

Литература

1. Тимашев С.А. Инфраструктуры. В 2-х частях. Том 1. Надежность и долговечность. Екатеринбург : Изд-во НИСО УрО РАН, 2016. 530 с.
2. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М. : Наука, 1981. 110 с.
3. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. М. : Машиностроение, 1990. 448 с.
4. Похабов Ю.П. Теория и практика обеспечения надёжности механических устройств одноразового срабатывания. Красноярск : СФУ, 2018. 340 с.
5. Шпете Г. Надежность несущих строительных конструкций. М. : Стройиздат, 1994. 288 с.
6. Вероятностный риск-анализ конструкций технических систем / А.М. Лепихин, Н.А. Махутов, В.В. Москвичев, А.П. Черняев. Новосибирск : Наука, 2003. 174 с.
7. Алямовский А.А. Solid Works/COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов. М. : ДМК Пресс, 2004. 432 с.
8. Богомоллов М.В. Виртуальные испытания изделий // Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск 38 /www.mai.ru/science/trudy/

УДК 539.4:519.2

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ, НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Махутов Н.А.¹, Лепихин А.М.², Чернякова Н.А.²

¹Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН, г. Москва

²Институт вычислительных технологий СО РАН, Красноярский филиал, г. Красноярск

Значительная доля технических систем эксплуатируется в экстремальных природно-климатических условиях Сибири и Крайнего Севера. К таким системам и их конструкциям предъявляются повышенные требования работоспособности, определяемые показателями прочности, надежности и безопасности. К настоящему времени сложилась многоуровневая концепция обеспечения работоспособности технических систем [1, 2]. Она включает специфические этапы, требования, критерии, расчетные параметры и направления развития (рис. 1). На первых этапах методология расчетно-экспериментального обоснования работоспособности основывалась на детерминированных методах, с элементами статистического анализа (этапы I-III). Осознание роли случайных факторов в нарушении работоспособности привело к использованию вероятностных методов моделирования и анализа (этапы IV, V). С созданием сложных, энергонасыщенных технических систем в анализ работоспособности стали вводиться параметры безопасности S и риска R аварий и катастроф с учетом природных, техногенных и антропогенных факторов (этапы VI, VII). На этой основе, к концу XX века сформировался комплекс взаимосвязанных многоуровневых детерминированных и вероятностных требований к параметрам работоспособности технических систем: прочность R_{σ} → жесткость R_{δ} → устойчивость R_{λ} → ресурс R_N, τ → надежность $P_{P,R}$ → живучесть $L_{d,l}$ → безопасность S . Необходимо отметить, что каждому этапу развития фундаментальных исследований в этой структуре соответствует определенный практический результат в проектировании, создании и эксплуатации технических систем: нераз-

рушимость – стабильность размеров и формы – долговечность – отказоустойчивость – живучесть – риск аварий. Риск рассматривается как количественная вероятностная мера безопасности. Базовое соотношение для определения указанных характеристик работоспособности технических систем записывается в следующем виде [3]

$$\{R, S, L_{l,d}, P_{P,R}, R_{N,\tau}, R_{\delta}, R_{\lambda}, R_{\sigma}\} \\ = \Psi\{\varphi_Q(Q, N, t, \tau); \varphi_{\sigma}(\sigma_y, \sigma_b, \sigma_{-1}, E, \nu, m, \psi, K_{1c}); \varphi_A(\alpha_{\sigma}, l, A)\}, \quad (1)$$

где Ψ – обобщенная функция технического состояния; $\varphi_Q(\cdot)$ – функционал нагруженности, учитывающий параметры нагрузок Q , числа циклов N , температуру t , длительность τ нагружения; $\varphi_{\sigma}(\cdot)$ – функционал физико-механических свойств конструкционных материалов, учитывающий предел текучести σ_y , предел прочности σ_b , предел выносливости σ_{-1} , модуль упругости E , коэффициент Пуассона ν , коэффициент упрочнения m , относительное сужение ψ в шейке при разрушении стандартного образца, критический коэффициент интенсивности напряжений K_{1c} ; $\varphi_A(\cdot)$ – функционал конструктивных форм, учитывающий размеры сечений A , размеры дефектов l и наличие конструктивных концентраторов напряжений α_{σ} .

Выражение (1) может рассматриваться как для предельных состояний, при которых техническая система перестает удовлетворять требованиям эксплуатации, так и для допустимых состояний, определяемых системой коэффициентов запаса n . Следует подчеркнуть, что каждый из этапов данной многоуровневой концепции рассматривает специфические расчетные ситуации: проектные, запроектные, гипотетические (рис. 2). При этом решается ряд фундаментальных задач механики деформируемого твердого тела: краевые задачи, определяющих напряжения в наиболее нагруженных элементах, сечениях A и локальных объемах V , $\{\sigma_{ij}, e_{ij}\} = F_{\sigma}\{Q, A, V(x, y, z)\}$; экспериментальные задачи получения диаграмм деформирования металла (уравнений состояния), $\{\sigma_{max}, e_{max}\} = F_{\sigma,e}\{\sigma_{ij}, e_{ij}\}$; экспериментальные задачи оценки критериальных значений напряжений и деформаций, соответствующих достижению условий нарушения прочности (разрушению), $\{\sigma_c, e_c\} = F_c\{\sigma_b, e_f\}$.

2030-2016	VIII	Защищенность	Приемлемый риск	$Z(\tau)$
2000	VII	Риск	Допустимые потери	$R(\tau)$
1990	VI	Безопасность	Допустимые угрозы	$S(\tau)$
1980	V	Живучесть	Устойчивость повреж дней	$L_{d,l}$
1970	IV	Надежность	Безотказность	$P_{P,R}$
1960	III	Долговечность	Долговечность	$R_{N,\tau}$
1940	II	Жесткость	Сохранение формы	$R_{\delta} R_{\lambda}$
1920	I	Прочность	Неразрушимость	R_{σ}
Годы	Этапы	Характеристики	Критерии	Параметры

Рис. 1. Структура системы расчетного обоснования работоспособности технических систем

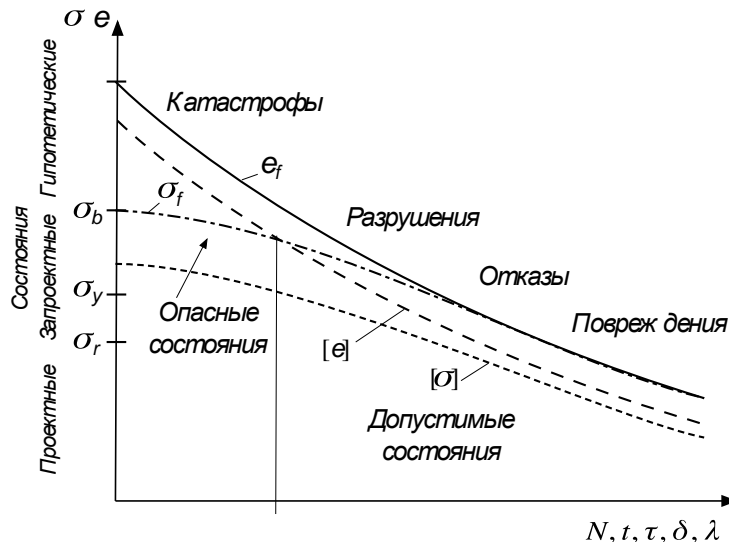


Рис. 2. Диаграмма расчетного анализа состояний технических систем

В качестве определяющих параметров используются номинальные напряжения σ_n и деформации e_n , локальные напряжения σ_l и деформации e_l , разрушающие напряжения σ_f и деформации e_f , а также фактические и критические размеры технологических и эксплуатационных дефектов l и l_f . Величины разрушающих напряжений и деформаций характеризуют предельные состояния и определяются с учетом режима нагружения по числу циклов N и времени τ , по диаграммам усталости $(\sigma_f - N_f)$ и $(e_f - N_f)$; устойчивости $(\sigma_f - \lambda_f)$ и $(e_f - \lambda_f)$; длительной прочности $(\sigma_f - \tau_f)$ и $(e_f - \tau_f)$; трещиностойкости $(\sigma_f - l_f)$ и $(e_f - l_f)$. Базовые характеристики прочности R_σ , жесткости R_δ , устойчивости R_λ и ресурса $R_{N,\tau}$ в основном рассматриваются для проектных ситуаций, когда значения всех параметров находятся в детерминированных пределах, установленных проектом.

$$\{R_\sigma, R_\delta, R_\lambda\} = F_R\{(\sigma_n, e_n); (\sigma_l, e_l); (\sigma_f, e_f)\}, \quad (2)$$

$$R_{N,\tau} = F_{N,\tau}\{(N, \tau); (R_\sigma, R_\delta, R_\lambda)\}. \quad (3)$$

Живучесть $L_{d,l}$ технических систем рассматривается для проектных и запроектных расчетных ситуаций при наличии процессов развития повреждений D .

$$L_{d,l} = F_D\{(d, l); P_d, P_l\}. \quad (4)$$

Повреждения обычно характеризуются скалярной мерой накопленных повреждений d или вектором обобщенных координат технологических и эксплуатационных дефектов $\{l_j(\tau), j = 1, m\}$. Количественные оценки характеристик безопасности основаны на совместном анализе надежности и живучести технических систем

$$S = F_S\{P_{P,N,\tau}, L_{d,l}\}. \quad (5)$$

Безопасность характеризует работоспособность технических систем при переходе в запредельные, не предусмотренные проектом, поврежденные состояния. В инженерной практике мерой безопасности являются риски R аварий и катастроф. Риски определяются как функция вероятностей P_f аварий и катастроф, и связанных с ними ущербов U_f :

$$R = F_c\{P_f, U_f\}. \quad (6)$$

Важно отметить, что вероятности P_f оцениваются для запроектных и гипотетических ситуаций, при экстремальных значениях параметров эксплуатации Q^{extr} и экстремальных характеристиках прочности и ресурса, не предусматриваемых проектом

$$P_f = F_P \left\{ P \left| (Q^{extr}, N, \tau); (R_\sigma, R_\delta, R_\lambda, R_{N,\tau})^{extr} \right. \right\}. \quad (7)$$

Современный этап исследований технических систем характерен тем, что после крупнейших техногенных аварий и катастроф XX-XXI веков этапы VII-VIII стали включать анализ защищенности объектов техносферы по критериям риска. Определяющим выражением этого нового направления инженерной методологии расчетно-экспериментального обоснования работоспособности становится функционал защищенности Z следующего вида

$$Z = F_Z \{ R, S, L_{l,d}, P_{P,R}, R_{N,\tau}, R_\delta, R_\lambda, R_\sigma \}. \quad (8)$$

Основываясь на изложенной методологии рассмотрим некоторые методические аспекты и особенности оценки прочности, надежности и безопасности технических систем в экстремальных природно-климатических условиях Сибири и Крайнего Севера.

Одна из основных проблем техники северного исполнения заключается в обеспечении хладостойкости, определяющей сопротивляемость конструкций хрупким разрушениям [4, 5]. В рассматриваемой методологии обеспечение хладостойкости заключается в обеспечении требуемых характеристик прочности R_σ для заданных экстремальных условий нагружения, с учетом номинальных (σ_n, e_n) , локальных $((\sigma_l, e_l))$ и критических (разрушающих) напряжений и деформаций (σ_f, e_f)

$$\{R_\sigma\} = F_R \{ (\sigma_n, e_n); (\sigma_l, e_l); (\sigma_f, e_f) \} \geq [R_\sigma]_t. \quad (9)$$

Особенность задачи заключается в различии подходов к оценке хладостойкости по номинальным и локальным характеристикам напряженно-деформированного состояния. В первом случае необходима проверка выполнения условия $\sigma_l/\sigma_f \leq S_k/\sigma_y$ при заданной температуре t . Левая часть этого соотношения характеризует особенности напряженно-деформированного состояния, а правая часть характеризует свойства материала. При наличии дефектов в конструкциях расчет проводится по локальным характеристикам напряженно-деформированного состояния методами механики разрушения. При этом необходимо использовать нормативные зависимости вязкости разрушения (мастер-диаграммы) от температуры, с учетом первой и второй критической температур. Следует отметить, что для большинства конструкционных сталей, используемых для техники северного исполнения, мастер-диаграммы отсутствуют.

Рассмотрим некоторые особенности задачи анализа риска. Анализ риска может быть выполнен с использованием двух подходов. Первый, классический, подход основан на статистической трактовке риска и актуарной статистики отказов и аварий технических систем [6]. Классическая статистическая формулировка риска задается триплетом, включающим описание сценария аварии C , вероятности его реализации P и возможных последствий (ущербов) U , т.е. $R = \{C, P, U\}$. Поскольку всегда есть неопределенность будущих состояний системы, таких триплетов может быть множество. Задача инженерной оценки риска заключается в нахождении некоторого конечного приближения числа сценариев. Не останавливаясь подробно на методических аспектах этого подхода заметим, что определение расчетных сценариев составляет науку и искусство актуарного анализа риска аварий технических систем.

Второй подход основан на использовании вероятностных формулировок риска, основанных на вероятностном описании и моделировании предельных состояний технических систем, приводящих к катастрофическим последствиям [7]. Принципиальные

различия этих подходов заключаются в том, что актуарная статистика относится к событиям, которые уже произошли. Статистические оценки невозможно корректно относить к будущим моментам времени. Вероятности же могут относиться как к прошедшим, так и к будущим событиям. Особые перспективы этого направления заключаются в использовании гибридного подхода, полагающего, что состояния технических систем определяются как случайным вектором $A = \{a_i\}^T$, $i = 1, n$ случайных переменных a_i с функциями распределения вероятностей $f(a_i)$, так и интервальным вектором $B = \{b_j^I\}$, $j = 1, m$, интервальных переменных с заданными нижними \underline{b} и верхними \bar{b} границами $b_j^I = [\underline{b}, \bar{b}]$. Такой подход позволяет получать интервальные оценки риска $R \in [R_{min}, R_{max}]$.

Защищенность Z технической системы по критериям риска можно рассматривать как выполнение условия, при котором расчетный риск $R(E)$, $E \subset (a, b)$ меньше некоторого допустимого значения R_0

$$Z = \{R(E) < R_0\} \text{ или } Z = \{R(E) - R_0 < 0\}. \quad (10)$$

На основании (10) можно предложить следующую классификацию уровней защищенности технических систем по критериям рисков (рис. 3): безусловно защищенные технические системы, для которых выполняется условие $R_{min} \leq R_{max} \leq R_0$; условно защищенные технические системы, для которых $R_{min} \leq R_0, R_{max} \geq R_0$; незащищенные технические системы, для которых $R_0 < R_{min} \leq R_{max}$.

В заключении следует отметить следующее. Для обеспечения работоспособности технических систем в экстремальных условиях эксплуатации необходимо дальнейшее развитие расчетно-экспериментальных методов оценки прочности, надежности и безопасности. Особую значимость в этом направлении имеют методы и технологии вычислительного моделирования и анализа предельных состояний конструкций, приводящих к катастрофическим разрушениям. Наиболее перспективным направлением создания эффективного аппарата оценки риска и анализа защищенности технических систем можно считать использование гибридных методов, позволяющих учесть, как стохастические, так и интервальные неопределенности параметров.

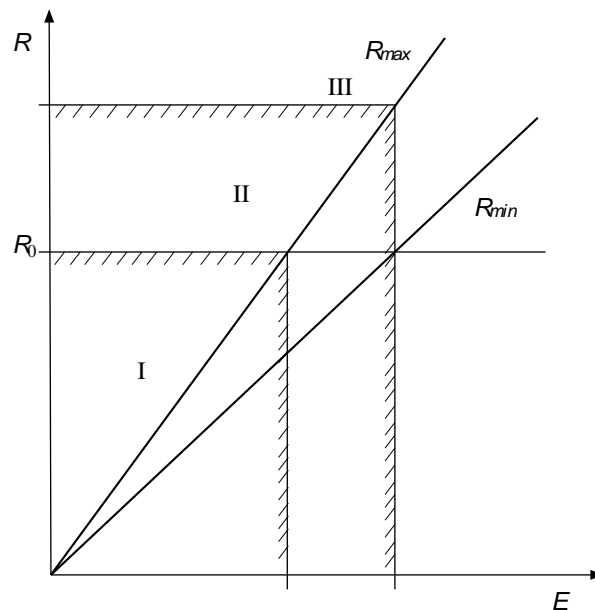


Рис. 3. Схема классификации защищенности технических систем:
 I – область безусловной защищенности; II – область условной защищенности;
 III – область незащищенности

Литература

1. Махутов Н.А. Прочность и безопасность. Фундаментальные и прикладные исследования. Новосибирск : Наука, 2008. 528 с.
2. Махутов Н.А. Критериальная база прочности, ресурса, надежности, живучести и безопасности машин и человеко-машинных комплексов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 5. С. 25-36.
3. Махутов Н.А. Безопасность и риски: системные исследования и разработки. Новосибирск : Наука, 2017. 724 с.
4. Григорьев Р.С., Ларионов В.П., Уржумцев Ю.С. Методы повышения работоспособности техники в северном исполнении. Новосибирск : Наука, 1987. 254 с.
5. Махутов Н.А., Лыглаев А.В., Большаков А.М. Хладостойкость. Метод инженерной оценки. Новосибирск : Наука, 2011. 195 с.
6. Bahr N.J. System safety engineering and risk assessment: a practical approach. New York : Taylor & Francis, 2015. 420 p.
7. Вероятностный риск-анализ конструкций технических систем / А.М. Лепихин, Н.А. Махутов, В.В. Москвичев, А.П. Черняев. Новосибирск : Наука, 2003. 174 с.

УДК 629.7.015.4

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СПОСОБА КРЕПЛЕНИЯ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КОМПОЗИТНОГО БАКА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Мироненко Е.Д.

АО «Информационные спутниковые системы»
имени академика М.Ф. Решетнева», г. Железногорск

Введение. Исторически в России сложилась практика прямого выведения космического аппарата (КА) на геостационарную орбиту (ГСО) посредством ракеты-носителя и разгонного блока. Однако, с появлением новых КА тяжелого класса массой более 3250 кг, энергетические возможности существующих средств выведения не обеспечивают выполнение данной задачи. Для преодоления существующих ограничений по массе выводимой полезной нагрузки, была реализована альтернативная схема выведения КА на заданную орбиту с использованием штатных электрореактивных двигательных установок (ЭРДУ) расположенных на КА (патент РФ №2586945). Реализация данной схемы выведения позволяет увеличить массу выводимого КА на ГСО с 3250 кг до 4500 кг. Запас рабочего тела – порядка 400 кг ксенона, необходимый для работы штатных ЭРДУ и эксплуатации КА в течение всего срока активного существования (САС) обеспечивает композитный бак высокого давления (КБВД, бак).

Обеспечение надежности КБВД является важной задачей, так как потеря его работоспособности является единичной точкой отказа КА в целом (резервирование столь тяжелого и объемного узла в конструкции КА не возможно). На данный момент проведены работы по определению несущей способности и жесткости, исследованию напряженно-деформированного состояния (НДС) КБВД [1, 2].

Изучение зарубежной литературы свидетельствует о том, что немаловажное влияние на НДС бака оказывают элементы крепления находящиеся в непосредственном контакте с баком. В данной статье приведен сравнительный анализ НДС КБВД с раз-