающей среде возникают шумовые сигналы, амплитуда и энергия которых превосходит параметры сигналов от пластической деформации, образования и развития трещин, что затрудняет идентификацию опасных источников локализуемых¹ сигналов АЭ на фоне сигналов шумов. В области упругого деформирования материала невозможна оценка напряженно-деформированного состояния диагностируемой конструкции, поскольку сигналы АЭ излучаются преимущественно при нагрузках, вызывающих локальную перестройку в структуре материала конструкции — переход в пластическое состояние, что в ряде случаев недопустимо (например, для конструкций из хрупких и квази-хрупких материалов).

Метод хрупких тензочувствительных покрытий. Эффективным средством неразрушающего контроля для выявления дефектов и оценки напряженного состояния конструкций могут быть хрупкие покрытия, позволяющие оперативно и достаточно точно выявлять (по характеру и плотности распространения трещин в тензопокрытии) не только зоны конструктивно-технологической концентрации напряжений, но и зоны вероятных локальных дефектов [2–5]. Тензопокрытия позволяют количественно оценить коэффициенты концентрации напряжений, определить места наиболее вероятного разрушения и скорость роста трещин.

Используемая до настоящего времени технология фиксации трещин в хрупких тензочувствительных покрытиях предполагает дискретное или непрерывное фотографирование мест образования трещин в покрытиях на исследуемой конструкции. Контроль состояния хрупких тензопокрытий и фиксацию образовавшихся трещин выполняют визуально, используя для этого направленный свет. Однако визуальное наблюдение за образованием и распро-

странением трещин в тензопокрытии на реальных конструкциях часто оказывается весьма сложной технической задачей. Кроме того, точность фиксации картин трещин в значительной степени зависит от квалификации оператора и удобства фиксации. Эти недостатки в значительной степени препятствуют широкому распространению метода в качестве самостоятельного средства экспериментальной диагностики и НК при исследовании полей деформации и выявлении скрытых дефектов в производственных конструкциях. Совместное использование методов АЭ и хрупких покрытий обеспечивает сочетание достоинств, присущих каждому из комбинируемых методов, и исключение недостатков, свойственных этим методам в отдельности. Требуемый эффект достигается за счет установки в наиболее нагруженных и опасных зонах диагностируемого изделия хрупких тензоиндикаторов, настроенных на уровень пороговой деформации, меньший или равный предельно допустимой для безопасной эксплуатации конструкции. Для дистанционного контроля их состояния (регистрация и локация трещин) используется акустико-эмиссионная система [9, 10]. Совместное использование этих двух методов, наряду с повышением вероятности обнаружения мест повреждения объектов, позволит более достоверно определять напряженно-деформированное состояние элементов объектов, регистрировать смещение и нарастание деформации в несущих элементах конструкции, оценивать их текущее состояние и выделять зоны, наиболее подверженные опасности разрушения. При этом главным условием обеспечения безопасной эксплуатации объектов является постоянный мониторинг процесса накопления повреждений, образования и развития трещин в высоконагруженных и высокорискованных зонах конструкций.

Аэрозольный метод. Данный метод базируется на мониторинге микрочастиц различного размера в технологических средах по мере повышения локальных напряжений и повреждений в опасных зонах конструкций. Под микрочастицами понимаем детектируемые оптическими способами элементы диаметром 0,1–100 мкм, взвешенные в оптически прозрачной среде (воздухе, воде, масле и др.). Регистрация отдельных частиц в указанном диапазоне размеров представляет собой уникальный способ дистанционно обнаружить аварийные ситуации различной природы. Это связано с тем, что практически любое изменение режима работы установки или оборудования, нарушение хода технологического процесса и другие нештатные состояния сопровождаются резкими колебаниями (как правило, в сторону усиления)

¹ Лоцирование — выявление (ред.).

генерации микрочастиц. При этом прослеживается связь счетной концентрации и дисперсного состава частиц с характером развивающейся неисправности. Аэрозольный метод применяется в области диагностики напряженно-деформированного состояния различных изделий и конструкций. Его особые преимущества — высокая чувствительность, а также возможность работы в труднодоступных участках (при большом фоновом уровне шумов), что представляется проблематичным для метода АЭ. Кроме того, метод приобретает дополнительную актуальность в системах высокой потенциальной опасности, где для надежной регистрации предаварийных ситуаций используются одновременно несколько методов, основанных на различных физических принципах. Более того, выяснилось, что при наличии тензоиндикаторного покрытия (метод хрупких покрытий) выход аэрозольных частиц усиливается на два-три порядка.

Новая комплексная методика контроля, предназначенная для диагностики предельных состояний и раннего предупреждения об опасности разрушений конструкций и объектов, представляет собой сочетание трех методов: акустико-эмиссионного, хрупких тензочувствительных покрытий и аэрозольного [8, 11]. Совместное использование этих методов обеспечивает сочетание достоинств, присущих каждому из комбинируемых методов, и исключение недостатков, свойственных этим методам в отдельности.

Апробация комплексной методики. Проверка методики осуществлялась посредством одновременного измерения аэрозольной концентрации и акустической эмиссии в зонах нанесения тензочувствительных покрытий. В творческий коллектив входили ученые кафедры «Техносферная безопасность» Тюменского государственного нефтегазового университета, Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Института информационных технологий Национального исследовательского центра

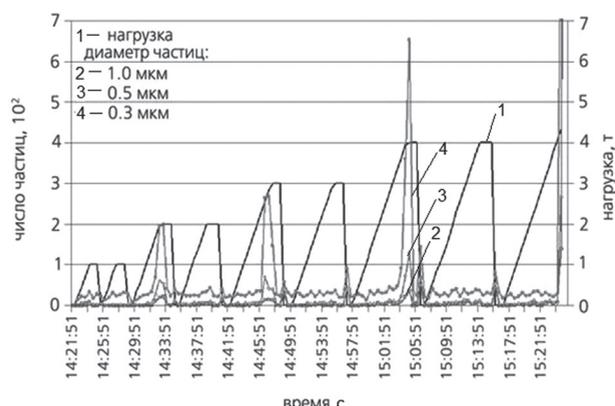


Рис. 2. Концентрация частиц разного размера при приложении циклической растягивающей нагрузки к образцу с покрытием толщиной 12 мкм

«Курчатовский институт». На растяжение и сжатие в условиях циклического и непрерывного нагружения испытывались образцы из алюминиевого сплава В95, на которые было нанесено разработанное хрупкое тензоиндикаторное покрытие из анодированного алюминия. Такие покрытия используются в технике для выявления дефектов и индикации поля напряжений — мерой служат густота и направления трещин. Для контроля состояния тензоиндикаторов и материала подложки использовалась АЭ система A-Line 32 D («метод акустической эмиссии»). Измерения аэрозольной концентрации проводились в герметичном обеспыливающем кожухе (приемной камере), что позволило свести к минимуму аэрозольный фон.

В ходе экспериментов было выявлено следующее (рис. 2):

- использование хрупких покрытий усиливает выход аэрозольных частиц на два-три порядка в зависимости от толщины оксидной пленки (чем она толще, тем больше выход);
- при деформации сначала возникают трещины в более толстых покрытиях, а трещинообразование и, соответственно, выход аэрозолей в более тонких покрытиях происходят при больших значениях деформации;
- образование пиков генерации аэрозолей происходит дискретно при последовательном прохождении определенных порогов нагрузки (рис. 2), что позволяет, в дополнение к данным АЭ, определять порог нагрузки по уровню аэрозольной концентрации.

При непрерывном увеличении нагрузки вплоть до разрыва максимум генерации аэрозолей приходится на упругую часть кривой деформации основного материала (сплав В95). На рис. 3 продемонстрирован пример при толщине тензоиндикаторного покрытия 18 мкм.

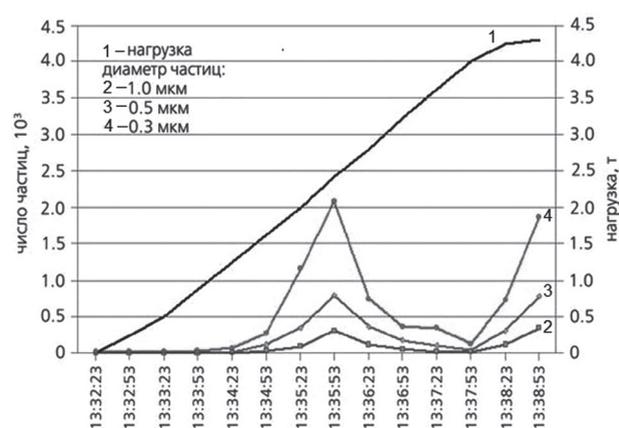


Рис. 3. Концентрация частиц при монотонном растяжении образца с покрытием толщиной 18 мкм

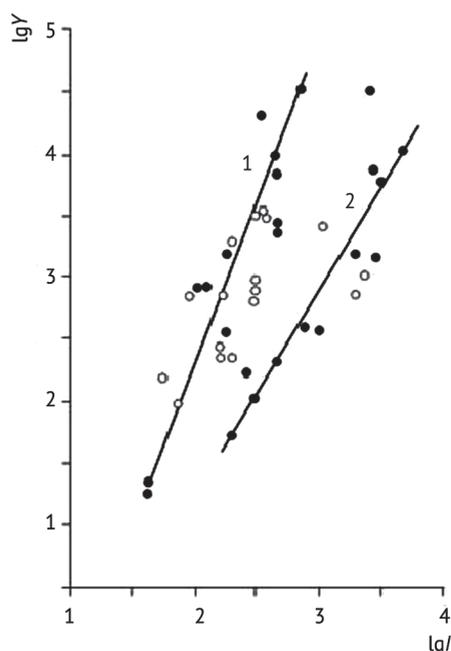


Рис. 4. Сопоставление концентрации микрочастиц Y и интенсивности I сигналов акустической эмиссии в области малых (< 2%, прямая 1) и повышенных (< 5%, прямая 2) деформаций

Следовательно, выбирая толщину покрытия, можно сдвигать максимум в область напряжений, допустимых с точки зрения многоциклового усталости. Тогда резкое увеличение выхода аэрозольных частиц будет показывать, что достигнуты напряжения, при которых в результате многоциклового усталости может произойти разрыв образца.

Сравнение сигналов, вызываемых генерацией аэрозольных частиц (Y) и акустической эмиссией (в первую очередь ее интенсивностью I), показывает их корреляцию (рис. 4).

Линейные аппроксимационные зависимости в двойных логарифмических координатах относятся к нагружению образцов в двух областях: в области упругих и упругопластических деформаций (< 2%, прямая 1), когда в оксидных тензоиндикаторах интенсивно образуются трещины, и в области значительных пластических деформаций (< 4–5%), когда разрушается не только тензоиндикатор, но и материал подложки (прямая 2).

Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о том, что «метод хрупких тензочувствительных покрытий», «метод АЭ» и «аэрозольный метод» дают важную адекватную достоверную информацию о состоянии материала на различных стадиях статического и циклического нагружения.

Новая комплексная методика позволяет на ранней стадии в области раннего упругого деформиро-

вания задолго до структурной перестройки материала контролировать состояние диагностируемой конструкции. По этой информации можно оценить вероятность $P_i(\tau)$ сохранения безопасных и наступление опасных ситуаций.

5. Заключение

Дистанционная технология получения и передачи информации для анализа и мониторинга состояния и рисков $R_i(\tau)$ по выражениям (1)–(10) потенциально опасных объектов на различных стадиях жизненного цикла τ_i контролируемого объекта (ОТР, ОПО, КВО, СВО) может использоваться при регулировании безопасности и предупреждении тяжелых катастроф. На производствах с высокой опасностью аварий и катастроф жизненно необходимо иметь систему, заранее предупреждающую о возможных нештатных ситуациях с вероятностью $P_i(\tau)$, чтобы предупредить и предотвратить их тяжелые фазы, сократить ущерб $U_i(\tau)$ или хотя бы вывести из опасной зоны и спасти операторов и персонал. Требования к такой системе достаточно очевидны: это минимальное число, а в идеале резкое снижение ложных срабатываний и не очень высокая величина затрат $Z_i(\tau)$ на снижение рисков $R_i(\tau)$ до приемлемого уровня $[R_i(\tau)]$. При этом следует учитывать, что остановка производственного процесса ведет к серьезным экономическим потерям. С другой стороны, переход аварии в необратимую форму вызовет гораздо больший ущерб $U_i(\tau)$ и даже, возможно, человеческие жертвы. В этом случае независимо от формы собственности на рассматриваемом объекте экономические последствия аварии $U_i(\tau)$ могут выйти за пределы $U_i(\tau) > U_k(\tau)$ материальной и юридической ответственности собственника предприятия; в этом случае ответственность возлагается не только на собственника, но и на государство. Отсюда следует вывод о необходимости конкретизировать государственную политику в этой области. Приоритетной целью политики должно быть повышение уровня промышленной безопасности и защищенности потенциально опасных объектов от тяжелых аварий и катастроф, имеющих региональные, национальные и глобальные социальные, экономические и экологические последствия. Базовыми критериями при этом по выражению (10) могут стать три группы стратегических рисков — формирующиеся интегральные риски $R_{СИ}(\tau)$, критические риски $R_{КСИ}(\tau)$ и приемлемые риски $[R_{СИ}(\tau)]$. По величине этих рисков необходимо проводить категорирование объектов по максимально возможной величине ущерба $U_{СИ}(\tau)$ от аварий и катастроф, а также законодательно и нормативно обязать принимать меры по снижению рисков $R_{СИ}(\tau)$ до приемлемых $[R_{СИ}(\tau)]$ с учетом расчетных затрат $Z_{RC}(\tau)$ на это снижение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Об основах стратегического планирования в Российской Федерации: (утв. Указом Президента Российской Федерации от 12 мая 2009 г. № 536).
2. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. — М.: МГФ «Знание», 2008 — 2012. Т. 1–36.
3. Махутов Н.А., Лисин Ю.В., Гаденин М.М., Пермяков В.Н. Анализ безопасности и рисков критически и стратегически важных нефтепроводов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2011. № 2. С. 6–13.
4. Махутов Н.А., Пермяков В.Н. Ресурс безопасной эксплуатации сосудов и трубопроводов. — Новосибирск: Наука, 2005. — 516 с.
5. Махутов Н.А. Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования. — Новосибирск: Наука, 2008. — 528 с.
6. Махутов Н.А. Конструкционная прочность: ресурсы и техногенная безопасность. В 2-х ч. — Новосибирск: Наука, 2005.
7. Стратегия национальной безопасности Российской Федерации до 2020 года: (утв. Указом Президента Российской Федерации от 12 мая 2009 г. № 537).
8. Пермяков В.Н., Хайруллина Л.Б. Дистанционный мониторинг состояния нефтегазохимического оборудования // Известия вузов. Нефть и газ. — 2012. № 5. — С. 111–115.
9. Патент 2313551, МПК 11 G 01B 11/16./ Хрупкое покрытие на основе искусственных смол. Пермяков В.Н., Махутов Н.А., Паршуков Н.Н., Хайруллина Л.Б.; заявитель и патентообладатель ТюмГНГУ; заявл. 27.09.2006; опубл. 27.12.2007. Бюл. № 36.
10. Патент 2345324 Российская Федерация, МПК8 G01B 17/04, G01N 29/14 / Способ исследования деформаций и напряжений. Пермяков В.Н., Махутов Н.А., Хайруллина Л.Б.; заявитель и патентообладатель ТюмГНГУ; заявка 2007116182/28, заявл. 27.04.2007; опубл. 27.01.2009, Бюл. № 3. — 6 с.
11. Патент 2505780 Российская Федерация, МПК G01 N29/14/ Способ исследования деформаций и напряжений в хрупких тензоиндикаторах [Текст] Махутов Н.А., Пермяков В.Н., Александров П.А., Иванов В.И., Новоселов В.В., Спасибов В.М.; заявитель и патентообладатель ТюмГНГУ; заявка 202130488128, заявл. 17.07.2012; опубл. 27.01.2014, Бюл. №3.

Substantiation of Industrial Facilities Safety by Risk Criteria and Early-Stage Diagnostics

N.A. Makhutov, Senior Staff Scientist, Federal State Budgetary Scientific Institution Blagonravov Machinery Institute under Russian Academy of Science, Associate member of Russian Academy of Science, Doctor of Technical Sciences, Professor, Tyumen State Gas and Oil University

N.V. Novosyolov, Head of the University, Doctor of Technical Sciences, Professor, Tyumen State Gas and Oil University

V.N. Permyakov, Head of Department, Doctor of Technical Sciences, Professor, Tyumen State Gas and Oil University

V.M. Spasibov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Tyumen State Gas and Oil University

The paper reviews integrated issues of safety and risks of technosphere objects. Importance of complex consideration of technogenic, natural and human reasons for onset and progress of emergencies is stressed. Issues of multi-object early-stage diagnostics (including acoustic emission, fragile strain-sensitive covers and aerosols) are up-to-date challenges for potentially hazardous oil and gas facilities of crucial and strategic importance. Such diagnostics promote prevention of crashes and catastrophes.

Keywords: safety, risk, destruction, damage, breakage, diagnostics, acoustic emission, strain-sensitive covers.

Анализ риска

Анализ риска включает анализ опасностей и оценку риска аварий, в частности на опасных производственных объектах (ОПО). Анализ риска — специальный научно-исследовательский метод надлежащего выполнения следующих процедур обеспечения промышленной безопасности ОПО:

- обоснование безопасности;
- декларирование промышленной безопасности ОПО;

- анализ опасностей технологических процессов;
- количественная оценка риска аварии;
- использование методов вычислительной гидродинамики (моделирование) и программных средств;
- оценка риска взрыва и разрушения зданий, сооружений при авариях;
- расчет пожарного риска;
- разработка специальных технических условий для ОПО.