

УДК 539.4

Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-1-166-176

Для цитирования: К вопросу установления коэффициентов безопасности и запасов прочности при заданной вероятности неразрушения силовых конструкций / Ю. П. Похабов, Д. О. Шендалёв, А. Ю. Колобов и др. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 1. С. 166–176. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-1-166-176.

For citation: Pokhabov Yu. P., Shendalev D. O., Kolobov A. Y., Nagovitsyn V. N., Ivanov E. A. To the question of establishing safety coefficient and assurance coefficient at a given probability of non-destruction of load-bearing structures // Siberian Aerospace Journal. 2021, Vol. 22, No. 1, P. 166–176. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-1-166-176.

К вопросу установления коэффициентов безопасности и запасов прочности при заданной вероятности неразрушения силовых конструкций

Ю. П. Похабов^{1*}, Д. О. Шендалёв², А. Ю. Колобов³,
В. Н. Наговицин², Е. А. Иванов²

¹АО «НПО ПМ МКБ»

Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 55а

²АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»

Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

³АО «Научно-производственное объединение имени С. А. Лавочкина»

Российская Федерация, 141400, г. Химки, Московская область, ул. Ленинградская, 24

*E-mail: pokhabov_yury@mail.ru

Обеспечение высокой надежности уникальных высокоответственных изделий является актуальной задачей, стоящей перед аэрокосмической отраслью. Для достижения высоких показателей надежности на этапе проектирования, необходимо обеспечить базовое свойство изделия – его прочность – с высокой вероятностью неразрушения. Высокая вероятность неразрушения обеспечивается, в том числе введением в расчеты на прочность коэффициентов – безопасности, а также нормируемых значений запаса прочности. Необходимость в этих коэффициентах обусловлена разбросом значений внешних нагружающих факторов: величин сил, комбинаций сил и их сочетаний, характером действий, местом приложения и тому подобными условиями. Требуемая величина коэффициента безопасности определяется заданной вероятностью превышения запаса прочности установленной величины. Целью данной работы является определение математической зависимости между внешними факторами разброса и коэффициентом безопасности, внутренними факторами разброса и запасом прочности, совокупностью этих факторов и вероятностью неразрушения конструкций. В рамках данной работы, значения внутренних и внешних факторов, которые влияют на прочность и вероятность неразрушения изделия и имеют границы разброса своих величин, при помощи инструментов теории вероятностей, были характеризованы как случайные величины, значения которых определяются плотностью распределения, математическим ожиданием и дисперсией. В ходе работы была обнаружена высокая степень зависимости прочности изделия от разброса его геометрических характеристик и определены инструменты для определения совокупного разброса значений основных прочностных характеристик изделия с заданной вероятностью неразрушения. Практическая значимость итогов данной работы может быть достигнута в аэрокосмической отрасли, в частности, на этапе проектирования уникальных высокоответственных изделий.

Ключевые слова: коэффициент безопасности, запас прочности, теория вероятностей, обеспечение прочности, коэффициент вариации, нагрузка, сопротивление.

To the question of establishing safety coefficient and assurance coefficient at a given probability of non-destruction of load-bearing structures

Yu. P. Pokhabov^{1*}, D. O. Shendalev², A. Y. Kolobov³,
V. N. Nagovitsyn², E. A. Ivanov²

¹JSC “NPO PM SDB”

55a, Lenin St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

²JSC Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”

52, Lenin St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

³Lavochkin Research and Production Association

24, Leningradskaya St., Khimki, Moscow oblast, 141400, Russian Federation

*E-mail: pokhabov_yury@mail.ru

Ensuring high reliability of unique high-critical products at the design stage is an actual task that the aerospace industry faces. For high reliability indicators, at the design stage, it is necessary to ensure the basic property of the product – its strength, with a high probability of non-destruction. It is provided by introducing the corresponding coefficients – «safety coefficient» and «margin of safety» into the strength calculations. The necessity in these coefficients is based on the spread of values of external loading factors: magnitude of forces, combination of forces, kind of actions, place of connection, etc. In this case, the safety coefficient is related to external factors. The margin of safety refers to internal factors: the spread of the mechanical characteristics of the product material, the spread of the geometric dimensions of the product, etc. To determine, with a given probability, the safety coefficient and margin of safety, it is necessary to know their dependence on the combination of spread of external and internal factors. The purpose of this work is to determine the mathematical connection between the internal factors of the spread and the safety coefficient, external factors of the spread and the margin of safety, the combination of these factors and the probability of non-destruction of structures. In this work the values of internal and external factors, which affect the strength and probability of non-destruction of the product and have the boundaries of the spread of their values, using the tools of probability theories, were characterized as random variables, the values of which are determined by the distribution density, expected value and variance. In this work there was found a high dependence of the product strength on the spread of its geometric characteristics and tools were defined to determine the total spread of the values of the main strength characteristics of the product with a given probability of non-destruction. The practical significance of the results of this work can be achieved in the aerospace industry, in particular, at the design stage of unique high-critical products.

Keywords: safety coefficient, assurance coefficient, theory of probability, strength assurance, coefficient of variation, load, resistance.

Введение. Коэффициент безопасности, согласно ГОСТ Р 56514–2015, учитывает неточность теоретического и экспериментального определения нагрузок и несущей способности, а также случайный разброс этих нагрузок, а запас прочности – избыток природной прочности материала по сравнению с необходимой для его работы в данных условиях [1]. Таким образом, говоря о коэффициентах безопасности, имеют в виду внешние нагрузки, а запасы прочности принято главным образом использовать для выбора механических характеристик конструкционных материалов.

В детерминированной постановке задач прочности коэффициент безопасности f используют для определения расчетной нагрузки N^p

$$N^p = f \cdot N,$$

где N – эксплуатационная (действующая) нагрузка.

Под N понимают значение нагрузки и режим нагружения (зависимость нагрузок от времени), реализуемые в рассматриваемом случае нагружения в процессе эксплуатации.

Запас прочности элемента конструкции определяют по формуле

$$\eta = \frac{N_{\text{пред}}}{N^P}, \quad \text{или} \quad \eta = \frac{\sigma_{\text{пред}}}{\sigma^P},$$

где $N_{\text{пред}}$ – величина предельной нагрузки; $\sigma_{\text{пред}}$ – предельное напряжение; σ^P – эквивалентное расчетное напряжение.

Если рассматривать прочность в категории внутренних усилий конструкции, то для простейших сочетаний типов конструктивных элементов и нагрузок, несущая способность R , в виде неразрушающих внутренних нагрузок, равна

$$R = \frac{\sigma(N)}{\lambda} \geq N_{\text{пред}} = \eta \cdot f \cdot N, \quad (1)$$

где $\sigma(N)$ – максимально допустимые локальные напряжения, возникшие от нагрузки N , Па; λ – коэффициент, зависящий от размеров поперечного сечения конструктивных элементов.

Значение $\sigma(N)$ зависит от действующих нагрузок, например, при сложном напряжённом состоянии (одновременно ненулевые нормальные и касательные напряжения) используют один из четырёх критериев предельного напряжённо-деформированного состояния (механической теории прочности) [2]. В свою очередь λ зависит от размеров поперечного сечения конструктивных элементов [3]. Например, для растягиваемого стержня

$$\lambda = \frac{1}{F},$$

для изгибаемого стержня

$$\lambda = \frac{\alpha \cdot l}{W_Z},$$

для скручиваемого стержня

$$\lambda = \frac{1}{W_K},$$

где F – площадь поперечного сечения; α – коэффициент, зависящий от условий закрепления балки и нагрузки; l – длина стержня; W_Z – момент сопротивления сечения стержня при изгибе; W_K – момент сопротивления сечения стержня при кручении.

При нормальном распределении R и N (знак функциональной зависимости от времени здесь и далее опущен), без учета корреляционной зависимости, вероятность неразрушения элементов конструкции, т. е. вероятность того, что несущая способность R будет больше действующей нагрузки N , определяется как

$$P = \text{Вер} \{R > N\} = \Phi(z) = \Phi \left(\frac{m_R - m_N}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_N^2}} \right), \quad (2)$$

где $\Phi(z)$ – функция нормального распределения (функция Лапласа); m_R , m_N – математические ожидания R и N ; σ_R , σ_N – среднеквадратические отклонения R и N .

При нормальных законах распределения случайных величин нагрузки и сопротивления модель отказов по схеме «нагрузка – сопротивление» имеет следующий вид (рис. 1).

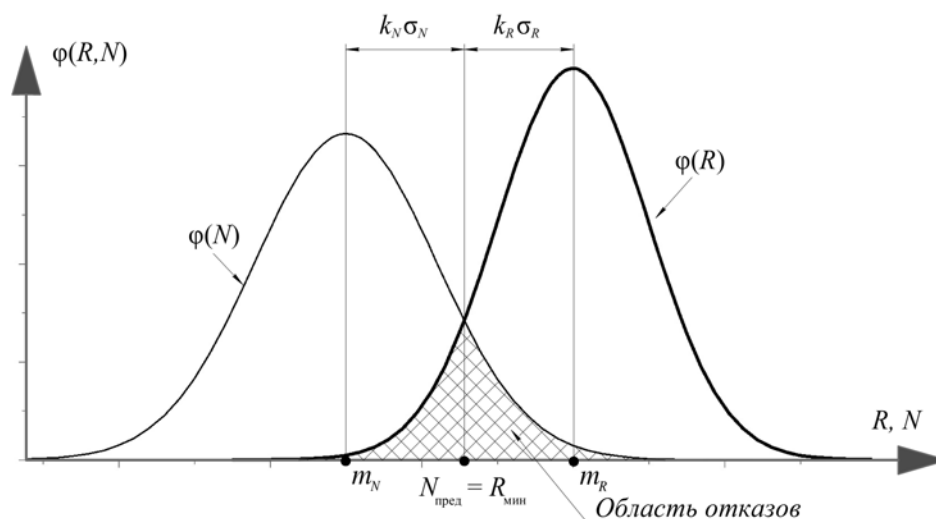


Рис. 1. Модель отказов по схеме «нагрузка – сопротивление» при нормальном законе случайных величин

Fig. 1. Model of failure on the scheme “load – resistance” by the law of normal distribution random variable

Как следует из рис. 1, максимальная вероятность неразрушения элементов конструкции достигается разделением средних значений m_R до m_N , а также снижением σ_R и/или σ_N . При этом минимальная несущая способность и предельная нагрузка всегда лежат в диапазоне от m_R до m_N и при условии $z > 0$ определяются выражениями

$$R_{\min} = m_R - k_R \cdot \sigma_R, \quad (3)$$

$$N_{\text{пред}} = m_N + k_N \cdot \sigma_N, \quad (4)$$

где k_R , k_N – числовые коэффициенты, характеризующие вероятность отклонения случайной величины от математического ожидания, которые для высоконадежных систем устанавливаются от 3 до 6 (исходя из правил трех сигм или шести сигм) [4].

Случай, когда

$$R_{\min} = N_{\text{пред}}, \quad (5)$$

при любом способе повышения надежности определяет минимальную область отказов (см. рис. 1).

С учетом выражений (1)–(5) получаем

$$n = \frac{R_{\min}}{N_{\text{пред}}}, \quad (6)$$

где n – обобщенный коэффициент безотказности и запаса прочности, одновременно учитывающий действующие нагрузки и характеристики конструкционного материала, который равен

$$n = \eta \cdot f.$$

Математические ожидания в выражении (2), при условии выражения (5) (в точке пересечения кривых плотностей распределения согласно рис. 1) с учетом (1), (3)–(6) можно определить зависимостями

$$m_R = \frac{R_{\min}}{1 - k_R \cdot v_R} = \frac{n \cdot N_{\text{пред}}}{1 - k_R \cdot v_R}, \quad (7)$$

$$m_N = \frac{N_{\text{пред}}}{1 + k_N \cdot v_N}, \quad (8)$$

где v_R, v_N – коэффициенты вариации несущей способности (прочности) и нагрузок.

Значения v_R, v_N определяются по формулам

$$v_R = \frac{\sigma_R}{m_R},$$

$$v_N = \frac{\sigma_N}{m_N}.$$

Среднеквадратические отклонения в выражении (2) с учетом (7)–(8) можно представить как

$$\sigma_R = v_R \cdot m_R = \frac{n \cdot v_R \cdot N_{\text{пред}}}{1 - k_R \cdot v_R}, \quad (9)$$

$$v_N = v_N \cdot m_N = \frac{v_N \cdot N_{\text{пред}}}{1 + k_N \cdot v_N}. \quad (10)$$

С учетом (7)–(10) выражение (2) для наиболее нагруженного элемента конструкции принимает вид

$$P = \Phi \left(\frac{\frac{n}{1 - k_R \cdot v_R} - \frac{1}{1 + k_N \cdot v_N}}{\sqrt{\left(\frac{n \cdot v_R}{1 - k_R \cdot v_R} \right)^2 + \left(\frac{v_N}{1 + k_N \cdot v_N} \right)^2}} \right). \quad (11)$$

С учетом правила трех сигм формулу (11) можно записать в виде [5; 6]

$$P = \Phi \left(\frac{\frac{n}{1 - 3 \cdot v_R} - \frac{1}{1 + 3 \cdot v_N}}{\sqrt{\left(\frac{n \cdot v_R}{1 - 3 \cdot v_R} \right)^2 + \left(\frac{v_N}{1 + 3 \cdot v_N} \right)^2}} \right). \quad (12)$$

Допустим, что $v_R = v_N = 10\%$ [5]. Тогда при обобщенном запасе прочности $n = 1,5$ (например, при $f = 1,5$ и $\eta = 1,0$) значение нормированной случайной величины составляет $z = 6,03$, что соответствует вероятности неразрушения конструкции более 0,999999999 [7].

Использование формул (11)–(12) дает возможность с помощью коэффициентов безопасности и запасов прочности управлять прочностной надежностью конструкции на этапе проектирования.

Коэффициенты безопасности f , как правило, отражают отраслевую специфику подходов и методов обработки статистической информации о нагрузках, отраженных в частных нормах прочности с учетом полноты и точности информации о величинах и повторяемости эксплуатационных нагрузок, а также объема экспериментальной обработки, точности воспроизведения режимов нагружения при испытаниях. В частности, для силовых конструкций автоматических космических аппаратов могут быть использованы рекомендуемые коэффициенты безопасности по ГОСТ Р 56514–2015, которые, как правило, принимают равными от 1,3 до 1,5, но в отдельных случаях, могут достигать значений 2,0–2,6.

Запасы прочности η принято назначать исходя из значений коэффициентов вариации для сталей $\nu_R = 5-9\%$ и для алюминиевых сплавов $\nu_R = 4-6\%$ [8; 9], что соответствует приемлемости вычислений по формуле (12). Однако такой подход учитывает только природную прочность материала, без учета вариации геометрических характеристик конструкции, влияющих на величину сопротивления конструкции внешним нагрузкам [2]. В то же время известно, что значения коэффициентов запаса прочности неразрывно связаны с закладываемыми в расчеты допущениями и потому требуют точной формулировки используемых методов расчета, требований к точности исходных данных и т. п. [10].

Пример. Рассмотрим влияние разбросов геометрических размеров поперечного сечения конструктивного элемента на запас прочности на примере антенны, консольно закрепленной на борту КА, показанной на рис. 2, на которую действуют поперечные перегрузки n_x активного участка полета. Тело антенны выполнено из изотропного материала с пределом прочности $[\sigma] = 140 \cdot 10^6$ Па. Антенна имеет постоянное сечение в виде круглой трубы $D = (65,5 \pm 0,3) \cdot 10^{-3}$ м и $d = (64,1 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}$ м. Масса антенны m равномерно распределена по длине L .

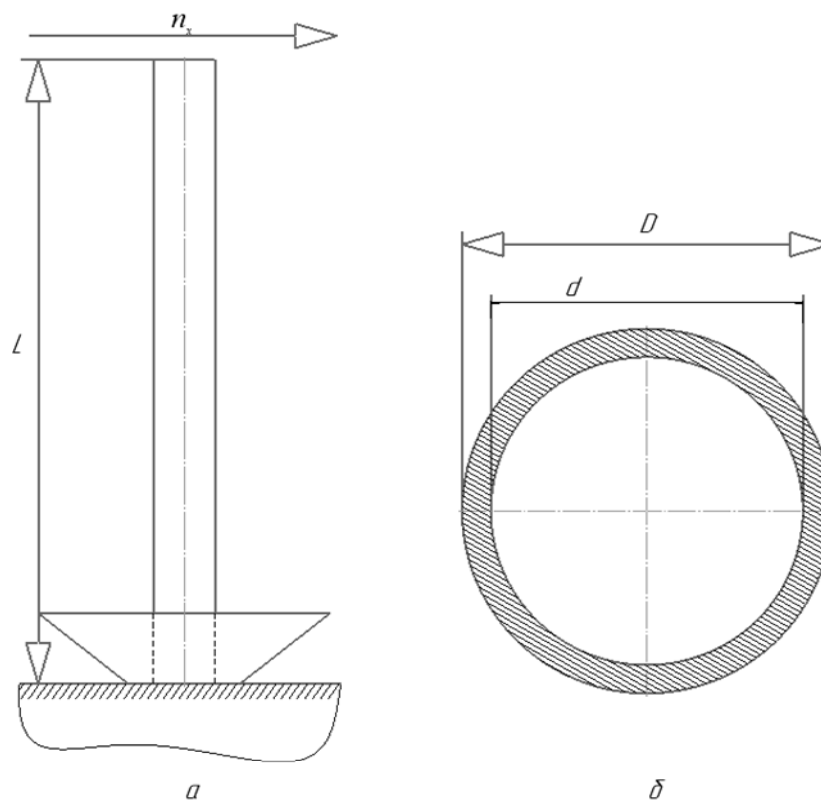


Рис. 2. Схема закрепления (а) и сечение антенны (б)

Fig. 2. Schematics attachment (a) and cross-section of antenna (b)

Внешняя распределенная нагрузка на антенну q_N равна

$$q_N = f \cdot n_x \cdot \frac{m \cdot g}{L}, \quad (13)$$

где g – ускорение свободного падения.

Изгибающие моменты в антенне равны

$$M_N = \frac{q_N \cdot L^2}{2}, \quad (14)$$

Из формул (13)–(14) видно, что изгибающие моменты, действующие на антенну, определяются некими внешними факторами условий эксплуатации, которые выражены через n_x и в некоторой степени характеризуются свойствами реальной конструкции (в рассматриваемом случае – это масса m и длина консоли L), которые определяют (влияют на) величину внешних нагрузок. Случайный разброс параметров внешних нагрузок, связанный с расхождениями их теоретического и экспериментального определения, учитывается коэффициентом безопасности f . Накопленный в ракетно-космической отрасли опыт [11; 12] позволяет предположить, что при существующих комбинациях условий эксплуатации и принятых конструктивно-силовых схем КА, максимальные значения коэффициентов вариации нагрузки не превысят $v_N = 0,1$ [5], и, соответственно, к выбору значений коэффициентов безопасности могут быть приемлемы рекомендации ГОСТ Р 56514–2015.

Теперь рассмотрим внутренние изгибающие моменты M_R в сечениях штаги, которые сопротивляются действию внешней нагрузки M_N (14):

$$M_R = \frac{\pi \cdot \sigma \cdot (D^4 - d^4)}{32 \cdot D},$$

где σ – нормальное действующее напряжение.

При условии сохранения прочности с учетом (1) имеем

$$M_R \geq \frac{\pi \cdot [\sigma] \cdot (D^4 - d^4)}{32 \cdot D}.$$

С учетом нормального закона распределения случайной величины (2) суммарное среднеквадратические значения сопротивления внешним нагрузкам σ_R определяются как [13]

$$\sigma_R = \sqrt{\left(\frac{\partial M_R}{\partial D}\right)^2 \cdot (v_D \cdot D)^2 + \left(\frac{\partial M_R}{\partial d}\right)^2 \cdot (v_d \cdot d)^2 + \left(\frac{\partial M_R}{\partial [\sigma]}\right)^2 \cdot (v_{[\sigma]} \cdot [\sigma])^2}, \quad (15)$$

где v_D – коэффициент вариаций внешнего диаметра; v_d – коэффициент вариаций внутреннего диаметра; $v_{[\sigma]}$ – коэффициент вариаций допустимого напряжения материала. Или, для наглядности, в виде

$$\sigma_R = \sqrt{\sigma_{R(1)}^2 + \sigma_{R(2)}^2 + \sigma_{R(3)}^2}. \quad (16)$$

Исходя из (15), (16) коэффициент вариаций несущей способности v_R является функцией, зависимой от v_D , v_d , $v_{[\sigma]}$. Зададим для упрощения коэффициент вариации материала, исходя из общепринятой практики расчетов, $v_{[\sigma]} = 10\%$ [5]. Тогда коэффициент вариаций v_D для внешнего диаметра D можно вычислить по формуле

$$v_D = \frac{\sigma_D}{m_D},$$

где m_D – математическое ожидание размера D (в нашем случае $m_D = 0,0655$ м); σ_D – среднеквадратическое отклонение D .

Значение σ_D можно определить по формуле

$$\sigma_D = \sqrt{\frac{1}{j-1} \cdot \sum_{i=1}^j (m_D - x_i)^2},$$

где x_i – все значения параметров измерений в заданном диапазоне; j – количество измерений.

В связи с тем, что существуют жесткие ограничения по предельным размерам, то можно принять $j = \infty$. Таким образом, формула для вычисления итогового значения коэффициент вариаций v_D будет иметь вид

$$v_D = \lim_{j \rightarrow \infty} \left(\frac{\sqrt{\frac{1}{j-1} \cdot \sum_{i=1}^j (m_D - x_i)^2}}{m_L} \right). \quad (17)$$

С учетом (17) для размеров D и d были получены следующие значения: $v_D = 0,26 \%$ и $v_d = 0,36 \%$.

Таким образом, с учетом (15), (16) получаем:

$$\begin{aligned} \sigma_{R(1)} &= \left(\frac{\pi \cdot [\sigma] \cdot D^2}{8} - \frac{1}{32} \cdot \frac{\pi \cdot [\sigma] \cdot (D^4 - d^4)}{D^2} \right) \cdot (v_D \cdot D), \\ \sigma_{R(2)} &= \left(\frac{[\sigma] \cdot \pi \cdot d^4 \cdot v_d}{8 \cdot D} \right), \\ \sigma_{R(3)} &= \left(\frac{\pi \cdot [\sigma] \cdot v_{[\sigma]} \cdot (D^4 - d^4)}{32 \cdot D} \right). \end{aligned}$$

Для иллюстрации вклада каждого слагаемого на среднеквадратичное отклонение σ_R посчитаем последовательно

$$\begin{aligned} \sigma_{R(1)} &= \left(\frac{\pi \cdot 140 \cdot 10^6 \cdot 0,0655^2}{8} - \frac{1}{32} \cdot \frac{\pi \cdot 140 \cdot 10^6 \cdot (0,0655^4 - 0,0641^4)}{0,0655^2} \right) \times \\ &\quad \times (0,0026 \cdot 0,0655) = 39,34 \text{ Н}\cdot\text{м}, \\ \sigma_{R(2)} &= \left(\frac{(140 \cdot 10^6) \cdot \pi \cdot 0,0641^4 \cdot 0,0036}{8 \cdot 0,0655} \right) = 51,01 \text{ Н}\cdot\text{м}, \\ \sigma_{R(3)} &= \left(\frac{\pi \cdot (140 \cdot 10^6) \cdot 0,1 \cdot (0,0655^4 - 0,0641^4)}{32 \cdot 0,0655} \right) = 31,98 \text{ Н}\cdot\text{м}. \end{aligned}$$

Таким образом,

$$\sigma_R = \sqrt{\sigma_{R(1)}^2 + \sigma_{R(2)}^2 + \sigma_{R(3)}^2} = 71,92 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Представленные расчеты показывают, что влияние прочности материала оказывает гораздо меньшее воздействие, чем разброс геометрических характеристик, а суммарный коэффициент вариаций несущей способности будет равен

$$v_R = \frac{\sigma_R}{m_R} = \frac{\sigma_R}{\frac{\pi \cdot [\sigma] \cdot (D^4 - d^4)}{32 \cdot D}} = \frac{71,92}{\frac{\pi \cdot 140 \cdot 10^6 \cdot (0,0655^4 - 0,0641^4)}{32 \cdot 0,0655}} = \frac{71,92}{319,78} = 0,225.$$

Таким образом, учет вариаций геометрических размеров сечения способен увеличить разброс несущей способности конструкции до 2,25 раз. Это приводит к тому, что при $\upsilon_N = 10\%$ и $\upsilon_R = 22,5\%$ не существует приемлемых комбинаций коэффициентов безопасности и запасов прочности, которые бы обеспечили неразрушение критичных элементов с вероятностью $P = 0,999999999$. Согласно формуле (12), в данном случае при обобщенном запасе прочности $n = 1,5$ может быть достигнута вероятность неразрушения $P = \Phi(3,69) = 0,99989$. Для повышения надежности в данном случае необходимо исключить разброс размеров геометрических сечений, что возможно при расчетах на прочность в запас с учетом минимаксного подхода [14; 15], когда расчет момента сопротивления сечения производится при минимально возможном внешнем диаметре D и максимально возможном внутреннем диаметре d антенны.

Заключение

1. Назначение коэффициентов безопасности и запасов прочности при расчетах на прочность элементов конструкций следует производить, исходя из требуемых показателей надежности изделий.
2. Существует возможность определить математическую зависимость между коэффициентами безопасности, запасами прочности и вероятностью неразрушения элементов конструкции.
3. Коэффициент безопасности определяет величину внешних нагрузок, а запас прочности – внутренних усилий (напряжений).
4. При назначении коэффициентов безопасности и запасов прочности следует учитывать не только вариации нагрузки и физических свойств материалов, но и вариации размеров геометрических сечений, в первую очередь, при расчетах внутренних усилий (напряжений).
5. При использовании тонкостенных конструкций с нерегламентированными полями допусков на размеры сечений расчеты на прочность следует производить, исходя из минимально возможного момента сопротивления сечения, с учетом вариации определяющих его размеров.

Библиографические ссылки

1. Словарь основных терминов, необходимых при проектировании, строительстве и эксплуатации автомобильных дорог / под ред. проф. Иванова Н. Н. ; Моск. автомоб.-дор. ин-т. М. : Высш. школа, 1967. 99 с.
2. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов. Киев : Наук. думка, 1988. 736 с.
3. Арасланов А. М. Расчёт элементов конструкций заданной надёжности при случайных воздействиях. М. : Машиностроение, 1987. 128 с.
4. Dhillon B. S., Singh C. Engineering reliability. NJ.: John Wiley & Sons, 1981. 339 p.
5. Алёшин В. Ф., Колобов А. Ю., Петров Ю. А. Проблемные вопросы прогнозирования и подтверждения надёжности космических аппаратов длительного функционирования // Наука и Образование. 2015. № 6. С. 31–41.
6. Особенности транспортировки капсулы с грунтом с помощью надувной оболочки в грунтозаборном устройстве КА «Фобос-Грунт» / Петров Ю. А., Колобов А. Ю., Кононенко А. С. и др. // Наука и Образование. 2016. № 5. С. 14–28.
7. Шор Я. Б., Кузьмин Ф. И. Таблицы для анализа и контроля надёжности. М. : Сов. радио, 1968. 268 с.
8. Бирюков Г. П., Кукушкин Ю. Ф., Торпачёв А. В. Основы обеспечения надёжности и безопасности стартовых комплексов. М. : Изд-во МАИ, 2002. 264 с.

9. Волков Л. И., Шишкевич А. М. Надежность летательных аппаратов. М. : Высш. школа, 1975. 296 с.
10. Чернявский А. О., Шадчин А. В. Оценка достоверности расчета малой вероятности разрушения для единичных конструкций // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. № 4. С. 118–123.
11. Корчагин Е. Н., Колобов А. Ю., Мурин А. В. Обеспечение надежности // Многофункциональная космическая платформа Навигатор. Химки, НПО Л, 2017. С 43–53.
12. Колобов А. Ю., Дикун Е. В. Интервальные оценки безотказности единичных космических аппаратов // Надежность. 2017. Т. 17. № 4. С. 23–26.
13. Солнечные батареи автоматических космических аппаратов / К. В. Безручко, В. Ф. Гайдуков, С. В. Губин и др. Харьков : ХАИ, 2001. 276 с.
14. Чеботарёв В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения / СибГАУ. Красноярск, 2011. 488 с.
15. Похабов Ю. П. Что понимать под расчетом надежности уникальных высокоответственных систем применительно к механизмам одноразового срабатывания космических аппаратов // Надежность. 2018. Т. 18. № 4. С. 28–35.

References

1. Ivanov N. N. *Slovar' osnovnykh terminov, neobkhodimyykh pri proektirovanii, stroitel'stve i ekspluatatsii avtomobil'nykh dorog* [Dictionary of basic terms necessary for the design, construction and operation of highways]. Moscow, Vyssh. shkola Publ., 1967, 99 p.
2. Pisarenko G. S., Yakovlev A. P., Matveev V. V. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov* [Handbook on strength of materials]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1988, 736 p.
3. Araslanov A. M. *Raschet elementov konstruktsiy zadannoy nadezhnosti pri sluchaynykh vozdeystviyakh* [Calculation of structural elements of a given reliability under random impacts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987, 128 p.
4. Dhillon B. S., Singh C. Engineering reliability. NJ. : John Wiley & Sons, 1981. 339 p.
5. Aleshin V. F., Kolobov A. Yu., Petrov Yu. A. [Problematic issues of forecasting and confirming the reliability of long-term spacecraft]. *Nauka i Obrazovanie*. 2015, No. 6. P. 31–41. (In Russ.)
6. Petrov Yu. A., Kolobov A. Yu., Kononenko A. S. [Features of transportation of the capsule with soil using an inflatable shell in the soil intake device "Phobos-Grunt"]. *Nauka i Obrazovanie*. 2016, No. 5. P. 14–28. (In Russ.)
7. Ya. B. Shor, F. I. Kuz'min. *Tablitsy dlya analiza i kontrolya nadezhnosti* [Tables for reliability analysis and control]. Moscow, Sov. radio, Publ., 1968, 268 p.
8. Biryukov G. P., Kukushkin Yu. F., Torpachev A. V. *Osnovy obespecheniya nadezhnosti i bezopasnosti startovykh kompleksov* [Basics of ensuring the reliability and safety of launch complexes]. Moscow, MAI Publ., 2002, 264 p.
9. Volkov L. I., Shishkevich A. M. *Nadezhnost' letatel'nykh apparatov* [Reliability of aircraft]. Moscow, Vyssh. shkola Publ., 1975, 296 p.
10. Chernyavskiy A. O., Shadchin A. V. [Estimation of the reliability of calculating the low probability of failure for individual structures]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*. 2010. No. 4. P. 118–123. (In Russ.)
11. Korchagin E. N., Kolobov A. Yu., Murin A. V. [Ensuring reliability]. *Mnogofunktsional'naya kosmicheskaya platforma Navigator*. 2017, P. 43–53. (In Russ.)
12. Kolobov A. Yu., Dikun E. V. [Interval estimates of the reliability of individual spacecraft], *Nadezhnost'*, 2017, Vol. 17, No. 4. P. 23–26. (In Russ.)

13. Bezruchko K. V., Gaydukov V. F., Gubin S. V. *Solnechnye batarei avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov* [Solar panels of automatic spacecraft]. Kharkov, KhAI Publ., 2001, 276 p.
14. Chebotarev V. E., Kosenko V. E. *Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya* [Basics of designing information support spacecraft]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2011, 488 p.
15. Pokhabov Yu. P. [What is meant by calculating the reliability of unique highly responsible systems in relation to the mechanisms of one-time operation of spacecraft]. *Nadezhnost'*, 2018, Vol. 18, No. 4. P. 28–35. (In Russ.)

© Похабов Ю. П., Шендалёв Д. О., Колобов А. Ю.,
Наговицин В. Н., Иванов Е. А., 2021

Похабов Юрий Павлович – кандидат технических наук, главный специалист; АО «НПО ПМ МКБ». E-mail: pokhabov_yury@mail.ru.

Шендалёв Денис Олегович – кандидат технических наук, заместитель начальника отдела; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: shendalev_d@iss-reshetnev.ru.

Колобов Анатолий Юрьевич – кандидат технических наук, главный специалист; АО «НПО Лавочкина». E-mail: kolobov@laspace.ru.

Наговицин Василий Николаевич – кандидат технических наук, главный специалист; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: nvn@iss-reshetnev.ru.

Иванов Ефим Анатольевич – аспирант СибГУ им. М. Ф. Решетнева, инженер второй категории; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: LLlAX-95@mail.ru.

Pokhabov Yuriy Pavlovich – Cand. Sc., Ch. Specialist; JSC “NPO PM SDB”. E-mail: pokhabov_yury@mail.ru.

Shendalev Denis Olegovich – Cand. Sc., Deputy Head of Department; JSC Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: shendalev_d@iss-reshetnev.ru.

Kolobov Anatoliy Yur’evich – Cand. Sc., Ch. Specialist; Lavochkin Research and Production Association. E-mail: kolobov@laspace.ru.

Nagovitsin Vasilii Nikolaevich – Cand. Sc., Ch. Specialist; JSC Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: nvn@iss-reshetnev.ru.

Ivanov Efim Anatol’evich – graduate student of Reshetnev University, an engineer of the second category; JSC Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: LLlAX-95@mail.ru.
