

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-1-I-05-09

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ КРИТИЧЕСКИ И СТРАТЕГИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ¹© **Николай Андреевич Махутов**

Институт машиноведения РАН, НИИ Транснефть, Москва, Россия; e-mail: kei51@mail.ru

TOPICAL SECURITY ISSUES OF CRITICAL AND STRATEGIC FACILITIES© **Nikolai A. Makhutov**Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;
The Pipeline Transport Institute, Moscow, Russia; e-mail: kei51@mail.ru

Современное машиностроение — промышленная база создания критически (КВО) и стратегически (СВО) важных объектов для жизнеобеспечения человека, общества и государства. Этими объектами являются: крупные энергетические установки — атомные энергетические реакторы на тепловых и быстрых нейтронах единичной мощностью от 200 до 1200 МВт; экспериментальные гидравлические электростанции мощностью 1000 – 6700 МВт; уникальные морские платформы для шельфовой добычи углеводородов общей массой до 160 тыс. т; хранилища энергоресурсов (в том числе сжиженных газов) емкостью до 120 тыс. м³; магистральные трубопроводы диаметром 800 – 1420 мм на давление до 2500 МПа; сверхмощные прокатные станы, обрабатывающие центры, технологические прессы с усилиями до 750 тыс. кН; транспортные системы для перевозки опасных грузов и большого числа пассажиров; уникальные инженерные сооружения гражданского и оборонного назначения массой до 15 тыс. т.

Стратегии научно-технологического развития и национальной безопасности России должны опираться на достижения фундаментальной теории безопасности, а также изменение действующих традиционных подходов к обеспечению требуемых условий безаварийной эксплуатации на новые и перспективные. В основу последних должны быть положены нормируемые параметры рисков и безопасности, обосновываемые по комплексам критериев прочности, ресурса, надежности и живучести. При этом ключевым фактором в решении данных проблем становится использование концепции расчетно-эксперимен-

тальных оценок, нормирования и регулирования риска и технической диагностики состояния конструкционных материалов и объектов техносферы с учетом возникновения нештатных опасных, кризисных, аварийных и катастрофических ситуаций.

Согласно федеральному закону «О стратегическом планировании в Российской Федерации» с учетом обеспечения и повышения безопасности КВО и СВО в качестве исходных следует назвать четыре основных направления:

проектное обоснование прочности, ресурса, живучести и надежности;

диагностика состояния объектов на всех стадиях их жизненного цикла;

определение рисков возникновения техногенных, природно-техногенных и антропогенно-природно-техногенных аварий и катастроф;

комплексный мониторинг текущего состояния объектов и рисков при их функционировании и выводе из эксплуатации.

Данные направления ввиду потенциальных опасностей и технологической сложности КВО и СВО должны быть отнесены к четырем складывающимся в процессе эксплуатации этих объектов состояниям:

штатные состояния и нормальные ситуации при эксплуатации в рамках проектных решений;

отклонения от штатных ситуаций, учтенных в проекте;

опасные аварийные состояния и аварийные ситуации при эксплуатации, частично парируемые в проектных решениях;

предельно опасные катастрофические состояния и катастрофические чрезвычайные ситуации, предусматриваемые в проекте с невоз-

¹ Работа выполнена при поддержке Гранта РФФ № 14-19-00776-П.

возможностью и неопределенностью их детального анализа.

Для обеспечения прочности, ресурса, живучести и безопасности КВО и СВО в целом следует исходить из того, что степень научной обоснованности технических заданий, проектно-конструкторской документации, методов, систем, средств и аппаратуры для расчетов, испытаний, диагностики и мониторинга, а также накопленный практический опыт в сфере конструирования и эксплуатации по мере перехода от штатных (нормальных) состояний к аварийным и катастрофическим характеризуются тремя основными тенденциями:

экспоненциально нарастающими рисками, характеризующими рассматриваемые кинетические во времени t процессы накопления повреждений $d(t)$;

существенно сокращающимися уровнем и возможностями расчетов и диагностики напряженно-деформированных ($\sigma - \epsilon$) и предельных состояний при переходе от штатных ситуаций к катастрофическим;

относительно невысоким, особенно для катастрофических ситуаций, уровнем расчетов и мониторинга состояний и рисков $R(t)$.

В отечественной практике в соответствии с федеральными законами «О техническом регулировании», «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», решениями Совета Безопасности Российской Федерации и Государственного совета по анализу аварий и катастроф в техносфере используется категорирование объектов по числам циклов нагружений:

объекты технического регулирования (ОТР) — $10^6 - 10^7$;

опасные производственные объекты (ОПО) — $10^4 - 5 \cdot 10^5$;

критически важные объекты (КВО) — $10^3 - 5 \cdot 10^3$;

стратегически важные объекты (СВО) — $10^2 - 10^3$.

Для всех стадий создания и эксплуатации указанных потенциально опасных объектов системы расчетов и диагностики остаются важнейшим фактором обеспечения безопасности. Их условно можно представить состоящими из следующих основных групп:

встроенные системы, функционирующие на всех стадиях нормальной эксплуатации объектов и обеспечивающие срабатывание систем аварийной защиты;

встроенные системы, включаемые в работу при возникновении и развитии режимных и проектных аварийных ситуаций, дополненные системами защиты и аварийной остановки объектов;

объектовые и внеобъектовые системы диагностики предвестников возникновения тяжелых аварий и их развития, действующие непрерывно или периодически и включаемые в систему мониторинга за проектных и гипотетических аварий;

внеобъектовые и объектовые системы диагностики, доставляемые в зону проектных, за проектных и гипотетических аварий.

Решенные к началу XXI в. проблемы характеризуются исторически сложившейся последовательностью формирования фундаментальных научных основ, разработки инженерных методов расчетов и испытаний, создания норм и правил проектирования и изготовления объектов техносферы, обеспечения их функционирования в заданных пределах проектных режимов и параметров: «прочность → жесткость → устойчивость → ресурс → надежность → живучесть → безопасность → риск → защищенность». При этом в традиционном анализе названных направлений в самом общем виде приняты следующие определяющие параметры: R_σ — прочность, определяемая сопротивлением разрушению несущих элементов при штатных и аварийных воздействиях; R_λ — устойчивость, определяемая сопротивлением потери начальной формы λ несущих элементов при действии штатных или аварийных нагрузок; R_δ — жесткость, определяемая сопротивлением несущих элементов достижению недопустимых деформаций δ при действии штатных или аварийных нагрузок; R_{Nt} — ресурс (долговечность), определяемый временем t или числом циклов N до разрушения или потери устойчивости; P_{QR} — надежность, определяемая способностью объекта выполнять заданные функции в штатном или поврежденном состоянии при заданных нагрузках Q или ресурсе R_{Nt} ; L_{ld} — живучесть, определяемая способностью объекта выполнять свои функции в ограниченном объеме при недопустимых нормах повреждений d или размерах дефектов l ; S — безопасность, определяемая способностью объекта не переходить в катастрофическое состояние с нанесением значительных ущербов человеку, техносфере и природной среде; R — риск, определяемый вероятностью возникновения на объекте неблагоприятных ситуаций и возможными ущербами от этих ситуаций в штатных и нештатных условиях; Z_k — защищенность, определяемая способностью объекта противостоять возникновению и развитию неблагоприятных ситуаций в штатных и нештатных условиях.

Параметры R_σ , R_λ , R_δ характерны для ОТР; R_σ , R_λ , R_δ , R_{Nt} — для ОПО; R_σ , R_λ , R_δ , R_{Nt} , P_{QR} , L_{ld} , S — для КВО; R_σ , R_λ , R_δ , R_{Nt} , P_{QR} , L_{ld} , S , R , Z_k — для СВО.

На основе анализа традиционных и новых перспективных требований к обеспечению безопасных условий эксплуатации и соответствующих им параметров можно построить зоны обеспеченности и необеспеченности работоспособности объектов техносферы по указанным выше критериям. При этом могут быть выделены основные этапы развития, базовые требования и основные практические результаты взаимодействия названных выше направлений. В этом случае следует иметь в виду, что решение новых проблем защищенности, риска и безопасности должно обязательно опираться на решение проблем живучести, надежности, ресурса, жесткости, устойчивости и прочности.

Фундаментальные результаты определения и обеспечения прочности были получены к началу XX века, а замкнутый анализ жесткости и устойчивости завершился к его середине. Во второй половине XX века сформировались теория и практика обеспечения ресурса, надежности, живучести. В конце прошлого века была поставлена новая фундаментальная проблема анализа и обеспечения безопасности и риска для всех потенциально опасных объектов с переходом на управление безопасностью по критериям рисков. На этих этапах требование безопасности было сформулировано как определяющее, что определило разработку нового направления ее обеспечения как основного для будущего развития техносферы и научно-технологического развития России.

В соответствии с изложенным выше базовое выражение, характеризующее защищенность объектов техносферы (ОТР, ОПО, КВО, СВО) от аварий и катастроф, может быть представлено в виде функционала, включающего в себя параметры прочности, ресурса, живучести, безопасности и рисков:

$$Z_k(\tau) = F_z\{R(\tau), S(\tau), L_{ld}(\tau), P_{QR}(\tau), R_{N\tau}(\tau), R_\delta(\tau), R_\lambda(\tau), R_\sigma(\tau)\}. \quad (1)$$

Основным направлением анализа и обеспечения защищенности объектов от неблагоприятных ситуаций с учетом выражения (1) является реализация требований к их работоспособности в штатных, аварийных и катастрофических ситуациях.

Новым направлением фундаментальных и прикладных исследований для обеспечения защищенности рассматриваемых высокорисковых КВО и СВО от неблагоприятных ситуаций является именно то, которое изначально формирует уровень защищенности объекта $Z_k(\tau)$. Защищен-

ность $Z_k(\tau)$ определяется через формирующиеся $R(\tau)$ и приемлемые $[R(\tau)]$ риски:

$$Z_k(\tau) = R(\tau)\{1 - [R(\tau)]/R(\tau)\}. \quad (2)$$

Риски $R(\tau)$, формирующиеся на данной стадии τ жизненного цикла, научно обосновываются и оцениваются по вероятностям (частотам) $P(\tau)$ возникновения отказов, аварийных или катастрофических ситуаций и сопутствующим им ущербам $U(\tau)$:

$$R(\tau) = P(\tau)U(\tau). \quad (3)$$

Этот уровень защищенности определяет все основные группы требований:

безопасности $S(\tau)$ и рисков $R(\tau)$;
ресурса $R_{N\tau}(\tau)$, надежности $P_{QR}(\tau)$, живучести $L_{ld}(\tau)$;
прочности $R_\sigma(\tau)$, жесткости $R_\delta(\tau)$, устойчивости $R_\lambda(\tau)$.

Приемлемые риски $[R(\tau)]$ на основе анализа критических отказов, аварий и катастроф научно обосновываются и директивно назначаются по наиболее опасным, критическим параметрам $P_k(\tau)$, $U_k(\tau)$, $R_k(\tau)$ с введением запасов по рискам n_R ($n_R \geq 1$):

$$[R(\tau)] = \frac{R_k(\tau)}{n_R} = \frac{P_k(\tau)U_k(\tau)}{n_R}. \quad (4)$$

Безопасность объекта $S(\tau)$ оценивается по неравенствам

$$S(\tau) > 0 \text{ при } R(\tau) \leq [R(\tau)]. \quad (5)$$

Живучесть объекта в количественной форме определяется через сопоставление параметров развития дефектов $l(\tau)$ и повреждений $d(\tau)$:

$$l(\tau) \leq [l(\tau)]; \quad d(\tau) \leq [d(\tau)];$$

$$[l(\tau)] = l_k(\tau)/n_l; \quad [d(\tau)] = d_k(\tau)/n_d, \quad (6)$$

где $[l(\tau)]$, $[d(\tau)]$ — допускаемые дефекты и повреждения; n_l , n_d — запасы по дефектам и повреждениям, $\{n_l, n_d\} \geq 1$.

Надежность $P_{QR}(\tau)$ находится по вероятностным характеристикам эксплуатационной нагруженности $Q(\tau)$ и ресурса $R_{N\tau}(\tau)$ на основе функций распределения f эксплуатационных воздействий $Q^3(\tau)$ и предельных нагрузок $Q_k(\tau)$ для заданных N_k , τ_k . При этом обычно используются «деревья событий» и «деревья отказов» по опыту предшествующей эксплуатации аналогичных объектов техносферы. В такой формулировке может определяться технический риск

$$R_\tau(\tau) = 1 - P_{QR}(\tau). \quad (7)$$

Параллельно с анализом надежности $P_{QR}(\tau)$ и техногенного риска $R_\tau(\tau)$ устанавливаются параметры ущербов $U(\tau)$ (в первую очередь экономических), соответствующих достижению рассматриваемых состояний (отказ, авария, катастрофа).

Ресурс $R_{N\tau}$ несущих элементов определяется нормативными и уточненными расчетами по кривым циклической (N) и длительной (τ) прочности для номинальных и локальных амплитудных значений напряжений и деформаций $\sigma_{an}(\tau)$, $\sigma_{amax}(\tau)$, $e_{an}(\tau)$, $e_{amax}(\tau)$:

$$R_{N\tau} = F_{N\tau} \{ (\sigma_{an}(\tau), \sigma_{amax}(\tau)), (e_{an}(\tau), e_{amax}(\tau)), ((\langle \sigma - N \rangle), (\langle e - N \rangle)), ((\langle \sigma - \tau \rangle), (\langle e - \tau \rangle)) \}, \quad (8)$$

где $\langle \sigma - N \rangle$, $\langle e - N \rangle$, $\langle \sigma - \tau \rangle$, $\langle e - \tau \rangle$ — уравнения кривых циклической (N) и длительной (τ) прочности в напряжениях σ и деформациях e , получаемые по результатам стандартных испытаний гладких лабораторных образцов.

Если проводятся статистические испытания серий образцов с оценкой вероятностей циклических и длительных разрушений, то по выражению (8) можно найти показатели надежности $P_{QR}(\tau)$.

Жесткость $R_\delta(\tau)$ несущих элементов определяется расчетами их деформаций — перемещений $\delta(\tau)$ при эксплуатационных воздействиях $Q^3(\tau)$ и выбранных размерах сечений F и длины L :

$$R_\delta(\tau) = \delta(\tau) \leq [R_\delta(\tau)] = \delta_k(\tau)/n_\delta, \quad (9)$$

где $[R_\delta(\tau)]$ — допускаемые деформации; $\delta_k(\tau)$ — критические деформации; n_δ — запас по деформациям ($n_\delta \geq 1$).

Для оценки величин $\delta(\tau)$ используются уравнения кривых деформирования « $\sigma - e$ » при статическом, циклическом и длительном нагружении. Расчетными характеристиками механических свойств при этом являются модули упругости E , коэффициенты Пуассона μ и показатели упрочнения m неупругой области.

Устойчивость $R_\lambda(\tau)$ определяется расчетом на потерю устойчивости (в упругой области — по уравнениям Эйлера, в упругопластической — по формулам Журавского):

$$R_\lambda = Q_k(\tau)/Q^3(\tau) = n_y, \quad (10)$$

где $Q_k(\tau)$ — критические нагрузки при потере устойчивости; n_y — запас на устойчивость ($n_y \geq 1$). В расчет $Q_k(\tau)$ входят модули продольной упругости E и показатели упрочнения в неупругой области m , зависящие от времени, числа циклов нагружения.

Прочность $R_\sigma(\tau)$ несущих элементов находится с использованием максимальных номинальных и локальных напряжений $\sigma_{max}(\tau)$ деформаций $e_{max}(\tau)$ для экстремальных эксплуатационных нагрузок $Q_{max}(\tau)$:

$$\begin{aligned} \{ \sigma_{max}(\tau), e_{max}(\tau) \} &= \\ &= F_{\sigma e} \{ Q_{max}(\tau), R, L, E, \mu, m \}, \quad (11) \\ \{ \sigma_{max}(\tau), e_{max}(\tau) \} \leq \{ [\sigma(\tau)], [e(\tau)] \} &= \\ &= \left\{ \frac{\sigma_k(\tau)}{n_\sigma}, \frac{e_k(\tau)}{n_e} \right\}, \quad (12) \end{aligned}$$

где $[\sigma(\tau)]$, $[e(\tau)]$, $\sigma_k(\tau)$, $e_k(\tau)$ — допускаемые и критические (разрушающие) напряжения и деформации для заданных режимов нагружения (по числу циклов N , времени τ и температуре t); n_σ , n_e — запасы по напряжениям и деформациям ($1 \leq n_\sigma \ll n_e$).

В традиционных расчетах в качестве силовых критериев $\sigma_k(\tau)$ используются пределы текучести σ_t (или $\sigma_{0,2}$), прочности σ_b , сопротивление разрыву в шейке S_k без увязки со временем τ , а также предел длительной прочности $\sigma_k(\tau) = \sigma_{дп}$. Характеристики σ_t , $\sigma_{0,2}$, σ_b , $\sigma_{дп}$ определяются стандартными испытаниями в соответствующем диапазоне температур t .

В качестве критической деформации $e_k(\tau)$ используется деформация предела текучести σ_t/E (или $\sigma_{0,2}/E$), равномерная деформация e_b на пределе прочности σ_b или истинная предельная деформация в шейке при разрыве

$$e_k = \ln \frac{100}{100 - \psi_k}, \quad (13)$$

где ψ_k — относительное сужение в шейке (в процентах).

Система выражений (1) – (13) является основой для анализа и назначения ключевых параметров безопасности, рисков и защищенности в первую очередь КВО и СВО. Они используются на основе общих уравнений механики деформирования и разрушения (сопротивления материалов, теорий усталости, упругости, пластичности, ползучести, термоциклической прочности, линейной и нелинейной механики разрушения, механики катастроф, риска и безопасности). Эти уравнения позволяют построить диаграммы деформирования, повреждения, развития трещин и разрушения как исходные условия возникновения отказов, повреждений, аварий и катастроф для проектных, запроектных и гипотетических ситуаций.

Если для ОТР и ОПО к концу XX века можно было использовать указанную выше прямую по-

следовательность, то для КВО и СВО с 2020 г. важной станет обратная постановка задач: «защищенность → риск → безопасность → живучесть → надежность → ресурс → устойчивость → жесткость → прочность». В этом случае определяющими будут выражения (1) – (5). Их реализация на практике потребует выполнения условий (6) – (12), которые до настоящего времени были базовыми.

При практическом использовании действующих и разработке новых расчетно-экспериментальных методов и диагностических систем применительно к каждой группе объектов (ОТР, ОПО, КВО, СВО), к каждому классу катастроф и каждому типу аварийных ситуаций должны быть выделены следующие определяющие расчетные и диагностируемые характеристики:

состояния наиболее важных потенциально опасных систем, компонентов узлов и деталей в штатных и аварийных ситуациях;

повреждающих факторов при возникновении и развитии аварийных ситуаций;

состояния конструкционных материалов и их свойств с учетом эффектов старения и деградации.

К наиболее важным относятся характеристики и параметры состояния эксплуатируемых объектов в их наиболее нагруженных элементах — напряжения σ (деформации e), температуры t , размеры, формы и места возникновения дефектов (трещин) l , которые изменяются при эксплуатации во времени τ . Эти параметры оказываются зависящими от реальных условий нагружения (давления, механических, тепловых и электромагнитных усилий, скоростей, ускорений), геометрических форм и размеров конструктивных элементов, свойств конструкционных материалов.

Поскольку возникновение и развитие практически всех аварийных ситуаций на объектах техносферы начинается с повреждений их несущих элементов (разрушения, деформирования, разуплотнения, потери устойчивости), то в процессе диагностирования подлежат обязательному определению максимальные (σ_{\max} , e_{\max} , t_{\max}) и амплитудные (σ_a , e_a , t_a) значения базовых параметров нагруженности этих элементов — напряжений, деформаций, температур.

Для диагностики (измерений) состояний объектов и мониторинга (расчет и измерения) в реальном масштабе времени эксплуатации или при проведении регламентных работ с остановкой соответствующих объектов могут быть исполь-

зованы как широко применяемые, так и новые методы и средства — оптические, физические, механические, электромеханические. К ним можно отнести: внешний осмотр, ультразвуковую и магнитную дефектоскопию, методы проникающих жидкостей и фотоупругости, тензометрию, виброметрию, термометрию, акустическую эмиссию, термовидение, рентгенографию, томографию, голографию. При этом оказывается, что пока отсутствуют универсальные методы, позволяющие одновременно вести измерения всех указанных выше параметров с необходимой точностью.

При постановке новых задач многопараметрической диагностики состояния КВО и СВО первоочередное значение имеет получение эксплуатационной информации о названных выше параметрах с учетом всех особенностей функционирования рассматриваемых объектов. При этом следует иметь в виду, что только получение полной информации о комбинации всех требуемых по выражениям (1) – (13) параметров в их непосредственном взаимодействии позволяет провести комплексную оценку поврежденности и опасных состояний объекта с использованием характеристик фактических и приемлемых рисков.

В дальнейших концепциях, стратегиях, нормах и правилах развития техносферы жизнеобеспечения человека, общества и государства с использованием всего многообразия ее объектов внимание должно уделяться совершенствованию методов, систем и средств обеспечения и повышения безопасности $S(\tau)$ и защищенности $Z_k(\tau)$ по критериям как текущих $R(\tau)$, так и допускаемых $[R(\tau)]$ рисков для КВО и СВО.

Журнал «Заводская лаборатория. Диагностика материалов», сохраняя и развивая свои традиции, будет и в дальнейшем уделять внимание решению актуальных проблем безопасности критически и стратегически важных объектов, включая вопросы расчетов, испытаний, диагностики и мониторинга состояния материалов и несущих элементов этих объектов техносферы, а также комплексное обоснование на основе выражений (1) – (13) прочности, ресурса, живучести, безопасности и защищенности по критериям риска для всех стадий жизненного цикла. Это может способствовать поэтапному комплексному переходу страны на новый уровень государственного планирования, отвечающего стратегиям научно-технологического развития и национальной безопасности.