

УДК 539.43

## АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ И ТЕХНОГЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ С УЧЁТОМ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЮ И РАЗРУШЕНИЮ

**Член-корреспондент РАН Н.А. Махутов, кандидат техн. наук В.В. Зацаринный  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН**

*Рассматриваются основные методы анализа прочности и безопасности сложных технических систем (СТС) и потенциально опасных объектов (ПОО). В их число входят методы детерминированного, статистического и вероятностного определения параметров прочностной надёжности и рисков. В развитие широко применяемого вероятностного метода анализа безопасности (ВАБ), основанного на построении деревьев событий и деревьев отказов с использованием статистической информации о вероятностях сценарного развития опасных процессов в СТС и ПОО исследуются особенности и возможности комбинированных методов получения связи между запасами прочности, характеристиками основных механических свойств и эксплуатационной нагруженности в детерминированной, статистической и вероятностной постановке. В качестве исходных используются результаты стандартных механических испытаний серий (20-30шт.) лабораторных образцов и допущение о нормальном распределении характеристик прочности (пределов текучести, прочности, сопротивления отрыву) и пластичности (относительное удлинение и сужение при отрыве). В расчётах прочности, надёжности и безопасности вводятся дополнительные характеристики-показатели упрочнения в уравнения состояния и коэффициенты концентрации напряжений и деформаций при упругих и упругопластических деформациях. В конечном счете, традиционные законы прочности становятся функциями не только номинальных эксплуатационных напряжений и стандартных характеристик механических свойств, но и коэффициентов их вариации, а также коэффициентов концентрации напряжений и деформаций. Приведены соответствующие зависимости для наиболее ответственных компонентов ракетно-космических, авиационных и атомных энергетических объектов.*

**Ключевые слова:** прочность, надёжность, безопасность, пределы текучести и прочности, пластичность, запасы прочности, детерминированные, статистические и вероятностные методы.

## ANALYSIS OF STRENGTH AND TECHNOGENIC SAFETY TAKING INTO ACCOUNT THE PROBABILISTIC CHARACTERISTICS OF RESISTANCE TO DEFORMATION AND FRACTURE

**Corresponding Member of the RAS N.A. Makhutov, Ph.D. (Tech) V.V. Zatsarinnyi  
The RAS Institute for Machine Sciences**

*The basic methods of strength and safety analysis of complex technical systems (CTS) and potentially dangerous objects (PDO) are considered. These include methods of deterministic, statistical, and probabilistic determination of strength reliability and risk parameters. The features and capabilities of combined methods for obtaining a relationship between safety factors, characteristics of main mechanical properties and operational loading in a deterministic, statistical and probabilistic formulation are investigated in the development of the widely used*

*probabilistic safety analysis method (PSA), based on the construction of event trees and failure trees using statistical information on the probabilities of scenario development of hazardous processes in CTS and PDO. The results of standard mechanical testing of series (20-30 pieces) of laboratory samples and the assumption of a normal distribution of strength characteristics (yield stress, ultimate strength, critical rupture strength) and plasticity (relative elongation and narrowing at break) are used as the initial ones. The additional characteristics are included in the calculations of strength, reliability and safety. These are the strainhardening factor into the state equations and the stress and strain concentration coefficients for elastic and elastoplastic deformations. Ultimately, the traditional laws of strength become functions not only of nominal operational stresses and standard characteristics of mechanical properties, but also of their variation coefficients, as well as stress and strain concentration coefficients. Corresponding dependences are given for the most critical components of rocket-space, aviation and nuclear power facilities.*

**Keywords:** strength, reliability, safety, yield stress and ultimate strength, plasticity, safety factors, deterministic, statistical and probabilistic methods.

## 1. Постановка проблемы

Решение проблемы оценки безопасности потенциально опасных объектов (ПОО) и сложных технических систем (СТС) от различных технологических и эксплуатационных факторов является многокритериальным процессом и основывается, в первую очередь, на анализе предельных состояний и механизмов их достижения. Для ПОО и СТС обычно характерна большая вариативность несущей способности на различных стадиях их жизненного цикла - проектирования, изготовления, испытаний и эксплуатации. Это вызывается статистическим разбросом характеристик механических свойств материалов и эксплуатационных нагрузок, конструктивными особенностями элементов оборудования, влиянием среды и т.д. Важно при этом, в конечном счёте, на основе разрабатываемых научно-методических подходов оценить количественные детерминированные, статистические и вероятностные показатели статической и циклической прочности, ресурса, запасов и на их основе перейти к определению параметров техногенной безопасности элементов ПОО и СТС.

При разработке системы критериев оценки статической и циклической прочности и методов, используемых для оценки безопасности, следует рассматривать взаимосвязанные вероятностные, статистические и детерминированные подходы, а также их комбинирование.

При проведении вероятностной оценки техногенной безопасности элементов несущих конструкций возможны два основных подхода. Первый – вероятностный анализ безопасности (ВАБ), связанный с построением деревьев событий и деревьев отказов; он является самостоятельным разделом теории безопасности. При этом базовым параметром безопасности является расчётная величина вероятности возникновения отказа, аварии или катастрофы. Вторым подходом является поэтапный анализ стадии возникновения и накопления повреждений с прямым использованием критериев прочности и эксплуатационной нагруженности. Он предполагает поэтапное комбинированное применение детерминированных и статистических данных о материалах и условиях нагруженности объектов, на основе которых и осуществляется вероятностный анализ прочности, надёжности и безопасности. Т. е. вероятностный подход по критерию прочностной надёжности основан на оценке вероятности достижения предельного состояния.

Указанный подход при его численной реализации даёт возможность определять вероятностные исходные характеристики прочности, ресурса и в конечном итоге позволяет перейти к количественному определению безопасности.

Как отмечается в [1, 2, 3] научные основы вероятностных подходов при оценке прочности и надежности длительное время разрабатывались многими зарубежными и отечественными учеными (W. Weibull, A. Freudenthal, Н.С. Стрелецкий, Р.С. Ржаницин, С.В. Серенсен, В.В. Болотиним, И.А. Биргер, В.П. Когаев, Г.Б. Иосилевич, Н.А. Махутов и др.).

В качестве базовых характеристик механических свойств при детерминированных, статистических и вероятностных расчётах статической прочности при условии недопущения разрушения или больших пластических деформациях используются физический  $\sigma_T$  или условный  $\sigma_{0,2}$  пределы текучести, предел кратковременной прочности  $\sigma_b$ , предел длительной прочности  $\sigma_{дл}$ , сопротивление отрыву  $S_k$  и предельная пластичность  $\psi_k$ . Испытания серии лабораторных образцов при статическом нагружении позволяет получить экспериментальные и расчётные детерминированные, статистические и вероятностные величины  $\sigma_T$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_b$ ,  $\sigma_{дл}$ ,  $S_k$ ,  $\psi_k$  с учётом их единичных средних и вероятностных значений. А так как эти характеристики механических свойств и параметры эксплуатационных воздействий имеют, в конечном счете, вероятностную природу, то и наступление статического разрушения (повреждения) также имеет вероятностный характер (по параметру вероятности  $P$ ).

Тогда можно вычислить заданный запас  $n$  по установленной вероятности  $P$  [1, 3].

$$n_{\sigma_p} = \frac{(\sigma_c)_d}{(\sigma^3)_d} \quad n_{\sigma_p} = \frac{(\sigma_c)_c}{(\sigma^3)_c} \quad n_{\sigma_p} = \frac{(\sigma_c)_p}{(\sigma^3)_p} \quad (1)$$

где  $\sigma_c$  – предельное (критическое) напряжение с заданным детерминированным (д), статистически определённым (с) и вероятностным уровнем (p).

$(\sigma^3)_p$  -соответствующее эксплуатационное номинальное напряжение.

Для других предельных состояний, когда могут появиться недопустимые упругопластические деформации или развитие трещин в элементах несущих конструкций, наряду с указанными в (1) параметрами механических свойств также должны быть использованы закономерности и уравнения нелинейной механики деформирования и разрушения [3].

Детерминированные расчёты стали общепринятыми в нормах проектирования ПОО и СТС. Статистические методы используются в оценках прочности контролируемых и диагностируемых ПОО и СТС, а вероятностные – для наиболее ответственных и опасных ПОО и СТС.

Ниже показаны особенности расчётов прочности, ресурса и безопасности по выражению (1).

## 2. Исходные положения

На базе проведенных в ИМАШ РАН исследований было проведено обобщение обширной экспериментальной информации по анализу рассеяния основных механических свойств (ОМС) при статическом разрыве корпусных реакторных сталей 15X2НМФА и X18Н9 при комнатной (20°С) и повышенных (до 350°С и до 650°С) температурах соответственно[4].

В число ОМС включены:

- характеристики прочности  $\sigma_T$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$ ,  $S_k$ ,
- характеристики пластичности  $\delta$  и  $\psi_k$ .

Эти характеристики прочности являются параметрами выражения (1) в виде  $\sigma_c$ .

На рис. 1 и 2 представлены экспериментально полученные на n-серии образцов функции распределения ОМС при нормальной температуре соответственно для сталей 15X2НМФА (дополнительный отпуск при 620°С-25 час и +650°С-17 час) и X18Н9. Видно, что статистические значения экспериментально определённых ОМС (точки) в обоих случаях удовлетворительно аппроксимируются прямыми, проведёнными в предположении нормального закона распределения.

Принятие гипотезы о нормальном распределении ОМС сталей 15X2НМФА и X18Н9 для данных объёмов выборки ( $20 \leq n \leq 30$ ) позволяет использовать расчётные значения ОМС для заданных уровней вероятностей P для поведения детерминированных (P=50%), статистических (P=5%) и вероятностных (P=5%) расчётов при статическом и циклическом нагружениях. Проведенная для ряда конструкционных сталей оценка характера и степени зависимости ОМС друг от друга (коэффициент корреляции r) [4] показала, что увеличению прочностных характеристик сталей  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$ ,  $S_k$  соответствует уменьшение их пластичности  $\psi_k$ ,  $\delta$ .

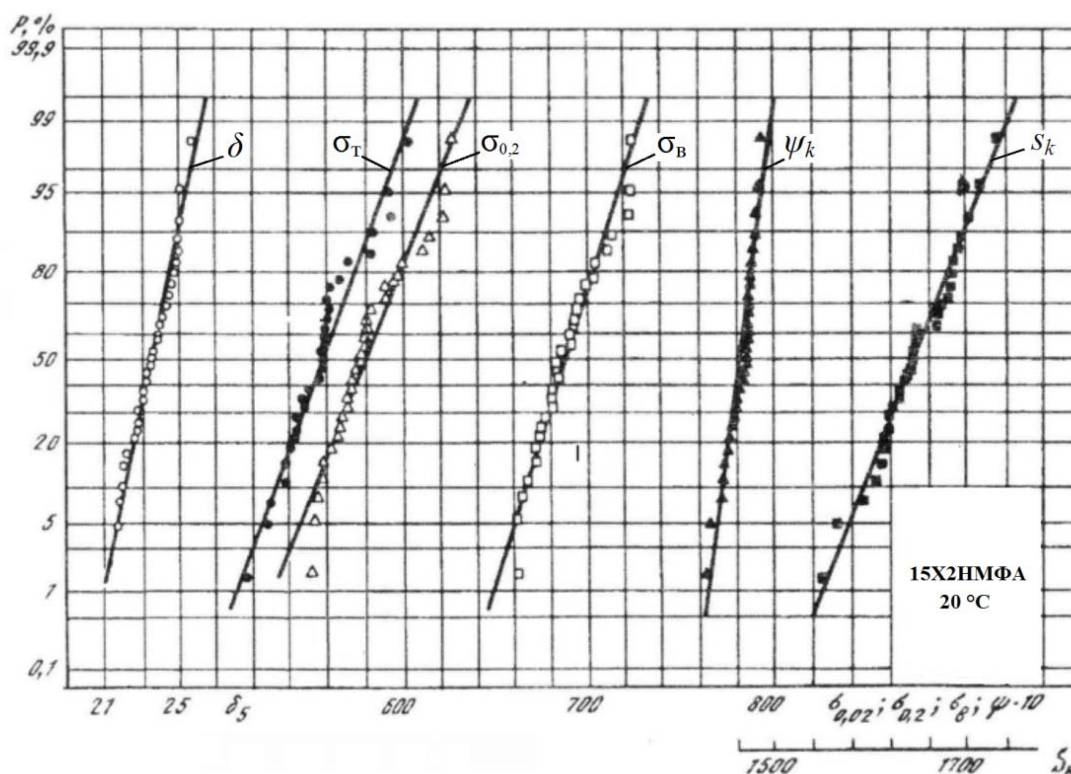


Рис. 1. Функции распределения основных механических свойств стали 15XНМФА при 20°С

Величины  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$ ,  $\delta$  и  $\psi_k$  определяются в соответствии со стандартами. При этом они включаются в данные ГОСТ и ТУ (технических условий).

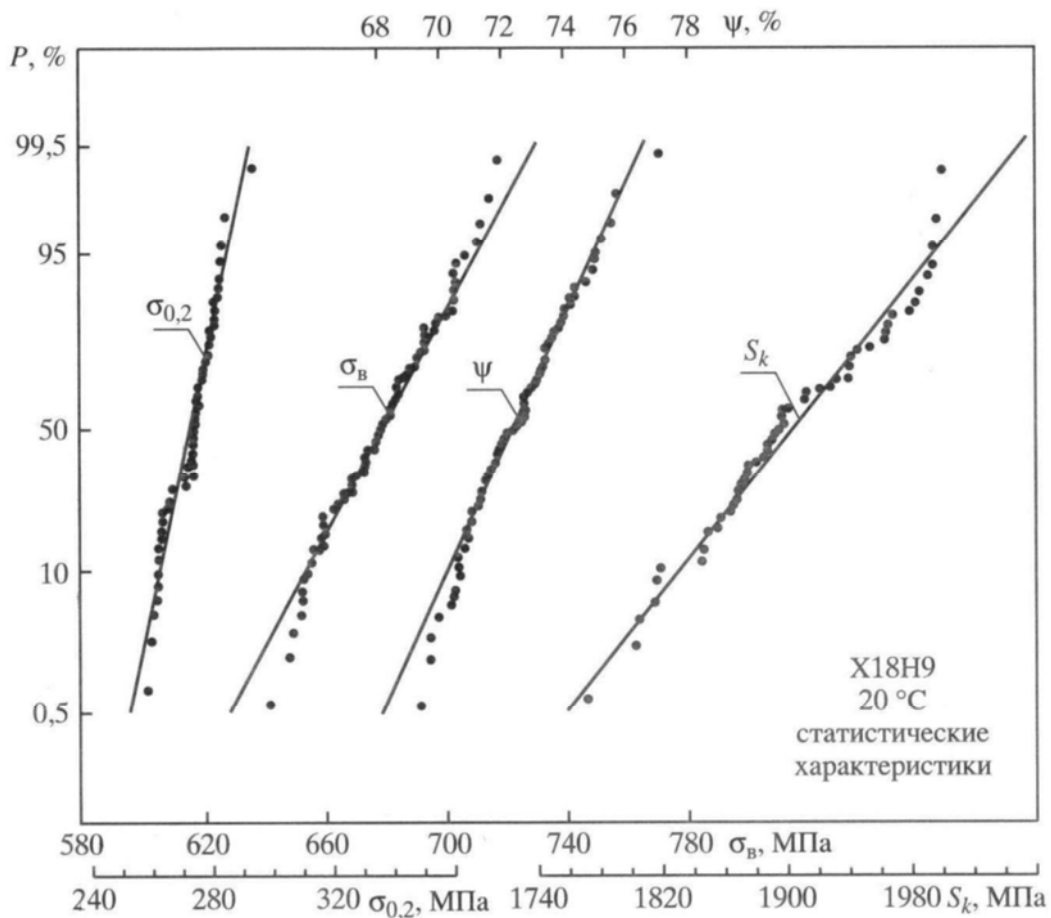


Рис. 2. Функции распределения основных механических свойств стали X18H9 при 20°C

Можно отметить некоторые особенности экспериментально определенного сопротивления разрушению в шейке образца  $S_k$ . При отсутствии в ГОСТ и ТУ прямых экспериментальных данных о величинах  $S_k$  для расчётной оценки  $S_{кр}$  можно использовать корреляционную связь  $S_k$  с основными характеристиками ОМС –  $\sigma_B$  и  $\psi_k$  [4].

$$S_{кр} = \sigma_B (1 + 1,4\psi_k) \quad (2)$$

Построенная расчетная кривая нормального распределения для для  $S_{кп}$  по (2) для того же диапазона вероятностей (30 значений) представлена (в сравнении с экспериментальным значением  $S_k$ ) на рис. 3.

Если  $S_{кр} < S_k$ , то использование расчетного выражения (2) идет в запас прочности по выражениям (1) и (2). Для выяснения степени влияния предельной пластичности  $\psi_k$  (в случае, когда пластичность  $\psi_k$  увеличивается с увеличением вероятности  $P - \psi_{кп}$  и наоборот –  $\psi_{к0}$ ) на ход кривых распределений  $S_{кр}$  по формуле (2) было построено два распределения  $S_{крп}$  и  $S_{кpo}$  (рис. 3). Видно, что средние значения обоих расчетных распределений  $S_{крп}$  и  $S_{кpo}$  (1450 МПа) меньше и составляют примерно 0,88 от экспериментальных значений  $S_k$  (1640 МПа).

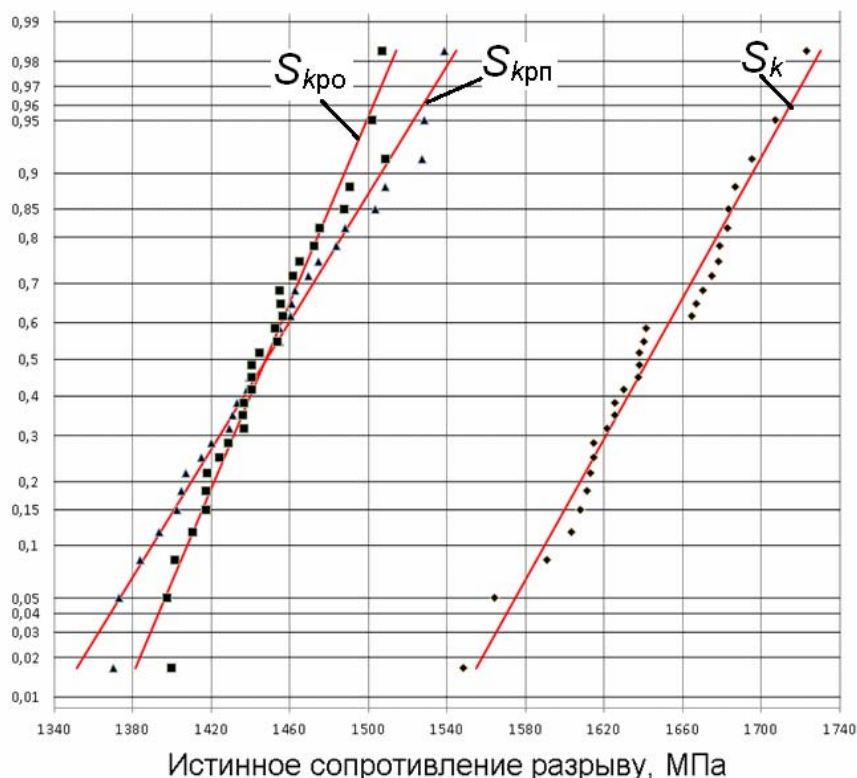


Рис. 3. Сравнение экспериментальных и расчётных функций сопротивления отрыву  $S_k$

Кроме того коэффициент вариации «прямого» распределения  $S_{крп}$  на 25% больше, чем экспериментального  $S_k$ , что идёт в запас статической прочности, а «обратного» – на 15% меньше (не в запас). На этом основании выражение (2) применимо для инженерных расчётов, исходя из необходимости построения консервативного расчёта, идущего в запас прочности и надёжности.

### 3. Кинетика напряжённо-деформированного состояния

Современные методы расчётов на прочность, ресурс и безопасность требуют определения напряженно-деформированных и предельных состояний (“ $\sigma - e$ ”) на базе закономерностей линейного и нелинейного статического деформирования конструкционных материалов в опасных зонах. В связи с этим были проведены расчётно-экспериментальные исследования с применением вероятностных методов описания уравнений состояния (“ $\sigma - e$ ”) и кинетики местных напряжённо-деформированных состояний в зонах концентрации с учётом рассеяния базовых характеристик статических свойств материалов [5].

При этом новизна предлагаемого подхода к оценке вероятности и разрушения заключается в том, что в степенные уравнения аппроксимированных диаграмм упругопластического деформирования следует вводить не постоянные (детерминированные) значения основных параметров  $\sigma_T$ ,  $E$ ,  $m$ , а их расчётные значения для заданной вероятности  $P$ .

$$\sigma = \sigma_T \left( \frac{e}{e_T} \right)^m ; \sigma_p = \sigma_{Tp} \left( \frac{e_p}{e_{Tp}} \right)^{mp}$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести;  
 $e_T$  – деформация предела текучести ( $e_T = \sigma_T/E$ );  
 $m$  – показатель упрочнения ( $0 \leq m \leq 1$ ).

Величина  $m$  определяется [1] по эксперименту или расчётом по характеристикам  $\sigma_T$ ,  $\psi_k$ ,  $S_k$ .

$$m = \frac{\log\left(\frac{S_k}{\sigma_T}\right)}{\log\left(\frac{e_k}{e_T}\right)}, \quad (4)$$

где  $e_k$  – истинная деформация при разрушении в шейке образца

$$e_{k=\ln} = \left( \frac{1}{1 - \psi_k} \right). \quad (5)$$

Вариация  $\sigma_T$ ,  $S_k$ ,  $e_T$ ,  $\psi_k$  даёт вариацию  $m_p$ .

В связи с рассеянием ОМС определяются и вероятностные характеристики (значения) таких показателей, как показатель упрочнения  $m$  и модуль упругости  $E$ . Коэффициент вариации для  $E$  существенно меньше, чем для  $\sigma_T$ ,  $\sigma_B$ .

Была выявлена довольно значительная вариация конечных деформаций  $e$  и  $e_p$  по сравнению с вариацией  $\sigma$  и  $\sigma_p$  при статическом нагружении гладких образцов в зависимости от рассеяния ОМС при переходе в стадию упругопластического деформирования.

Кинетика локальных напряжённо-деформированных состояний в зонах концентрации при упругопластическом деформировании описывается [1] выражениями

$$\sigma_{\max} = \sigma_n K_\sigma, \quad e_{\max} = e_n K_e; \quad \{K_\sigma, K_e\} = F_k \left\{ \alpha_\sigma, \frac{\sigma_n}{\sigma_T}, m \right\} \quad (6)$$

где  $\sigma_n$  – теоретический коэффициент концентрации напряжений при упругом деформировании ( $\alpha_\sigma \geq 1$ );

$e_n$  – номинальное напряжение вне зоны концентрации;

$K_\sigma$ ,  $K_e$  – коэффициенты концентрации напряжений и деформаций при упругопластическом деформировании соответственно;

$F_k$  – сложный функционал, учитывающий изменение геометрии зоны концентрации по мере развития пластических деформаций.

По данным расчётов и экспериментов при увеличении  $\sigma_n$  величина  $K_\sigma$  снижается ( $1 \leq K_\sigma \leq \alpha_\sigma$ ), а величина  $K_e$  растёт ( $\alpha_\sigma \leq K_e \leq \alpha_\sigma^2$ ).

В качестве примера на рис. 4 представлен по результатам расчётов по выражениям (3) - (6) разброс кривых статического деформирования для стали 25Х1МФ при комнатной температуре в относительных координатах  $\bar{\sigma}_n$  -  $\bar{e}_{\max}$  для зоны концентрации при  $\alpha_\sigma = 4,5$ .

При этом  $\bar{\sigma}_n = \sigma_n / \sigma_T$ ,  $\bar{e}_{\max} = e_{\max} / e_T$ .

Размах вариации максимальных местных упругопластических деформаций в зоне концентрации (при относительном напряжении  $\bar{\sigma}_n = 1,2$ , в пределах изменения значений ОМС при вероятностях  $P$  от 0,001 до 0,999) достигает до 38,5% суммарно в обе стороны от среднего значения для экспериментально определённых (рис. 1) или принятых в расчёте коэффициентов вариации механических свойств  $\nu$ .

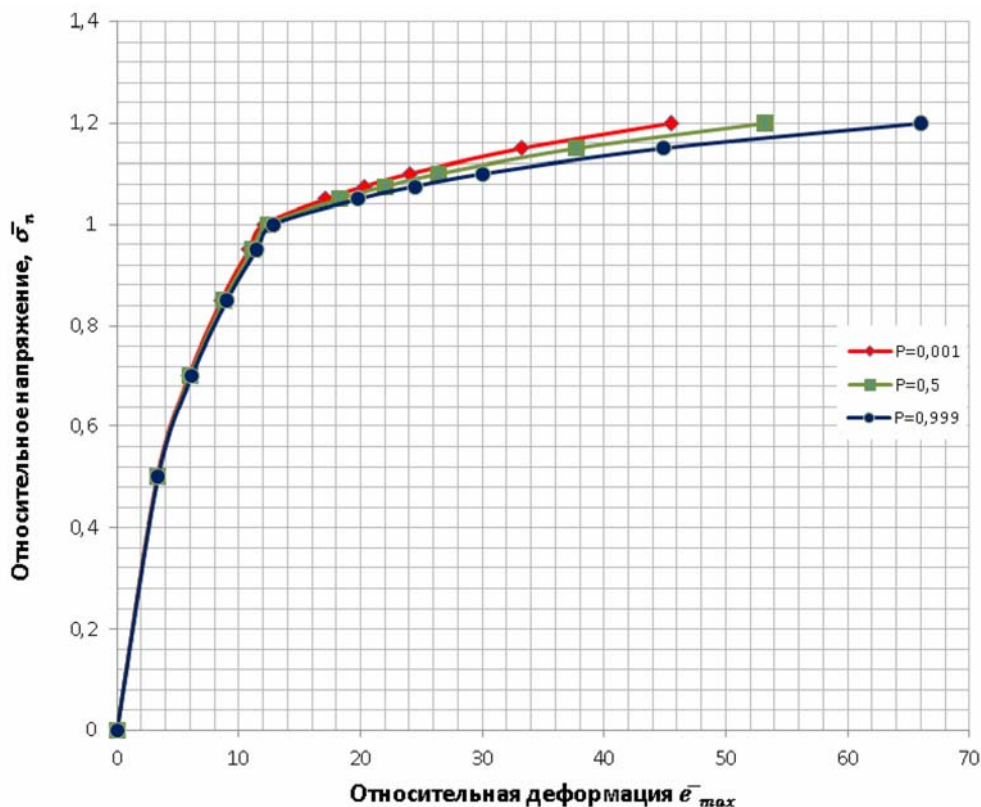


Рис. 4. Диаграмма статического деформирования стали 25X1МФ в зоне концентрации

Для повышенных расчётных коэффициентов вариации свойств  $\nu$  и коэффициентов вариации  $\alpha_\sigma$  при том же напряжении  $\bar{\sigma}_n = 1,2$  размах вариации локальных номинальных деформаций  $e$  достигает до 60%. а размах местных максимальных деформаций в зоне концентрации  $e_{max}$  возрастает суммарно до 75%.

Это требует дополнительного учёта при анализе надёжности и статической прочности по деформационным критериям разрушения.

#### 4. Оценка статической прочности

Представленная выше информация по вероятностным характеристикам сопротивления деформированию и разрушению позволяет перейти к вероятностному анализу статической прочности, надёжности и безопасности в зонах и вне зон концентрации напряжений.

Надёжность (вероятность неразрушения  $P_H$ ) и вероятность разрушения  $P$  несущего элемента связаны соотношениями

$$P_H = 1 - P \quad (7)$$



Величина  $P$  может интерпретироваться как технический риск - один из показателей техногенной безопасности.

Рассмотрим метод определения вероятности разрушения элемента конструкции. Он основан на предположении, что эксплуатационные напряжения, действующие в опасной точке опасного сечения элемента, имеют рассеяние из-за непостоянства и варьирования внешней нагрузки, особенностей конструкции (например, наличие различных зон концентрации, остаточных напряжений от сварки и т.д.). Статистическая изменчивость действующих напряжений  $(\sigma^э)_p$  и несущей способности или разрушающего напряжения  $(\sigma_c)_p$  описывается соответствующими кривыми плотности распределения  $f$ . На рис. 5 показаны функции плотности распределения  $f(\sigma)$  действующих напряжений  $\sigma^э$  и разрушающего напряжения  $\sigma_c$  для оценки вероятностей разрушения  $P_{(k)}$  в случае вероятностного определения статической прочности при однократном нагружении) в точке  $k$  и для областей  $A_1$  и  $A_2$  [1-3, 6].

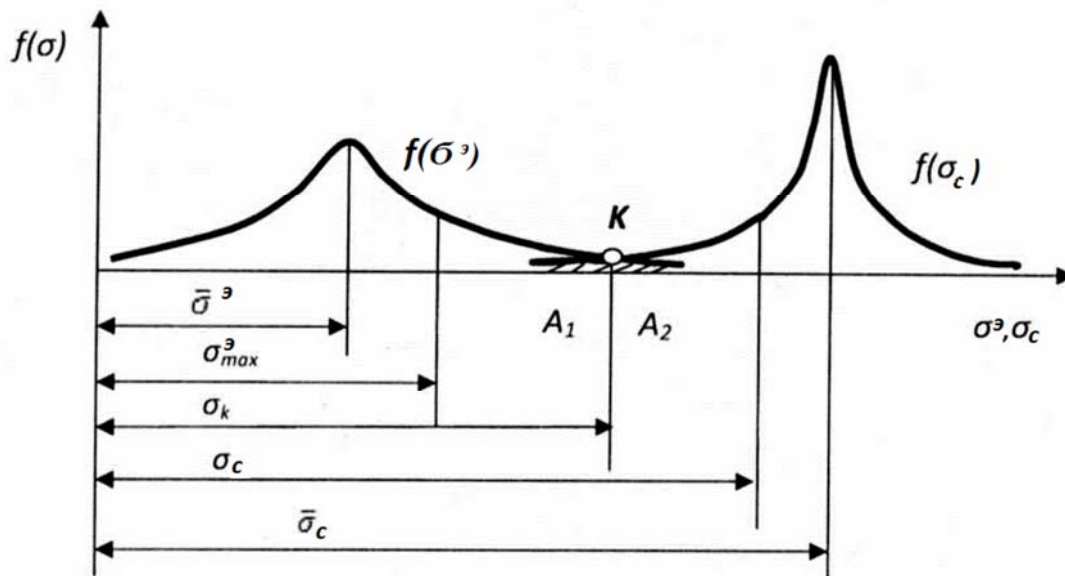


Рис. 5. Кривые плотности распределения нагрузки и несущей способности

Предполагая, что эксплуатационные  $\sigma^э$  и предельные напряжения  $\sigma_c$  являются практически независимыми случайными величинами и распределены по нормальному закону, то вероятность разрушения будет равна

$$P_{разр} = \left[ \frac{1}{2} - \Phi \left( \frac{\sigma_k - \bar{\sigma}^э}{S^э} \right) \right] \times \left[ \frac{1}{2} + \Phi \left( \frac{\sigma_k - \bar{\sigma}_c}{S_c} \right) \right] \quad (8)$$

где  $\bar{\sigma}^э$  и  $\bar{\sigma}_c$  - средние значения действующих (напряжение в опасном сечении) и предельных напряжений (текучести  $\sigma_T$ , прочности  $\sigma_b$  или сопротивление отрыву  $S_k$ ) в выражении (1), используем при детерминированных и вероятностных расчётах;  $S^э$  и  $S_c$  - средние квадратические отклонения в их распределениях.

Тогда, вводя в расчётный анализ функцию неразрушимости  $\psi = \psi_B - \sigma^3$  по А.Р. Ржаницыну [7] окончательно после преобразований для вероятности разрушения получим [2]

$$P_{разр} = \frac{1}{2} - \Phi \left( -\frac{\bar{n} - 1}{\sqrt{v_\alpha^2 + \bar{n}^2 v_\beta^2}} \right) \quad (9)$$

где  $v_\alpha = v_\sigma$  и  $v_\beta = v_c$  - соответственно коэффициенты вариации действующих нагрузок  $\sigma^3$  и разрушающих напряжений  $\sigma_c$ ;

$\bar{n}$  – запас по напряжениям по средним значениям.

В итоге, можно получить зависимости между вероятностью разрушения  $P_{разр}$  и запасами  $n$  для различных типов объектов техносферы, приняв в первом приближении предположение о нормальном законе распределений эксплуатационной нагрузки и несущей способности элемента конструкции и зная фактические (или заданные) значения коэффициентов вариации  $v_\sigma$  и  $v_c$ .

Вероятность разрушения  $P_{разр}$  также можно получить через численную величину квантиля связывающего запас статической прочности и коэффициенты вариации нагрузки и прочности [2, 8].

$$U_p = \left( -\frac{\bar{n} - 1}{\sqrt{v_{\sigma^3}^2 + \bar{n}^2 v_{\sigma_B}^2}} \right) \quad (10)$$

Положения этих расчётных подходов на базе выражений (1) - (10) проиллюстрированы в [1, 2, 6, 9-12] на примере изменений вероятности разрушения и запасов прочности  $n_{\sigma_B}$  для трёх специальных отраслей техники – ракетной, авиационной и для сосудов давления оборудования АЭС, где представлены зависимости вероятности разрушения (достижение предельного состояния элемента конструкции)  $P_{разр}$  от запаса прочности  $n_{\sigma_B}$  при заданных значениях коэффициентов вариации эксплуатационной нагрузки  $v^\sigma$ , критических напряжений  $v_c$ . Результаты этих расчётов представлены на рис. 6-8.

Из этих графиков можно определить условия безопасности (неразрушения) элементов конструкции объекта, если расчётная вероятность локального разрушения оказывается меньше нормативной предельно допустимой величины  $P_{разр} < [P_{разр}]$ . Это достигается путём установления предельно допустимых запасов прочности  $[n_{\sigma_B}]$  для различных заданных уровней вариации  $v_c$  и  $v^\sigma$ .

Для ракетной техники, проектируемой с минимальными запасами прочности  $n_{\sigma_B}$  на уровне 1.1-1.4 вероятность разрушения оказывается в пределах  $10^{-2}$ - $10^{-5}$ , для авиационной техники с запасами на уровне 1,4-1,8 в пределах  $10^{-3}$ - $10^{-6}$ , для реакторных установок с запасами на уровне 2,2-2,6 в пределах  $10^{-13}$ - $10^{-22}$ .

Указанные вероятности разрушения могут возрасти, если учесть наличие циклических и длительных нагрузок, а также технологических и эксплуатационных дефектов типа трещин.

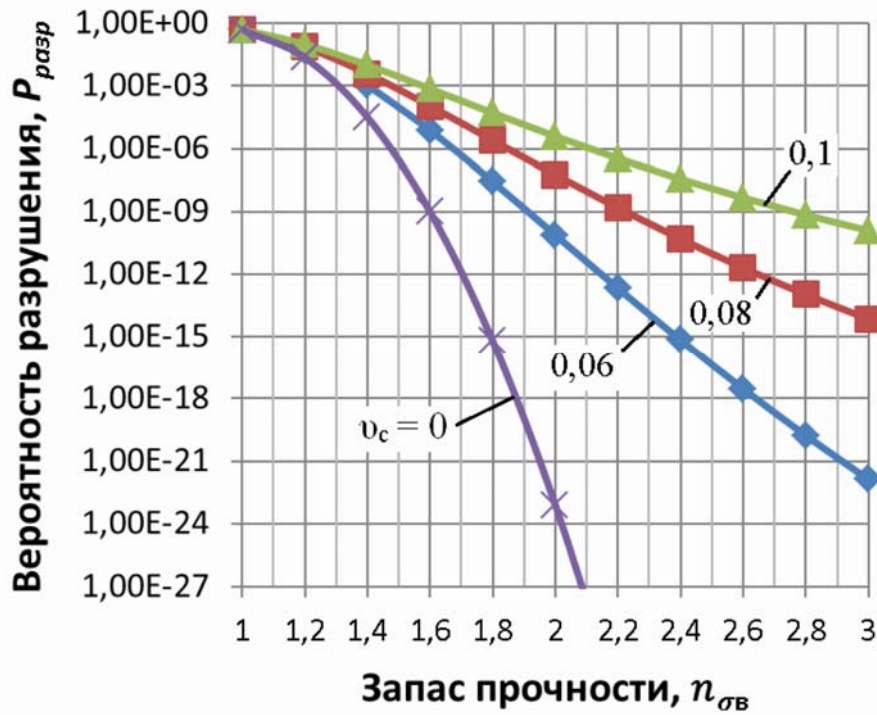


Рис. 6. Зависимость вероятности разрушения от запаса прочности  $n_{\sigma_B}$  при различных сочетаниях коэффициентов вариации нагрузки ( $v_s = 0,1$ ) и прочности  $v_c$  ( $0,0 \leq v_c \leq 0,1$ ) для сосудов давления

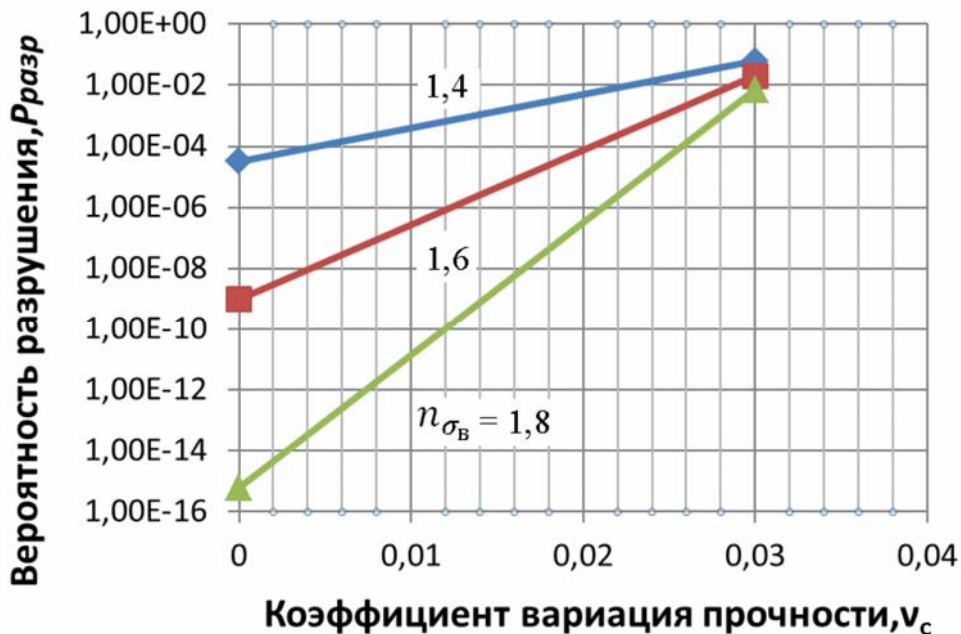


Рис. 7. Зависимость вероятности разрушения от коэффициента вариации прочности по параметру запаса прочности  $n_{\sigma_B}$  для авиа- и ракетных конструкций (при  $v_s = 0,1$ )

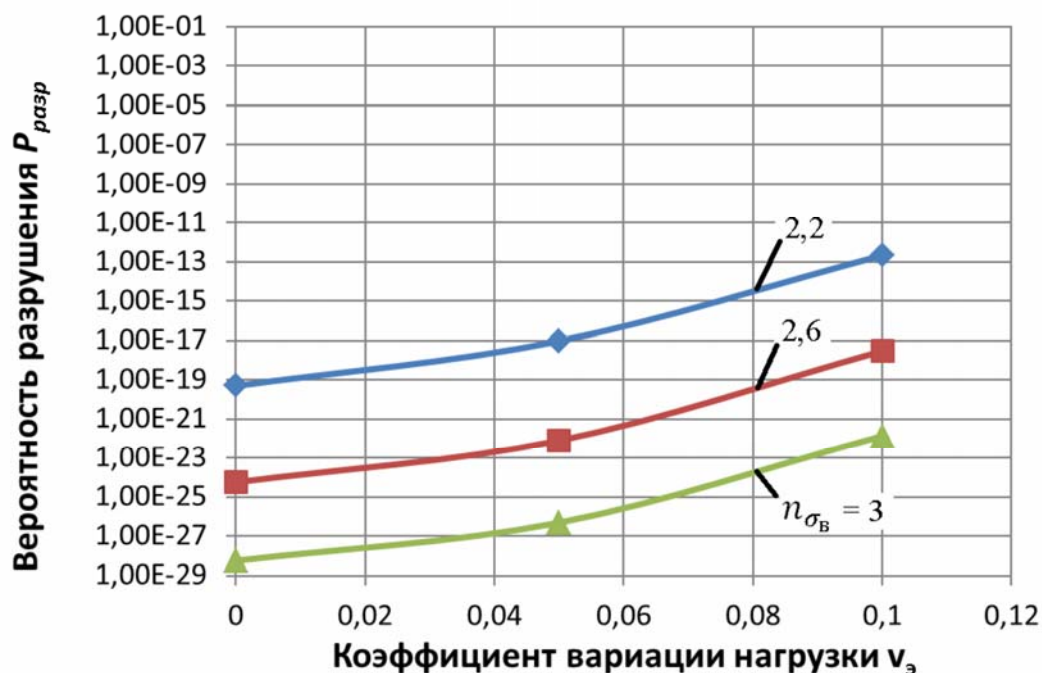


Рис. 8. Зависимость вероятности разрушения от коэффициента вариации нагрузки  $v_z$  по параметру запаса прочности  $n_{\sigma_B}$  для сосудов давления (при  $v_c=0,06$ )

## 5. Заключение.

Для уточнённого определения прочности и безопасности в расчёт необходимо вводить комбинированные детерминированные, статистические и вероятностные методы с учётом конструкторско-технологических факторов разброса механических свойств и эксплуатационной нагруженности и концентрации напряжений.

Учёт указанных видов рассеяния должен быть распространён на все виды уточнённых расчётов для уравнений состояния, кинетики напряжённо-деформированных и предельных состояний.

При этом рассеяние исходных характеристик механических свойств может определяться как экспериментальным, так и расчётным путём, вводя в расчётные выражения значения ОМС для определённых уровней вероятностей  $P$ .

Для обоснования безопасности конструкций в общем случае необходимо выполнить требования по комплексу запасов по прочности, надёжности и вероятности разрушения.

## Литература

1. Махутов Н.А. Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования. Новосибирск.: Наука. – 2008. – 528 с.
2. Степнов М.Н. Вероятностные методы оценки характеристик механических свойств материалов. Новосибирск.: Наука. – 2005. – 342 с.
3. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. - М.: Машиностроение. – 1990. – 447 с.
4. Махутов Н.А., Зацаринный В.В, Романов А.Н. и др. Статистические закономерности малоциклового разрушения. – М.: Наука. – 1989. -252 с.

5. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Научные основы техногенной безопасности. Науч. рук. Махутов Н.А. – М.: МГОФ «Знание». – 2015. – 936 с.
6. Махутов Н.А., Зацаринный В.В., Резников Д.О. Особенности статистических подходов при оценке статической прочности. Безопасность в техносфере. – 2014, №2. С.33-39.
7. Ржаницин А.Р. Расчёт сооружений с учётом пластических свойств материала. М.: Стройиздат. – 1954.
8. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчёты деталей машин на прочность и долговечность: Справочник – М.: Машиностроение. – 1985.–224
9. Махутов Н.А., Резников Д.О., Зацаринный В.В. Два типа сценариев аварий в сложных технических системах. Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. №2, 2014. С. 28-41.
10. Прочность и ресурс ЖРД. Махутов Н.А., Рачук В.С., Гаденин М.М. и др. М.: Наука. – 2011. – 525 с.
11. Локальные критерии прочности, ресурса и живучести авиационных конструкций. Махутов Н.А., Гаденин М.М., Москвичёв В.В. и др. Новосибирск.: Наука. – 2017. – 600 с.
12. Анализ риска и повышение безопасности водо-водяных энергетических реакторов. Махутов Н.А., Гаденин М.М., Зацаринный В.В. и др.-М.: Наука. – 2009. – 449 с.

### Сведения об авторах

**Николай Андреевич Махутов** – д.т.н., главный научный сотрудник Института машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, тел. (499) 135 7771; e-mail: mibsts@mail.ru. Адрес: 101990, г. Москва, Малый Харитоньевский пер., д.4.

**Владимир Васильевич Зацаринный** – ведущий научный сотрудник Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, тел. 8-916 169 7569; e-mail: v.zatsar@mail.ru. Адрес: 101990, г. Москва, Малый Харитоньевский пер., д.4.

УДК 614.8

## МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОБЛЕМ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ: СОСТОЯНИЕ И ПУТИ РЕШЕНИЯ

**Доктор техн. наук В.А. Акимов, кандидат социолог. наук С.Л. Диденко  
ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ) МЧС России**

*Представлены результаты междисциплинарных исследований проблем комплексной безопасности и обоснованы направления дальнейших исследований. Показано, что закрытые системы в принципе являются менее безопасными, нежели открытые, поскольку последним доступны ресурсы окружающей их среды, имеются источники и стоки вещества, энергии и информации. Поэтому самый лучший способ обеспечения безопасности лежит на пути самоорганизации и усложнения систем, а не на пути сохранения достигнутой системой сложности с помощью ее изоляции от внешней среды.*

**Ключевые слова:** междисциплинарные исследования, комплексная безопасность, общая теория безопасности, термодинамика, синергетика, теория катастроф, чрезвычайные ситуации природного и техногенного характера.