

О функциональной надежности регенерационных систем жизнеобеспечения пилотируемых космических аппаратов

© И.В. Глебов, А.Д. Митрюхин

ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва»,
Московская область, г. Королёв, 141070, Россия

Рассмотрены два класса задач обеспечения надежности регенерационных систем жизнеобеспечения (РСЖО) пилотируемых космических аппаратов на этапах проектирования, испытаний и эксплуатации, а также подход к определению понятия «функциональная надежность» как составной части общей теории надежности и ее отличие от «структурной надежности». Представлены общие методы расчета надежности технических систем на всех этапах их жизненного цикла. Предложены математические модели функциональной, структурной и общей надежности РСЖО пилотируемого космического аппарата. По результатам автономных испытаний системы переработки диоксида углерода приведены расчеты функциональной надежности блока гидрирования диоксида углерода, разрабатываемого для применения в составе РСЖО пилотируемых космических аппаратов, а также сделаны выводы на основе проведенного анализа и полученных результатов расчета функциональной надежности блока гидрирования диоксида углерода.

Ключевые слова: регенерационная система жизнеобеспечения, функциональная надежность, структурная надежность, блок гидрирования диоксида углерода, требования назначения, математическая модель надежности

Введение. Для обеспечения надежности разрабатываемых систем авиационной и космической техники, включающей средства вычислительной техники, современную радиоэлектронную и автоматическую аппаратуру, необходимо решить ряд основных задач [1]:

- прогнозирование надежности разрабатываемых функциональных систем летательных аппаратов на всех этапах проектирования с выявлением слабых мест и выдачей своевременных рекомендаций по обеспечению надежности;
- контроль достигнутого уровня надежности на конечных этапах разработки на основании результатов испытаний систем;
- оптимизация надежности разрабатываемых систем программными и аппаратно-программными средствами.

Следует различать два класса задач обеспечения надежности технических систем [2]:

- 1) задачи структурной надежности, т. е. традиционной теории надежности, в которой исследуются процессы отказов и восстановлений объектов (элементов и агрегатов);

2) задачи функциональной надежности, решение которых включает в себя:

- выбор показателей функциональной надежности и критерия эффективности функционирования системы;
- определение факторов, оказывающих влияние на изменения показателей функциональной надежности системы;
- формализацию требований к показателям, создание системы показателей функциональной надежности системы, разработку новых и адаптацию существующих методов анализа этих показателей;
- разработку математических моделей для расчета и оценки функциональной надежности системы;
- прогнозирование изменений функциональной надежности системы на последующих этапах ее жизненного цикла.

Следует отметить, что до сих пор для оценки надежности технических систем (ТС) различных видов (по выполняемым функциям) не выработано единой системы взглядов на понимание предмета, целей и задач функциональной надежности. Цель настоящей статьи — проанализировать существующие подходы к оценке надежности технических систем и выработать подход к оценке функциональной надежности регенерационных систем жизнеобеспечения (РСЖО) пилотируемых космических аппаратов (ПКА).

Применительно к ТС каждого вида у соответствующих исследователей сформировались свои взгляды на надежность, привычки в подходах, стремление к преимственности [3]. Например, для информационных систем в источниках научно-технической информации [3] под функциональной надежностью понимается готовность системы к выполнению предусмотренных задач. Эта позиция сформулирована следующим образом: вероятность отказа любой части системы определяет, будет ли система пригодна к использованию в любое заданное (случайное) время. Факторы, которые влияют на функциональную надежность, включают в себя среднее время между сбоями, среднее время, требуемое на ремонт, и время простоя.

Более распространенный подход, закрепленный в стандарте [4] и рассмотренный в [3], состоит в том, что для многофункциональной управляющей системы, например, автоматизированной системы управления (АСУ), рассчитывается надежность относительно каждой функции. С этой целью устанавливается перечень функций и видов их отказов, а также перечень критериев этих отказов. Уровень надежности системы оценивают в зависимости от надежности и других свойств технических средств, от программного обеспечения, а также от персонала, участвующего в функционировании системы. Для расчета надежности АСУ из ее состава выделяют функциональные подсистемы (ФП), каждая из которых решает одну конкретную

задачу и содержит необходимые для этого технические и программные средства, а обслуживает ее определенный персонал. Анализ показателей надежности всей системы проводят для каждой ФП, учитывая параметры ее составных средств, например надежность реализации функций. Так, в качестве единичного показателя безотказности системы относительно непрерывно выполняемой функции вводятся:

- вероятность безотказной работы i -й ФП в течение заданного времени;
- параметры средней наработки до отказа;
- наработки на отказ;
- интенсивность отказов;
- поток отказов.

В качестве комплексных показателей надежности используют коэффициенты готовности, технического использования и сохранения эффективности каждой i -й ФП [3].

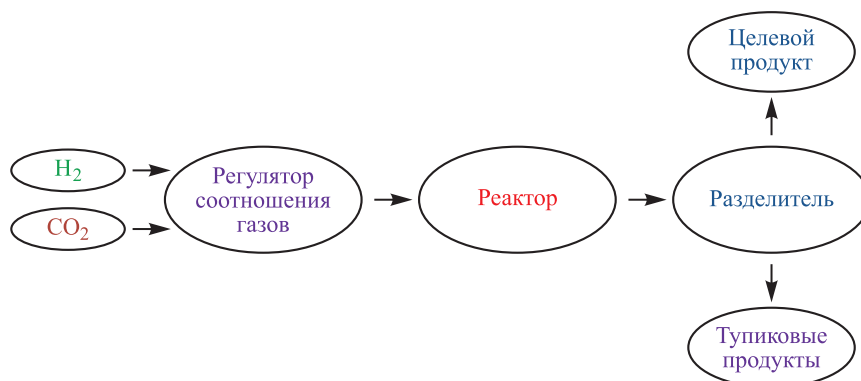
Оба рассмотренных подхода — попытка объединить надежности технических средств и выполнения основных функций систем с позиции структурной надежности (функционирование систем зависит от надежности ее составных частей). Для оценки функциональной надежности ТС конкретных видов эти подходы имеют право на существование, но без адаптации не могут быть применены для оценки функциональной надежности РСЖО пилотируемых космических аппаратов.

Подход к оценке функциональной надежности регенерационных систем жизнеобеспечения пилотируемых космических аппаратов. Регенерационные системы жизнеобеспечения ПКА — самостоятельная область исследований в науке. Отличительной особенностью РСЖО, принцип функционирования которых основан на регенерации продуктов жизнедеятельности человека в замкнутых герметичных отсеках (ГО), является наличие в их составе устройств, реализующих сложные физико-химические процессы. Поэтому надежное функционирование данных систем зависит не только от надежности их составных частей, но и от правильности, т. е. от надежности течения в них физико-химических процессов, решение вопросов которых оказалось в рамках классической (структурной) надежности. Для каждой конкретной РСЖО существуют влияющие на развитие таких процессов факторы, в частности конструктивные характеристики системы, соотношение исходных компонентов химической реакции, характеристики катализаторов, температура химической реакции и т. п.

Оценка функциональной надежности РСЖО ПКА может осуществляться путем контроля выполнения требований назначения, предъявляемых в техническом задании (ТЗ). Расчет функциональной надежности при таком подходе сводится к следующему:

- вычислению (измерению) показателей назначения;
- оценке показателей надежности выполнения заданных функций (например, вероятность того, что система очистки атмосферы ГО изделия будет работать в течение заданного времени при заданных режимах эксплуатации с сохранением всех необходимых параметров показателей очистки).

Рассмотрим предложенный подход к оценке функциональной надежности РСЖО на примере составной части разрабатываемой системы переработки диоксида углерода (СПДУ) из состава интегрированной регенерационной системы обеспечения газового состава ПКА для длительных автономных космических полетов. Данная система предназначена для удаления из газовой среды обитаемого модуля диоксида углерода, его концентрирования до 99 % и последующей переработки по реакции гидрирования (реакции Сабатье) до газообразных веществ: метана и паров воды [5]. В системе переработки диоксида углерода блок гидрирования диоксида углерода (БГДУ), осуществляющий получение воды по реакции Сабатье, структурная схема которого представлена на рисунке, является основным, и он определяет производительность системы по целевому продукту [6].



Структурная схема блока гидрирования

Проверку функциональной надежности БГДУ следует проводить путем контроля следующих требований назначения, предъявляемых в ТЗ:

- 1) температура на поверхности агрегатов системы не должна превышать 40 °С;
- 2) БГДУ должен обеспечивать переработку диоксида углерода по реакции Сабатье до воды и метана, выход воды при подаче в блок 40 дм³/ч диоксида углерода и 160 дм³/ч водорода должен быть не менее 62 г/ч;
- 3) влагосодержание метана на выходе блока должно быть не более 10 мг/дм³.

Очевидно, что посредством введения испарителя и теплозащитных материалов в конструкцию реализуется выполнение двух требований:

- влагосодержание метана на выходе БГДУ должно быть не более 10 мг/дм³;
- температура на поверхности агрегатов системы должна быть не более 40 °С.

Требование по обеспечению не менее 62 г/ч выхода воды при подаче в блок 40 дм³/ч диоксида углерода и 160 дм³/ч водорода — определяющее, так как именно этот показатель назначения определяет соответствие СПДУ своему основному функциональному назначению. Выполнение данного требования в первую очередь зависит от качества протекания сложной химической реакции гидрирования. Таким образом, основным показателем функциональной надежности и критерием эффективности функционирования системы является «выход по воде». Если в исследуемой РСЖО будут выделены два и более критерия эффективности функционирования системы, позволяющих оценивать качество протекания физико-химических процессов, то анализ функциональной надежности системы необходимо проводить по каждому из этих показателей.

Математические модели расчета структурной, функциональной и общей надежности регенерационных систем жизнеобеспечения. Надежность любых технических систем количественно может быть оценено набором показателей: безотказностью функционирования, долговечностью, ремонтпригодностью и сохраняемостью. Многие показатели надежности изделия отображают случайные события, связанные с непредусмотренными отказами при его эксплуатации. Поэтому соответствующие численные характеристики надежности имеют вероятностную сущность, и значит, они основаны на статистике и математической теории вероятностей [7]. Одной из важнейших количественных характеристик надежности, в том числе и надежности РСЖО, является вероятность безотказной работы P , т. е. вероятность того, что в течение определенного промежутка времени отказа не возникнет [8].

Расчет структурной надежности систем проводится на основании данных о надежности составных частей (СЧ), приведенных в конструкторских документах (технические условия, паспорта, формулы и т. п.). Выражение для вычисления структурной надежности РСЖО, как и для вычисления надежности любой другой технической системы, имеет вид [7]

$$P_s = \prod_{k=1}^K P_s;$$
$$P_k = \prod_{j=1}^{n_k} P_j.$$

Здесь P_k — вероятность безотказной работы в составе k -й СЧ РСЖО при $k = \overline{1, K}$ (K — количество СЧ за вычетом заменяемых сменных элементов); P_j — вероятность безотказной работы отдельных элементов в составе k -й СЧ РСЖО при $j = \overline{1, n_k}$ (n_k — количество отдельных элементов в составе k -й СЧ РСЖО).

Для вычисления функциональной надежности конкретной РСЖО необходимо учитывать факторы, влияющие на протекание физико-химических процессов в системе. Эффективное функционирование системы характеризует параметр μ (основной показатель назначения), который функционально связан с параметрами b_k , $k = \overline{1, n}$ (в определенный момент времени t), влияющими на его изменения [8]:

$$\mu(t) = f(b_1(t), b_2(t), \dots, b_n(t)), \quad (1)$$

где f — оператор функции в общем виде.

Для надежного функционирования системы в соответствии с требованиями ТЗ значение параметра μ должно находиться в некоторых пределах [7]:

$$\mu_n \leq \mu \leq \mu_v. \quad (2)$$

Задача определения нижней μ_n и верхней μ_v границ диапазона изменения параметра μ сводится к вычислению доверительных интервалов с использованием аппарата теории вероятностей и математической статистики. Вычисление доверительных интервалов выполняется со следующими основными допущениями:

- значения параметра μ в серии измерений подчиняются нормальному закону распределения случайных величин;
- надежность методов оценки параметра μ должна быть не меньше, чем методов оценки вероятности безотказной работы системы.

Выражения для вычисления нижней μ_n и верхней μ_v границ доверительного интервала имеют вид [9]

$$\begin{aligned} \mu_n &= \bar{x} - t_\alpha(v) \frac{S_x}{\sqrt{n}}; \\ \mu_v &= \bar{x} + t_\alpha(v) \frac{S_x}{\sqrt{n}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь \bar{x} — выборочная оценка среднего значения параметра x по результатам испытаний x_i , $i = \overline{1, n}$; $t_\alpha(v)$ — квантиль распределения Стьюдента с степенями свободы и доверительной вероятностью α ; S_x — выборочная оценка среднего квадратичного отклонения пара-

метра x по результатам испытаний $x_i, i = \overline{1, n}$; n — количество измерений параметра;

Нижнюю μ_n и верхнюю μ_v границы доверительного интервала оцениваемого показателя назначения РСЖО вычисляют на этапе конструкторско-технологического макета (КТМ) системы или методом имитационного моделирования. Расчетные соотношения для оценки функциональной надежности определяются особенностями функционирования объекта испытаний и возможностями измерительных средств. В одних случаях в процессе отработки фиксируется только факт отказа или успешного функционирования изделия (первая схема), в других — в каждом испытании проводят измерение целой группы параметров, характеризующих работоспособность изделия. В другой схеме проведения испытаний предполагается формализация сложных зависимостей выходного параметра от входных. Эту схему целесообразно применять при летных испытаниях или эксплуатации системы, а также для прогнозирования ее надежности. Этап наземной отработки разрабатываемой системы, как правило, длится относительно недолго (несколько месяцев). В течение этого времени уровень ее надежности значимо не снижается. Поэтому на этапах автономных и комплексных испытаний для оценки функциональной надежности РСЖО можно применять точечные оценки (по результатам серии измерений основного показателя назначения системы) и проводить испытания по первой схеме. В качестве точечной оценки функциональной надежности системы принимается вероятность безотказного протекания физико-химических процессов, рассчитываемая по соотношению:

$$P_f = \frac{m}{n}, \quad (4)$$

где P_f — показатель функциональной надежности системы (вероятность безотказного протекания физико-химических процессов); n — количество измерений в серии; m — количество измерений, удовлетворяющих условию (2).

Таким образом, выражение для вычисления общей надежности системы можно записать в следующем виде:

$$P_o = \min(P_s, P_f),$$

где P_o — вероятность (общая) безотказного функционирования системы; P_s — показатель структурной надежности системы.

Ниже представлены результаты применения описанного подхода к конкретной СЧ РСЖО.

Результаты расчета функциональной надежности блока гидрирования диоксида углерода. На этапе испытаний СПДУ проверялась нормальность распределения значений из выбранных последовательностей наблюдений и была подтверждена гипотеза, что наблюдаемые распределения результатов экспериментов значимо не отличаются от теоретически ожидаемого нормального распределения [10]. Таким образом, границы доверительного интервала вычисляются применительно к нормальному закону распределения измерений с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$ (определяется вероятностью безотказной работы СПДУ, заданной в ТЗ).

На стадии проектирования СПДУ с использованием имитационной модели [6] были определены наиболее значимые факторы, варьирование которых приводит к изменению основного показателя назначения БГДУ — «выход по воде»:

- объемные соотношения исходных реагентов CO_2 и H_2 — A ;
- объемная скорость подачи газовой смеси CO_2 и H_2 в реактор — V ;
- температура протекания процесса гидрирования, определяемая конструкцией реактора, — T .

Следовательно, для БГДУ выражение (1) можно записать в виде

$$\mu(t) = f(A(t), V(t), T(t)),$$

где $\mu(t)$ — значение показателя назначения «выход по воде» в момент времени t ; $A(t)$ — значения объемного соотношения исходных реагентов CO_2 и H_2 ; $V(t)$ — объемная скорость подачи газовой смеси CO_2 и H_2 в реактор; $T(t)$ — температура протекания процесса гидрирования в момент времени t .

Поскольку в ТЗ на разработку СПДУ задана нижняя граница параметра «выход по воде», для анализа функциональной надежности системы значение параметра μ необходимо сравнивать с нижней границей доверительного интервала:

$$\mu_n \leq \mu. \quad (5)$$

Результаты измерений значений целевого параметра («выход по воде») на этапе автономных испытаний БГДУ представлены в таблице.

С помощью формулы (3) была вычислена нижняя граница изменения параметра «выход по воде»: $\mu_n = 60,15$. Следует отметить, что для измерения 6 (см. таблицу) неравенство (5) не выполняется. С учетом этого по выражению (4) была определена точечная оценка вероятности безотказного протекания реакции Сабатье:

$$P_f = \frac{m}{n} = \frac{11}{12} = 0,92.$$

Результаты измерений параметра «выход по воде»

Номер измерения	X	$(x_i - \bar{x})^2$
1	61,15	0,166736
2	60,58	0,026136
3	60,77	0,000803
4	60,62	0,014803
5	60,90	0,025069
6	60,04	0,492336
7	60,64	0,010336
8	60,49	0,063336
9	60,44	0,091003
10	61,08	0,114469
11	60,92	0,031803
12	61,27	0,279136
Сумма	728,9	–
Среднее	60,74657	–

Точечная оценка надежности разрабатываемых РСЖО позволяет определять соответствие системы требованиям ТЗ на более ранних стадиях автономных испытаний.

Заключение. Проведенный анализ результатов расчета функциональной надежности БГДУ на этапе автономных испытаний с учетом вероятности безотказной работы 0,95, заданной в ТЗ, не подтвердил соответствия системы требованию назначения по производительности. Подтверждение возможности выполнения этого требования назначения также будет проведено на последующих этапах испытаний СПДУ. Однако уже на этапе автономных испытаний стало очевидно, что подтвердить выполнение требования назначения по производительности с учетом вероятности безотказной работы 0,95, заданной в ТЗ, на этапе наземной экспериментальной отработки системы будет проблематично, и поэтому потребуется корректировка ТЗ.

Требование по функциональной надежности СПДУ может быть сформулировано следующим образом: система должна обеспечивать выход воды по реакции гидрирования (реакции Сабатье) не менее 60 г/ч в течение заданного времени (определяемого гарантийным сроком службы и задаваемого в ТЗ) с вероятностью 0,92 при подаче в блок 40 дм³/ч диоксида углерода и 160 дм³/ч водорода.

Предложенный подход к оценке функциональной надежности СПДУ на этапах наземной экспериментальной отработки необходимо применять и для других вновь разрабатываемых РСЖО.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Махитыко В.П., Засканов В.Г., Савин М.В. Методы оценки показателей надежности изделий по результатам испытаний и эксплуатации. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2011, т. 13, № 6, с. 293–299.
- [2] Шубинский И.Б. *Функциональная надежность информационных систем. Методы анализа*. Москва, Журнал Надежность, 2012, 296 с.
- [3] Гаранин А.И. О функциональной надежности информационных систем. *Информационные технологии в науке, образовании и управлении*, 2008, № 2, с. 45–50.
- [4] ГОСТ 24.701–86. *Надежность автоматизированных систем управления. Основные положения*. Москва, Изд-во стандартов, 2009, с. 4.
- [5] Глебов И.В., Курмазенко Э.А., Романов С.Ю., Железняков А.Г. Прогнозирование функционирования перспективной системы обеспечения газового состава для длительных пилотируемых космических полетов. *Труды МАИ*, 2014, № 73, с. 5–8. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=48477> (дата обращения 16.03.2020).
- [6] Глебов И.В., Коган И.Л. Имитационное моделирование при проектировании регенерационных систем жизнеобеспечения пилотируемого космического аппарата. *Космическая техника и технологии*, 2017, № 4 (19), с. 89–94.
- [7] Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. *Математические методы в теории надежности: Основные характеристики надежности и их статистический анализ*. Москва, Либроком, 2013, с. 133.
- [8] Шубинский И. Б. *Структурная надежность информационных систем. Методы анализа*. Москва, Журнал Надежность, 2012, 216 с.
- [9] Кобзарь А.И. *Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников*. Москва, Физматлит, 2006, 816 с.
- [10] Глебов И.В., Коган И.Л. Об адекватности имитационной модели функционирования системы переработки диоксида углерода обитаемых космических объектов. *Космическая техника и технологии*, 2018, № 3 (22), с. 113–119.

Статья поступила в редакцию 08.05.2020

Ссылку на статью просим оформлять следующим образом:

Глебов И.В., Митрюхин А.Д. О функциональной надежности регенерационных систем жизнеобеспечения пилотируемых космических аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 6.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-6-1987>

Глебов Игорь Васильевич — канд. техн. наук, заместитель начальника отделения ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва». e-mail: igor.glebov4@rsce.ru

Митрюхин Александр Дмитриевич — инженер-конструктор, аспирант ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва». e-mail: aleksandr.mitryukhin@rsce.ru

On the functional reliability of the regenerative life support systems for manned spacecraft

© I.V. Glebov, A.D. Mitryukhin

S.P. Korolev Rocket and Space Corporation “Energia”,
Korolyov town, 141070, Russia

The paper considers two classes of problems concerned with reliability of manned spacecraft regenerative life-support system (RLSS) on the stages of design, testing and operation, as well as the approach to the definition of “functional reliability” as a component of the general reliability theory as opposed to the “structural reliability”. General methods for calculating the reliability of technological systems at all stages of their life cycle are considered. Mathematical models of functional, structural, and overall reliability of a manned spacecraft RLSS are proposed. Based on the results of independent tests of the carbon dioxide processing system, calculations of the functional reliability of the unit for the hydrogenation of carbon dioxide are performed. The unit is being developed for use in the manned spacecraft RLSS. The article also presents the conclusions on the analysis of the results of the calculation of functional reliability for the carbon dioxide hydrogenation unit.

Keywords: *regenerative life-support system, functional reliability, structural reliability, carbon dioxide hydrogenation unit, requirements defined by purpose, mathematical model of reliability*

REFERENCES

- [1] Makhitko V.P., Zaskanov V.G., Savin M.V. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk — Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2011, vol. 13, no. 6, pp. 293–299.
- [2] Shubinsky I.B. *Funktsionalnaya nadezhnost informatsionnykh sistem. Metody analiza* [Functional reliability of information systems. Methods of analysis]. Moscow, “Zhurnal Nadezhnost” Publ., 2012, 296 p.
- [3] Garanin A.I. *Informatsionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i upravlenii (Information technology in science, education and management)*, 2008, no. 2, pp. 45–50.
- [4] *GOST 24.701–86. Nadezhnost avtomatizirovannykh sistem upravleniya. Osnovnyye polozeniya* [State Standard 24.701–86. Reliability of automated control systems. The main provisions]. Moscow, Standartinform Publ., 2009.
- [5] Glebov I.V., Kurmazenko E.A., Romanov S.Yu., Zheleznyakov A.G. *Trudy MAI (Proceedings of Moscow Aviation Institute)*, 2014, no. 73, pp. 5–8. Available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=48477> (accessed March 16, 2020).
- [6] Glebov I.V., Kogan I.L. *Kosmicheskaya nauka i tekhnologiya — Space Science and Technology*, 2017, no. 4 (19), pp. 89–94.
- [7] Gnedenko B.V., Belyayev Yu.K., Solovyev A.D. *Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti: Osnovnye kharakteristiki nadezhnosti i ikh statisticheskiy analiz* [Mathematical methods in the theory of reliability: The main characteristics of reliability and their statistical analysis]. Moscow, Librokom Publ., 2013.
- [8] Shubinsky I.B. *Strukturnaya nadezhnost informatsionnykh sistem. Metody analiza* [Structural reliability of information systems. Methods of analysis]. Moscow, “Zhurnal Nadezhnost” Publ., 2012, 216 p.

- [9] Kobzar A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* [Applied Mathematical Statistics. For engineers and scientists]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006, 816 p.
- [10] Glebov I.V., Kogan I.L. *Kosmicheskaya nauka i tekhnologiya — Space Science and Technology*, 2018, no. 3 (22), pp. 113–119.

Glebov I.V., Cand. Sc. (Eng.), Deputy Head of the Division, S.P. Korolev Rocket and Space Corporation “Energia”. Research interests: calculations of the reliability of functional systems of spacecraft, simulation. e-mail: igor.glebov4@rsce.ru

Mitryukhin A.D., Design Engineer, Post-graduate Student, S.P. Korolev Rocket and Space Corporation “Energia”. Research interests: calculations of the reliability of functional systems of spacecraft, simulation. e-mail: aleksandr.mitryukhin@rsce.ru