

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

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.38>

**МОДЕЛЬ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ НА ЭТАПЕ КОМПЛЕКСНОЙ ОТРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ
РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

Научная статья

Гусев Е.В.^{1,*}, Пронкин А.А.²

¹ORCID : 0000-0003-1634-0352;

²ORCID : 0000-0001-9907-260X;

^{1,2} Московский Авиационный Институт (Национальный Исследовательский Университет), Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (ccg-gus[at]mail.ru)

Аннотация

В статье рассматривается модель обеспечения надежности изделий ракетно-космической техники на этапе комплексной отработки, когда взаимодействие элементов системы приводит к появлению дополнительных факторов риска, не проявляющихся на автономных испытаниях. Цель исследования заключается в уточнении прогнозируемых уровней надежности с учетом вероятности возникновения новых отказов и выявления их источников. В работе анализируется изменение логарифма вероятности отказа от числа испытаний, приводятся исходные предпосылки, параметры модели и используемые зависимые величины, включая коэффициенты запаса, вариации и доверительные вероятности. Предложен подход к оценке вероятности отказа при различных сочетаниях параметров и показано, как аппроксимация экспериментальных данных позволяет получить функциональные зависимости для дальнейших расчетов. Представленные результаты демонстрируют характер изменения надежности системы при увеличении числа испытаний и дают возможность уточнять объемы экспериментальной отработки на последующих этапах разработки. Сделаны выводы о применимости модели для предварительной оценки надежности и подготовки алгоритмической части оптимизации испытаний.

Ключевые слова: ракетно-космическая техника, надежность, комплексные испытания, модель надежности, вероятность отказа, экспериментальная отработка, оценка работоспособности.

MODEL FOR ENSURING RELIABILITY AT THE STAGE OF COMPLEX TESTING OF ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY PRODUCTS

Research article

Gusev E.V.^{1,*}, Pronkin A.A.²

¹ORCID : 0000-0003-1634-0352;

²ORCID : 0000-0001-9907-260X;

^{1,2} Moscow Aviation Institute, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (ccg-gus[at]mail.ru)

Abstract

The article examines a model for ensuring the reliability of rocket and space technology products at the comprehensive testing stage, when the interaction of system elements leads to the emergence of additional risk factors that do not manifest themselves in autonomous tests. The aim of the study is to specify the predicted reliability levels, taking into account the probability of new failures and identifying their sources. The paper analyses the change in the logarithm of the failure probability from the number of tests, provides the initial assumptions, model parameters and dependent variables used, including reserve coefficients, variations and confidence probabilities. An approach to estimating the probability of failure for various combinations of parameters is suggested, and it is shown how the approximation of experimental data allows functional dependencies to be obtained for further calculations. The presented results demonstrate the nature of changes in system reliability as the number of tests increases, and make it possible to clarify the scope of experimental testing at subsequent stages of development. Conclusions are made about the applicability of the model for preliminary reliability evaluation and preparation of the algorithmic part of test optimisation.

Keywords: rocket and space technology, reliability, comprehensive testing, reliability model, failure probability, experimental testing, performance evaluation.

Введение

Обеспечение надежности изделий ракетно-космической техники является одним из ключевых требований при их создании, поскольку отказ даже одного элемента способен привести к срыву всей программы. На этапе автономных испытаний формируется предварительная оценка надежности, однако она не отражает влияние взаимодействия подсистем, возникающее при комплексной отработке. В этих условиях появляются дополнительные источники отказов, что требует уточнённой модели прогнозирования.

Цель работы заключается в разработке теоретической модели изменения вероятности отказа изделия на различных этапах комплексных испытаний с учетом параметров, подтверждённых на автономной отработке. Актуальность

исследования обусловлена необходимостью повышения точности оценки надежности и сокращения затрат на экспериментальную программу.

Научная новизна работы заключается в получении аналитической зависимости, позволяющей напрямую оценивать изменение подтверждаемого уровня надёжности в зависимости от числа испытаний. В отличие от известных подходов, основанных на имитационных моделях и многоэтапной статистической обработке данных [1], предложенный метод использует аппроксимацию экспериментальных зависимостей и минимальный набор параметров. Такой подход упрощает процедуру расчёта, повышает её практическую применимость и обеспечивает более удобный инструмент для планирования комплексной отработки и оценки достаточности количества испытаний.

Анализ работоспособности изделия на этапе комплексной отработки

Подтверждаемая на этапе автономных испытаний оценка надежности требует уточнения, поскольку она не учитывает появление новых источников отказов, возникающих при совместном функционировании элементов в составе изделия [2]. Выявить такие источники возможно только при комплексных испытаниях, где оценивается изменение вероятности отказа вследствие взаимодействия агрегатов. На данном этапе известны коэффициенты запаса по основным параметрам, подтверждённые на автономной отработке, и задача заключается в подтверждении надежности системы либо выявлении дополнительных отказов и выполнении доработок для достижения требуемого уровня надежности.

Отказы, проявляющиеся при комплексной отработке, обусловлены неучтёнными факторами взаимодействия подсистем. В случае возникновения отказа выполняются доработки, направленные на устранение его причины, после чего проводятся повторные испытания. При успешном результате можно считать, что выявленный источник отказа устраниён, и условия испытаний приводятся к идентичным автономным.

Общий объём комплексных испытаний определяется числом испытаний, необходимых для подтверждения требуемой надежности, и количеством отказов, проявившихся в процессе работы. В связи с этим к обязательным испытаниям добавляются испытания, вызванные проявившимися отказами.

Для снижения материальных затрат на проведение наземных комплексных испытаний (НКИ) испытания целесообразно выполнять поэтапно [3]. На ранних этапах устраняется основная часть отказов, что позволяет сократить их число на последующих стадиях. Формирование структуры этапов комплексной отработки осуществляется с учётом временных ограничений, материальных затрат, возможного ущерба от отказа и наличия материально-технической базы для проведения испытаний.

Модель прогнозирования надежности при комплексных испытаниях

Оценим зависимость подтверждаемых уровней надежности от числа испытаний k на каждом из возможных этапов экспериментальной отработки системы этой целью воспользуемся соотношением:

$$m_\eta = \frac{\eta_{\text{зад}}}{\left(1 - \frac{k_{V_\Sigma} t_\gamma}{\sqrt{k}}\right)^2} \approx \eta_{\text{зад}} \left(1 - \frac{k_{V_\Sigma} 2t_\gamma}{\sqrt{k}}\right) \quad (1)$$

где m_η — математическое ожидание коэффициента запаса; $\eta_{\text{зад}}$ — заданное значение коэффициента запаса;

$k_{V_\Sigma} = \sqrt{k_v^2(x_y) + k_v^2(x_\delta)}$; $k_v(x_y)$ и $k_v(x_\delta)$ — коэффициенты вариации допустимых и действующих значений параметров соответственно; k — количество испытаний; t_γ — квантиль нормального распределения, соответствующий доверительной вероятности γ . Используемая зависимость (1) основана на общепринятых методах прикладного анализа надежности, изложенных в монографии [4].

Разрешая соотношение (1) относительно $\eta_{\text{зад}}$, найдем:

$$\eta_{\text{зад}} = m_\eta \left(1 - \frac{2t_\gamma}{\sqrt{k}} k_{V_\Sigma}\right) \quad (2)$$

Знание требований, предъявляемых к надежности $\eta_{\text{зад}}$, позволяет оценить прогнозируемые уровни надежности, подтверждаемые по каждому параметру после проведения k испытаний.

Раскрывая выражение $H_k = F\left\{\frac{\eta_{\text{зад}} - 1}{m_\eta k_{V_\Sigma}}\right\}$ для H_k , получим:

$$H_k = F\left\{\frac{\frac{m_\eta - 1}{m_\eta k_{V_\Sigma}} - \frac{tm_\eta k_{V_\Sigma}}{m_\eta k_{V_\Sigma} \sqrt{k}}}{\frac{t}{\sqrt{k}}}\right\} = F\{W\} \quad (3)$$

где H_k — уровень надёжности системы на k -м испытании, безразмерная величина; $F\{W\}$ — функция нормированного нормального распределения; $W = \left(\frac{m_\eta - 1}{k_{V_\Sigma} m_\eta} - \frac{t}{\sqrt{k}}\right)$; $t = 2t_\gamma$.

Вероятность отказа системы будет оцениваться по соотношению (4):

$$Q_k = \left\{ \int_{-\infty}^{-W} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-0.5U^2} dU \right\} \quad (4)$$

где Q_k — вероятность отказа системы при k -м испытании.

Изменение вероятности отказа в белах от числа испытаний при испытании на отдельном этапе комплексной отработки двух агрегатов представлено на рисунке 1.

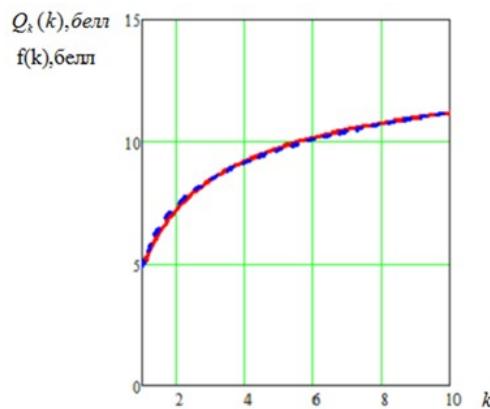


Рисунок 1 - Изменение логарифма вероятности отказа $Q_k(k)$ и аппроксимирующей кривой $f(k)$ от числа испытаний
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.38.1>

На рисунке 1 представлена кривая изменения логарифма отказа $Q_k(k)$ (сплошная линия) и аппроксимирующая кривая $f(k)$ (пунктирная линия).

При проведении расчетов были приняты следующие исходные данные: коэффициент вариации $k_{V_\Sigma} = s = 0.1$; коэффициент запаса $m_{\eta,1} = 2$; $m_{\eta,2} = 2.4$; доверительная вероятность $\gamma = 0.95$ ($t = 2t_\gamma$; $t_\gamma = 1.65$).

Расчеты проводились по соотношениям [4]:

$$\Phi(k) = (-1) \ln \left[\int_{-\infty}^{-(sm)^{-1}(m-1)-t(k)^{-0.5}} (\sqrt{2\pi})^{-1} e^{-0.5u^2} du \right] \quad (5)$$

$$\Phi 1(k) = \int_{-\infty}^{-(2s)^{-1}(2-1)-t(k)^{-0.5}} (\sqrt{2\pi})^{-1} e^{-0.5u^2} du \quad (6)$$

$$\Phi 2(k) = \int_{-\infty}^{-(2.4s)^{-1}(2.4-1)-t(k)^{-0.5}} (\sqrt{2\pi})^{-1} e^{-0.5u^2} du \quad (7)$$

$$W(k) = (-1) \ln[(\Phi 1(k) + \Phi 2(k))] \quad (8)$$

На рисунке 1 представлена так же аппроксимирующая зависимость:

$$f(k) = 2 \ln(k - 0.6) + 6.7 \quad (9)$$

Таким образом, изменение логарифма вероятности отказа по числу испытаний можно представить в виде:

$$\ln Q = \delta \ln(k - \beta) + \alpha \quad (10)$$

где α , δ и β — аппроксимирующие коэффициенты.

Согласно полученным результатам, аппроксимирующие коэффициенты будут равны: $\alpha = 6.7$; $\beta = 0.6$; $\delta = 2$. Соответственно надежность будет равна:

$$H(k) = 1 - e^{-6.7} e^{-2 \ln(k-0.6)} \quad (11)$$

Изменение надежности изделия в зависимости от числа испытаний

Характер изменения надежности изделия при проведении комплексной отработки определяется влиянием выявляемых отказов и последующих корректирующих мероприятий. По полученной аппроксимационной зависимости для вероятности отказа можно представить динамику функции $H(k)$ в зависимости от числа испытаний k , представленную на рисунке 2.

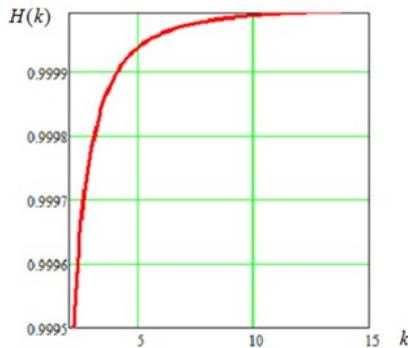
Рисунок 2 - Изменение надежности $H(k)$ по числу испытанийDOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.38.2>

График на рисунке 2 рассчитан по выражению (11) с использованием аппроксимированных значений параметров α , δ и β , что позволяет отразить изменение прогнозируемой надёжности при увеличении числа испытаний.

На начальных этапах испытаний надёжность растёт сравнительно медленно, так как значительная часть отказов связана с ранее не учтённым взаимодействием подсистем и проявляется уже при первых включениях [5]. В этот период основную роль играет выявление грубых дефектов, что формирует характерную пологую форму кривой.

По мере увеличения числа испытаний вероятность появления новых отказов заметно уменьшается. Это связано с тем, что основные источники отказов были выявлены на ранних этапах и устранены, а взаимодействие агрегатов стабилизируется [6]. На рисунке 2 это проявляется в виде ускоренного роста надёжности и постепенного приближения к заданному уровню. Аппроксимационная модель показывает, что дальнейшее увеличение количества испытаний приводит к затухающему приросту надёжности, что свидетельствует о снижении эффективности дополнительных испытательных мероприятий.

Таким образом, анализ полученной зависимости позволяет не только определить диапазон значений k , в котором дополнительные испытания дают наибольший прирост надёжности, но и выделить область, где дальнейшее увеличение объёма испытаний становится экономически неоправданным. В этот период прирост надёжности практически прекращается, а затраты на проведение испытаний продолжают расти. Выявление такого участка важно для формирования рациональной программы комплексной отработки, поскольку позволяет обосновать прекращение испытаний на уровне, обеспечивающем подтверждённую надёжность без избыточных затрат. На практике это означает возможность оптимизации распределения ресурсов и корректировки планов испытаний с учётом реального поведения исследуемой системы.

Заключение

В работе представлена модель прогнозирования надёжности изделия ракетно-космической техники на этапе комплексной отработки. На основе экспериментальных допущений и аппроксимационной зависимости получено выражение для вероятности отказа и соответствующей функции надёжности $H(k)$, позволяющей оценивать изменение надёжности в зависимости от числа проведенных испытаний. Показано, что модель обеспечивает количественное описание динамики надёжности при последовательном устраниении выявляемых отказов и может использоваться для корректировки планов испытаний.

Полученные результаты соответствуют поставленной цели исследования — уточнению показателей надёжности на основе данных комплексных испытаний и формированию математического аппарата для анализа влияния числа испытаний на достижение требуемого уровня надёжности. Представленный подход позволяет обоснованно оценивать достаточность объема испытаний и выявлять участки, где дополнительная экспериментальная нагрузка практически не изменяет итоговые показатели надёжности.

Предложенная модель дополняет существующие методы анализа надёжности, основанные на применении сложных имитационных процедур и многофакторных моделей [1], и обеспечивает более простую аналитическую оценку изменения уровня надёжности при увеличении числа испытаний. Отличительной особенностью подхода является возможность его применения при ограниченном объёме исходных данных, что делает модель удобным инструментом для инженерного планирования комплексной отработки.

Перспективы дальнейших исследований включают развитие методов оптимизации объемов испытаний, учет нескольких одновременно контролируемых параметров работоспособности и интеграцию модели в алгоритмы автоматизированного планирования экспериментальной отработки.

Благодарности

Авторы выражают благодарность кафедре 610 «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем» МАИ.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Acknowledgement

The authors express their gratitude to the Department 610 "Management of the operation of rocket and space systems" of MAI.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

- 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.
- Gusev E. Forecasting of maintenance indicators of complex technical systems during storage / E. Gusev, A. Pronkin // Aerospace Systems. — 2023. — Vol. 6. — P. 383–391. — DOI: 10.1007/s42401-023-00225-6.
- 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.
- 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.
- Абрамов О.В. Управление состоянием сложных технических систем / О.В. Абрамов // Труды Международного симпозиума «Надёжность и качество». — 2010. — Т. 1. — С. 24–26.
- Федоров В.К. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств / В. Федоров, Н. Сергеев, А. Кондрашин; под ред. В.К. Федорова. — Москва: Техносфера, 2005. — 502 с.
- 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.
- 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.
- Пахабов Ю.П. Метод проектирования и конструирования механизмов космического назначения с заданной надёжностью / Ю.П. Пахабов // Надёжность. — 2023. — Т. 23. — № 2. — С. 26–38. — DOI: 10.21683/1729-2646-2023-23-2-26-38.
- Похабов Ю.П. Некоторые выводы по результатам применения конструкторско-технологического анализа надёжности для изделий ракетно-космического назначения. Часть 1 / Ю.П. Похабов // Инженерный журнал: наука и инновации. — 2023. — № 8 (140). — DOI: 10.18698/2308-6033-2023-8-2297.

Список литературы на английском языке / References in English

- Galeev A.V. Razrabotka tehnologii ispytanij kriogennyh raketnyh dvigatelej s imitacijey vozdejstvujuščih faktorov [Development of a test technology for cryogenic rocket engines with simulation of influencing factors]: diss. PhD in Technical Sciences: 05.07.05 / A.V. Galeev. — Moscow, 2018. — 126 p. [in Russian].
- Gusev E. Forecasting of maintenance indicators of complex technical systems during storage / E. Gusev, A. Pronkin // Aerospace Systems. — 2023. — Vol. 6. — P. 383–391. — DOI: 10.1007/s42401-023-00225-6.
- Gusev E.V., Pronkin A.A. Model' opredelenija optimal'nogo količestva zapasnyh elementov i prinadležnostej metodom dinamicheskogo programmirovaniya [Model for determining the optimal number of reserve parts using dynamic programming] / E.V. Gusev, A.A. Pronkin // Naučno-tehničeskiy vestnik Povolžja [Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region]. — 2024. — № 5. — P. 46–49.
- Zolotov A.A. Prikladnye zadači obespečenija nadjozhnosti pri razrabotke apparatov raketno-kosmičeskikh sistem [Applied Problems of Ensuring Reliability in the Development of Rocket and Space System Devices] / A.A. Zolotov, V.V. Rodčenko, E.V. Gusev. — Moscow: Moscow Aviation Institute (National Research University), 2023. — 160 p. [in Russian].
- Abramov O.V. Upravlenie sostojaniem složnyh tehničeskikh sistem [Control of the state of complex technical systems] / O.V. Abramov // Trudy Meždunarodnogo simpoziuma «Nadjozhnost' i kačestvo» [Proceedings of the International Symposium “Reliability and Quality”]. — 2010. — Vol. 1. — P. 24–26. [in Russian].
- Fedorov V.K. Kontrol' i ispytaniya v proektirovaniyi i proizvodstve radioelektronnyh sredstv [Control and testing in the design and production of electronic equipment] / V. Fedorov, N. Sergeev, A. Kondrašin; edited by V.K. Fedorov. — Moscow: Tehnosfera, 2005. — 502 p. [in Russian].
- Pohabov Ju.P., Kaverin V.A., Vasil'ev A.M. Podhod k konstruirovaniyu na osnove prognozirovaniya nadjozhnosti [Approach to construction based on reliability forecasting] / Ju.P. Pohabov, V.A. Kaverin, A.M. Vasil'ev [et al.] // Inzhenernyj žurnal: nauka i innovacii [Engineering Journal: Science and Innovation]. — 2025. — No. 4 (160). — DOI: 10.18698/2308-6033-2025-4-2439. [in Russian].

8. Pohabov Ju.P. O nadjozhnosti izdelij raketno-kosmičeskogo naznachenija, soderžaščih komponenty i elementy s neizvestnymi pokazateljami nadjozhnosti [On the reliability of rocket-space products containing components and elements with unknown reliability indicators] / Ju.P. Pohabov // Inzhenernyj žurnal: nauka i innovacii [Engineering Journal: Science and Innovation]. — 2024. — No. 6 (150). — DOI: 10.18698/2308-6033-2024-6-2363. [in Russian].
9. Pahabov Ju.P. Metod proektirovaniya i konstruirovaniya mehanizmov kosmičeskogo naznachenija s zadannoj nadjozhnost'ju [Method for design and engineering of space mechanisms with specified reliability] / Ju.P. Pahabov // Nadjozhnost' [Reliability]. — 2023. — Vol. 23. — № 2. — P. 26–38. — DOI: 10.21683/1729-2646-2023-23-2-26-38. [in Russian].
10. Pohabov Ju.P. Nekotorye vyvody po rezul'tatam primenenija konstruktorsko-tehnologičeskogo analiza nadjozhnosti dlja izdelij raketno-kosmičeskogo naznachenija. Čast' 1 [Some conclusions based on the results of applying design-technological reliability analysis for rocket-space products. Part 1] / Ju.P. Pohabov // Inzhenernyj žurnal: nauka i innovacii [Engineering Journal: Science and Innovation]. — 2023. — No. 8 (140). — DOI: 10.18698/2308-6033-2023-8-2297. [in Russian].