



**ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ/DESIGN,
CONSTRUCTION AND PRODUCTION OF AIRCRAFT**

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.76> EDN: DIWXCF**ОПТИМИЗАЦИЯ ОБЪЁМОВ ИСПЫТАНИЙ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ КОМПЛЕКСНОЙ ОТРАБОТКИ
ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

Научная статья

Пронкин А.А.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0001-9907-260X;¹ Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (pronkinalex[at]mail.ru)

Аннотация

В статье рассматриваются задачи оптимизации объёмов испытаний на различных этапах комплексной отработки изделий ракетно-космической техники. Цель исследования заключается в определении рационального распределения испытаний между этапами с учётом требований к надёжности и ограничений по ресурсам. На основе дисциплинирующего условия надёжности сформирована математическая постановка задачи оптимизации, включающая использование функции Лагранжа и вывод системы уравнений, позволяющей определить оптимальные значения вероятностей отказов и соответствующие им объёмы испытаний. Представлены аналитические зависимости для расчёта числа испытаний на каждом этапе, учитывающие удельные затраты и аппроксимирующие коэффициенты, полученные на стадии комплексной отработки. Разработан алгоритм проведения расчётов, обеспечивающий поэтапный выбор объёмов испытаний с последующим нормированием требуемого уровня надёжности. Рассмотрена приближённая оценка момента завершения испытаний для равнонадёжных систем, позволяющая определить средний объём испытаний с учётом перехода в область подтверждения надёжности нескольких контролируемых параметров. Полученные результаты обеспечивают возможность формирования экономически обоснованных программ экспериментальной отработки и служат основой для дальнейшего совершенствования методов оптимизации испытаний изделий ракетно-космической техники.

Ключевые слова: ракетно-космическая техника, оптимизация испытаний, комплексная отработка, надёжность, вероятность отказа, экспериментальная отработка, равнонадёжные системы, математическая модель.

**OPTIMISATION OF TEST EXTENT AT VARIOUS STAGES OF COMPLEX TESTING OF ROCKET AND SPACE
EQUIPMENT PRODUCTS**

Research article

Pronkin A.A.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0001-9907-260X;¹ Moscow Aviation Institute, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (pronkinalex[at]mail.ru)

Abstract

The article examines the problem of optimising the extent of testing at various stages of the complex development of rocket and space equipment products. The aim of the study is to determine the optimal distribution of tests across the stages, taking into account reliability requirements and resource constraints. Based on a reliability discipline condition, a mathematical formulation of the optimisation problem is established, involving the use of the Lagrangian function and the derivation of a system of equations that allows the determination of optimal values for failure probabilities and the corresponding test volumes. Analytical relationships are presented for calculating the number of tests at each stage, considering specific costs and approximating coefficients obtained during the complex testing phase. An algorithm for performing calculations has been developed, ensuring a phased selection of test scope followed by normalisation of the required reliability level. An approximate estimate of the test completion time for systems of equal reliability is presented, allowing the average test volume to be determined, taking into account the transition to the reliability confirmation phase for several controlled parameters. The obtained results enable the development of economically viable experimental testing programmes and serve as a basis for the further improvement of methods for optimising the testing of rocket and space equipment products.

Keywords: rocket and space equipment, test optimisation, complex testing, reliability, failure probability, experimental testing, equally reliable systems, mathematical model.

Введение

Оптимизация объёмов испытаний является важной задачей комплексной отработки изделий ракетно-космической техники, поскольку рост числа испытаний сопровождается увеличением подтверждаемой надёжности и одновременным ростом затрат. В предыдущей работе [1] была предложена аналитическая модель прогнозирования надёжности на этапе комплексной отработки, основанная на аппроксимационной зависимости вероятности отказа от числа испытаний. Данная модель позволяет количественно описывать изменение надёжности изделия, однако не решает задачу распределения испытаний между этапами комплексной отработки.

Цель настоящего исследования заключается в разработке математического аппарата оптимизации объёмов испытаний на различных этапах комплексной обработки изделий ракетно-космической техники. Актуальность работы обусловлена необходимостью обоснованного выбора числа испытаний при ограниченных ресурсах и заданных требованиях по надёжности, а также отсутствием аналитических методов, позволяющих формально учитывать распределение испытаний по этапам экспериментальной программы.

Научная новизна работы заключается в формировании оптимизационной постановки задачи распределения объёмов испытаний на основе аналитической модели надёжности. В работе введено дисциплинирующее условие надёжности и получены аналитические зависимости, позволяющие определить оптимальные вероятности отказов и соответствующие им объёмы испытаний на каждом этапе комплексной обработки. Разработан алгоритм расчётов, обеспечивающий практическую реализацию предложенного подхода при планировании испытаний.

Определение оптимального объёма испытаний на этапах комплексной обработки

Планирование комплексных испытаний заключается в определении объёма испытаний на каждом из этапов экспериментальной обработки [2]. В результате проведения полного цикла испытаний должны быть удовлетворены требования, предъявляемые к надёжности, задающиеся соотношением:

$$H_k = 1 - Q_k, \quad (1)$$

где H_k — уровень надёжности транспортного средства (ТС); Q_k — суммарная вероятность отказа. Суммарная вероятность отказа определяется через следующее выражение:

$$Q_k = \sum_{j=1}^r q_{k,j} = \sum_{j=1}^r \frac{1}{(k_j - \beta_j)^{\delta_j}} e^{-\alpha_j}, \quad (2)$$

где $q_{k,j}$ — вероятность отказа, достигаемая на j -ом этапе комплексной обработки; α_j , β_j , δ_j — параметры аппроксимационной модели; r — число этапов комплексных испытаний.

Функциональная зависимость вероятности отказа от числа испытаний на этапе комплексной обработки задаётся аппроксимационной моделью, полученной ранее по результатам обработки экспериментальных данных [1], [3], [5].

Как видно из соотношения (1) заданные уровни надёжности ТС можно обеспечить при различных сочетаниях вероятностей отказа $q_{k,j}$. Очевидно, что конкретные уровни вероятности отказа $q_{k,j}$, удовлетворяющие дисциплинирующему условию (1), целесообразно назначать из условия минимизации суммарных затрат на проведение экспериментальной обработки:

$$C_k = \sum_{j=1}^r c_j k_j \xi_j, \quad (3)$$

где c_j — удельные затраты на одно испытание на j -м этапе; ξ_j — корректирующий множитель. Корректирующий множитель ξ_j учитывает специфику проведения испытаний на соответствующем этапе, включая дополнительные организационные и технологические факторы, не отражённые непосредственно в аппроксимационной зависимости вероятности отказа.

В рассматриваемой постановке варьируемыми параметрами являются вероятности отказа $q_{k,j}$, а соответствующие им объёмы испытаний k_j определяются из аппроксимационной зависимости.

Для рассматриваемого случая функция Лагранжа имеет вид [5]:

$$L = C_k + \lambda (Q_k - Q_{\text{зад}}). \quad (4)$$

Таким образом, оптимальные значения вероятностей отказа $q_{k,j}$ и соответствующие им объёмы испытаний k_j должны удовлетворять условию:

$$\frac{\partial L}{\partial k_j} = 0. \quad (5)$$

Раскрывая выражение (5) и приравнявая частные производные функции Лагранжа к нулю, получим систему алгебраических уравнений:

$$c_j \xi_j - \lambda e^{-\alpha_j} \frac{\delta_j}{(k_j - \beta_j)^{\delta_j+1}} = 0. \quad (6)$$

Производя преобразование выражения (6), получим соотношение:

$$e^{-\alpha_j} \frac{\delta_j}{(k_j - \beta_j)^{\delta_j+1}} = \delta_j \cdot q_{k,j}^{\frac{\delta_j+1}{\delta_j}} \cdot e^{\frac{\alpha_j}{\delta_j}}. \quad (7)$$

Подставляя полученное соотношение (7) в уравнение (6), получим:

$$c_j \xi_j - \lambda \cdot e^{\frac{\alpha_j}{\delta_j}} \cdot q_{k,j}^{\frac{\delta_j+1}{\delta_j}} \cdot \delta_j = 0. \quad (8)$$

Разрешим уравнение (8) относительно вероятностей отказа [5]:

$$q_{k,j} = \left(\frac{1}{\lambda \delta_j} c_j \xi_j e^{-\frac{\alpha_j}{\delta_j}} \right)^{\frac{\delta_j}{\delta_j+1}}. \quad (9)$$

После подстановки выражения (9) в дисциплинирующее условие (1) получим:

$$Q_{\text{зад}} = \left(\frac{1}{\lambda} \right)^{\frac{\delta_j}{\delta_j+1}} \sum_{j=1}^r \left(\frac{1}{\delta_j} c_j \xi_j e^{-\frac{\alpha_j}{\delta_j}} \right)^{\frac{\delta_j}{\delta_j+1}}. \quad (10)$$

Отсюда окончательное выражение для вероятностей отказа на этапах комплексной обработки принимает вид:

$$q_{k,j} = \left(\frac{1}{\delta_j} c_j \xi_j e^{-\frac{\alpha_j}{\delta_j}} \right)^{\frac{\delta_j}{\delta_j+1}} \cdot \frac{Q_{\text{зад}}}{\sum_{j=1}^r \left(\frac{1}{\delta_j} c_j \xi_j e^{-\frac{\alpha_j}{\delta_j}} \right)^{\frac{\delta_j}{\delta_j+1}}}. \quad (11)$$

Знание $q_{k,j}$ позволяет оценить объёмы испытаний на различных этапах комплексной обработки через выражение:

$$k_j = \left(\frac{e^{-\alpha_j}}{q_{k,j}} \right)^{\frac{1}{\delta_j}} + \beta_j. \quad (12)$$

Полученные зависимости позволяют определить оптимальные вероятности отказов и соответствующие объёмы испытаний при заданных ограничениях по надёжности и ресурсам. Формулы (11) и (12) задают основу для их распределения между этапами. Для практического применения необходим последовательный расчёт, включающий нормирование надёжности и определение корректирующего множителя. Ниже приводится соответствующий алгоритм.

Алгоритм проведения расчётов

Алгоритм определения оптимального объёма испытаний основан на ранее полученных выражениях для распределения вероятностей отказов и расчёта числа испытаний на каждом этапе комплексной обработки [1]. Последовательность вычислительных процедур включает несколько этапов, позволяющих перейти от исходных параметров надёжности к количественной оценке необходимого объёма испытаний.

Рассмотрим каждый этап алгоритма:

1. Задание исходных данных.

На первом этапе определяются коэффициент вариации k_{V_Σ} ; коэффициент запаса $m_{\eta,1}$, $m_{\eta,2}$; доверительная вероятность $\gamma = 0,95$ ($t = 2t_\gamma$; $t_\gamma = 1,65$) и аппроксимирующие коэффициенты α_j , β_j , δ_j , полученные по результатам комплексной обработки [1], [3], [4], [5]. Эти данные используются для дальнейшего построения зависимостей надёжности и определения вероятности отказа на различных этапах комплексных испытаний.

2. Построение аппроксимационной зависимости.

Изменение вероятности отказа в зависимости от числа испытаний на этапе комплексной обработки описывается аппроксимационной зависимостью логарифма вероятности отказа:

$$\ln Q = \delta \ln(k - \beta) + \alpha. \quad (13)$$

На основе экспериментальных данных вычисляются аппроксимирующие коэффициенты α , β , δ . Полученная зависимость позволяет определить вероятность отказа, достигаемую на j -м этапе испытаний:

$$Q_j(k) = \frac{1}{(k_j - \beta_j)^{\delta_j}} e^{-\alpha_j}. \quad (14)$$

На рисунке 1 приведено сопоставление экспериментальных значений логарифма вероятности отказа $Q_j(k)$, рассчитанных по соотношениям (1) – (4), и аппроксимирующей зависимости $f(k)$, построенной по выражению (13). Сплошной линией показаны расчётные значения $Q(k)$, пунктирной — аппроксимирующая функция. Близость кривых подтверждает корректность выбранной аппроксимационной модели и достаточную точность оценки коэффициентов α , β , δ для дальнейших расчётов [1], [3].

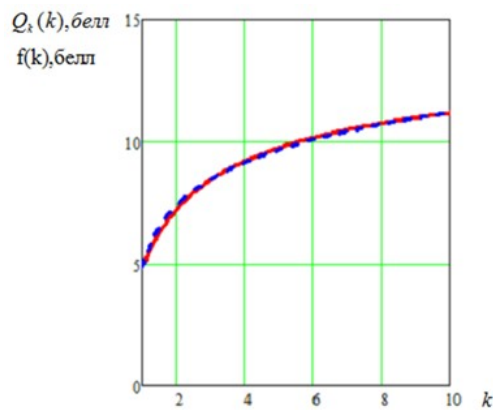


Рисунок 1 - Аппроксимация логарифма вероятности отказа по числу испытаний
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.76.1>

3. Нормирование надежности и оптимизация числа испытаний.

На данном этапе выполняется нормирование требований по надёжности изделия с целью распределения допустимой суммарной вероятности отказа между этапами комплексной обработки. В качестве исходного требования задаётся значение надёжности изделия $H_{зад}$, которому соответствует допустимое значение суммарной вероятности отказа $Q_{зад} = 1 - H_{зад}$.

Распределение вероятностей отказа по этапам осуществляется на основе аналитических зависимостей (10) – (11), полученных в предыдущем разделе статьи, с учётом аппроксимационных параметров α_j , β_j , δ_j , удельных затрат c_j и корректирующих множителей ξ_j . При этом обеспечивается выполнение дисциплинирующего условия по надёжности, заключающегося в равенстве суммы вероятностей отказа на этапах заданному значению $Q_{зад}$.

В результате нормирования каждому этапу комплексной обработки сопоставляется нормированное значение вероятности отказа q_{k_j} , согласованное с заданными требованиями по надёжности и ограничениями по ресурсам. Данный подход позволяет учесть неоднородность этапов комплексной обработки и различие их вклада в формирование общей надёжности изделия [7].

4. Расчёт объёмов испытаний.

Для каждого этапа комплексной обработки определяется такое значение числа испытаний k_j по выражению (12), при котором достигается рассчитанное на предыдущем этапе нормированное значение вероятности отказа q_{k_j} согласно выражению (11). Таким образом обеспечивается выполнение заданных требований по надёжности при минимально необходимом объёме экспериментальных работ.

Полученные значения k_j представляют собой оптимальное распределение испытаний между этапами комплексной обработки. Данное распределение согласует требования по надёжности, экономические ограничения и экспериментальные возможности, обеспечивая рациональную организацию программы испытаний в рамках единой оптимизационной модели.

Приближенная оценка объёма испытаний для равнонадежных систем

Рассмотрим приближённую оценку потребного числа испытаний для равнонадежных систем. При проведении комплексной обработки объём испытаний будет определяться числом испытаний необходимых для подтверждения заданного уровня надёжности всеми агрегатами системы. Моменты окончания испытаний в этом случае соответствуют моментам пересечения случайных траекторий параметра работоспособности $\hat{m}_\eta(k)$ с граничной кривой $\eta_{гр}(k)$. Под граничной кривой $\eta_{гр}(k)$ понимается зависимость предельного значения коэффициента запаса от числа испытаний, соответствующая заданному уровню надёжности.

Оценка среднего числа испытаний сводится к определению среднего значения момента пересечения случайных траекторий $\hat{m}_\eta(k)$ с граничной кривой $\eta_{гр}(k)$. На рисунке 2 представлено типовое поведение случайных траекторий параметра работоспособности и их пересечения с граничной областью. Точка пересечения каждой траектории с кривой $\eta_{гр}(k)$ соответствует моменту выхода параметра за допустимую область и, соответственно, моменту завершения испытаний по данному параметру. Усреднение таких моментов по множеству реализаций позволяет получить оценку числа испытаний, необходимых для достижения требуемого уровня надёжности.

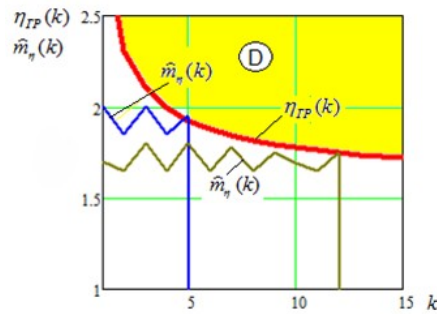


Рисунок 2 - Оценка моментов окончания испытаний
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.76.2>

В случае нормального распределения параметров работоспособности граничные кривые определяются соотношениями, вытекающими из модели прогнозирования надёжности, использованной в работе [1]:

$$\eta_{ГР} = \frac{\eta_{зад}}{1 - \frac{t_\gamma}{\sqrt{k}} k_V(\eta)} \quad (15)$$

где значение коэффициента запаса $\eta_{зад}$, соответствующее заданному уровню надёжности $H_{зад}$, определяется по соотношению:

$$\eta_{зад} = \frac{1}{1 - \arg F^* \{ H_{зад} \} k_V(\eta)} \quad (16)$$

где t_γ — аргумент, соответствующий принятому уровню доверительной вероятности γ ; $\arg F^* (H_{зад})$ — обозначает квантиль нормированного нормального распределения, определяемый из условия $F(x) = H_{зад}$.

В условиях комплексной отработки измерения параметров работоспособности выполняются по нескольким контролируемым характеристикам, поэтому требуемый объём испытаний определяется моментом подтверждения надёжности всех параметров. Среднее число испытаний при этом может быть оценено аналогично «горячему» резервированию и выражается через средний объём испытаний для одного параметра [6], [9], [10]. При наличии n оцениваемых параметров приближённая оценка среднего числа испытаний задаётся выражением:

$$k_{ср, n} = k_{ср} \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n} \right), \quad (17)$$

где $k_{ср}$ — средний объём испытаний для подтверждения надёжности одного параметра.

Полученное соотношение позволяет выполнить быструю инженерную оценку объёма испытаний для равнонадёжных систем и может быть использовано на ранних этапах планирования экспериментальной отработки в качестве ориентировочной оценки.

Заключение

В работе представлена методика оптимизации объёмов испытаний на этапах комплексной отработки изделий ракетно-космической техники. На основе дисциплинирующего условия по надёжности сформирована математическая модель распределения вероятностей отказов между этапами, включающая использование функции Лагранжа и вывод аналитических зависимостей для расчёта числа испытаний. Получены выражения, позволяющие определять оптимальные значения вероятностей отказов и соответствующие им объёмы испытаний при заданных ограничениях по надёжности и удельным затратам.

Разработан алгоритм проведения расчётов, обеспечивающий последовательное определение корректирующего множителя, нормирование требований по надёжности и расчёт объёмов испытаний для каждого этапа комплексной отработки. Предложенный алгоритм дополняет существующие подходы к планированию испытаний [8], [9], [10], ориентированные преимущественно на фиксированные объёмы экспериментальных работ, и позволяет учитывать неоднородность этапов, различие их вклада в формирование надёжности и экономические ограничения в рамках единой оптимизационной схемы.

Дополнительно в работе предложен приближённый метод оценки необходимого числа испытаний для равнонадёжных систем, основанный на анализе пересечений случайных траекторий параметра работоспособности с граничной кривой. Данный подход может быть использован для быстрой инженерной оценки объёмов испытаний на ранних этапах планирования комплексной отработки и при предварительном обосновании программ испытаний [2].

Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием предложенной методики в направлении учёта неоднородных систем, включения нескольких ограничений по ресурсам (временным, стоимостным и энергетическим), а также с разработкой процедур оптимизации для адаптивных программ испытаний, предусматривающих уточнение параметров модели по мере накопления экспериментальных данных. Полученные в работе результаты могут служить основой для построения более общего инструментария анализа и оптимизации испытаний многоэлементных и многофазовых систем.

**Благодарности**

Автор выражает благодарность кафедре 610 «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем» Московского авиационного института.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Извеков Ю.А., Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова, Магнитогорск Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.76.3>

Acknowledgement

The author expresses sincere gratitude to Department 610, 'Operation Management of Rocket and Space Systems', at the Moscow Aviation Institute.

Conflict of Interest

None declared.

Review

Izvekov Y.A., Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.76.3>

Список литературы / References

1. Гусев Е.В. Модель обеспечения надежности на этапе комплексной отработки изделий ракетно-космической техники / Е.В. Гусев, А.А. Пронкин // Международный научно-исследовательский журнал. – 2026. – № 1 (163). — DOI: 10.60797/IRJ.2026.163.38.
2. Галеев А.В. Разработка технологии испытаний криогенных ракетных двигателей с имитацией воздействующих факторов : дис. ... канд. техн. наук : 05.07.05 / А.В. Галеев. — Москва, 2018. — 126 с.
3. Gusev E. Forecasting of maintenance indicators of complex technical systems during storage / E. Gusev, A. Pronkin // Aerospace Systems. — 2023. — Vol. 6. — № 3. — P. 383–391. — DOI: 10.1007/s42401-023-00225-6.
4. Гусев Е.В. Модель определения оптимального количества запасных элементов и принадлежностей методом динамического программирования / Е.В. Гусев, А.А. Пронкин // Научно-технический вестник Поволжья. — 2024. — № 5. — С. 46–49.
5. Золотов А.А. Прикладные задачи обеспечения надёжности при разработке аппаратов ракетно-космических систем / А.А. Золотов, В.В. Родченко, Е.В. Гусев. — Москва : Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2023. — 160 с.
6. Абрамов О.В. Управление состоянием сложных технических систем / О.В. Абрамов // Труды Международного симпозиума «Надёжность и качество». — 2010. — Т. 1. — С. 24–26.
7. Гусев Е.В. Разработка математической модели оценки надёжности аппаратуры летательного аппарата на основе метода статистического моделирования / Е.В. Гусев // Научно-технический вестник Поволжья. — 2023. — № 3. — С. 24–27.
8. Федоров В.К. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств / В.К. Федоров, Н.П. Сергеев, А.А. Кондрашин; под ред. В.К. Федорова. — Москва : Техносфера, 2005. — 502 с.
9. Похабов Ю.П. Подход к конструированию на основе прогнозирования надёжности / Ю.П. Похабов, В.А. Каверин, А.М. Васильев [и др.] // Инженерный журнал: наука и инновации. — 2025. — № 4 (160). — DOI: 10.18698/2308-6033-2025-4-2439.
10. Похабов Ю.П. О надёжности изделий ракетно-космического назначения, содержащих компоненты и элементы с неизвестными показателями надёжности / Ю.П. Похабов // Инженерный журнал: наука и инновации. — 2024. — № 6 (150). — DOI: 10.18698/2308-6033-2024-6-2363.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Gusev E.V. Model' obespecheniya nadozhnosti na jetape kompleksnoj otrabotki izdelij raketno-kosmicheskoy tehniki [Model for ensuring reliability at the stage of complex testing of rocket and space technology products] / E.V. Gusev, A.A. Pronkin // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Research Journal]. — 2026. — № 1 (163). — DOI: 10.60797/IRJ.2026.163.38. [in Russian]
2. Galeev A.V. Razrabotka tekhnologii ispytaniy kriogennyh raketnyh dvigatelej s imitaciej vozdejstvuyushchih faktorov [Development of a test technology for cryogenic rocket engines with simulation of influencing factors] : dis. ... of PhD in Engineering : 05.07.05 / A.V. Galeev. — Moscow, 2018. — 126 p. [in Russian].
3. Gusev E. Forecasting of maintenance indicators of complex technical systems during storage / E. Gusev, A. Pronkin // Aerospace Systems. — 2023. — Vol. 6. — № 3. — P. 383–391. — DOI: 10.1007/s42401-023-00225-6.
4. Gusev E.V. Model' opredeleniya optimal'nogo kolichestva zapasnyh elementov i prinadlezhnostej metodom dinamicheskogo programmirovaniya [Model for determining the optimal number of spare elements and accessories using the dynamic programming method] / E.V. Gusev, A.A. Pronkin // Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya [Scientific and Technical Volga Region Bulletin]. — 2024. — № 5. — P. 46–49.
5. Zolotov A.A. Prikladnye zadachi obespecheniya nadyozhnosti pri razrabotke apparatov raketno-kosmicheskikh sistem [Applied Problems of Ensuring Reliability in the Development of Rocket and Space System Devices] / A.A. Zolotov, V.V. Rodchenko, E.V. Gusev. — Moscow : Moscow Aviation Institute (National Research University), 2023. — 160 p. [in Russian].
6. Abramov O.V. Upravlenie sostoyaniem slozhnyh tekhnicheskikh sistem [Control of the state of complex technical systems] / O.V. Abramov // Mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadyozhnost' i kachestvo" [Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"]. — 2010. — Vol. 1. — P. 24–26. [in Russian].



7. Gusev E.V. Razrabotka matematicheskoy modeli ocenki nadyozhnosti apparatury letatel'nogo apparata na osnove metoda statisticheskogo modelirovaniya [Development of a mathematical model for assessing the reliability of aircraft equipment based on the statistical modeling method] / E.V. Gusev // Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya [Scientific and Technical Volga Region Bulletin]. — 2023. — № 3. — P. 24–27. [in Russian].
8. Fedorov V.K. Kontrol' i ispytaniya v proektirovanii i proizvodstve radioelektronnyh sredstv [Control and testing in the design and production of electronic equipment] / V.K. Fedorov, N.P. Sergeev, A.A. Kondrashin; edited by V.K. Fedorov. — Moscow : Tekhnosfera, 2005. — 502 p. [in Russian].
9. Pokhabov Yu.P. Podhod k konstruirovaniyu na osnove prognozirovaniya nadyozhnosti [An approach to design based on reliability forecasting] / Yu.P. Pokhabov, V.A. Kaverin, A.M. Vasilyev [et al.] // Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii [Engineering Journal: Science and Innovation]. — 2025. — № 4 (160). — DOI: 10.18698/2308-6033-2025-4-2439. [in Russian].
10. Pokhabov Yu.P. O nadyozhnosti izdelij raketno-kosmicheskogo naznacheniya, sodержashchih komponenty i elementy s neizvestnymi pokazatelyami nadyozhnosti [On the reliability of rocket and space products containing components and elements with unknown reliability indicators] / Yu.P. Pokhabov // Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii [Engineering Journal: Science and Innovation]. — 2024. — № 6 (150). — DOI: 10.18698/2308-6033-2024-6-2363. [in Russian].