

Надежность, живучесть и безопасность сложных технических систем

А. М. ЛЕПИХИН, В. В. МОСКВИЧЕВ, С. В. ДОРЕНИН

Учреждение Российской академии наук

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия

e-mail: niko@ksc.krasn.ru

Обобщены исследования надежности конструкций технических систем, содержащих трещиноподобные дефекты. Представлены результаты оценки живучести на базе численного анализа напряженно-деформированного состояния. Обоснованы новые методические подходы к анализу безопасности конструкций и оценке риска их аварий.

Ключевые слова: живучесть, безопасность, риск, разрушение, конструкции, дефекты.

1. Краткая характеристика проблемы

Объекты техносферы, составляющие основу экономики развитых стран, с одной стороны, являются результатом глубоких научных разработок и наукоемких технологий, с другой — обладают функциями, качествами и свойствами, которые изучаются и уточняются на протяжении их эксплуатации. К числу особо важных и широко исследуемых относятся свойства надежности и безопасности [1]. Во второй половине XX в. сформировался особый класс объектов техносферы, определяемых как сложные технические системы (СТС). Характерными особенностями СТС являются большое число составляющих их элементов, сложная функциональная и структурная иерархия, большая энерговооруженность и значительный разрушительный потенциал. Несмотря на высокие стандарты обеспечения безопасности СТС по мере увеличения их доли в техносфере отмечается неуклонный рост числа и тяжести аварий и катастроф. Происходит качественное изменение техногенных угроз — они охватывают все сферы жизнедеятельности и их масштабы уже сравнимы с масштабами природных стихийных бедствий. Постоянное усложнение СТС и повышение требований к их безопасности в настоящее время вошли в противоречие с обеспечивающими эти требования материально-техническими, финансовыми и научно-методическими ресурсами. Статистика крупных катастроф свидетельствует о том, что возможности парирования угроз в техногенной сфере несмотря на выдающиеся достижения научно-технического прогресса оказались или ограниченными, или фактически исчерпанными. Указанные обстоятельства предопределили пересмотр традиционных подходов к проблеме и привели к формулировке новых концепций и представлений в области безопасности СТС. Основное внимание уделяется конструкционным аспектам, определяющим общий уровень безопасности СТС.

Безопасность конструкций СТС рассматривается как комплексное свойство, оцениваемое функционалом $S(t)$, включающим расчетно-экспериментальные характеристики прочности $F(t)$, ресурса $N(t)$, надежности $P(t)$, защищенности $Z(t)$, живучести $L(t)$ и риска $R(t)$ [2]:

$$S(t) = \{F(t), N(t), P(t), Z(t), L(t), R(t)\}. \quad (1)$$

Наиболее разработанными в научном плане являются задачи оценки и обеспечения прочности, ресурса и надежности конструкций, задачи же обеспечения защищенности, живучести и оценки риска требуют дальнейшего научного развития.

2. Исследования надежности технических систем

Исследования вероятности безотказной работы конструкций различного назначения были предприняты в отделе машиноведения ИВМ СО РАН в 1986 г. в связи с вопросами обеспечения прочности сварных соединений крупногабаритных машин в рамках Плана НИР АН СССР по фундаментальным проблемам машиностроения (Постановление Президиума АН СССР № 642 от 21.05.86 г., тема 3.4 “Разработка расчетно-экспериментальных методов оценки прочности и живучести деталей и элементов сверхтяжелых экскаваторов”). Цель исследований заключалась в разработке и практической реализации методов прогнозирования надежности сварных соединений крупногабаритных конструкций по критериям механики разрушения. Выбор объекта исследований был обусловлен тем, что разрушения сварных соединений оказывались наиболее частым источником аварий и катастроф крупногабаритных конструкций. Сварные конструкции в зависимости от числа циклов нагружения N за расчетный срок эксплуатации условно были разделены на три группы. Для конструкций первой группы $N < 10^2$, поэтому эффекты времени можно считать несущественными (имеющиеся дефекты не успевают развиться до критических размеров). Для конструкций второй группы $10^2 \leq N \leq 10^6$ и необходим учет эффектов развития дефектов. Для третьей группы $N > 10^6$ и рост дефектов до критических размеров практически неизбежен. В этом случае необходимо обеспечивать отсутствие условий зарождения трещин. Исходя из этих предпосылок разработка методов оценки надежности конструкций осуществлялась на основе методов механики разрушения.

В общем случае функция надежности P для конструкции может быть представлена как [2, 3]

$$P(t, M) = P \{g(l, \sigma, r, \tau) \leq 0, r \in M, \tau \in [0, t]\}, \quad (2)$$

где $g(\cdot)$ — уравнение предельного состояния рассматриваемого элемента конструкции; l — размер дефекта или трещины; σ — напряжение в рассматриваемом элементе; r — радиус-вектор, определяющий положение исследуемой области в пространстве M конструкции; τ — расчетный момент времени, t — срок эксплуатации конструкции.

Уравнение предельного состояния записывается в виде

$$g(l, \sigma, r, \tau) = l_c(\tau, r) - l(\tau, r), \quad l_c = \frac{1}{\pi Y^2} \frac{K_c^2}{\sigma^2}, \quad (3)$$

где l_c — критический размер дефекта, Y — поправочная функция, K_c — критическое значение коэффициента интенсивности напряжений.

В предположении пуассоновского характера дефектности функция надежности выражается в форме

$$P(t, M) = \exp \left\{ - \int_t^\infty \int_M^\infty \mu_c(l, r, \tau) d\tau dr \right\}, \quad (4)$$

где $\mu_c(l, r, \tau) = \mu \int_0^\infty \int_{l_c}^\infty f_\tau(l) f_\tau(l) dl_c dl$ — математическое ожидание числа дефектов критических размеров. На основании (4) для прогнозирования надежности конструкций необходима информация по следующим параметрам: среднему числу дефектов μ , плотностям распределения вероятностей размеров фактических $f(l)$ и критических $f(l_c)$ дефектов в конструкции.

Для оценки указанных параметров были выполнены широкие исследования дефектности сварных соединений конструкций различного назначения [4]. Как показали результаты, наиболее характерными дефектами являются поры, шлаковые включения, непровары и подрезы. Среднее число дефектов μ для исследованных соединений находится в пределах $2.0 \dots 16.1 \text{ м}^{-1}$. Для отдельных видов дефектов их число колеблется в достаточно широких пределах: для пор $\mu = 0.9 \dots 44.4 \text{ м}^{-1}$, шлаковых включений $\mu = 0.3 \dots 0.9$, непроваров $\mu = 0.2 \dots 1.6$, подрезов $\mu = 0.2 \dots 3.3 \text{ м}^{-1}$.

Анализ гистограмм распределений дефектов по размерам показал, что наилучшим приближением для плотностей вероятностей $f(l)$ является распределение Вейбулла

$$f(l) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{l}{\theta} \right)^{\beta-1} \exp \left\{ - \left(\frac{l}{\theta} \right)^\beta \right\}, \quad (5)$$

где β, θ — статистические параметры. Для исследованных случаев параметр формы β изменяется в пределах от 0.4 до 4.0. Ресурсная характеристика θ изменяется в более широких пределах (1.5...25 и более). Оба параметра существенно зависят от типа соединений и способа сварки.

С практической точки зрения весьма важен анализ распределений экстремальных (наибольших) размеров дефектов. Исследования показали, что распределение наибольших размеров дефектов соответствует асимптотическому распределению следующего вида:

$$F(l_{\max}) = \exp \left\{ - \left(\frac{\delta - l_{\max}}{\theta} \right)^{-\beta} \right\}, \quad (6)$$

где статистический параметр δ в данном случае ограничивает максимально возможные размеры дефектов.

Функции распределения критических размеров трещин можно получить через функции распределения вероятностей силовых (K_c), энергетических (J_c) и деформационных (K_{Icc}) характеристик трещиностойкости $f(K_c)$, $f(J_c)$, $f(K_{Icc})$ и напряжений $f(\sigma)$ на основе формул типа (3). Для исследования вида функций $f(K_c)$, $f(J_c)$ были проведены статистические испытания сварных соединений на трещиностойкость. Для всех исследованных случаев получено, что эмпирические функции распределения трещиностойкости согласуются с двухпараметрическим законом Вейбулла

$$F(J_c) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{J_c}{\theta} \right)^\beta \right\}. \quad (7)$$

Статистические оценки параметров показали, что параметр формы β имеет незначительные различия по зонам и практически не меняется в исследованном диапазоне температур ($\beta = 3.8 - 4.7$), в то время как параметр θ зависит от параметров нагружения, температуры испытаний, структуры материала и других факторов.

Полученные результаты и модели позволили провести оценки надежности сварных соединений конструкций экскаваторов, мостовых кранов, трубопроводов, реакторов АЭС. Для реакторов АЭС наиболее опасными являются соединения трубопроводов с корпусом реактора. На рис. 1 представлены конструкция и режим нагружения сварного соединения патрубковой зоны реактора ВВЭР-1000, относящейся к наиболее критичной части данной конструкции.

Расчеты показали (рис. 2), что высокая надежность при нормальных условиях эксплуатации обеспечивается при относительных размерах дефекта не более 0.2 от толщины рассматриваемого элемента. При аварийном режиме опасными оказываются дефекты относительной глубины 0.1...0.15.

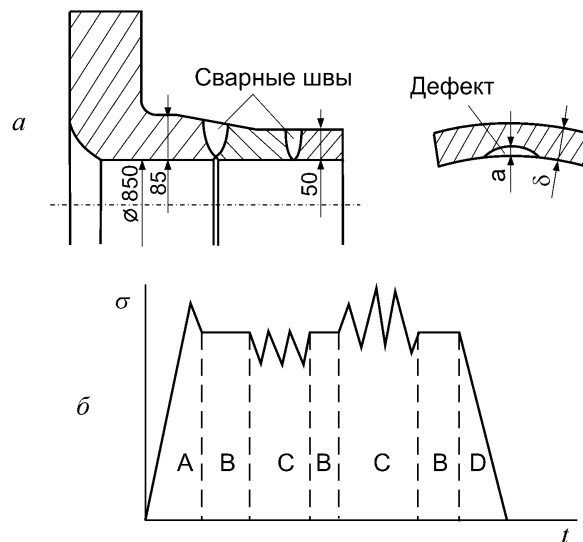


Рис. 1. Схема сварного соединения (а) и режима нагружения (б) патрубка реактора ВВЭР-1000; А — разогрев, В — стационарный режим, С — переходный режим, D — остановка

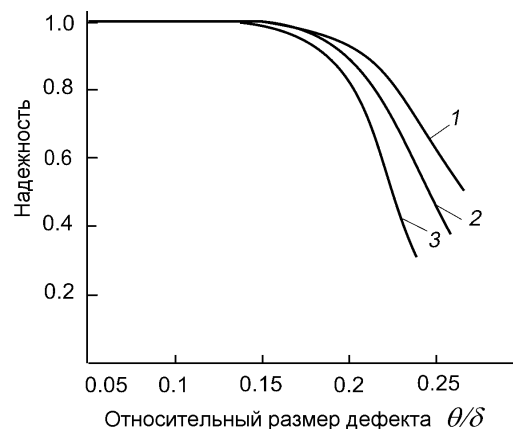


Рис. 2. Надежность сварного соединения патрубка реактора ВВЭР-1000; 1 — нормальные условия эксплуатации, 2 — нарушение нормальных условий эксплуатации, 3 — аварийная ситуация

Полученные результаты в целом совпадают с данными длительной эксплуатации реакторов ВВЭР и дают основания для практической реализации концепции “безопасного дефекта” в атомном машиностроении [3].

3. Исследования живучести систем

Исследования живучести конструкций обусловлены необходимостью оценки резерва времени безопасной эксплуатации при наличии развивающихся повреждений. Принимая во внимание статистическую природу дефектов и иерархическую структуру конструкций, рассматривались многоочаговые повреждения элементов (Many Elements Damages — MED) и многоочаговые повреждения структуры (Many Structural Damages — MSD). Для конструкций без избыточных элементов, когда разрушение любого из них приводит к разрушению всей структуры, для анализа живучести достаточно исследований кинетики MED. При наличии избыточности структуры конструкции анализ живучести существенно усложняется, поскольку здесь анализ MED должен дополняться анализом MSD.

Для оценки живучести, определяемой кинетикой MED, разработана следующая методика. Полагается, что элемент конструкции СТС содержит статистически распределенные дефекты в виде структуры $l_t = \{l_i(t), i = 1, n\}$. Далее принимается, что рост дефектов характеризуется условием необратимости вида [2–4]

$$\delta l_t \geq 0 \quad (8)$$

и кинетическим уравнением

$$\frac{dl}{dt} = \phi\{l, \sigma, K, J, C, t\}, \quad (9)$$

где δl_t — вариация размера дефекта; $\phi\{\cdot\}$ — кинетическая функция заданного вида; σ — напряжение; K, J, C — характеристики напряженно-деформированного состояния в вершине дефекта, учитывающие особенности полей пластических деформаций.

Для расчета живучести условия (8) и (9) дополняются соответствующей формулировкой уравнения предельного состояния вида

$$g(l, t) = l_c - \int_t [\phi\{l, \sigma, K, J, C, t\}]^{-1} dt. \quad (10)$$

В качестве вероятностной характеристики устойчивости стохастически распределенной структуры дефектов l_t принимается функция живучести $L(t)$. Формально ее можно представить в виде [2]

$$L(t) = P(t_N > t) = \prod_{j=1}^N P(t_j > t) = \{1 - G(t)\}^N = \exp\{-NG(t)\}, \quad (11)$$

$$t_N = \min\{t_j, j = 1, N\}, \quad G(t) = P\{t_j < t\}.$$

где N — число дефектов, t — заданный (расчетный) ресурс. Вероятность $G(t)$ эквивалентна вероятности $P(l_j > l_0)$, где l_0 — размер дефекта, обеспечивающего ресурс t . Используя аппарат теории вероятностей, для $G(t)$ было получено следующее выражение:

$$G(t) = P\{l_0 < l_j(t) < l_c | l_j(t) > l_0\} = P(l_0 < l < l_c) / P(l > l_0) =$$

$$= \int_{l_0}^{l_c} f(l, t) dl / \int_{l_0}^{\infty} f(l, t) dl = \frac{F(l_c, t) - F(l_0, t)}{1 - F(l_0, t)}. \quad (12)$$

Фактор времени эксплуатации в данном случае отражается в параметрах распределений размеров дефектов. Если критические размеры дефектов случайны, то интегрирование следует проводить и по плотности распределения $f(l, t)$.

В качестве иллюстрации на рис. 3 представлены функции живучести (числа циклов нагружения N до разрушения) обечайки трубчатой вращающейся печи глиноземного производства при различных температурах рабочего пространства печи. Ряд характерных примеров расчетов функций живучести приведен в [4, 5].

Анализ живучести, связанный с кинетикой поврежденных MSD, основан на численном моделировании аварийных ситуаций в сложных структурах после инициации разрушения в локальной зоне Z_k или в отдельном элементе конструкции. Очевидно, что в зависимости от особенностей структуры конструкции и положения поврежденного элемента в этой структуре развитие разрушения может проходить по разным путям с различными последствиями. В теории надежности технических систем предложен ряд методов анализа живучести сложных структур. Основной недостаток этих методов состоит в том, что анализируются некоторые идеализированные схемы, отображающие структурные взаимосвязи элементов в системе. В качестве исходных данных задаются предельные ресурсы элементов. Результатом расчета является предельный ресурс системы, определяемый по факту разрушения некоторого числа элементов. Слабым моментом данного подхода является сложность учета взаимосвязей элементов в структуре и их влияния на работоспособность друг друга. Обычно для этого приходится вводить достаточно абстрактные функции работоспособности, формализация которых с точки зрения конструктора оказывается крайне сложной. Структурный анализ живучести конструктивных схем с этих позиций не позволяет выявить особенности поведения конструкции в аварийных ситуациях и оценить риск возможных аварий с учетом перераспределения силового потока при разрушении отдельных элементов.

Для устранения указанных недостатков была разработана методика оценки живучести на базе численного анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) кон-

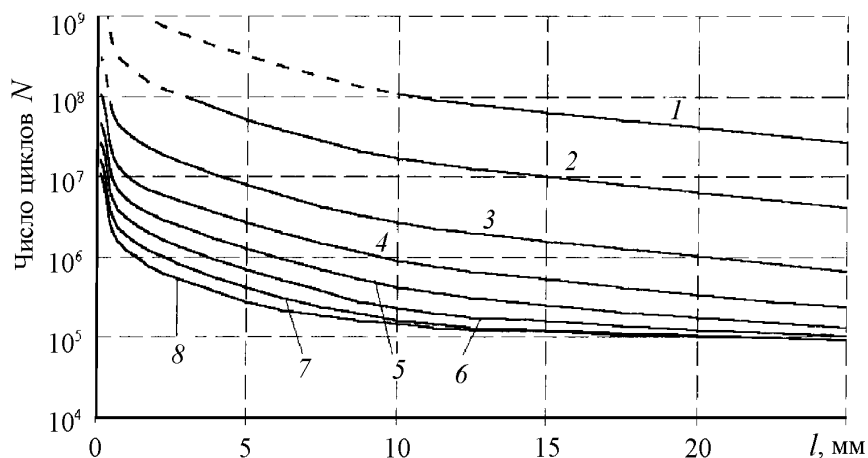


Рис. 3. Живучесть обечайки при различных температурах: 1 — 100 °С, 2 — 200, 3 — 400, 4 — 600, 5 — 800, 6 — 1000, 7 — 1200, 8 — 1400 °С

струкций в аварийных ситуациях [4–6]. Вопросы численного анализа НДС конструкций широко представлены в литературе, поэтому остановимся на принципиальных моментах, относящихся к особенностям непосредственного исследования аварийных ситуаций. Существо разработанного подхода заключается в следующем. На первом этапе выполняется структурный анализ конструкции с выделением составляющих элементов, соединений и узлов. С учетом возможностей имеющихся вычислительных мощностей и программ анализа НДС определяются иерархия локальных уровней M_i процесса разрушения и масштаб $M = \{ \cup M_i, i = 1, n \}$, охватываемый численными моделями. Задаются уравнения предельных состояний для локальных уровней M_i и разрабатываются их численные модели с учетом отмеченного выше принципа избирательного масштаба. Проводится численный анализ НДС-конструкции на заданном масштабе M , нагрузках и воздействиях. Определяются потенциальные зоны разрушения Z_k . В предположении независимости событий находятся вероятности разрушения $P_f(Z_k)$. Далее, с использованием процедуры рандомизации задается сценарий аварии в виде разрушения некоторой зоны Z_k с заданной вероятностью $P_f(Z_k)$. Затем выполняется многоэтапное конечно-элементное или гранично-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния конструкции в условиях предполагаемой аварийной ситуации с учетом того, что на уровне конструкций происходят согласованное перераспределение внешних сил с возникновением дополнительных нагрузок и формирование очага разрушения более высокого уровня M_{i+1} . Механизм разрушения определяется на основе заданного уравнения предельного состояния в предположении наличия технологических или эксплуатационных дефектов. При этом анализируются перераспределение силового потока и изменение характера напряженного состояния несущих элементов конструкции, на основании чего определяются следующие наиболее перегруженные элементы. Такая вычислительная процедура повторяется до ситуации, соответствующей полной потере несущей способности конструкции. Результаты расчетов сопоставляются со структурной схемой конструкции, и строится сценарная диаграмма разрушения, которая может рассматриваться в качестве основы для оценки живучести и риска конструкции как системы элементов.

Необходимо подчеркнуть, что набор исходных сценариев будет зависеть от полноты имеющейся информации о характере нагружения, дефектности, свойствах материала и данных предварительного анализа НДС-конструкции, позволяющих выделять потенциальные зоны разрушения. Многократное моделирование аварий с различными исходными сценариями локальных разрушений может дать объемную картину живучести конструкции в заданных условиях эксплуатации. Функция живучести в данном случае определяется по результатам статистических оценок ресурса конструкции при разных сценариях развития повреждений. Диаграммы сценариев кинетики MSD для ряда конструкций СТС представлены в работах [2, 4].

4. Анализ безопасности и оценка риска аварий

Основанием для выполнения работ в области исследования безопасности конструкций СТС послужили Федеральная целевая научно-техническая программа “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники гражданского назначения”. Подпрограмма 08.02 “Безопасность населения и народнохозяйственных объектов с учетом риска возникновения природных и техногенных катастроф” (1991–2000 гг.); Программа СО РАН “Механика, научные основы машиностроения и на-

дежности машин”. Тема “Развитие методов математического моделирования, расчетно-экспериментальной оценки живучести и безопасности при проектировании технических систем” (1995–1999 гг.) и план НИР научного совета РАН по комплексной проблеме “Машиностроение” (1997–2000 гг.). Далее работы были продолжены по программам СО РАН и грантам РФФИ.

Общая направленность формирования теории безопасности сложных технических систем заключается в системно-целостном вероятностном подходе к исследуемым явлениям и процессам. Парадигма теории основана на признании принципиальной невозможности исключения катастроф и использовании новой иерархии системных понятий, таких как “опасность”, “угроза”, “риск”. Спектр теоретических построений здесь достаточно широк, поскольку имеются существенно различающиеся классы источников опасности, механизмов угрозы и возникающих рисков.

При разработке математических моделей и методов риск-анализа СТС должны рассматриваться три базовых вопроса, определяющих концептуальные формулировки понятий “безопасность” и “риск”, цель и назначение риск-анализа, особенности математических моделей в контексте риск-анализа. Ответ на первый вопрос базируется на следующих положениях. Прежде всего полагается, что безопасность СТС — это состояние, при котором отсутствует недопустимый риск. Далее учитывается, что катастрофы уникальны по комплексу причин, факторов и механизмов. Наконец, количественные оценки риска определяются на основе анализа динамики состояний СТС. При этом полагается, что можно установить приемлемый уровень риска, определяемый соотношением затрат на создание и эксплуатацию СТС, и возникающих при аварии потерь.

Ответ на второй вопрос основан на том, что риск-анализ является элементом поддержки принятия решений и инструментом оценки опасности различных сценариев аварийных ситуаций. Для принятия решений об опасности СТС оценки риска сопоставляются с допустимыми значениями (принцип ALARA) или минимизируются на заданных ресурсах (принцип ALAPA). Как в первом, так и во втором случае реализуется концепция “ненулевого риска” аварии или катастрофы.

Более сложным оказывается ответ на третий вопрос. Технические системы за редким исключением представляют собой сложные структуры элементов различной природы. Задачи декомпозиции таких структур оказываются многовариантными и приводят к неоднозначным решениям. В условиях сложности и статистической невоспроизводимости динамики состояний СТС, многообразия элементов, множественности механизмов катастроф построение в ближайшее время цельной всеобъемлющей модели риска представляется маловероятным. Более перспективным направлением можно считать построение согласованных по целям и задачам отдельных моделей риска, опирающихся на представление СТС в форме структуры Σ , состоящей из подсистем ω и элементов e :

$$\Sigma = \bigcup_i \omega_i \left(\bigcup_j e_{ij} \right), \quad i = 1, n, j = 1, m. \quad (13)$$

Данные модели должны реализовывать разложение R -характеристик (риск-разложение) структуры (13) в форме [2]

$$R_\Sigma \rightarrow \{R_i\} \rightarrow \{R_{ij}\} \rightarrow \{R_{ijk}\}, \quad (14)$$

где R_Σ — интегральный (системный) риск; R_i — комплексный (подсистемный) риск; R_{ij} — элементный риск; R_{ijk} — критериальный риск. Конечным уровнем в этом раз-

ложении является критериальный риск, что дает возможность осуществить связь системного риска с механизмами катастроф.

При построении системы моделей, реализующих разложение (14), необходимо учитывать следующие проблемные особенности СТС как объектов анализа риска. Во-первых, в большинстве случаев приходится анализировать ситуации, ранее не встречавшиеся, поскольку совпадение всех обстоятельств катастроф практически невозможно. Во-вторых, анализ осуществляется в условиях высокой неопределенности, связанной как со случайным характером внешних воздействий и процессов в элементах систем, так и с неоднозначностью целей и критериев безопасности, а также альтернатив принимаемых решений и их последствий. В-третьих, анализ выполняется при жестких ограничениях по времени. На стадии анализа проектных решений эти ограничения определяются сроком проектирования, на стадии эксплуатации — временем реагирования на аварийную или чрезвычайную ситуацию.

Перечисленные особенности предъявляют специфические требования к модельным представлениям, вычислительному аппарату и информационной базе риск-анализа. Разработка модельных представлений и вычислительного аппарата связана с решением ряда целевых практических задач. Первая задача заключается в описании СТС с позиций целостности и иерархичности. Создание содержательной и компактной модели с большим числом значимых параметров даже с применением современных математических и вычислительных технологий относится к числу сложнорешаемых задач. Основой построения модели является декомпозиция системы на составляющие элементы. В рассматриваемом контексте возможны два уровня декомпозиции. Первый из них должен разделять исследуемую систему на блоки, локальные по множеству критериальных функций, второй — на блоки, локальные по множеству варьируемых параметров, определяющих критериальные функции.

Вторая задача заключается в формулировке информационного обеспечения риск-анализа. Она имеет два аспекта. Первый связан с задачей обработки информации. Информация в иерархической системе поступает на языке того уровня, который анализируется. Для выводов и заключений на более высоком иерархическом уровне требуется ее обобщение, а на более низком — детализация. Второй аспект связан с необходимостью построения гипотез о состояниях элементов на имеющейся информации. Надежность таких гипотез зависит от уровня полноты информации и ее достоверности.

Третья задача связана с выбором критерия риска. Она может быть решена на основе анализа известных или разработки специальных показателей, отражающих свойства предельных состояний элементов систем или предельных параметров процессов. Данный выбор также может оказаться неоднозначным или многокритериальным.

Наконец, четвертая задача заключается в создании аппарата анализа риска на заданных варьируемых параметрах. Этот аппарат можно рассматривать как совокупность математических моделей, отражающих механизмы катастроф в заданной последовательности процесса риск-анализа. Здесь необходимо учитывать случайность собственно события катастрофы системы и возможности формализованного описания и измерения случайных параметров системы. В итоге это означает разработку и реализацию математического аппарата и методов, практически пригодных для осуществления формализованного риск-анализа СТС.

С учетом данных обстоятельств при анализе риска аварии СТС следует рассматривать как разрушение структуры (13), обусловленное развитием повреждений. Для учета многоочагового характера повреждений и их структурной иерархии воспользо-

емся принципом избирательного масштаба и выделим указанную выше иерархию масштабов $M = \{\cup M_i, i = 1, n\}$, на которой происходит развитие повреждений. Каждый масштаб M_i рассматривается как внутренний для данного уровня и анализируется соответствующими методами. Например, масштабный уровень элементов конструкций можно анализировать методами механики разрушения, а уровень конструкции — методами строительной механики. Следует отметить, что если разрушения отдельных элементов, обусловленных MED, можно рассматривать как независимые события, то на уровне конструкций происходит согласованное перераспределение нагрузок и формирование очага MSD необходимо рассматривать как кооперированный процесс. Далее для каждого M_i зададим вектор повреждений l_i , подчиняющийся указанным выше соотношениям (8) и (9). Рост повреждений завершается достижением критического параметра l_{ic} , при котором возникает предельное состояние масштаба M_i с последующим разрушением конструкции и переходом процесса на уровень M_{i+1} .

Введем обобщенную функцию состояния $Z(t, v)$ для иерархии масштабов M и уравнение предельного состояния $Z(t, v) = Z_c(t)$, где v — вектор случайных параметров, характеризующих нагрузки, воздействия, размеры повреждений, характеристики механических свойств элементов конструкций. Множественность и случайность повреждений и внешних воздействий приводят к множественности и случайности траекторий $z_i(t, v)$ на каждом масштабном уровне M_i . Эти траектории можно рассматривать как выборочные реализации функции распределения вероятностей $F(Z, t) = P\{z_1(t) < z_c, z_2(t) < z_c, \dots, z_n(t) < z_c\}$. Если указанная функция известна, то функцию риска СТС можно определить в виде интеграла кратности n от этой функции. Однако получение таких функций для многокомпонентных систем с множественными повреждениями представляет собой довольно сложную и часто неразрешимую задачу.

Для преодоления указанных затруднений воспользуемся тем, что оценкой сверху для функции риска R_f является математическое ожидание $\mu(z_c, t) = P\{z_1(t) > z_c, z_2(t) > z_c, \dots, z_n(t) > z_c\}$ числа выбросов функций состояния за предельный уровень z_c , т. е. $R_f \leq \mu(z_c, t)$. Вычислить $\mu(z_c, t)$ можно с использованием интерполяционного метода [2]. В его основе положена идея аппроксимации интерполяционными полиномами зависимостей между случайными входными параметрами и случайными выходными величинами [2]. Выходные величины можно получить путем численного интегрирования уравнений статистической динамики рассматриваемой СТС при определенных значениях случайных переменных, называемых узлами интерполирования. В качестве таких узлов выбираются ортогональные полиномы с весами, равными плотностям распределения вероятностей случайных входных параметров. В рассматриваемом контексте входными параметрами являются характеристики повреждений, нагрузок, механических свойств, а выходными — функции состояния $z_i(t, v)$.

Полагая, что $z_i(t, v)$ и z_c определены, на основе [7] введем характеристическую меру риска χ в форме [8]

$$\chi = \prod_{k=1}^n \frac{1}{2} \left[1 - \frac{z_{ck} - z_k(v_k, t)}{|z_{ck} - z_k(v_k, t)|} \right], \quad \chi = \begin{cases} 1, & z_k \in \Omega_R, \\ 0, & z_k \notin \Omega_R, \end{cases} \quad (15)$$

где Ω_R — область риска, определяемая уравнением предельного состояния. Математическое ожидание функции χ при фиксированном времени t определяется как

$$\mu[\chi] = 1 \cdot P_1(t) + 0 \cdot P_2(t), \quad (16)$$

где $P_1(t) = P\{z_1(t) > z_c, z_2(t) > z_c, \dots, z_n(t) > z_c\}$ и $P_2(t) = P\{z_1(t) \leq z_c, z_2(t) \leq z_c, \dots, z_n(t) \leq z_c\}$. Следовательно, мера $\mu[\chi]$ эквивалентна мере $\mu(z_c, t)$ и может быть использована в задачах анализа риска.

Разработанная процедура вычисления показателя $\mu[\chi]$ включает следующее. Для рассматриваемых случайных величин v_i выбирается число узлов интерполирования q_i . Далее определяется общее число расчетных вариантов $m = \prod q_i$, выполняется m раз решение системы дифференциальных уравнений, описывающих кинетику повреждений в рассматриваемой системе, и расчет функций состояния $z_i(t, v)$. Затем по полученным значениям функций $z_i(t, v)$ и числам Кристоффеля ρ_k определяются математическое ожидание характеристической меры риска и оценка функции риска [8]

$$R_f(t) \leq \sum_k \frac{1}{2} \left[1 - \frac{z_{ck} - z_k(v, t)}{|z_{ck} - z_k(v, t)|} \right] \prod_j \rho_{kj}. \quad (17)$$

Достоинства рассмотренного метода оценки риска многокомпонентных систем заключаются в том, что задача вычисления интегральных законов распределения вероятностей многоочаговых повреждений сводится к более простой задаче вычисления математических ожиданий от характеристических функций χ множества повреждений. При этом общее число вариантов расчетов определяется произведением числа узлов интерполирования и обычно составляет несколько десятков, что существенно меньше требуемого числа вариантов расчетов с использованием метода Монте-Карло. Следует отметить, что функции состояния могут быть определены методами конечных и граничных элементов с использованием современных пакетов и систем автоматизированного проектирования. Это позволяет осуществлять риск-анализ СТС с учетом особенностей их структуры, конструктивного исполнения, характера нагрузок и пр.

Заключение

Результаты многолетних исследований надежности конструкций технических систем и статистика катастроф свидетельствуют о том, что традиционные методы обеспечения безопасности СТС за счет избыточной прочности, функциональной избыточности, резервирования и дублирования уже не приводят к желаемым результатам. В связи с этим можно выделить ряд актуальных направлений дальнейших исследований безопасности СТС.

1. *Разработка наукоемких технологий мониторинга и прогнозирования катастроф.* Здесь основное внимание следует уделить разработкам математических моделей и теории катастроф. Математические модели катастроф обычно сводят к условиям экстремума функций многих переменных, зависящих от многих параметров. Эти условия представляют собой системы нелинейных уравнений со многими переменными, которые зачастую с трудом поддаются даже численному анализу. Возникает вопрос — являются ли все эти переменные и параметры существенными, а если нет, то как их выделить? Второй вопрос, требующий аргументированного ответа, — как свести огромное многообразие возникающих ситуаций к ограниченному числу схем, достаточных для решения практических задач мониторинга состояний объектов и обеспечения безопасности? Наконец, третий вопрос касается соотношения категорий определенности, неопределенности и вероятности в описании катастроф. Рациональное соотношение указанных категорий позволит глубже исследовать эффекты многообразия причин и последствий катастроф.

2. *Обоснование комплекса характеристик и критериев безопасности ТС.* Традиционно используемые характеристики надежности и риска вполне применимы к серийным техническим системам. Однако в применении к уникальным ТС они уже не срабатывают. При высоких характеристиках надежности риск катастроф таких систем оказывается неопределенным или несоразмерно (недопустимо) большим. В этой связи следует вернуться к уже забытому подходу исключения возможностей катастроф, что можно осуществить за счет обеспечения защищенности ТС от опасных внешних воздействий и их живучести при наличии многоочаговых и многоуровневых повреждений. Формулировка характеристик защищенности позволит разработать фундаментальные основы для реализации принципа глубокоэшелонированной защиты в форме системы из множества административных и технических барьеров. Причем должна быть обеспечена защищенность как от ошибок персонала, так и от повреждений структуры и критических внешних воздействий и нагрузок. Формулировка характеристики живучести позволит подойти к решению задач оптимизации структуры ТС, учету взаимовлияния и взаимозависимости повреждений, выживаемости структуры ТС при катастрофических внешних воздействиях или внутренних повреждениях.

3. *Исследования причинно-следственного комплекса аварий и катастроф.* Аварии и катастрофы СТС чаще всего не вписываются в классическую статистику, которую мы считаем универсальной. Как свидетельствует статистика, аварии СТС сопровождаются огромными экономическими потерями, измеряемыми миллиардами рублей, и многочисленными жертвами. Значительным является и экологический ущерб. Статистические распределения всех этих потерь не соответствуют классическим представлениям теории риска, основанным на вероятностных распределениях экспоненциального типа. В связи с этим интерес исследователей все больше смещается к моделям и методам оценки риска, основанным на распределениях экстремальных значений с “тяжелыми хвостами”. Однако пока не ясным остается механизм формирования “тяжелых хвостов”. Модель пуассоновского потока событий здесь оказывается некорректной. Некоторые перспективы в анализе таких механизмов дают модели каскадных аварий, согласно которым каждое возникающее событие приводит к инициации нескольких последующих событий.

4. *Исследования живучести СТС в аварийных ситуациях.* Принципиальная особенность СТС заключается в иерархическом многоуровневом принципе организации структуры с упорядоченным взаимодействием между уровнями от высшего к нижнему. Каждый уровень выступает как управляющий по отношению ко всем нижележащим и как управляемый по отношению к вышележащему. Каждый уровень структуры специализируется на выполнении определенной функции и обладает определенной автономией по отношению к вышележащим уровням. В пределах уровня отношения элементов равнозначны между собой, взаимно дополняют друг друга, и им присущи черты самоорганизации (закладываемые при формировании структуры). Учет самоорганизации и иерархической подчиненности элементов СТС в рамках используемых моделей живучести крайне сложен.

Нерешенность указанных задач сдерживает реализацию базовых принципов обеспечения безопасности технических систем: высокой безотказности конструкций при заданном ресурсе (*safe-life*) и их высокой живучести при наличии повреждений и разрушений (*fail-safe*). Это в свою очередь препятствует созданию новых технических систем, обеспечивающих развитие новых технологий (скоростной транспорт, термоядерная энергетика, освоение ближнего и дальнего космоса и пр.).

Список литературы

- [1] БЕЗОПАСНОСТЬ РОССИИ. Правовые, социально-экономические и научно-технические системы. Анализ риска и проблемы безопасности. В 4-х частях. Часть 3. Прикладные вопросы анализа рисков критически важных объектов / Под ред. К.В. Фролова. М.: МГФ "Знание", 2007. 752 с.
- [2] ЛЕПИХИН А.М., МАХУТОВ Н.А., МОСКВИЧЕВ В.В., ЧЕРНЯЕВ А.П. Вероятностный риск-анализ конструкций технических систем. Новосибирск: Наука, 2003. 174 с.
- [3] ЛЕПИХИН А.М. Неразрушающий контроль и оценка опасности дефектов сварки на стадии эксплуатации оборудования // Вопросы материаловед. 2007. № 3(51). С. 208–213.
- [4] ДОРОНИН С.В., ЛЕПИХИН А.М., МОСКВИЧЕВ В.В., ШОКИН Ю.И. Моделирование прочности и разрушения несущих конструкций технических систем. Новосибирск: Наука, 2005. 250 с.
- [5] ДОРОНИН С.В., МОСКВИЧЕВ В.В. Моделирование прочности, надежности и живучести поврежденных элементов конструкций // Хим. и нефтегаз. машиностр. 2007. № 1. С. 37–42.
- [6] ДОРОНИН С.В. Расчеты живучести при проектировании машиностроительных конструкций // Тяжелое машиностр. 2008. № 7. С. 9–12.
- [7] ЧЕРНЕЦКИЙ В.И. Анализ точности нелинейных систем управления. М.: Машиностроение, 1968. 246 с.
- [8] ЛЕПИХИН А.М. Риск-анализ многокомпонентных систем с многоочаговыми повреждениями // Тяжелое машиностр. 2009. № 6. С. 23–25.

Поступила в редакцию 3 ноября 2009 г.