

УДК 51-74 + 621.01

Нормативные подходы к обеспечению защищенности критически важных объектов

Н. А. Махутов, главный научный сотрудник, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук,

Д. О. Резников, ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук,

В. П. Петров, ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук,

В. И. Куксова, старший научный сотрудник, канд. эконом. наук

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук

e-mail: mibsts@mail.ru, ImashReznikoff@yandex.ru

Ключевые слова:

критически важный объект, защищенность, коэффициент запаса, индекс надежности

В статье проводится сопоставительная оценка нормативного условно-детерминированного подхода к обеспечению защищенности критически важных объектов, который основывается на назначении запасов по основным механизмам достижения предельных состояний, и нормативного вероятностного подхода, базирующегося на использовании индексов надежности.

1. Постановка задачи и общие принципы обеспечения защищенности КВО

Критически важные объекты (далее — КВО) представляют собой сложные многокомпонентные технические системы, стабильная работа которых является необходимым условием нормального функционирования общества. КВО эксплуатируются в течение длительных временных интервалов (десятки лет), в ходе которых их элементы подвергаются широкому спектру проектных и запроектных воздействий, таких как эксплуатационные нагрузки, экстремальные природные воздействия, ошибки операторов, террористические атаки. Выход из строя КВО сопряжен как с большими прямыми ущербами, обусловленными высокой стоимостью самих объектов, так и значительными косвенными ущербами, связанными с не предоставлением населению и объектам экономики базовых услуг (обеспечение энергией, связью, транспортом и т.д.).

Защищенность критически важного объекта, определяется его способностью противостоять возникновению и развитию неблагоприятных ситуаций в штатных и нештатных условиях. Обеспечение защищенности КВО от угроз природно-техногенных катастроф и террористических воздействий является важной народно-хозяйственной проблемой и необходимым условием устойчивого развития общества.

Оценку защищенности критически важных объектов и выработку защитных мероприятий приходится осуществлять в условиях высокого уровня неопреде-

ленности относительно интенсивности эксплуатационных нагрузок и внешних воздействий на объект, с одной стороны, а также несущей способности ответственных элементов КВО на различных этапах цикла его эксплуатации — с другой. Источниками неопределенностей являются: естественная вариативность параметров системы и внешней среды, ограниченность знаний о связях между элементами КВО, событиями и процессами, протекающими в сложных технических системах; неточность имеющихся статистических данных и существующих оценок; несовершенство используемого контрольно-измерительного оборудования и математических моделей.

Могут быть сформированы две группы принципиально различных подходов к обеспечению защищенности КВО:

- нормативные подходы к обеспечению защищенности, которые базируются на снижении возможности достижения системой различных предельных состояний за счет реализации технических и организационных мер, обеспечивающих соответствующие запасы по основным механизмам достижения предельных состояний.
- подходы, основывающиеся на управлении риском аварий и катастроф на КВО и предполагающие выработку комплекса технических и организационных мероприятий, направленных на снижение уровня угроз, которым подвергаются

КВО, снижение уязвимости объектов по отношению к угрозам и минимизацию ущербов в случае аварий на КВО.

Применение нормативных подходов бывает оправдано в тех случаях, когда имеется определенный опыт, позволяющий опираться на проверенные на практике нормативные значения параметров системы. При строительстве уникальных систем обеспечение защищенности должно базироваться на оценке рисков и выработке мероприятий по их снижению.

Нормативные подходы предполагают осуществление проектирования и эксплуатации объекта таким образом, чтобы обеспечить защищенность по основным механизмам достижения предельных состояний $i = 1, 2, \dots, k$ на протяжении всего срока эксплуатации объекта T_3 :

$$\Sigma_i^C(t) - \Sigma_i^D(t) > 0 \quad \forall t \in [0; T_3], \quad \forall i = 1, 2, \dots, k, \quad (1)$$

где $\Sigma_i^C(t)$ предельные характеристики прочности, надежности, ресурса, живучести ответственных элементов КВО (далее — характеристики несущей способности),

$\Sigma_i^D(t)$ — соответствующие им факторы эксплуатационного нагружения (далее — нагрузки) (рис. 1) [1, 2].

С помощью выражений вида (1) могут рассматриваться две группы механизмов достижения предельных состояний.

1. Механизмы разрушения при перегрузках, обусловленных экстремальными воздействиями, которые способны вызывать разрушение при малой степени поврежденности системы. При рассмотрении механизмов достижения предельных состояний, обусловленных перегрузками, исходят из того, что система оказывается разрушенной в момент, когда нагрузка Σ^D окажется выше несущей способности Σ^C . В такой постановке считается, что нагрузки интенсивностью ниже предельного уровня не оказывают необратимого влияния на систему (ее несущую способность). При этом разрушение трактуется как первый выброс из области защищенных состояний, а история эксплуатационного нагружения не учитывается.

2. Кумулятивные деградационные механизмы разрушения (усталость, коррозия, износ), обусловленные постепенным накоплением повреждений в процессе эксплуатации системы, снижением ее несущей способности и достижением системой поврежденных состояний, при которых разрушение наступает при проектных воздействиях на систему.

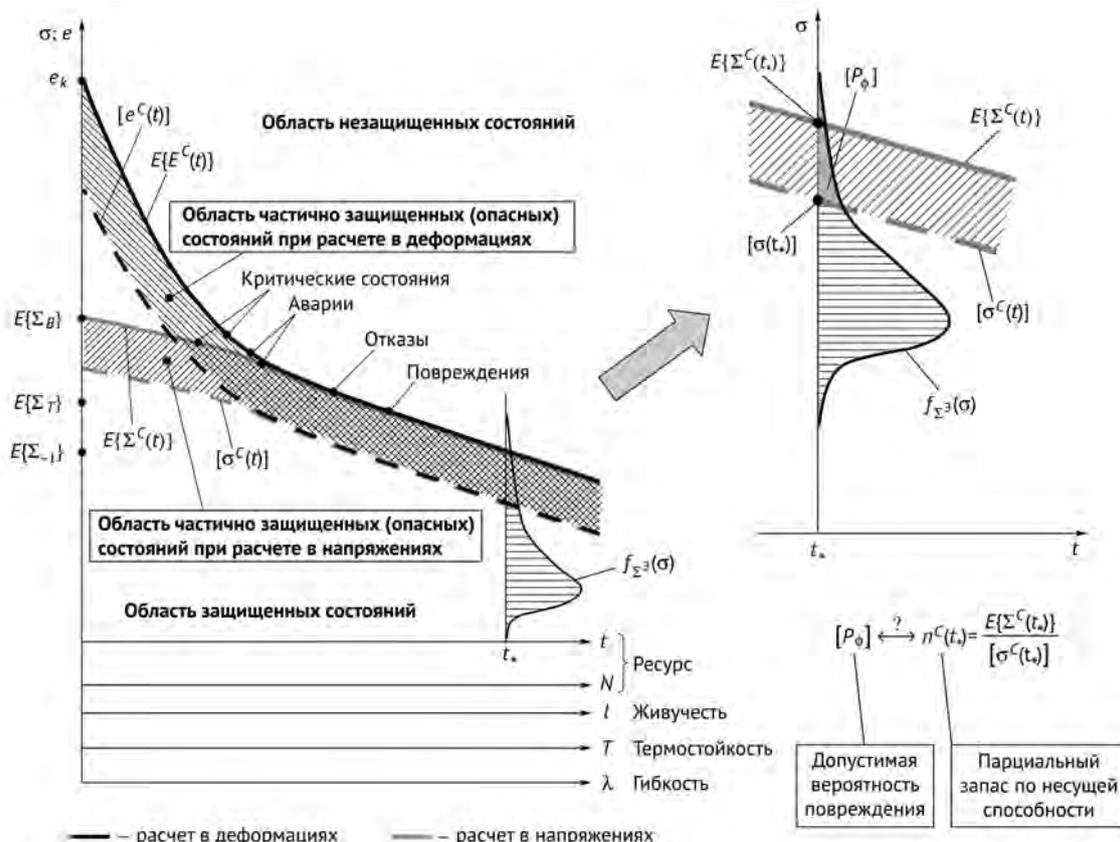


Рис. 1. Диаграммы защищенных состояний

Очевидно, что разрушение объекта в процессе его эксплуатации может происходить и по комбинированному механизму, сочетающему снижение несущей способности вследствие накопления повреждений и при экстремальном воздействии.

Следует отметить, что в выражении (1) фигурируют неопределенные величины нагрузки и несущей способности. В связи с этим в рамках группы нормативных подходов могут быть выделены два подхода, различающиеся принципами работы с неопределенностями: нормативный условно-детерминированный и нормативный вероятностный подходы, которые будут представлены в двух последующих разделах.

2. Нормативный условно-детерминированный подход

При реализации нормативного подхода неопределенные величины $\Sigma_i^c(t)$ и $\Sigma_i^o(t)$ в выражении (1) заменяются на детерминированные: расчетную (номинальную) несущую способность и расчетную нагрузку. В качестве указанных расчетных величин могут выбираться некоторые детерминированные характеристики случайных величин нагрузки и несущей способности, например, их математические ожидания $E\{\Sigma_i^c(t)\}$ и $E\{\Sigma_i^o(t)\}$. При этом для учета неопределенности вводятся парциальные запасы по несущей способности $n_i^c(t) > 1$ и нагрузке $n_i^o(t) > 1$. При назначении парциальных запасов учитываются: разброс величин нагрузки и несущей способности, уровень неопределенности, присутствующий в задаче, и критичность рассматриваемых элементов системы. В связи с тем, что уровень неопределенности о состоянии рассматриваемой технической системы в процессе эксплуатации, как правило, возрастает, парциальные запасы также должны быть возрастающими функциями времени. Однако в ряде случаев, например, когда осуществляется технический мониторинг, их можно считать постоянными.

При этом условие обеспечения защищенности (1), можно записать с помощью детерминированных величин:

$$\frac{E\{\Sigma_i^c(t)\}}{n_i^c(t)} - n_i^o(t) \cdot E\{\Sigma_i^o(t)\} > 0, \forall t \in [0; T_3], \forall i = 1, 2, \dots, k. \quad (2)$$

Введем понятия предельно допустимой несущей способности $[\sigma_i^c(t)] = E\{\Sigma_i^c(t)\} / n_i^c(t)$ и предельно допустимой нагрузки $[\sigma_i^o(t)] = n_i^o(t) \cdot E\{\Sigma_i^o(t)\}$, а также понятие предельно допустимого (нормативного) запаса $[n_i(t)] = n_i^o(t) \cdot n_i^c(t)$. Тогда условие обеспечения защищенности по i -му предельному состоянию может быть записано в виде:

$$E\{\Sigma_i^c(t)\} - [n_i(t)] \cdot E\{\Sigma_i^o(t)\} > 0, \forall t \in [0; T_3], \forall i = 1, 2, \dots, k.$$

Затем, введя понятия расчетного дифференциального запаса, равного отношению расчетных значений несущей способности и нагрузки при i -ом механизме достижения предельных состояний $n_i(t) = E\{\Sigma_i^c(t)\} / E\{\Sigma_i^o(t)\}$, можно записать условие обеспечения защищенности системы, выраженное через запасы:

$$n_i(t) > [n_i(t)], \quad \forall t \in [0; T_3], \forall i = 1, 2, \dots, k \quad (3)$$

Величина расчетного дифференциального запаса n_i в момент времени t может быть представлена как:

$$n_i(t) = n_i(0) - \Delta_i(t) + \delta_i^{\zeta_s}(t),$$

где $n_i(0)$ — величина начального запаса, задаваемого при проектировании путем выбора соответствующих технических решений, геометрических и физических параметров системы;

$\Delta_i(t)$ — величина, отражающая снижение несущей способности вследствие действия деградационных процессов в технической системе (усталость, коррозия, износ);

$\delta_i^{\zeta_s}(t)$ — величина, характеризующая увеличение несущей способности (и/или снижение уровня эксплуатационных нагрузок) вследствие реализации определенной программы эксплуатации объекта $\zeta_s(a_{mon}, a_{to}, a_{rem}, a_{sz})$, предусматривающей осуществление набора защитных мероприятий (мониторинг a_{mon} , техническое обслуживание a_{to} , ремонт a_{rem} , создание систем защиты a_{sz}).

Система начальных дифференциальных расчетных запасов формируется как:

$$n_i(0) = E\{\Sigma_i^c(0)\} / E\{\Sigma_i^o(0)\}, \quad i = 1, 2, \dots, k,$$

где $E\{\Sigma_i^c(0)\}$ и $E\{\Sigma_i^o(0)\}$ — соответственно математические ожидания несущей способности и нагрузки.

Указанные расчетные/нормативные значения принимаются как детерминированные величины, которые по отношению к реальным случайным величинам $\Sigma_i^c(0)$ и $\Sigma_i^o(0)$ играют роль некоторых средних или наиболее вероятных значений. Как уже отмечалось, определяемые таким образом расчетные запасы принято называть центральными. Они отражают соотношение между центрами распределения (математическими ожиданиями) величин Σ_i^c и Σ_i^o и не учитывают их дисперсии а также и более высокие моменты указанных распределений. Как будет показано ниже, это обстоятельство обуславливает ряд сложностей при оценке вероятности разрушений системы, спроектированной в соответствии с выбранными центральными запасами, и, следовательно, ограничивает возможность проведения оптимизации системы по параметрам выбираемых запасов.

В инженерной практике дифференциальные запасы n_i выбираются на этапе проектирования, при этом задается вектор начальных запасов по прочности,

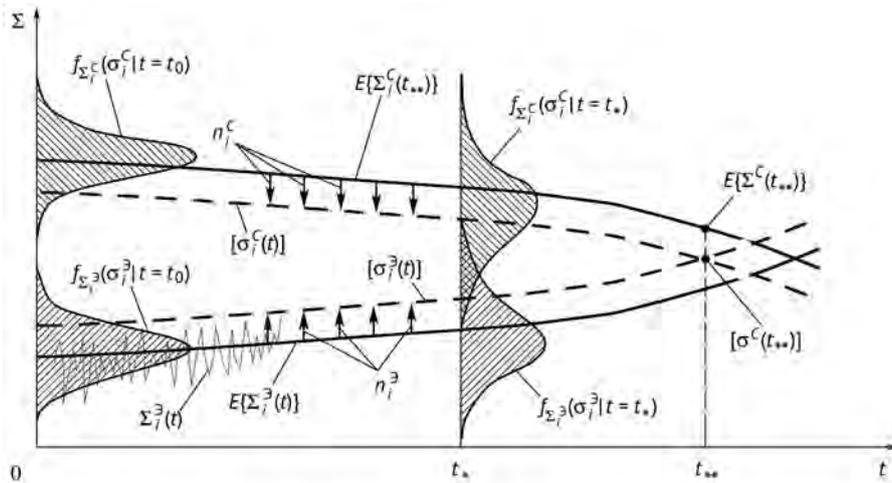


Рис. 2. Определение точек поверхностей предельных состояний

живучести, надежности, ресурсу и др. Очевидно, что комплекс запасов $n_1(0), n_2(0), \dots, n_k(0)$, обеспеченных на этапе строительства критически важного объекта, не полностью определяет состояние защищенности объекта на различных этапах его функционирования. Ввиду действия деградиционных процессов (усталость, коррозия, износ), а также экстремальных внешних воздействий, ошибок операторов и т.д., несущая способность элементов КВО имеет естественную тенденцию к снижению (рис. 2). Поэтому дифференциальные запасы $n_i(t)$ являются убывающими функциями, которые со временем могут опуститься ниже допустимых уровней $[n_i(t)]$. В связи с этим в процессе эксплуатации объекта предусматривается проведение комплекса специальных защитных мероприятий, включающих: мониторинг технического состояния, техническое обслуживание, ремонтные работы, введение систем защиты, которые в совокупности составляют избранную (на этапе проектирования) программу эксплуатации объекта $\zeta_*(a_{mon}, a_{to}, a_{rem}, a_{sz})$, призванную поддерживать требуемое состояние защищенности на протяжении всего жизненного цикла объекта. Следует отметить, что начальные запасы $n_i(0)$ по основным механизмам достижения предельных состояний КВО должны назначаться с учетом ожидаемой интенсивности деградиционных процессов и во взаимной увязке с принимаемой программой эксплуатации КВО.

Таким образом, защищенность объекта может характеризоваться совокупностью начальных дифференциальных запасов $n_1(0), n_2(0), \dots, n_k(0)$, семейством так называемых функций деградации $\Delta_{\Sigma_i^c}(t), \Delta_{\Sigma_i^z}(t), \dots, \Delta_{\Sigma_k^c}(t)$, отражающих снижение несущей способности вследствие действия деградиционных процессов, и комплексным параметром «программа эксплуатации объекта» $\zeta_*(a_{mon}, a_{to}, a_{rem}, a_{sz})$, определяющим систему защитных мероприятий, реализуемых в процессе эксплуатации КВО. В такой

постановке защищенность объекта характеризуется функционалом:

$$Z_H(t) = F_{\bar{n}, \zeta} \left\{ n_1(0), n_2(0), \dots, n_k(0), \Delta_{\Sigma_i^c}(t), \Delta_{\Sigma_i^z}(t), \dots, \Delta_{\Sigma_k^c}(t), \zeta_*(a_{mon}, a_{to}, a_{rem}, a_{sz}) \right\}. \quad (4)$$

Фактические нагрузки, действующие на элементы КВО, и свойства материалов, из которых они изготовлены, могут значительно отличаться от тех, которые принимаются для расчета. При этом факторы, снижающие несущую способность (перегрузки, экстремальные воздействия, ошибки операторов, неоднородность материалов, неточность геометрических размеров и т.д.), носят чаще всего случайный характер и предварительно не могут быть учтены. Поэтому для обеспечения защищенности КВО в этих неблагоприятных условиях необходимо принять определенные меры предосторожности [3, 4]. При рассматриваемом нормативном подходе эти меры заключаются в задании минимально допустимых запасов $\{[n_1], [n_2], \dots, [n_k]\}$ по основным механизмам достижения предельных состояний, которые, в свою очередь, обуславливают выбор начальных дифференциальных запасов $n_1(0), n_2(0), \dots, n_k(0)$ и программы эксплуатации объекта ζ_* .

Выбор величин допустимых запасов $[n_i]$ играет ключевую роль при решении практических задач комплексного обеспечения защищенности КВО.

Вопрос о предельно допустимом запасе по рассматриваемому предельному состоянию определяют исходя из опыта проектировщика, точности расчетных моделей, вариативности параметров, определяющих уровень загруженности и величины ущерба, ожидаемого в случае аварии. Таким образом, величины минимально допустимых запасов определяются как субъективными (мнение, опыт и осторожность проектировщика), так и объективными (уровень неопределенности относительно нагрузок и физико-

механических свойств материала, определяющих несущую способность конструкции) факторами. Использование подобного подхода при проектировании новых (уникальных) объектов сопряжено с большими сложностями и высокими уровнями неопределенности, связанными с отсутствием опыта назначения допустимых запасов по предельным состояниям, которые могут реализовываться в системе.

Еще одно ограничение по использованию представленного подхода состоит в том, что он позволяет рассматривать линейные функции предельных состояний вида $g(\Sigma^C; \Sigma^{\exists}) = \Sigma^C - \Sigma^{\exists}$. Очевидно, что в более общей постановке необходимо учитывать ситуации, когда функция предельных состояний является нелинейной и не может быть представлена в виде разности двух переменных, характеризующих нагрузку и несущую способность.

Описанный выше вариант нормативного подхода, предполагающий использование детерминированных (средних) величин распределений нагрузки Σ_i^{\exists} и несущей способности Σ_i^C для определения допустимых дифференциальных запасов, может быть назван условно-детерминированным.

Учитывая функционал (4), могут быть выделены две стратегии обеспечения защищенности:

1) стратегия ζ_1 , предусматривающая задание малых начальных запасов $n_i^{\zeta_1}(0)$ при значительном объеме защитных мероприятий. Данная стратегия применяется на объектах, которые легко контролировать в процессе эксплуатации и которые могут быть отремонтированы или заменены без длительной остановки.

2) стратегия ζ_2 , предусматривающая задание значительных начальных запасов $n_i^{\zeta_2}(0)$ по основным механизмам достижения предельных состояний при отсутствии защитных мероприятий. Данная стратегия используется на объектах (или для элементов объектов), доступ к которым в процессе эксплуатации является затрудненным и которые не могут быть отремонтированы без значительных материальных или временных издержек.

Нормативный детерминированный критерий обеспечения защищенности при стратегии эксплуатации ζ_* можно записать в виде:

$$n_i^{\zeta_*}(t) > [n_i(t)] \quad \forall t \in [0; T_{\exists}], \forall i = 1, 2, \dots, k. \quad (5)$$

Тогда вводится нормативный показатель защищенности

$$Z_{\text{Норм}} = \begin{cases} 1, & \text{если } n_i^{\zeta_*}(t) > [n_i(t)] \forall t \in [0; T_{\exists}], \forall i = 1, 2, \dots, k \\ 0, & \text{если } \exists (t_{..} \in [0; T_{\exists}] \wedge j \in \{1, 2, \dots, k\}) \mid n_j^{\zeta_*}(t_{..}) < [n_j(t)]. \end{cases}$$

Принятие решений по выбору вариантов проектов критически важных объектов и стратегий их эксплуа-

тации происходит при наличии двух конкурирующих групп требований: направленных на обеспечение защищенности КВО и их экономической эффективности.

Обеспечение защищенности предполагает назначение значительных начальных запасов по основным механизмам достижения предельных состояний и выбор интенсивных процедур обслуживания в процессе эксплуатации объекта.

Обеспечение эффективности, напротив, требует назначения малых начальных запасов и минимизации эксплуатационных затрат. Это обстоятельство определяет внутреннюю противоречивость задач, решаемых при выборе проектного решения по КВО. Указанное противоречие разрешается с помощью принципа минимизации затрат жизненного цикла объекта.

Задачу обеспечения защищенности приходится решать в условиях ограниченности ресурсов, поэтому необходимо оптимизировать затраты жизненного цикла объекта [5].

Затраты жизненного цикла C_L включают: первоначальные затраты на проектирование и строительство объекта C_p , затраты на мониторинг, техническое обслуживание и ремонт C_m , а также ожидаемые ущербы при авариях $C_{\phi} = \sum_k U_{\phi_k} \cdot P_{\phi_k}(\{n_i(0)\}, \zeta_j)$ (здесь U_{ϕ_k} — ущерб при реализации k -го поврежденного состояния, P_{ϕ_k} — вероятность реализации k -го поврежденного состояния).

$$C_L(\{n_i(0)\}; \zeta_j) = C_p(\{n_i(0)\}) + C_m(\{n_i(0)\}, \zeta_j) + \sum_k U_{\phi_k} \cdot P_{\phi_k}(\{n_i(0)\}, \zeta_j)$$

Задача выбора оптимального набора запасов по основным механизмам достижения предельных состояний затруднена тем, что зависимость вероятности аварии от выбранных запасов, как правило, неизвестна, поскольку часто неизвестны распределения таких случайных величин как уровень нагрузки и несущей способности (и, в частности, дисперсии указанных величин). В тех случаях когда удается получить данные о характере подобных распределений, указанная задача может быть решена.

Вероятность разрушения определяется областью перекрытия графиков функций плотностей распределений случайных величин нагрузки Σ^{\exists} и несущей способности Σ^C (рис. 3).

$$P_{\phi} = \Phi \left(E \{ \Sigma^C \}, E \{ \Sigma^{\exists} \}, S \{ \Sigma^C \}, S \{ \Sigma^{\exists} \}, \dots, \text{моменты высших порядков} \right),$$

где $S\{\Sigma^C\}$, $S\{\Sigma^{\exists}\}$ — среднеквадратичные отклонения величин несущей способности и нагрузки.

В рамках условно-детерминированного подхода, опирающегося на назначение запасов $n = E\{\Sigma^C\} / E\{\Sigma^{\exists}\}$,

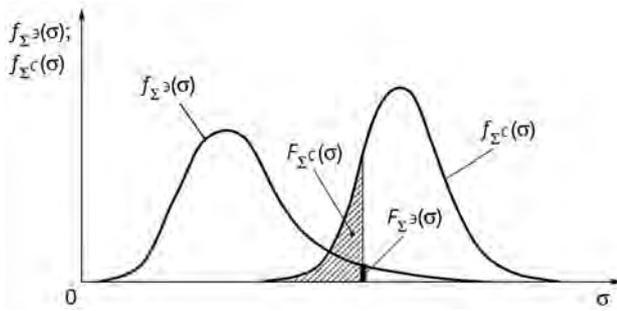


Рис. 3. Плотности распределения нагрузки и несущей способности

учитываются только соотношения между математическими ожиданиями нагрузки Σ^{\exists} и несущей способности Σ^C . То есть вероятность отказа оценивается с помощью приближенного выражения:

$$P_{\phi} \approx \psi_1 \left(E \{ \Sigma^C \}, E \{ \Sigma^{\exists} \} \right) = \psi_1(n). \quad (6)$$

Поэтому использование детерминированных запасов $\{n_i(0)\}$ для оценки защищенности объекта без учета дисперсий параметров несущей способности и нагрузок сопряжено с отбрасыванием значительного объема информации и может приводить к ошибочным результатам. Вообще, говорить о соотношении между вероятностью разрушения и величиной детерминированного запаса корректно, только когда величины дисперсий (а точнее, вид распределений случайных параметров) считаются заданными.

В этой связи следует отметить, что задача выбора оптимальных запасов может быть решена лишь в первом приближении, не учитывающем разброс параметров нагрузки и несущей способности.

3. Нормативный вероятностный подход

В настоящее время в рамках нормативного подхода выделено новое направление, в котором вместо дифференциальных запасов n_i по основным механизмам достижения предельных состояний используются дифференциальные индексы надежности β_p , которые учитывают не только соотношения между центрами распределений случайных величин нагрузки Σ_i^{\exists} и несущей способности и Σ_i^C , но и их дисперсии.

Как уже отмечалось, ключевым вопросом оценки защищенности является определение вероятности разрушения (отказа) системы, для различных соотношений несущей способности и нагрузки. Вероятность разрушения может быть оценена с помощью функции предельных состояний $g(\mathbf{X}) = 0$, которая определяет границу между областью защищенных состояний $g(\mathbf{X}) > 0$ и областью отказов $g(\mathbf{X}) < 0$ (рис. 4):

$$P_{\phi} = P(g(\mathbf{x}) \leq 0) = \int_{g(\mathbf{x}) \leq 0} f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x}, \quad (7)$$



Рис. 4. Функция предельных состояний

где $\mathbf{X} = X_1, X_2, \dots, X_k$ — вектор случайных переменных, определяющих несущую способность и нагрузки, а $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$ — совместная функция плотности распределения случайных параметров системы и внешних нагрузок X_1, X_2, \dots, X_k . При этом каждому механизму разрушения соответствует своя функция предельных состояний $g_i(\mathbf{X})$ [6].

Аналитическое решение задачи оценки вероятности отказа по выражению (7) может быть получено только для отдельных частных случаев. Однако можно применить численные расчеты, например, методом Монте-Карло. Далее будет рассмотрен другой подход к решению задачи, который применяется в системной теории надежности.

Рассмотрим частный случай оценки вероятности отказа для модели «нагрузка — несущая способность» (рис. 4), когда функция предельных состояний для рассматриваемого элемента системы определяется соотношением двух случайных переменных: несущей способности (критического напряжения) $X_1 = \Sigma^C$ и нагрузки (действующих напряжений) $X_2 = \Sigma^{\exists}$: $g(\Sigma^C, \Sigma^{\exists}) = \Sigma^C - \Sigma^{\exists}$.

Ведем понятие резерва несущей способности M , равного превышению несущей способности над нагрузкой: $M = \Sigma^C - \Sigma^{\exists}$. Поскольку Σ^C и Σ^{\exists} являются случайными величинами, то M также является случайной величиной, имеющей математическое ожидание $E\{M\}$ и среднеквадратичное отклонение $S\{M\}$. Пусть Σ^C и Σ^{\exists} являются некоррелированными случайными величинами, распределенными по нормальному закону. Тогда величина резерва несущей способности также будет распределена по нормальному закону, причем ее математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение будут определяться выражениями:

$$E\{M\} = E\{\Sigma^C\} - E\{\Sigma^{\exists}\},$$

$$S\{M\} = \sqrt{(S\{\Sigma^C\})^2 + (S\{\Sigma^{\exists}\})^2},$$

где $E\{\Sigma^C\}$, $E\{\Sigma^{\exists}\}$, $S\{\Sigma^C\}$, $S\{\Sigma^{\exists}\}$ — математические ожидания и среднеквадратичные отклонения для величин Σ^C и Σ^{\exists} , соответственно.

Вероятность отказа системы равна вероятности того, что $M \leq 0$: $P_\phi = P(M \leq 0) = F_M(0)$, где $F_M(M)$ — функция распределения случайной величины M . Поскольку M распределена по нормальному закону, то можно записать:

$$F_M(M) = \Phi(x) = \Phi\left(\frac{M - E\{M\}}{S\{M\}}\right),$$

где $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$ — нормальная функция распределения, для которой составлены таблицы.

Тогда вероятность разрушения будет оцениваться выражением:

$$P_\phi = \Phi\left(-\frac{E\{M\}}{S\{M\}}\right) = \Phi(-\beta). \quad (8)$$

В теории надежности величину $\beta = E\{M\}/S\{M\}$, обратную коэффициенту вариации резерва несущей способности M , принято называть гауссовой мерой надежности или индексом надежности (англ. *reliability index*). Можно показать, что величина β может рассматриваться как параметр, описывающий защищенность системы, поскольку он характеризует расстояние от текущей точки пространства параметров системы до функции предельных состояний.

Между вероятностью разрушения P_ϕ и индексом надежности β существует связь:

$$P_\phi = \Phi(-\beta). \quad (9)$$

Таким образом, индекс надежности (при условии предположения о нормальном характере распределения нагрузки и несущей способности) однозначно определяется вероятностью разрушения. О соотношении между этими величинами можно судить по данным, представленным в табл. 1.

Аналогично нормативному условно-детерминированному критерию обеспечения защищенности вида (5) может быть записан нормативный вероятностный критерий обеспечения защищенности, соответствующий стратегии эксплуатации объекта ζ_i :

$$\beta_i^{\zeta_i}(t) > [\beta_i]; \quad \forall t \in [0; T_3], \quad \forall i = 1, 2, \dots, k. \quad (10)$$

Зависимость вида (9) справедлива для случая, когда нагрузка и несущая способность распределены по нормальному закону. В тех случаях когда характер этих распределений отличен от нормального, но эти распределения являются достаточно компактными, нормативный вероятностный подход, тем не менее, позволяет оценивать вероятность отказа с помощью

приближенного выражения, учитывающего первые и вторые моменты распределений:

$$P_\phi \approx \Psi_2\left(E\{\Sigma^C\}, E\{\Sigma^\ominus\}, S\{\Sigma^C\}, S\{\Sigma^\ominus\}\right) = \Psi_2(\beta). \quad (11)$$

Очевидно, что оценка вида (11) является более точной, чем оценка вида (6), получаемая с помощью условно-детерминированного подхода. То обстоятельство, что индекс надежности, в отличие от коэффициентов запаса, учитывает не только соотношения между центрами распределений, но и дисперсии величин нагрузки и несущей способности, свидетельствует о том, что использование индекса надежности в качестве нормируемого параметра является более предпочтительным, чем использование традиционных коэффициентов запаса.

4. Заключение

Таким образом, можно сделать вывод, что для компактных распределений нагрузки и несущей способности нормативный вероятностный подход позволяет более точно оценивать защищенность системы, чем нормативный условно-детерминированный подход.

Как уже отмечалось, вероятность разрушения определяется областью перекрытия распределений Σ^C и Σ^\ominus . В случае если для высоконадежных систем предположение о компактности законов распределения нагрузки и (или) несущей способности не выполняется, то первых двух моментов распределений величин Σ^C и Σ^\ominus оказывается недостаточно для оценки вероятности разрушения. Иначе говоря, если Σ^C и Σ^\ominus имеют распределения с тяжелыми хвостами, то использование так называемых моментных методов, описывающих центральные области распределений с помощью центральных запасов n_i и индексов надежности β_i , становится некорректным.

В этом случае защищенность системы будет определяться областью перекрытия «правого хвоста» распределения нагрузки и «левого хвоста» распределения несущей способности и, следовательно, может характеризоваться экстремальной частью (правым хвостом) распределения функции $g = \Sigma^C - \Sigma^\ominus$.

Создание модели для оценки вероятности реализации экстремально высоких значений u является чрезвычайно важным для оценки защищенности и должно стать предметом внимательного рассмотрения. Для этой цели используется теория экстремальных значений, позволяющая оценивать распределение значений случайной переменной, превышающих высокий порог рассматриваемой величины.

Таблица 1

Соотношение между индексом надежности и вероятностью разрушения

β	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
P_ϕ	0,159	0,067	0,023	0,006	$0,14 \cdot 10^{-2}$	$0,23 \cdot 10^{-3}$	$0,32 \cdot 10^{-4}$	$0,34 \cdot 10^{-5}$

В качестве перспективного направления разработок в рамках нормативного подхода к обеспечению защищенности КВО можно выделить использование теории нечетких множеств и нечетких индексов надежности. Эти показатели позволяют оценивать уровень защищенности объектов в условиях высокой неопределенности, когда отсутствует достаточная информация,

позволяющая строить вероятностные распределения величин нагрузки Σ_i^{\ominus} и несущей способности Σ_i^{\ominus} , и нет четких границ между областями защищенных и незащищенных состояний элементов КВО.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант №10-08-00989.

ЛИТЕРАТУРА

1. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность: в 2 ч. — Новосибирск: Наука, 2005. — Часть 1. Критерии прочности и ресурса. — 494 с. Часть 2. Обоснование ресурса и безопасности. — 620 с.
2. Махутов Н.А. Прочность и безопасность. Фундаментальные и прикладные исследования. — Новосибирск: Наука, 2008. — 523 с.
3. Доронин С.В., Лепихин А.М., Москвичев В.В., Шокин Ю.И. Моделирование прочности и разрушения несущих конструкций технических систем. — Новосибирск: Наука, 2005. — 247 с.
4. Elishakoff I. Safety Factors and Reliability: Friends or Foes? — Kluwer: Academic Publishers, Dordrecht, 2004. — 294 p.
5. Махутов Н.А., Резников Д.О., Петров В.П., Кукусова В.И. Обеспечение защищенности и минимизация общих эксплуатационных затрат и ущербов в течение жизненного цикла критически важных объектов путем выбора оптимальной стратегии проведения технических инспекций и ремонта // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. — 2010. — № 3. — С. 34–68.
6. Ang A., Tang. W. Probability concepts in Engineering Planning and Design. — Volume 1. — Basic Principles. — John Wiley & Sons, Inc. US, 1975. 407 p.

Regulatory Approaches to Ensure Safety of Critical Facilities

N. A. Makhutov, Chief Researcher, corresponding member of RAS, Doctor of Engineering,

D. O. Reznikov, leading researcher, Candidate of Engineering,

V. P. Petrov, leading researcher, Candidate of Engineering,

V. I. Kuksova, senior researcher, Candidate of Economics,
Institute of Machine Sciences of the Russian Academy of Sciences

The article addresses comparative assessment of prescriptive deterministic approach to ensure safety of critical facilities based on complying with safety index requirement for main mechanisms failures and prescriptive probabilistic approach based on reliability index application.

Keywords: critical facility, safety, safety index, reliability index

Фоновый риск гибели людей на опасных производствах в России (официальные данные Госгортехнадзора России и Ростехнадзора – RiskProm.ru)

№	Отрасль промышленности, поднадзорные объекты	Удельный риск гибели людей при аварии или несчастном случае на единицу продукции, масштаб производства		Риск гибели работника (за 5 лет)	Дополнительные сведения		
		величина	размерность		Погибших на тыс. занятых	Период наблюдения, гг.	Среднегодовое число погибших
1	Угольная промышленность	53±11	смертей на 100 млн. т добытого угля	0,53±0,33	1991–2010	147,0±30,0	280±16 млн. т
2	Горнорудная и нерудная промышленность, объекты подземного строительства	6,6±0,7	смертей на 100 млн. м ³ добытой горной массы	0,12±0,02	1994–2010	89,0±7,0	1365±59 млн.м ³
3	Нефтедобывающие производства	5,9±1,0	смертей на 100 млн. т добытой нефти	0,10±0,03	1992–2010	21,0±3,0	396±34 млн. т
4	Газодобывающие производства	0,41±0,18	смертей на 100 млрд. м ³ добытого газа	0,02±0,016	1992–2010	2,3±1,0	577±22 млрд.м ³
5	Магистральный трубопроводный транспорт	2,4±0,6	смертей на 100 тыс. км трубопровода	нет данных	1998–2010	5,6±1,3	234±3 тыс. км

См. окончание таблицы на стр. 23