

Комплексный анализ прочности и безопасности потенциально опасных объектов с учетом неопределенностей

Николай А.Махутов¹, Дмитрий О.Резников^{1*}

¹ Институт машиноведения РАН, Российская Федерация, Москва

* mibsts@mail.ru



Николай А.Махутов



Дмитрий О.
Резников

Резюме. Цель. Целью статьи является проведение сопоставительной оценки двух базовых подходов к обеспечению конструкционной прочности и безопасности потенциально опасных объектов: детерминистического, основанного на обеспечении нормативных значений запасов прочности по основным механизмам достижения предельных состояний, и вероятностного, при котором критерием выполнения условий прочности является не превышение расчетными значениями вероятности разрушения по различным модам разрушения нормативных предельно допустимых значений. **Методы.** Ключевой проблемой при обеспечения конструкционной прочности является высокий уровень неопределенностей, которые принято разделять на два типа: (1) неопределенности, обусловленные естественной вариативностью параметров, определяющих несущую способность системы и действующие на нее нагрузки, и (2) неопределенности, связанные с человеком (ограниченность человеческих знаний о системе и возможность совершения человеком ошибок на различных этапах цикла эксплуатации системы). Методы компенсации неопределенностей зависят от используемого подхода к обеспечению прочности: при детерминистическом подходе случайные переменные «нагрузка» и «несущая способность» заменяются на детерминированные величины – их математические ожидания, а выполнение условия прочности с учетом неопределенностей обеспечивается путем введения условия, что отношение математических ожиданий несущей способности и прочности должно превышать нормативную величину запаса прочности, который, в свою очередь, должен быть больше единицы. В рамках вероятностного подхода конструкционная прочность считается обеспеченной, если расчетная вероятность разрушения по рассматриваемому механизму достижения предельного состояния не превосходит нормативно установленного значения вероятности разрушения. **Выводы.** Говорить об эквивалентности двух (детерминистического и вероятностного) подходов можно лишь в определенных частных случаях. Недостатком обоих подходов является их ограниченные возможности по компенсации неопределенностей второго типа, определяемых действием человеческого фактора, а также отсутствие корректной процедуры учета тяжести последствий, наступающих в случае достижения предельного состояния. Указанные недостатки могут быть преодолены путем привлечения к решению задачи по обеспечению конструкционной прочности и безопасности методического инструментария теории рисков, который позволяет включить в рассмотрение неопределенности второго типа и в явном виде учитывать критичность последствий, наступающих при разрушениях на объекте.

Ключевые слова: конструкционная прочность, безопасность, неопределенность, запас прочности, вероятность разрушения, риск.

Для цитирования: Махутов Н.А., Резников Д.О. Комплексный анализ прочности и безопасности потенциально опасных объектов с учетом неопределенностей // Надежность. 2020. №1. С. 47-56. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-1-47-56>

Поступила 02.11.2019 г. / После доработки 12.02.2020 г. / К печати 20.03.2020 г.

1. Введение

Конструкционная прочность представляет собой исходную комплексную характеристику технической системы, которая описывается сочетанием дифференцированных показателей статической, динамической, циклической прочности и прочностной надежности и определяется способностью системы противостоять достижению различных предельных состояний в реальных условиях эксплуатации. Выполнение требований конструкционной прочности потенциально опасных объектов (ПОО) является ключевым элементом решения задачи обеспечения техногенной безопасности [1, 2]. Конструкционная прочность считается обеспеченной, если для всех расстраиваемых механизмов достижения предельных состояний выполняется условие:

$$Q_i^C / Q_i^3 > 1 \quad (\forall i = 1, 2, \dots, m), \quad (1)$$

где Q_i^C и Q_i^3 – параметры несущей способности и нагрузки при i -ом механизме достижения предельных состояний, имеющих негативные последствия, которые характеризуются экономическими ущербами и человеческими жертвами; m – количество механизмов достижения предельных состояний. Такая трактовка конструкционной прочности, как показывает анализ отечественной и зарубежной информации о сценариях возникновения техногенных аварий и катастроф, дает основу для исследования, регулирования и обеспечения техногенной безопасности.

В число базовых вопросов обеспечения конструкционной прочности и безопасности ПОО для всех стадий их жизненного цикла входят три главных:

- расчетно-экспериментальный анализ напряженно-деформированных состояний с учетом механических Q_m^3 , термических Q_t^3 , аэрогидродинамических Q_{ah}^3 , электромагнитных Q_{em}^3 , радиационных и химических Q_r^3 воздействий. При этом локальные напряжения σ_{\max}^3 и деформации e_{\max}^3 зависят от эксплуатационного числа циклов нагружения N^3 , времени τ^3 и температуры t^3 :

$$\{\sigma_{\max}^3, e_{\max}^3\} = F_3 \{P^3, Q_t^3, Q_{ah}^3, Q_{em}^3, Q_r^3, N^3, \tau^3, t^3\}; \quad (2)$$

- анализ закономерностей циклического упругого и упругопластического деформирования в зонах и вне зон концентрации для варьируемых частот f_τ^3 , амплитуд напряжений σ_a^3 и деформаций e_a^3 , температур t^3 и времени τ^3 :

$$\{\sigma_a^3, e_a^3\} = F_{13} \{f_\tau^3, (\sigma_a^3, e_a^3), t^3, \tau^3\}; \quad (3)$$

- анализ критериев и условий накопления повреждений d^3 , а также определение циклической долговечности N_C^3 для стадий образования и развития трещин, возникновения разрушений:

$$\{d^3, N_C^3\} = F_{23} \{f_\tau^3, (\sigma_a^3, e_a^3), t^3, \tau^3\}. \quad (4)$$

Задачи обеспечения конструкционной прочности

потенциально опасных объектов приходится решать в условиях высокого уровня неопределенности относительно параметров эксплуатационного нагружения, с одной стороны, а также несущей способности элементов ПОО на различных этапах цикла его эксплуатации, с другой [3-5]. Источниками неопределенностей являются: естественная вариативность параметров объекта (геометрических размеров, механических свойств материала); стохастический характер деградационных процессов и режимов нагружения; ограниченность знаний о событиях и процессах, протекающих в несущих элементах; ограниченность имеющихся статистических данных; несовершенство используемых математических моделей; неточность имеющегося измерительного оборудования.

Конструкционная прочность ПОО на различных этапах его жизненного цикла может обеспечиваться в рамках двух принципиально различных подходов [3, 4, 7, 8]:

- 1) Детерминистический (нормативный) подход к обеспечению конструкционной прочности, основанный на обеспечении запасов по основным механизмам достижения предельных состояний.

- 2) Вероятностный подход к обеспечению конструкционной прочности, основанный на снижении вероятности достижения предельного состояния до уровня, который на данном этапе развития техники принимается в качестве приемлемого.

Исторически, в течение многих столетий, развивался первый подход, при котором неопределенности, с которыми приходилось сталкиваться при проектировании, строительстве и эксплуатации технических систем, учитывались с помощью введения системы коэффициентов запаса, по различным механизмам достижения предельных состояний. Второй подход получил распространение в середине XX столетия с развитием таких дисциплин как теория вероятности и теория надежности, позволяющих оценивать неопределенности с помощью вероятности достижения системой предельных состояний. Этот подход стал важным элементом развития теории техногенных рисков и техногенной безопасности. Ниже будет проведена сопоставительная оценка детерминистического и вероятностного подходов и рассмотрены условия, при которых эти подходы могут считаться эквивалентными.

2. Неопределенности задачи

Неопределенности, связанные с обеспечением конструкционной прочности технических систем ПОО, могут быть разделены на два принципиально различных типа [9-14]:

- 1) Неопределенности естественного, материально-технического характера, обусловленные недетерминированностью параметров, событий и процессов реального мира. К этому типу относятся неопределенности, связанные с вариативностью параметров системы и

воздействий на нее, со стохастической природой процессов деградации ее характеристик, а также неопределенности, обусловленные возможными отклонениями от номинальных значений интенсивности воздействия внешних и внутренних силовых факторов, режимов эксплуатации, геометрических размеров элементов системы, механических и физических свойств материалов, условий внешней среды и т.д.

2) Неопределенности, связанные с человеческим фактором (в широком толковании этого понятия), которые подразделяются на: (а) неопределенности, связанные с ограниченностью знаний проектировщика, изготовителя и эксплуатанта о сложных технических системах ПОО и условиях его функционирования (в частности, о характере сложных процессов достижения предельных состояний системы), (б) неопределенности, обусловленные возможностью совершения персоналом действий, ведущих к нарушению существующих норм проектирования, строительства и эксплуатации ПОО, в результате которых свойства (поведение, характеристики) системы станут отличными от проектных и запланированных (т.е. ошибками на этапе проектирования, строительства и эксплуатации системы), и (в) неопределенности, обусловливаемые возможностью осуществления несанкционированных (диверсионных и террористических) воздействий на рассматриваемый ПОО.

Учитывая, что ограниченность знаний о технических системах ПОО и обусловленный ею неучет важных факторов, равно как и нарушение установленных норм, можно рассматривать как своего рода ошибки, то группу неопределенностей, обусловленных человеческим фактором, можно для краткости называть неопределенностями, связанными с ошибками, совершаемыми проектировщиками, строителями и эксплуатантами ПОО, где термин *ошибка* используется в широком смысле этого слова.

Специфика обеспечения защищенности ПОО от аварий и катастроф заключается в том, что их описание требует учета огромного числа факторов. При этом ряд режимов эксплуатации ПОО становятся недоопределенными [15]. Это происходит вследствие сложных нелинейных взаимодействий между компонентами ПОО, сильной связанности между различными подсистемами, а также тем фактом что ПОО и окружающая среда начинают изменяться быстрее, чем они могут быть описаны и исследованы. Поэтому возникает ситуация недостатка информации о развитии опасных процессов в ПОО и, следовательно, ограниченности возможностей прогнозирования их поведения и управления ими. При этом на определенных режимах становится невозможным детально описать законы функционирования ПОО и разработать правила управления. Отличительной особенностью недоопределенных систем является то, что оказывается невозможным полное описание их поведения и прогнозирования их состояния при различных условиях и на различных режимах эксплуатации. Различие между полностью определенными и

недоопределенными системами становится чрезвычайно важным при разработке комплекса мер по обеспечению безопасности.

Неопределенности первого типа рассматриваются в рамках теории прочностной надежности. Однако опыт эксплуатации технических систем показывает, что расчетные оценки вероятностей разрушения системы, получаемые методами теории надежности, оказываются существенно заниженными и отличаются от наблюдаемых на практике значений как минимум на один порядок. Основной причиной этого несоответствия является то обстоятельство, что теория прочностной надежности не учитывает неопределенности человеческого фактора, которые во многих случаях являются доминирующими. Этот второй тип неопределенностей оценивается в рамках новых подходов, сосредоточивающих свое внимание на исследовании человеческого фактора.

3. Детерминистический подход к обеспечению конструкционной прочности

В рамках детерминистического подхода случайные параметры нагрузки Q_i^C и несущей способности Q_i^3 заменяются на их математические ожидания $E\{Q_i^C\}$ и $E\{Q_i^3\}$, а выполнение условия прочности с учетом неопределенностей обеспечивается путем введения в правую часть неравенства (1) величины нормативного допускаемого запаса $[n_i]$, который должен быть больше единицы:

$$n_i = \frac{E\{Q_i^C\}}{E\{Q_i^3\}} > [n_i] \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (5)$$

Вопрос о выборе $[n_i]$ является весьма сложным. Нормативный запас по рассматриваемому предельному состоянию назначается: исходя из опыта эксплуатации подобных систем; уровня неопределенности; социально-экономических условий страны; точности расчетных моделей и величины ущерба, ожидаемого в случае достижения предельных состояний. Таким образом, величины запасов определяются как объективными

Таблица 1. Количественные значения нормативных запасов прочности.

	Отрасль, тип технической системы	Диапазон значений $[n]$
1	Объекты космической техники	1,00...1,25
2	Авиационная техника (планер самолета)	1,25...2,0
3	Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок	1,07...3,0
4	Сосуды и аппараты, работающие под давлением	1,5...4,0
5	Металлургическое оборудование	2,07...8,0
6	Железнодорожный транспорт	3,33...5,56
7	Подъемно-транспортные машины	1,3...1,6

факторами (уровень неопределенности относительно нагрузок и несущей способности конструкции; критичность последствий, связанных с достижением предельного состояния), так и субъективными обстоятельствами (культура безопасности в отдельных отраслях и стране в целом, восприятие угроз в обществе). Современные значения нормативных запасов для конструктивных элементов технических систем различного назначения изменяются в следующих диапазонах (таблица 1).

Из представленных в табл. 1 данных следует, что значения нормативных запасов варьируются в весьма широких диапазонах (как внутри отдельных отраслей, так и между отраслями). Это свидетельствует не только об отсутствии единой методологической базы их обоснования, но и о разнице в уровнях рисков ПОО различных отраслей. Использование подобного подхода при проектировании новых (уникальных) объектов сопряжено с большими сложностями и высоким уровнем неопределенности, связанным с отсутствием опыта назначения допустимых запасов по предельным состояниям, которые могут реализовываться в системе.

Следует иметь в виду, что для ПОО, состоящих из сложных систем, характерно наличие различных предельных состояний, соответствующих различным механизмам разрушения (однократные перегрузки, кумулятивные механизмы усталостного, длительного, коррозионного, термоциклового разрушения и т.д.). В этом случае принято вводить систему запасов n_1, n_2, \dots, n_q по основным механизмам достижения предельных состояний. Причем запасы по различным предельным состояниям традиционно оказываются не связанными между собой. При этом система может обладать избыточной прочностью по одним предельным состояниям и недостаточной по другим.

Результаты экспериментальных и расчетных исследований на образцах, моделях и натурных конструкциях дают возможность определить запасы по напряжениям n_σ , деформациям n_ϵ , числу циклов n_N , времени n_τ и размеру дефектов (трещин) n_l :

$$\{n_\sigma, n_\epsilon, n_N, n_\tau, n_l\} = \left\{ \frac{\sigma_C}{\sigma_{\max}^\epsilon}, \frac{\epsilon_C}{\epsilon_{\max}^\epsilon}, \frac{N_C}{N^\epsilon}, \frac{\tau_C}{\tau^\epsilon}, \frac{l_C}{l^\epsilon} \right\}, \quad (6)$$

где индекс «C» относится к критической (предельной) величине соответствующей характеристики прочности, долговечности и трещиностойкости, а индекс «Э» – к соответствующим величинам при эксплуатации.

На основе выражений (2)–(4) строятся обобщенные поверхности предельных (опасных) состояний V^C (рис. 1). Поверхность допускаемых состояний $[V]$ определяется после построения поверхности предельных состояний введением коэффициентов запаса $[n_i]$ для каждого из указанных предельных параметров, по соответствующей координате пространства состояний:

$$[V_i] = V_i^C / [n_i].$$

Условием обеспечения конструкционной прочности и безопасности является то, что варьируемый во времени вектор эксплуатационных состояний V^ϵ остается для

всех стадий жизненного цикла в области допускаемых состояний, располагающейся ниже поверхности допускаемых состояний $[V]$.

Детерминистические подходы обычно используются на начальном этапе конструирования для определения размеров наиболее нагруженных сечений проектируемых конструктивных элементов, когда еще отсутствует достаточный статистический материал для анализа, при существенных изменениях конструкций и условий их эксплуатации. Задача обеспечения прочности конструктивных элементов технических систем традиционно решалась на основе использования детерминистических подходов, при которых неопределенности компенсировались путем введения дифференцированных запасов по основным механизмам достижения предельных состояний, базирующихся на опыте конструирования и эксплуатации ПОО. Однако в условиях бурного развития техники и внедрения новых конструкционных материалов возможности нормативного детерминистического подхода оказываются близкими к исчерпанию.

4. Вероятностные подходы к обеспечению конструкционной прочности

Вероятностные подходы к обеспечению конструкционной прочности базируются на снижении вероятности достижения предельных состояний до предписанного уровня. В рамках вероятностного подхода конструкционная прочность считается обеспеченной, если расчетная вероятность разрушения по i -му механизму достижения предельного состояния $P_{Fi} = P\{Q_i^C / Q_i^\epsilon < 1\}$ не превосходит нормативно установленного значения вероятности разрушения $[P_F]$:

$$P\{Q_i^C / Q_i^\epsilon < 1\} \leq [P_F], \quad \forall i = 1, 2, \dots, m. \quad (7)$$

Вероятностные подходы оказываются эффективными в тех случаях, когда уже накоплена (или может быть получена) значительная исходная статистическая информация по уровням эксплуатационных нагрузок и вариативности основных механических свойств несущих конструктивных элементов ПОО. Указанные подходы при их численной реализации дают возможность определять вероятностные исходные характеристики прочности, ресурса, живучести и позволяют подойти к количественному определению наиболее важных параметров ущербов U , определению риска R , безопасности S и защищенности Z .

Для высокорисковых ПОО вариации $\tau^\epsilon, N^\epsilon$ достигают 5–8 порядков, l^ϵ – 4 порядков, P – 3 порядка, P – 10 порядков, U – 6 порядков, R – 3–4 порядка, [1, 2]. Величины запасов $[n_i]$ изменяются в пределах одного порядка ($1 \leq [n_i] \leq 10$).

Вероятностные подходы к обеспечению конструкционной прочности получили свое развитие начиная со второй половины XX века, сначала в рамках клас-

сической теории прочности, а затем в рамках теории прочностной надежности. Предельная допустимая величина вероятности разрушения $[P_F]$ устанавливается в зависимости от величины ущерба, который может наступить в случае разрушения, с учетом социальной значимости объекта и срока его эксплуатации. В частности, Международной научно-информационной ассоциацией строительной индустрии (CIRIA-Construction Industry Research and Information Association) для сложных инженерных сооружений (плотин, мостов, шельфовых платформ) предложена следующая интерполяционная формула для оценки предельно допустимой расчетной вероятности разрушения [3]:

$$[P_F] = \frac{10^{-4} \xi_s \cdot \tau}{L \cdot k_{HF}}, \quad (8)$$

где τ – расчетный срок эксплуатации системы; L – среднее количество людей, которые могут погибнуть в случае разрушения системы; k_{HF} – коэффициент, учитывающий разрушения, связанные с человеческим фактором (обычно принимают $k_{HF} = 10$); ξ_s – коэффициент социальной значимости системы (см. табл. 2). Таким образом, величина $[P_F]$ обычно оказывается в диапазоне $1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-7}$.

Таблица 2. Коэффициент социальной значимости для различных типов технических систем.

Тип системы	ξ_s
Объекты массового скопления людей (спортивные комплексы, торговые центры)	0,005
Плотины	0,005
Жилые здания, офисные центры, промышленные объекты	0,05
Мосты	0,5
Буровые вышки, шельфовые установки	5

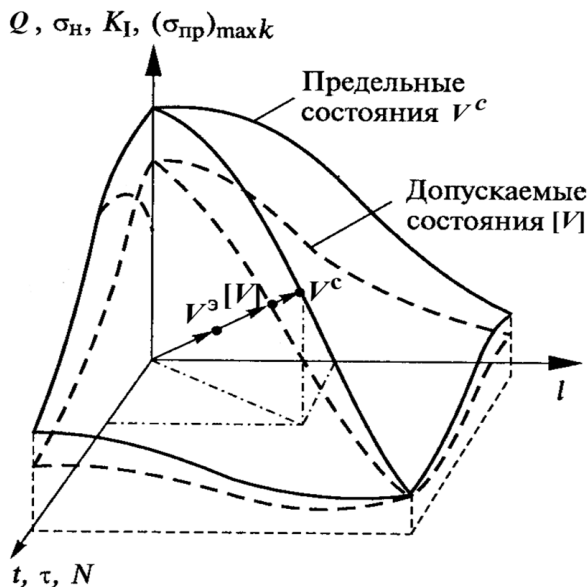


Рисунок 1. Схема построения поверхностей предельных и допускаемых состояний при оценках прочности, ресурса и живучести в трехмерном пространстве состояний объектов

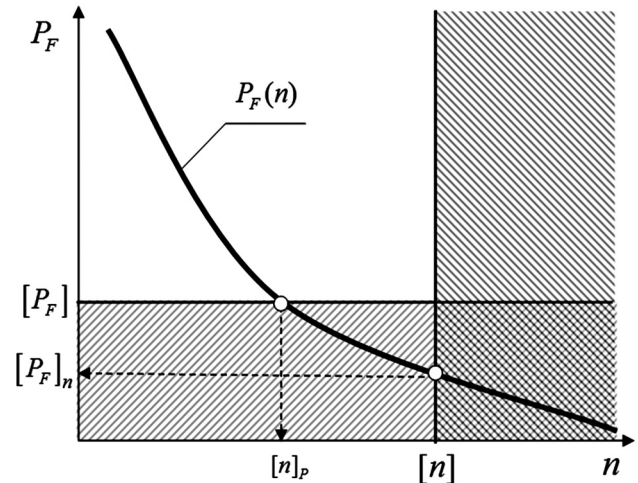


Рисунок 2. Зависимость между запасом прочности и вероятностью разрушения

Следует иметь в виду, что формула (8) учитывает неопределенности, связанные не только со случайным характером нагрузок и несущей способности конструкций, но также и неопределенности, обусловленные человеческим фактором. Это достигается путем введения коэффициента k_{HF} , который, как правило, принимается равным 10. Часто в нормативных документах фигурирует так называемая теоретическая предельно допустимая вероятность разрушения $[P_{FT}]$, которая оценивается без учета возможных ошибок или несанкционированных воздействий со стороны человека и оказывается существенно ниже, чем $[P_F]$. Принято считать, что эти величины различаются на один порядок.

В настоящее время вероятностный подход к обеспечению конструкционной прочности все больше внедряется в практику ряда отраслей, в частности, при проектировании объектов атомной энергетики, гидротехнических сооружений, шельфовых нефтегазодобывающих платформ, судостроении и др.

Необходимо отметить, что наличие коэффициента социальной значимости системы ξ_s в формуле (8) позволяет в неявной форме и весьма приближенно учесть масштаб возможных последствий разрушения при принятии решений о том, можно ли считать рассматриваемую систему защищенной. Более полный и математически корректный способ учета последствий разрушения реализуется в рамках комплексного подхода к обеспечению прочности и безопасности, который базируется на теории рисков.

5. Сопоставление детерминистического и вероятностного подходов

Следует отметить, что проектирование и обеспечение прочности, ресурса и безопасности несущих конструктивных элементов ПОО на основе детерминистического подхода, базирующегося на назначении запасов, является менее трудозатратным, поскольку для того, чтобы

убедиться, что выражение (5) справедливо, необходимо лишь один раз оценить соотношение $E\{Q_i^c\}/E\{Q_i^3\}$, в то время как расчет по вероятностному критерию (7) требует проведения многократной оценки Q_i^c/Q_i^3 . К сожалению, детерминистическому подходу, несмотря на его простоту, недостает строгости и точности анализа и учета неопределенностей. Существенное влияние при оценке прочности и ресурса играют субъективный фактор и наличие опыта эксплуатации систем данного класса в сходных условиях внешней среды. Возможности применения детерминистического подхода при проектировании уникальных объектов, для которых отсутствует релевантная статистическая информация, оказываются весьма ограниченными. Кроме того, детерминистический подход не позволяет решать вопрос оптимизации проектируемой системы, поскольку не дает возможности сопоставить затраты на ее создание с заданным запасом и положительный эффект, связанный с повышением прочности, который невозможно подсчитать, не ответив на вопрос: *До какого уровня может быть снижена вероятность разрушения, если обеспечить выполнение назначенного запаса?* Следовательно, детерминистический подход не позволяет осуществлять выбор оптимального из ряда возможных вариантов системы.

Проектирование и обеспечение конструкционной прочности по критерию надежности, напротив, представляет собой достаточно строгую математическую процедуру учета неопределенностей, связанных с нагрузками и несущей способностью системы. Данный критерий позволяет принимать обоснованные решения при проектировании системы в условиях неопределенности, производить сопоставительные оценки уровня прочности и ресурса при различных параметрах проектируемого элемента и осуществлять оптимизацию. Однако использование вероятностного подхода сопряжено со значительными трудозатратами и требует высокой квалификации проектировщика.

Поэтому было бы весьма полезно объединить достоинства обоих подходов, получив в тех случаях, когда это возможно, зависимость между запасом прочности и вероятностью разрушения. Это позволило бы, в частности, спроектировав конструктивный элемент с заданным запасом прочности, оценить его безопасность по критериям надежности. Сопоставление областей защищенных состояний Ω_n и Ω_p , полученных соответственно по критерию запаса и критерию надежности, является отдельной актуальной задачей.

Исходя из общих положений теории прочности и надежности, можно предположить, что, по крайней мере, в некоторых случаях между запасом прочности n и вероятностью разрушения P_F существует монотонно убывающая зависимость (рис. 2). Когда это предположение оказывается справедливым, можно говорить об эквивалентности детерминистического и вероятностного подходов. Тогда, если исходить из детерминистического подхода, можно определить предельную вероятность

разрушения $[P_F]_n$, соответствующую нормативному запасу $[n]$. Аналогично, в случае использования вероятностного подхода, можно было бы определить предельное значение запаса $[n]_{P_F}$, соответствующее предельно допустимой вероятности разрушения $[P_F]$.

К сожалению, в общем случае не существует взаимно-однозначного соответствия между величинами $[n]$ и $[P_F]$, и, следовательно, нельзя говорить об эквивалентности этих двух подходов. Однако для ряда частных случаев подобные соотношения могут быть получены.

Рассмотрим вопрос об эквивалентности детерминистического и вероятностного подходов для случаев однократного статического нагружения. В рамках детерминистического подхода условие обеспечения прочности (1) и (5) может быть переписано в виде:

$$n \geq [n], \quad (9)$$

где Q_C и Q_3 – параметры, характеризующие статическую прочность и нагрузку; $n = E\{Q_C\}/E\{Q_3\}$ – фактический запас, который должен быть не ниже нормативного предельно допустимого запаса $[n]$. Таким образом, величина запаса n определяется соотношением между математическими ожиданиями величин нагрузки и несущей способности.

Очевидно, что введение запасов не может полностью исключить возможность разрушения системы. Поэтому при использовании детерминистического подхода встает вопрос о том, какая предельная вероятность разрушения $[P_F]$ соответствует заданному нормативному запасу $[n]$.

В рамках детерминистического подхода, опирающегося на назначение запасов, учитывается только соотношение между характеристическими значениями распределений (в рассматриваемом примере математическими ожиданиями нагрузки и несущей способности $E\{Q_C\}/E\{Q_3\}$). Если величины Q_C и Q_3 являются некоррелированными и распределенными по нормальному закону, вероятность разрушения может быть оценена с помощью известного выражения [3, 6]:

$$P_F = \Phi \left(- \frac{E\{Q_C\} - E\{Q_3\}}{\sqrt{(S\{Q_C\})^2 + (S\{Q_3\})^2}} \right), \quad (10)$$

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

При введении коэффициентов вариации $v_{Q_3} = \frac{S\{Q_3\}}{E\{Q_3\}}$ и $v_{Q_C} = \frac{S\{Q_C\}}{E\{Q_C\}}$, искомая зависимость приобретает вид:

$$P = \Phi \left(- \frac{n-1}{\sqrt{v_{Q_3}^2 + v_{Q_C}^2 \cdot n^2}} \right). \quad (11)$$

Таким образом, сделав предположение о нормальном характере распределений нагрузки и несущей способ-

ности, и, задавшись фиксированными значениями коэффициентов вариации v_{Q_c} и v_{Q_3} (которые будут считаться неизменными), можно построить зависимости между вероятностью достижения предельного состояния и запасом прочности. Иными словами, если при варьировании параметров системы для рассматриваемого случая нормально распределенных, некоррелированных величин Q_c и Q_3 , коэффициенты вариации v_{Q_c} и v_{Q_3} являются постоянными, то вероятность разрушения зависит только от запаса прочности n .

Иначе говоря, соотношение (11) позволяет сделать вывод, что подходы, базирующиеся на назначении запасов и на теории надежности, являются эквивалентными в том случае, когда коэффициенты вариации v_{Q_c} и v_{Q_3} не меняются при варьировании параметров проектирования.

На рис. 3. представлены построенные в линейных координатах зависимости вероятности достижения предельного состояния $P_F(n | v_{Q_3^*}, v_{Q_c^*})$ от запаса n при различных значениях коэффициентов вариации нагрузки $v_{Q_3^*}$ и прочности $v_{Q_c^*}$.

В постановке теории прочностной надежности защищенность системы считается обеспеченной, если расчетная вероятность локального разрушения критического элемента оказывается меньше нормативного значения предельно допустимой вероятности разрушения: $P_F < [P_F]$.

Согласно выражению (11) вероятность разрушения P_F является функцией трех переменных: центрального запаса n , а также коэффициентов вариации нагрузки v_{Q_3} и несущей способности v_{Q_c} . Соответственно могут быть предложены три способа обеспечения конструкционной прочности: увеличение запаса, снижение вариации прочности, снижение вариации нагрузки. Выбор способа обеспечения защищенности осуществляется с учетом специфики отрасли и условий эксплуатации систем. В тех отраслях, где нет жестких ограничений

по весу конструкций (атомная энергетика, строительство) обеспечение защищенности может достигаться преимущественно за счет повышения запасов $n = 2 \dots 5$. В авиационно-космических системах, где требования ограничения веса являются доминирующими и, следовательно, запасы не могут превышать 1,2...1,6, обеспечение защищенности должно фокусироваться на снижении вариации нагрузок и основных механических свойств материалов.

6. Способы компенсации неопределенностей в задачах обеспечения конструкционной прочности и безопасности

Разрушения ПОО, связанные с техническими факторами, рассматриваются в рамках классической теории прочностной надежности. Традиционный способ компенсации неопределенностей, связанных с вариативностью параметров нагрузки и несущей способности системы, заключается во введении запасов n .

Обеспечение запасов не может полностью исключить возможность разрушения системы. Поэтому при использовании нормативного детерминистического подхода встает вопрос о том, какая вероятность разрушения $P(F)$ соответствует расчетному запасу n (рис. 4). В работах [3, 4, 7, 8] был подробно рассмотрен вопрос о соотношении между запасом и вероятностью разрушения (аварии и катастрофы) в условиях, когда существует точная или приближенная зависимость между этими величинами.

Вероятность разрушения вследствие проявления человеческого фактора также может зависеть от запаса. Однако необходимо иметь в виду, что ошибки операторов могут не просто изменять взаимное расположение кривых распределения нагрузки и несущей способности, но и приводить к изменению самой вероятностной модели системы, создавая новые функции предельных состояний или изменяя размерность пространства состояний. При этом увеличение запасов по исходному

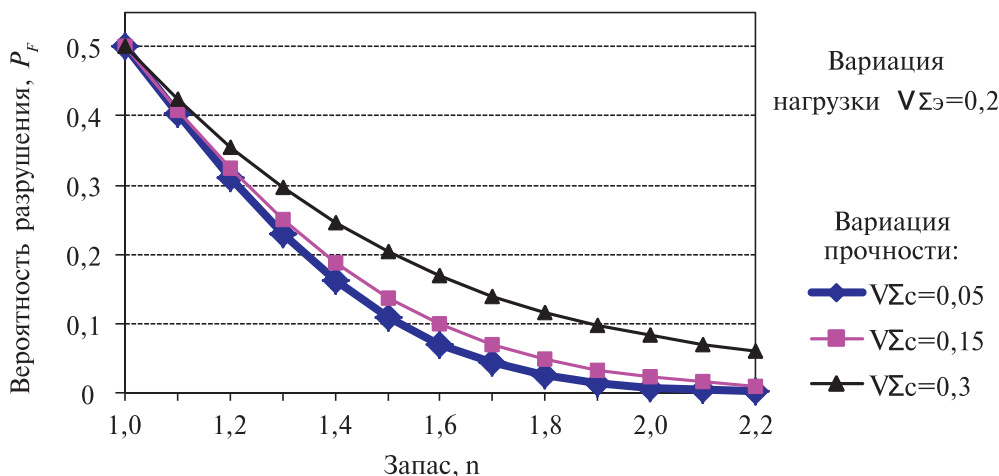


Рисунок 3. Зависимости вероятности локального разрушения от запаса при различных сочетаниях коэффициентов вариации нагрузки и прочности при $v_{Q_3} = 0$

предельному состоянию не может компенсировать неопределенности, вносимые ошибками [9].

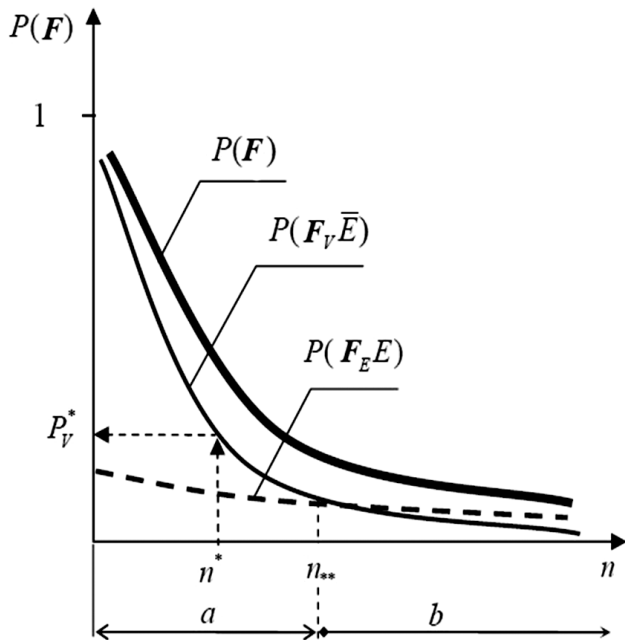


Рисунок 4. Влияние коэффициента запаса на вероятность разрушения ПОО [9]

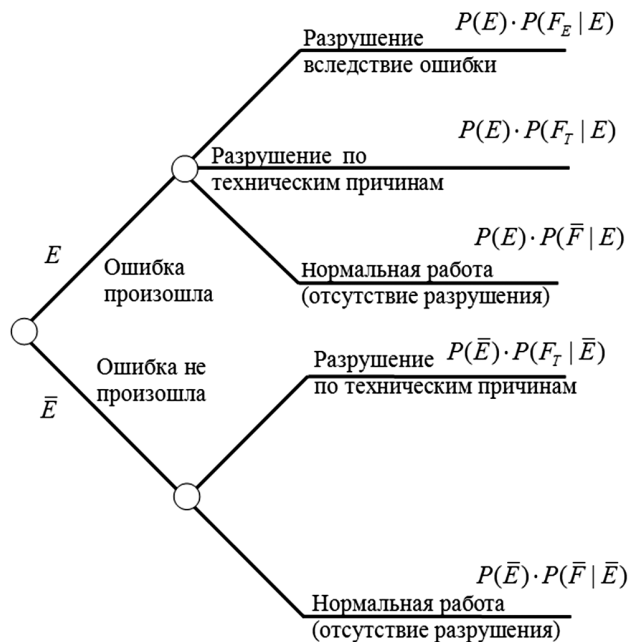


Рисунок 5. Простейшая модель оценки вероятности разрушения ПОО, учитывающая неопределенности, обусловленные вариативностью функции состояния и человеческими ошибками [10]

В соответствии с рассмотренными в разделе 2 настоящей статьи типами неопределенностей могут быть выделены два типа причин разрушений (аварий, катастроф) ПОО:

- разрушения F_V , обусловленные вариативностью функции состояния системы. Вероятность такого события оценивается как $P(F_V)$;

- разрушения F_E , связанные с человеческим фактором (или ошибками в широком смысле этого понятия), оценивающиеся вероятностью $P(F_E)$.

Простейшая сценарная модель, учитывающая неопределенности указанных двух типов, может быть представлена с помощью дерева событий (рис. 5), содержащего обобщенные сценарии разрушения (аварии, катастрофы), обусловленные техническими причинами и человеческим фактором [10]. В данной модели будем считать, что разрушение F системы в целом может произойти при достижении системой предельных состояний вследствие (а) разрушения отдельных элементов, обусловленных вариативностью функции предельных состояний, и (б) ошибок проектировщиков, строителей или эксплуатантов, совершаемых на различных этапах жизненного цикла. Тогда событие F может рассматриваться как объединение двух событий: F_V – разрушение, связанное с вариативностью технических параметров, и F_E – разрушение, произошедшее вследствие ошибки (человеческий фактор): $F = F_V \cup F_E$.

При этом вероятность разрушения системы может быть выражена как:

$$P(F) = P(F_V | \bar{E}) \cdot P(\bar{E}) + [P(F_E | E) + P(F_V | E)] \cdot P(E), \quad (12)$$

где $P(E)$ – вероятность совершения ошибки; $P(F | E)$ – условная вероятность разрушения, вызванного ошибкой, в случае, если была совершена ошибка; $P(F_V | E)$ – условная вероятность разрушения, обусловленного вариативностью технических параметров, в случае, если была совершена ошибка; $P(F_V | \bar{E})$ – условная вероятность разрушения, обусловленного вариативностью технических параметров, в случае отсутствия ошибки; $P(\bar{E}) = 1 - P(E)$ – вероятность несвершения ошибки.

Традиционная теория надежности концентрирует внимание на оценке величины $P(F_V | \bar{E})$, которая характеризует вероятность разрушения ПОО при условии отсутствия ошибок. Однако опыт эксплуатации ПОО свидетельствует, что от 70 до 90% разрушений ПОО бывает связано с человеческим фактором [1]. Важно, что с помощью выражения (12) могут быть описаны оба основных типа источников разрушений. При этом необходимо учитывать, что механизмы разрушений, обусловленные техническими причинами, могут принципиально отличаться от механизмов разрушений, которые были инициированы ошибками человека. Поэтому структура сценарного графа, составляемого с учетом человеческого фактора, должна быть существенно пересмотрена.

Будем считать, что после серьезной ошибки вероятность разрушения системы вследствие ошибки оказывается существенно больше, чем вероятность разрушения вследствие вариативности параметров нагрузки и несущей способности: $P(F_E | E) \gg P(F_V | E)$. Это допущение оказывается справедливым при достаточно больших запасах. В этом случае величиной $P(F_V | E)$ в выражении

(12) можно пренебречь по сравнению с величиной $P(F_E|E)$, то есть считать $P(F_V|E) \approx 0$. Тогда выражение (12) можно переписать в виде:

$$\begin{aligned} P(F) &= P(F_V | \bar{E}) \cdot P(\bar{E}) + P(F_E | E) \cdot P(E) = \\ &= P(F_V \bar{E}) + P(F_E E). \end{aligned} \quad (13)$$

Причем, первое слагаемое в выражении (13) определяет вероятность разрушения, обусловленного техническими факторами, а второе слагаемое – вероятность разрушения из-за ошибок, совершаемых на различных этапах жизненного цикла ПОО.

Сделанные выводы хорошо согласуются с имеющимися статистическими данными, которые показывают, что для систем, спроектированных с малым запасом, и, следовательно, работающих на режимах близких к исчерпанию их несущей способности, наиболее эффективным способом повышения надежности и безопасности является увеличение запасов. Сначала при увеличении запаса n вероятность разрушения резко снижается (рис. 4, участок «а» кривой $P(F_V)$) [9]. Однако по мере роста запаса скорость снижения вероятности разрушения начинает заметно падать и, после перехода в область высоконадежных систем, условной границей которой является величина запаса n_{**} , вероятность разрушения начинает весьма слабо зависеть от дальнейшего увеличения запаса (рис. 4, участок «б» кривой $P(F_V)$). Это объясняется тем, что при $n > n_{**}$ доминирующей причиной разрушения становится не вариативность параметров нагрузки и несущей способности, которая может быть компенсирована с помощью задания большего запаса, а ошибки, допускаемые при проектировании, строительстве или эксплуатации, которые не могут эффективно парироваться с помощью увеличения запаса (поскольку эти ошибки меняют вид функции предельных состояний или даже могут создавать новые механизмы достижения предельных состояний) (рис. 4, кривая $P(F_E)$). Поэтому в таком случае для снижения вероятности разрушения необходимо сосредоточить усилия на совершенствовании стратегии эксплуатации ξ , включающей меры технического мониторинга, процедуры контроля, регламентных и ремонтных работ и т. д., позволяющей своевременно идентифицировать и устранять ошибки, то есть компенсировать неопределенности Типа 2¹. Таким образом, вероятность разрушения ПОО можно рассматривать как функцию двух обобщенных переменных: запаса n и качества стратегии эксплуатации ξ (рис. 6), которые характеризуют два принципиально различных типа неопределенностей, связанных с функционированием ПОО [5].

¹ Здесь ξ – обобщенный параметр, характеризующий качество избранной стратегии эксплуатации ПОО, причем $\xi = 0$ соответствует стратегии, при которой эксплуатация ПОО не предполагает проведения каких-либо процедур контроля, технического обслуживания и ремонта ПОО, а $\xi = 1$ – стратегии, предполагающей максимально возможный контроль и ремонт.

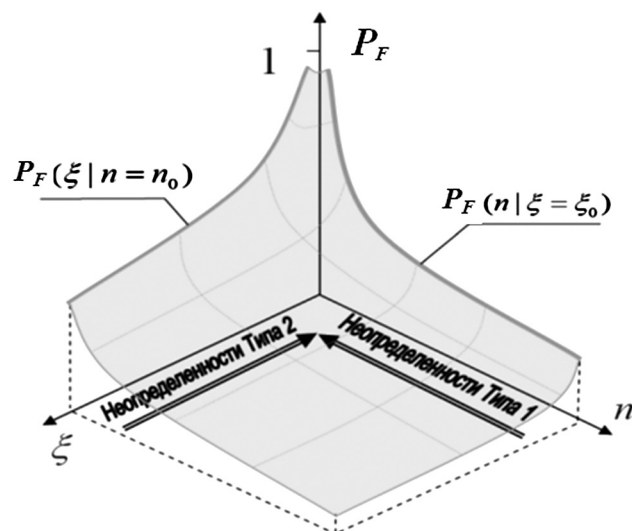


Рисунок 6. Зависимость вероятности разрушения от запаса и качества стратегии эксплуатации

В рамках традиционных и новых подходов к оценке конструкционной прочности и безопасности потенциально опасных объектов ключевое место занимает количественное определение интегральных показателей рисков возникновения разрушений, аварий и катастроф. В рамках этих подходов обязательному учету подлежат такие параметры, как запасы прочности и вероятности перехода несущих элементов в предельные состояния и соответствующие им ущербы. При этом в количественных оценках этих параметров существенную роль играют неопределенности, связанные с волатильностью параметров системы и внешней среды и с проявлением человеческого факторов на всех стадиях жизненного цикла объектов. Современные теории прочности и безопасности позволяют как оценивать роль этих факторов, так и разрабатывать методы компенсации неопределенностей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Грант №16-29-09575)

Библиографический список

1. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты [Текст]. – М.: МГОФ «Знание» 1998-2019 гг., тт.1-55.
2. Махутов, Н.А. Прочность и безопасность: Фундаментальные и прикладные исследования [Текст] / Н.А. Махутов. – Новосибирск: Наука, 2008. – 528 с.
3. Elishakoff, I. Safety Factors and Reliability: Friends and Foes? [Text] / I. Elishakoff. – Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2004.
4. Ching, J. Equivalence between reliability and factor of safety [Text] / J. Ching // Probabilistic Engineering Mechanics. – 2009. – Vol. 24(2). – P. 159-171.
5. Резников, Д.О. Способы компенсации неопределенностей при обеспечении защищенности сложных

технических систем и оптимизации затрат их жизненного цикла [Текст] / Д.О. Резников // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2013. – № 3. – С. 57-64.

6. **Махутов, Н.А.** Два типа сценариев аварий в сложных технических системах [Текст] / Н.А. Махутов, Д.О. Резников, В.В. Зацаринный // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2014. – № 2. – С. 28-41.

7. **Махутов, Н.А.** Сопоставление детерминированных и вероятностных оценок прочности конструктивных элементов технических систем при серийных нагрузках [Текст] / Н.А. Махутов, Д.О. Резников // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2014. – № 5. – С. 41-46.

8. **Махутов, Н.А.** Нормативные и вероятностные подходы к обеспечению защищенности критически важных объектов [Текст] / Н.А. Махутов, Д.О. Резников, В.П. Петров и др. // Безопасность в техносфере. – 2011. – № 4. – С. 5-12.

9. **Beeby, A.W.** Safety of structures, and a new approach to robustness [Text] / A.W. Beeby // The Structural Engineer. – 1999. – Vol. 77. – P. 16-21.

10. **Ellirtgwood, B.** Design and Construction Error Effects on Structural Reliability [Text] / B. Ellirtgwood // Journal of Structural Engineering. – 1987. – Vol. 113(2). – P. 409-422.

11. **Dhillon, B.S.** Human Reliability and Error in Transportation Systems [Text] / B.S. Dhillon. – Springer-Verlag, London, 2007. – 182 p.

12. **Махутов, Н.А.** Учет угроз, связанных с человеческим фактором, при оценке защищенности опасных производственных объектов [Текст] / Н.А. Махутов, Д.О. Резников // Безопасность труда в промышленности. – 2015. – № 1. – С. 60-67.

13. **Махутов, Н.А.** Влияние человеческого фактора на безопасность технических систем [Текст] / Н.А. Махутов, Р.С. Ахметханов, Е.Ф. Дубинин и др. // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2014. – № 3. – С. 80-98.

14. **Махутов, Н.А.** Безопасность России. Человеческий фактор в проблемах безопасности [Текст] /

Н.А. Махутов, Н.А. Абрамова, В.А. Акимов и др. – М.: МГОФ «Знание», 2008. – 687 с.

15. **Махутов, Н.А.** Особенности обеспечения безопасности критических инфраструктур [Текст] / Н.А. Махутов, Д.О. Резников, В.П. Петров // Безопасность в техносфере. – 2014. – Т. 3. – № 1(46). – С. 3-14.

Сведения об авторах

Николай А. Махутов – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), адрес: Малый Харитоньевский пер., д.4, Москва, Российская Федерация, 101990, тел. (495) 930 80 78, e-mail: kei51@mail.ru

Дмитрий О. Резников – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), адрес: Малый Харитоньевский пер., д.4, Москва, Российская Федерация, 101990, тел. (495) 623 58 35, e-mail: mibsts@mail.ru

Вклад авторов в статью

Махутовым Н.А. проведены обобщение данных по назначению запасов прочности при различных механизмах достижения предельных состояний, обоснование критериев прочности элементов конструкций и деталей машин в детерминистической постановке и развитие вероятностных подходов к оценке прочности с учетом разброса механических характеристик конструкционных материалов

Резниковым Д.О. проведена сопоставительная оценка детерминистических и вероятностных подходов к обеспечению прочности и безопасности технических систем; рассмотрены способы применения графологических методов при оценке прочностной надежности технических систем с учетом различных типов неопределенности.