

*На правах рукописи*

ШАТОВ МИХАИЛ МИХАЙЛОВИЧ

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ОТКАЗА,  
ДОСТИЖИМОЙ НА ОСНОВЕ РЕГЛАМЕНТАЦИИ  
ЗАПАСОВ ПРОЧНОСТИ**

Специальность

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск – 2013

**Работа выполнена в** Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет) (ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ)) на кафедре «Прикладная механика, динамика и прочность машин».

**Научный руководитель**

**Чернявский Александр Олегович**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной механики, динамики и прочности машин ЮУрГУ

**Официальные оппоненты:**

**Сызранцев Владимир Николаевич**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машин и оборудования нефтяной и газовой промышленности Института нефти и газа Тюменского государственного нефтегазового университета

**Барышов Сергей Николаевич**

доктор технических наук, заместитель директора по науке ОАО "Системы и технологии обеспечения безопасности. Техдиагностика", г. Оренбург

**Ведущая организация**

Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука» Красноярского научного центра Сибирского отделения РАН

Защита состоится «»  года в  часов на заседании диссертационного совета  при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр-т Ленина, 76, корп. , ауд. .

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан «»  20 года.

Учёный секретарь диссертационного совета Д 212.298.02,  
доктор технических наук, профессор

Чернявский А.О.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Конструкции должны удовлетворять противоречивым требованиям максимизации безопасности и минимизации стоимости (включая убытки от возможных аварий). Для одновременного описания этих сторон задачи используется понятие «риск», понимаемый как произведение вероятности отказа на ущерб от него. Ограничения на риск в российских и зарубежных нормативными документах требуют, чтобы авариям с большими убытками соответствовала меньшая допустимая частота. Часто вместо количественной оценки возможных убытков аварии делят на категории в зависимости от тяжести ущерба и ограничивают вероятности по категориям: так например, для опасных объектов в нефтегазовой отрасли и энергетике частота аварий с катастрофическими последствиями не должна превышать  $10^{-6}$  в год. Вероятность отказа определяется всеми звеньями жизненного цикла конструкции: разработкой задания, проектированием, изготовлением, эксплуатацией и утилизацией. Данная работа посвящена анализу зависимости вероятности отказа от результатов выполнения одного из звеньев этой цепочки – проектных расчётов на прочность.

На практике расчётная оценка вероятности имеет точность  $10^{-3} - 10^{-2}$  и не может быть повышена до уровня  $10^{-6}$  вследствие ограниченности доступного объема исходных данных. Вынужденное использование непроверяемых статистических гипотез, например, о виде законов распределения свойств материала в области маловероятных значений, приводит к тому, что результаты вероятностного расчёта должны рассматриваться лишь как сравнительные: из нескольких конструкций безопаснее та, у которой – при одинаковых методах расчета – меньше расчётная вероятность разрушения. При таком подходе расчётная вероятность становится относительной величиной, подобной коэффициенту запаса. В работе выявлены условия, при которых расчётная вероятность слабо зависит от статистических гипотез и близка к действительной, и условия, при которых она имеет лишь относительный смысл.

Если результаты расчётов применимы лишь в относительном смысле, то и критерии безопасности также должны носить относительный характер. Подобно тому, как нормативный коэффициент запаса связан с методами расчёта, вероятность, отделяющая «приемлемые» конструкции от «неприемлемых», также должна быть связана с методами расчёта и принимаемыми статистическими гипотезами. Чтобы подчеркнуть относительный смысл этой вероятности и ее отличие от нормативной, задаваемой из социально-экономических соображений, предложен термин «предельная расчётная вероятность отказа» (ПРВО). В основу предлагаемой методики назначения ПРВО положено соответствие между результатами вероятностного расчета и расчетов по апробированным детерминированным методикам: конструкции, вероятность

отказа которых ниже ПРВО, должны быть не опаснее существующих. Установление соответствия между коэффициентом запаса и вероятностью разрушения в реальных задачах усложняется наличием различных возможных механизмов разрушения (однократная перегрузка, усталость, потеря устойчивости и пр.). В работе сделана попытка установить это соответствие на примере реального элемента конструкции – сварного тройника паропровода Южноуральской ГРЭС.

Если вычисляемые вероятности имеют частотный смысл, то полученные соотношения позволяют установить коэффициенты вариации нагрузки и прочности (отражающие культуру производства и эксплуатации), которые при заданном коэффициенте запаса обеспечивают выполнение социально-экономических требований к риску. Сделанные оценки позволяют показать, какие частоты достижимы – либо принципиально недостижимы – при заданных коэффициентах запаса.

Недостижимость заданной вероятности отказа при принятых коэффициентах запаса прочности указывает на необходимость обеспечения требуемой вероятности другими средствами: ограничениями на плановый ресурс и условия работы, диагностикой и оценкой остаточного ресурса, локализацией последствий возможных аварий и др.

**Актуальность работы** определяется наличием в нормативных документах ограничений на вероятность разрушения для опасных конструкций. В то же время нормативные документы не ставят допустимую вероятность в зависимость от методов расчёта и используемых гипотез – в отличие от того, как это делается в документах, нормирующих детерминированные расчёты.

**Цель исследования** – уточнение выполняемых в настоящее время расчетных оценок риска эксплуатации опасных конструкций.

Для достижения цели в работе решаются следующие **задачи**:

1. Определение условий, в которых вычисляемым вероятностям отказов нельзя придать частотный смысл.
2. Разработка методики назначения предельной расчётной вероятности отказа – величины, разграничивающей «приемлемые» и «неприемлемые» конструкции при определённых методах расчёта и используемых гипотезах. Методика должна быть ориентирована, прежде всего, на малочисленные опасные конструкции с низкой частотой разрушения (отказа).
3. Оценку влияния вариаций нагрузок и прочности на расчетные значения вероятности разрушения и коэффициента запаса; определение требований к конструкциям для обеспечения требуемого уровня безопасности.

### **Научная новизна**

1. По результатам анализа чувствительности расчётной вероятности в области малых значений впервые были выявлены условия, при которых расчётная вероятность отказа практически не зависит от статистических гипотез.
2. Предложена методика определения критериального значения расчётной вероятности разрушения, обеспечивающего равную опасность конструкции, рассчитываемой на прочность вероятностными методами (с определённым набором гипотез) и конструкции, рассчитываемой по существующим нормативным детерминированным методикам. Предлагаемое критериальное значение вероятности разрушения отличается от нормативного тем, что определяется не допустимым значением риска, а методами вероятностного расчёта и опытом эксплуатации, отраженным в нормативных коэффициентах запаса;
3. Для инженерных расчетов предложена методика коррекции нормативного коэффициента запаса, обеспечивающая требуемую безопасность в случаях, когда коэффициенты вариации параметров нагруженности и/или прочности существенно изменились.

**Достоверность** полученных результатов обосновывается:

1. Указанием границ применимости результатов, обусловленных строгой системой постулатов, принимаемых в рассуждениях;
2. Соответствием закономерностей, полученных в результате численного эксперимента, выполненного по известным (апробированным) методикам, закономерностям, полученным в результате теоретического исследования;
3. Строгим использованием математического аппарата.

**Значимость для теории и практики** заключается в разработанной методике определения и назначения предельной расчётной вероятности отказа, при которой конструкция равноопасна конструкции, рассчитанной по апробированным детерминированным методикам. Применение методики продемонстрировано на примере типового элемента – тройника паропровода.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации доложены и обсуждены на IV всероссийской конференции «Безопасность критичных инфраструктур и территорий» (Екатеринбург, 2011), IV международном симпозиуме «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» (Челябинск, 2012), XVII международной конференции «Технические науки – от теории к практике» (Новосибирск, 2013), II международной конференции «Шаг в будущее: теоретические и прикладные исследования современной науки» и международной конференции «Приоритеты мировой науки: эксперимент и научная дискуссия» (Санкт-Петербург, 2013).

**На защиту выносятся** следующие положения диссертации, обладающие элементами научной новизны:

1. Результаты анализа чувствительности расчётной вероятности отказа к статистическим гипотезам.
2. Методика назначения предельной расчётной вероятности отказа;
3. Результаты численного эксперимента по определению предельной расчётной вероятности отказа сварного тройника паропровода;
4. Методика коррекции нормативного коэффициента запаса;

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 122 листах машинописного текста, включая 40 рисунков и 7 таблиц. Библиография работы содержит 120 наименований.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Социально-экономическая политика РФ в области обеспечения безопасности основана на концепциях устойчивого развития и приемлемого риска, которые обязывают проводить анализ риска техногенных объектов. В настоящее время Нормы ограничивают не риск, а вероятность аварии (Ветошкин А.Г., Махутов Н.А. и др.). Из обзора зарубежных и отечественных нормативных документов и ряда статей (Аронов И.З., Верёвкин А.П., Мещерин И.В, Kolios A., Maddox S.J., Wiesner C.S. и др.) следует, что методы оценки риска можно разделить на две категории: качественные и количественные. В работе рассмотрены вопросы, связанные с количественными методами.

При определении вероятности аварии (Махутов Н.А., Нихамкин М.Ш., Шаров В.Д. и др.) задача включает определение вероятности отказа технической системы и определение вероятности инициирующих внешних событий (Абрамова Л.С., Бочкарёв А.Н., Зубков Б.В. и др.), влияющих на работу технической системы. В настоящей работе рассматриваются вопросы, связанные с определением вероятности отказа технической системы.

При определении вероятности отказа технической системы трудность заключается в том, что отказ одного из элементов технической системы может приводить к существенному перераспределению полей нагрузок и изменению физических свойств элементов системы, что нельзя учесть методами структурной теории надёжности (Алексеев В.В., Махутов Н.А., Машканцев И.В, Москвичев В.В., Тимашев С.А., F.M. Burdekin и др.).

При аналитической оценке вероятности отказа одного элемента технической системы особые сложности вызывает оценка достоверности результата. Практика расчётов показывает, что достаточной статистической информации для эмпирических оценок частоты маловероятных событий нет. Всегда используется замена эмпирического закона распределения случайной величины теоретическим. Экстраполяция в область малых вероятностей, в слу-

чае использования различных законов распределения, приводит к существенным различиям в результатах (Барышов С.Н., Бушинская А.В., Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б., Степнов М.Н., Сызранцев В.Н., Чернявский А.О., Шадчин А.В. и пр.). Расчётные вероятности (в области значений менее  $10^{-4}$ ) не соответствуют реальной частоте аварий (по данным монографии «Безопасность России» проектная (расчётная) вероятность отказа для реакторов, турбоагрегатов, летательных аппаратов отличается от реальной частоты отказа на 1–3 порядка). Нормативных документов, связывающих метод расчёта на прочность и метод статистической обработки информации, нет.

В настоящее время основным подходом к расчётам на прочность является детерминированный. В отличие от детерминированных методов, вероятностные методы более информативны, так как имеют прямой учёт информации о разбросах: например, в двух расчётах при одном и том же распределении нагрузок и разных распределениях прочности с одинаковой минимальной прочностью (коэффициенты запаса одинаковы), случай с бóльшим математическим ожиданием прочности опаснее.

На основе анализа литературы сформулированы приведенные выше задачи исследования.

### **Используемые термины и предположения**

**Параметры нагруженности и прочности** являются интегральными понятиями, которые в одном значении характеризуют нагруженность или прочность всей конструкции (или её опасной точки). В детерминированном расчёте считается, что предельное состояние наступило, если отношение параметра прочности к параметру нагруженности меньше нормативного коэффициента запаса. В вероятностном расчёте вычисляется вероятность того, что параметр прочности окажется меньше параметра нагруженности.

**Понятие коэффициента запаса.** Рассматриваются два предельных состояния: разрушение от однократной перегрузки (статическая прочность) и разрушение от накопления повреждения (длительная циклическая прочность). При оценке статической прочности под коэффициентом запаса понимается множитель, на который нужно увеличить параметр нагруженности, чтобы наступило предельное состояние. При оценке длительной циклической прочности под коэффициентом запаса понимается отношение ресурса к наработке.

**Понятие минимальной прочности.** Нормы используют понятие «гарантированных механических характеристик», однако не устанавливают правил их определения по выборке случайных испытаний. Далее под минимальной прочностью будем понимать значение, полученное как нижняя граница симметричного доверительного интервала параметра прочности (механических характеристик) при выбранном законе распределения и

уровне доверия  $(1 - 2P_{toler})$ , где  $P_{toler}$  – вероятность выхода случайной величины за левую или правую границу доверительного интервала.

**Понятие максимальной нагрузки.** Максимальная нагрузка определяется как верхняя граница симметричного доверительного интервала параметра нагруженности (доверительная вероятность прочности и нагруженности одинакова).

### **Анализ чувствительности расчётной вероятности отказа к недоказуемым статистическим гипотезам**

При ограниченном количестве исходных данных существующие статистические критерии не позволяют однозначно вынести суждение о виде закона распределения, и в расчёт может быть заложен закон, не совпадающий с действительным законом распределения. Пусть параметры нагруженности и прочности распределены по законам, отличающимся от нормального, но в расчётах аппроксимируются нормальным законом. Обычно параметры аппроксимирующего закона определяют из минимума некоторой функции, характеризующей отличия между аппроксимируемым и аппроксимирующим законом. В качестве методического примера использовалось выражение:

$$R(m^T, \sigma^T) = \int_{-\infty}^{\infty} [f^И(x, m^И, \sigma^И) - g^T(x, m^T, \sigma^T)]^2 dx, \quad (1)$$

где  $f^И$  – истинный закон распределения, а  $g^T$  – аппроксимирующий закон (в приводимом примере – нормальный закон).

Определяющими значениями плотности распределения при нахождении вероятности отказа порядка  $10^{-3}$ - $10^{-6}$  являются значения в области маловероятных значений («хвостов» распределений). Поэтому при аппроксимации, например действительного закона равной плотности нормальным законом, расчётная вероятность окажется завышенной, а при аппроксимации закона Лапласа – заниженной. Под действительной вероятностью отказа понимается вероятность, посчитанная с использованием действительных законов распределения нагруженности и прочности, а под расчётной вероятностью ( $P^{расч}$ ) – вероятность, посчитанная с использованием аппроксимирующих (нормальных) законов.

При оценке значительных вероятностей (рисунки 1 – 3) погрешность вероятностного расчёта, определяемая принятием неверной статистической гипотезы, хоть и сопоставима по величине с расчётной вероятностью, но является приемлемой во всей области  $(k_l, k_s)$ , поэтому расчётная вероятность порядка  $10^{-2}$  имеет частотный смысл. Из рисунка 1 следует, что если законы распределения нагруженности и прочности достоверно не известны, то результат вероятностного расчёта в области малых ( $10^{-6}$ ) значений нельзя



трактовать в частотном смысле. Если достоверно известен один из законов распределения: прочности (рисунок 2) или нагруженности (рисунок 3), то можно выделить области, в которых расчётная вероятность близка к действительной (отличия менее порядка).

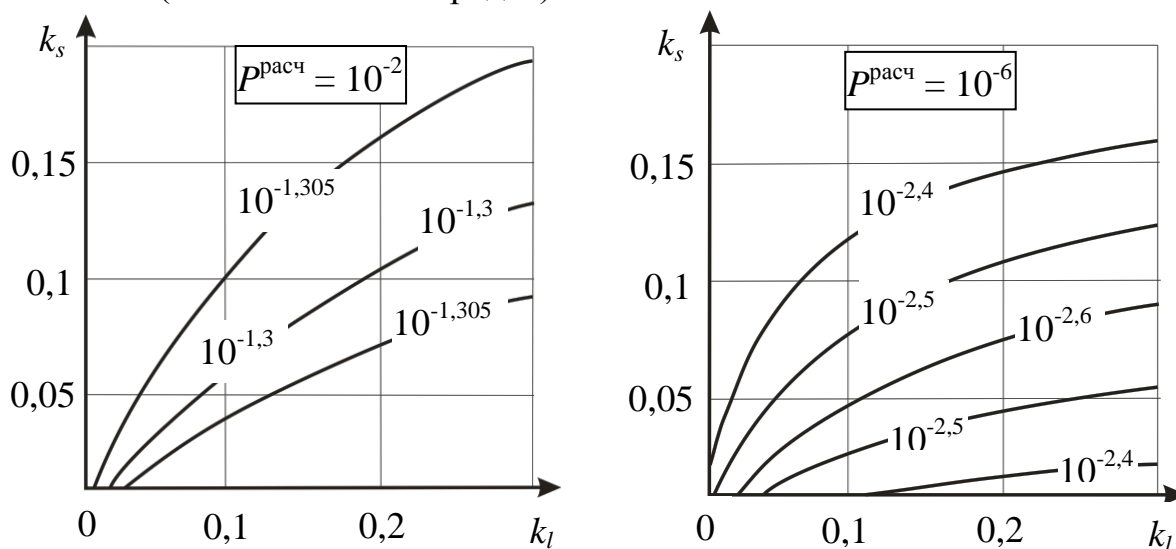


Рисунок 1 – Действительная вероятность отказа, посчитанная из условия, что распределения нагруженности и прочности (закон Лапласа) ошибочно аппроксимированы нормальными законами

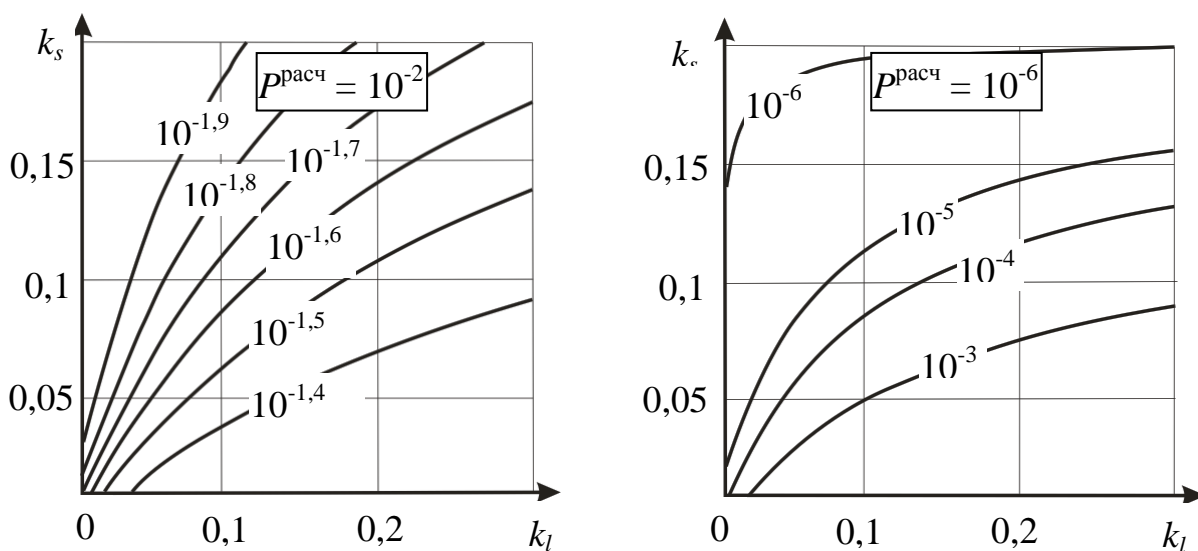


Рисунок 2 – Действительная вероятность отказа, посчитанная из условия, что распределение нагруженности (закон Лапласа) ошибочно аппроксимирован нормальным законом. Распределение прочности – нормальный закон

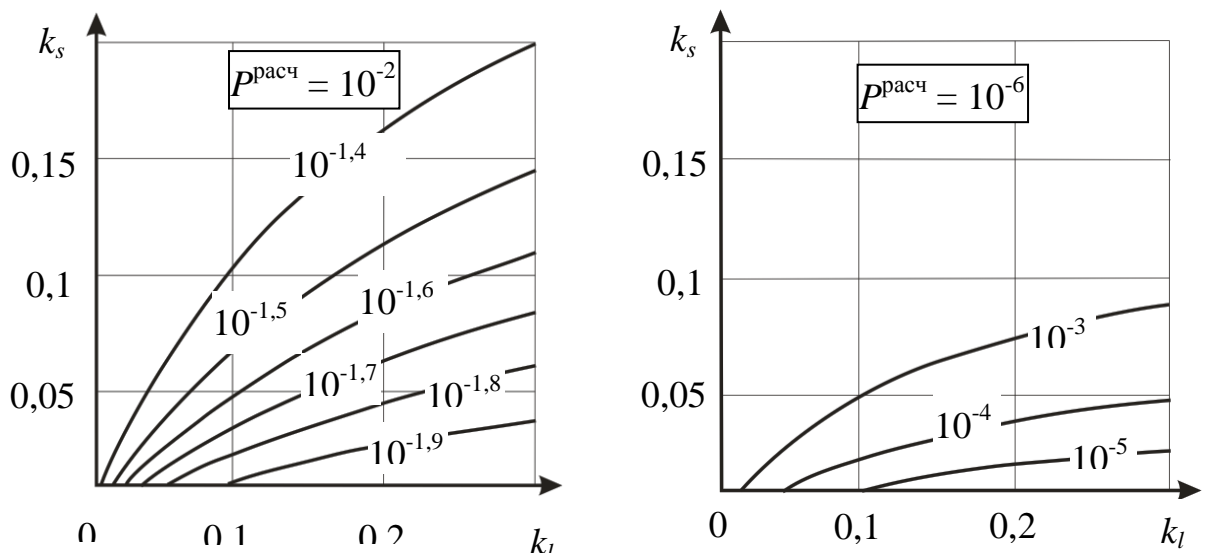


Рисунок 3 – Действительная вероятность отказа, посчитанная из условия, что распределение прочности (закон Лапласа) ошибочно аппроксимирован нормальным законом. Распределение нагруженности – нормальный закон

### Методика назначения предельной расчетной вероятности отказа

И детерминированные, и вероятностные расчёты не могут быть проведены без принятия гипотез. В детерминированном расчёте нормативный коэффициент запаса жёстко связан с принимаемыми гипотезами. В случае вероятностного расчёта, вероятность, отделяющая «приемлемые» конструкции от «неприемлемых» в области малых вероятностей, также должна быть увязана с набором гипотез. Для этой разделяющей вероятности предлагается использовать термин «предельная расчётная вероятность отказа» (ПРВО). Отличие ПРВО от допустимой частоты отказа заключается в том, что первая изменится при смене используемых в расчёте гипотез, а вторая – нет.

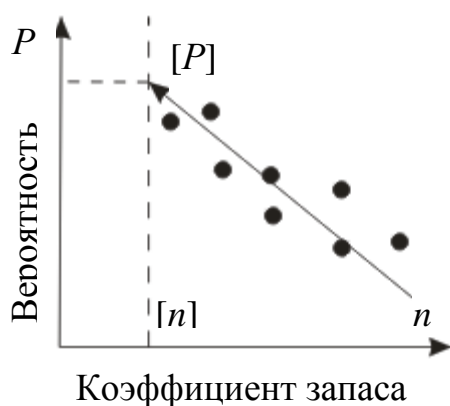


Рисунок 4 – Схема определения предельной расчётной вероятности отказа

Для назначения ПРВО  $[P]$  предлагается установить связь между расчётной вероятностью разрушения и коэффициентом запаса. Значение вероятности отказа, соответствующее нормативному коэффициенту запаса  $[n]$ , является значением ПРВО  $[P]$  (рисунок 4). Такой способ назначения ПРВО обеспечивает равную опасность конструкции, прочность которой обосновывается вероятностными расчётами, и конструкции, прочность которой обоснована нормативными детерминированными расчётами.

Пусть для произвольной конструкции, имеющей одно предельное

состояние, аналитически заданы функции распределения прочности и нагруженности. Пусть имеется аналитическая связь между минимальной прочностью и максимальной нагрузкой с границами доверительного интервала случайных величин. Определим ПРВО как функцию параметров распределений.

Детерминированный расчёт коэффициента запаса использует величины минимальной прочности и максимальной нагрузки, определяемые (возможно неявно) через те же законы распределения, что и в вероятностном расчёте. Это требует использования и в детерминированных, и в вероятностных расчётах одних и тех же расчётных схем и гипотез.

Вероятность разрушения определяется формулой для вычисления условной вероятности в форме, предложенной А.Р. Ржаницыным:

$$P = \int_{-\infty}^{\infty} f_l(x, m_l, \sigma_l, p_{l3}, \dots, p_{ln}) \int_{-\infty}^x f_s(y, m_s, \sigma_s, p_{s3}, \dots, p_{sk}) dy dx, \quad (2)$$

где  $f_l(x, m_l, \sigma_l, p_{l3}, \dots, p_{ln})$  – функция распределения нагруженности с параметрами сдвига  $m_l$  и масштаба  $\sigma_l$ , а также другими параметрами распределения  $p_{l3}, \dots, p_{ln}$ ,  $n$  – общее число параметров закона распределения нагруженности;  $f_s(x, m_s, \sigma_s, p_{s3}, \dots, p_{sk})$  – функция плотности распределения прочности с параметрами сдвига  $m_s$  и масштаба  $\sigma_s$ , а также другими параметрами распределения  $p_{s3}, \dots, p_{sk}$ ,  $k$  – общее число параметров закона распределения прочности.

Выражение (2) можно привести к виду:

$$P = \frac{1}{k_m k_l k_s} \int_{-\infty}^{\infty} f_l\left(\frac{\xi - 1}{k_l}, p_{l3}, \dots, p_{ln}\right) \int_{-\infty}^{\xi} f_s\left(\frac{\eta - k_m}{k_m k_s}, p_{s3}, \dots, p_{sk}\right) d\eta d\xi, \quad (3)$$

где введены обозначения:  $\frac{x}{m_l} = \xi, \frac{y}{m_s} = \eta, k_m = \frac{m_s}{m_l}, k_l = \frac{\sigma_l}{m_l}, k_s = \frac{\sigma_s}{m_s}$ .

Минимальная прочность и максимальная нагрузка имеют смысл квантилей, которые можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \sigma_{min} &= m_s + A_s \sigma_s; \\ \sigma_{max} &= m_l + A_l \sigma_l, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $A_s$  и  $A_l$  – некоторые коэффициенты, определяемые из условий:

$$\int_{-\infty}^{A_s} f_s(x, 0, 1, p_{s3}, \dots, p_{sk}) = P_{toler}; \quad \int_{A_l}^{\infty} f_l(x, 0, 1, p_{l3}, \dots, p_{ln}) = P_{toler}. \quad (5)$$

Учитывая (4), коэффициент запаса можно представить формулой:

$$n = k_m \frac{1 + A_s k_s}{1 + A_l k_l}. \quad (6)$$

Выразив из (6)  $k_m$  через коэффициент запаса  $[n]$  и подставив в (3), можно получить зависимость предельной расчётной вероятности отказа (ПРВО) от  $[n]$  и  $k_l, k_s$ . Эта зависимость показана на рисунке 5 для случая нормальных законов распределения и различных значений коэффициентов вари-

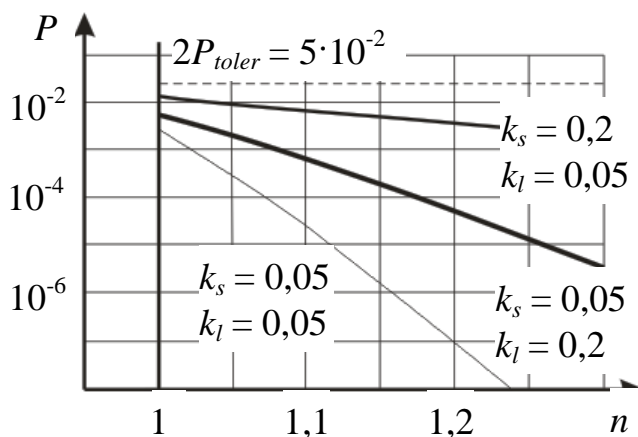


Рисунок 5 – Зависимость расчётной вероятности разрушения от коэффициента запаса  $n$  и коэффициентов вариации нагруженности  $k_l$  и прочности  $k_s$ . Закон распределения характеристик нагруженности  $f_l$  и прочности  $f_s$  – нормальный

$[n]$ . С ростом  $[n]$  диапазон изменения ПРВО становится шире, причем верхняя граница почти не меняется (около  $2P_{toler}$ ), а нижняя стремится к нулю. Если законы, аппроксимирующие нагруженности и прочность, нормальные и коэффициенты вариации произвольны, то, согласно рисунку 5, значению  $[n] = 1,1$  отвечает минимальное значение ПРВО  $10^{-8}$ , а при  $[n] = 2$  –  $10^{-20}$ .

Для случая, когда закон распределения параметров нагруженности и прочности нормальный, изолинии ПРВО на плоскости коэффициентов вариации представлены на рисунке 6. При рассмотренных коэффициентах вариации, требование не превышения вероятностью разрушения значения  $10^{-5}$  обеспечивает создание конструкций не опаснее, чем по детерминированным методикам. При некоторых значениях коэффициентов вариации требование  $P \leq 10^{-5}$  может быть ослаблено, например, до  $P \leq 10^{-3}$ .

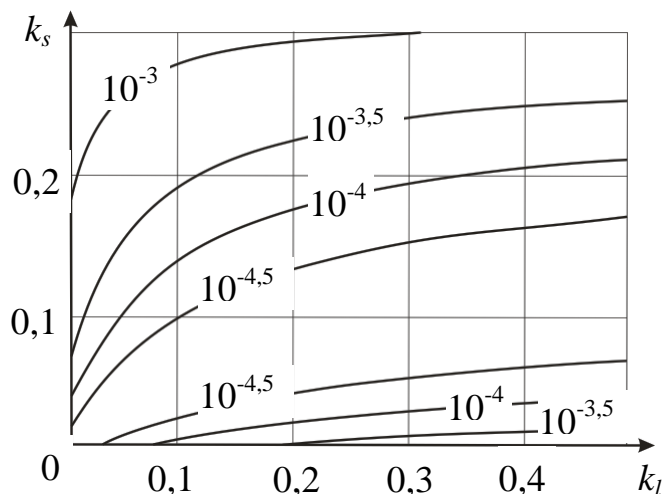


Рисунок 6 – Зависимость ПРВО от коэффициентов вариации нагруженности  $k_l$  и прочности  $k_s$ . Закон распределения характеристики нагруженности  $f_l$  и прочности  $f_s$  – нормальный.  $[n] = 1$ ,  $P_{toler} = 1,5 \cdot 10^{-3}$

ации  $k_l$ ,  $k_s$ . По рисунку 5 можно оценить влияние коэффициентов вариации на значения ПРВО при различных значениях нормативного коэффициента запаса.

Если для коэффициентов вариации  $k_l$ ,  $k_s$  известны только интервальные оценки, то фиксированному нормативному запасу  $[n]$  соответствует диапазон значений ПРВО  $[P]$ . В случае недостатка данных ориентироваться нужно на нижнюю границу этого диапазона: конструкция с вычисленной вероятностью разрушения  $P$  будет заведомо не хуже имеющей детерминированный запас

Численная оценка предельной расчётной вероятности отказа проведена для сварного тройника паропровода Южноуральской ГРЭС, нагруженного внутренним давлением, крутящими и изгибающими моментами, нормальными силами в каждом сечении тройника. Рассматривались только стационарные режимы нагружения («холодный» и «горячий»). Геометрические дефекты (непровары, трещины и пр.) не учитывались. Расчёт проводился по двум предельным состояниям: разрушение от однократной перегрузки (статическая прочность), разрушение от накопления повреждения (длительная циклическая прочность). Разные предельные состояния характеризуются разными коэффициентами запаса и вероятностями разрушения. В основу вероятностной методики были положены зависимости детерминированной методики, дополненные учётом характеристик разброса.

Численный эксперимент проводился методом Монте-Карло. Геометрические характеристики тройника предполагались неизменными. В каждом сечении тройника разыгрывались нагрузки, зависящие от случайных аргументов: давления, температуры, монтажных усилий. Из них отбирались сочетания, которые удовлетворяли условиям прочности детерминированного метода. Для выбранных сочетаний нагрузок определялась вероятность разрушения (отказа).

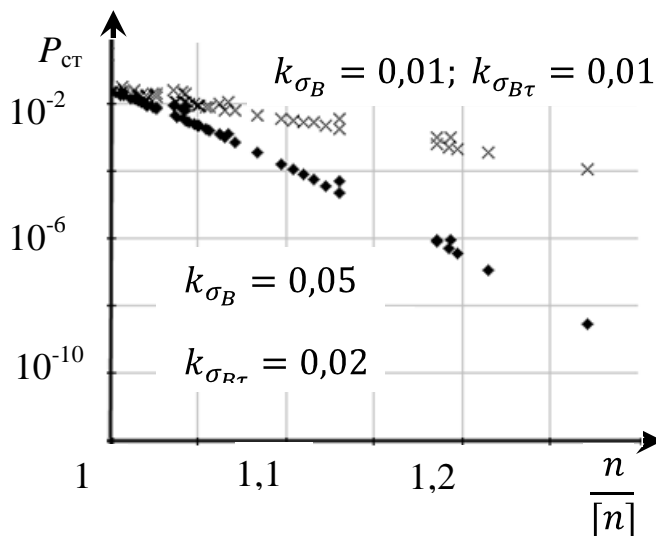


Рисунок 7 – Влияние коэффициента вариации характеристик прочности на значение предельной расчётной вероятности отказа от однократной перегрузки.  $P_{toler} = 2,5 \cdot 10^{-2}$

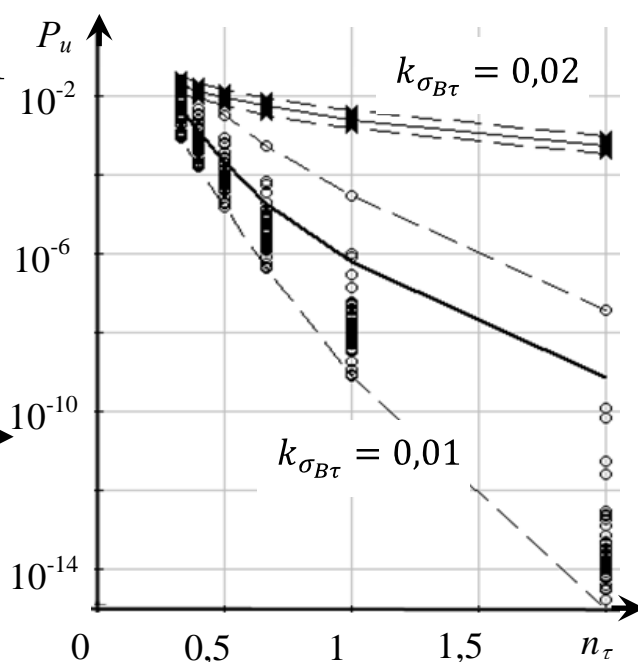


Рисунок 8 – Чувствительность ПРВО от циклического нагружения к коэффициенту вариации длительной прочности  $k_{\sigma_{B\tau}}$

Индексами «ст» и «ц» на рисунках 7, 8 отмечены величины, относящиеся к расчёту на статическую и циклическую прочность соответственно. Сопоставив результаты вероятностного и детерминированного расчёта, было установлено значение ПРВО для разных предельных состояний ( $10^{-2}$  от однократной перегрузки и  $10^{-8}$  от циклического нагружения). Был проведён анализ чувствительности ПРВО к коэффициенту вариации прочности  $k_s$  и доверительной вероятности ( $1 - 2P_{toler}$ ). В целом, закономерности численного эксперимента, соответствуют закономерностям, полученным при аналитической оценке ПРВО. Наблюдаемые разбросы объясняются тем, что на рисунках показана полная вероятность разрушения, учитывающая разрушение в каждом сечении тройника.

### **Методика коррекции нормативного коэффициента запаса**

Выше было показано, что расчётная вероятность отказа связана с коэффициентом запаса функциональной зависимостью, нормативному коэффициенту запаса может быть поставлена в соответствие значение ПРВО:  $[P] = f(k_l, k_s, f_l, f_s, [n])$  ( $k_l, k_s$  – коэффициенты вариации параметров нагруженности и прочности;  $f_l, f_s$  – законы функций распределения параметров нагруженности и прочности;  $[n]$  – нормативный коэффициент запаса,  $[P]$  – ПРВО). Поскольку эта связь однозначна, её можно обратить:  $[n] = f^{-1}(k_l, k_s, f_l, f_s, [P])$ . Таким образом, наличие этой связи позволяет не только передать разрабатываемым вероятностным методикам расчёта на прочность опыт эксплуатации, заложенный в детерминированных методиках в виде коэффициентов запаса, но и сделать детерминированные методики более гибкими, корректируя нормативный коэффициент запаса для учёта изменившихся (например, в результате изменения технологии) коэффициентов вариации  $k_l, k_s$  или даже вида законов  $f_l, f_s$ . Такая коррекция может быть сделана, например, из условия равенства предельных расчётных вероятностей отказа в новых и старых условиях (предполагая, что это равенство обеспечивает равноопасность конструкций). Поступая таким образом, можно сохранить опыт эксплуатации и нивелировать связь нормативного коэффициента запаса с определёнными условиями эксплуатации.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Выполненный обзор научных публикаций и нормативных документов показал, что результаты расчётов для маловероятных событий (в области значений менее  $10^{-4}$ ) сильно зависят от принимаемых статистических гипотез. При этом существующая ситуация, когда Нормы регламентируют частоту аварий в зависимости от тяжести последствий, но не регламентируют метод расчёта вероятности отказа элемента технической системы, является некорректной.
2. Выполненный анализ чувствительности погрешностей вероятностного расчёта выявил условия, при которых расчётная вероятность отказа имеет лишь относительный смысл, и условия, при которых она имеет частотный смысл.
3. Для ситуаций, в которых вычисляемым вероятностям отказов нельзя придать частотный смысл, предложено понятие предельной расчётной вероятности отказа (ПРВО), зависящей от принимаемых в расчёте гипотез (в том числе и статистических). Величину ПРВО предложено назначать, используя сопоставление результатов вероятностных расчётов и расчётов по детерминированным методикам и соответствующим им коэффициентам запаса. Такой способ обеспечивает создание конструкций по вероятностным методикам не опаснее, чем по апробированным детерминированным Нормам.
4. В рамках оговоренных предположений была получена зависимость вероятности разрушения от коэффициента запаса. Эта зависимость позволяет установить значение ПРВО для конкретных конструкций в связи с методами и гипотезами вероятностного расчёта.
5. Выполненный в качестве методического примера расчёт сварного тройника паропровода показал, что результаты и закономерности, полученные в численном эксперименте по назначению ПРВО для тройника, находятся в полном соответствии с аналитическими закономерностями.
6. На основе анализа связи между коэффициентом запаса прочности и расчетной вероятностью разрушения, имеющей частотный смысл, показано, что требуемый уровень безопасности может быть обеспечен только при определенных сочетаниях коэффициента запаса и вариаций нагрузок и прочности.

**Публикации по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. Гаденин, М.М. Анализ рисков отказов при функционировании потенциально опасных объектов /М.М. Гаденин, Н.А. Махутов, А.О. Чернявский, М.М. Шатов// Проблемы анализа риска, 2012. – Т.9, №3. – С.8–21.
2. Шатов, М.М. Методика назначения предельной вероятности отказа / М.М. Шатов, А.О. Чернявский // Проблемы машиностроения и надёжности машин, 2013. – №1. – С. 51–55.
3. Шатов, М.М. Оценка величины предельной расчётной вероятности отказа, основанная на опыте эксплуатации классов конструкций // Проблемы машиностроения и надёжности машин, 2013. – №3. – С.73–77.

**Материалы конференций:**

4. Чернявский, А.О. Особенности расчёта вероятности разрушения сосудов и трубопроводов / А.О. Чернявский, М.М. Шатов // Безопасность критических инфраструктур и территорий: тез. IV всеросс. науч.-техн. конф. – Екатеринбург, 2011. – С. 235–237.
5. Чернявский, А.О. О связи между вероятностью разрушения и коэффициентами запаса прочности / А.О. Чернявский, М.М. Шатов // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений: тез. IV междунар. симп. APCSCSE. – Челябинск, 2012. – С. 160–162.
6. Шатов, М.М. Методика коррекции нормативного коэффициента запаса с учётом ограничений на риск // Технические науки – от теории к практике: тез.докл. XVII междунар. науч.-практ. конф.– Новосибирск, 2013. – Ч. 2. – С. 126–132.
7. Шатов, М.М. Численная оценка соотношения между коэффициентом запаса и расчётной вероятностью разрушения // Шаг в будущее: теоретические и прикладные исследования современной науки: тез.докл. II междунар. науч.-практ. конф. – СПб., 2013. – С. 48–59.
8. Шатов, М.М. Аналитическая оценка предельной расчётной вероятности отказа // Приоритеты мировой науки: эксперимент и научная дискуссия: тез.докл. I междунар. науч. конф. –Спб., 2013. –С. 61–69.