



Научная статья

УДК 629.7.08

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=187451>

EDN: <https://www.elibrary.ru/FKPVUY>

**МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К СОСТАВУ ПРИБОРНОЙ БАЗЫ  
ЛАБОРАТОРИИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

**А.М. Астанков<sup>ORCID</sup>, С.Ф. Стельмах<sup>✉ ORCID</sup>, Н.В. Головчинская<sup>ORCID</sup>**

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

г. Санкт-Петербург, Россия

✉ [vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru)

---

**Цитирование:** Астанков А.М., Стельмах С.Ф., Головчинская Н.В. Методика обоснования требований к составу приборной базы лаборатории неразрушающего контроля технологического оборудования наземной космической инфраструктуры // Труды МАИ. 2026. № 146. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=187451>

---

**Аннотация.** В работе показано, что в настоящее время в условиях необходимости увеличения количества пусков ракет-носителей, усложнения современного технологического оборудования космодромов, ужесточения режимов его функционирования, влияющих на срок службы современной техники, проблема обеспечения эффективной, надежной и безопасной эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры становится крайне актуальной. При этом, проведение таких мероприятий, как неразрушающий контроль технического состояния, прогнозирование остаточного ресурса технологического оборудования, своевременная частичная замена его компонентов и их ремонт, результатом которых является увеличение сроков службы указанных объектов, становятся экономически и технически целесообразными.

В статье рассмотрены основные виды и методы неразрушающего контроля технологического оборудования объектов наземной космической инфраструктуры.

Показана актуальность разработки методики обоснования требований к составу приборной базы лаборатории неразрушающего контроля, практическая реализация которой направлена на формирование комплекта диагностического оборудования, решающего задачи оценивания технического состояния объектов контроля с наибольшей эффективностью. Предлагаемая в работе методика основана на применении математических моделей, в которых используются нормализованные оценки средневзвешенных показателей привлекательности диагностического оборудования. Показана практическая значимость разработанной методики и сформулированы рекомендации по ее применению.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, технологическое оборудование, наземная космическая инфраструктура, техническое состояние, приборная база, диагностическое оборудование, оценки, показатели, альтернативы

---

## METHODOLOGY FOR JUSTIFYING THE REQUIREMENTS FOR THE INSTRUMENT BASE OF THE NON-DESTRUCTIVE TESTING LABORATORY OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT FOR GROUNDBASED SPACE INFRASTRUCTURE

A.M. Astankov<sup>ORCID</sup>, S.F. Stelmakh<sup>✉</sup><sup>ORCID</sup>, N.V. Golovchinskaya<sup>ORCID</sup>

Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia

✉ [vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru)

---

**Citation:** Astankov A.M, Stelmakh S.F, Golovchinskaya N.V. Methodology for justifying the requirements for the instrument base of the non-destructive testing laboratory of technological equipment for groundbased space infrastructure // Trudy MAI. 2026. No. 146. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=187451>

---

**Abstract.** The paper shows that at present, in conditions of the need to increase the number of launch vehicles, the complexity of modern technological equipment at spaceports, and stricter operating modes affecting the service life of modern technology, the problem of ensuring efficient, reliable and safe operation of ground-based space infrastructure facilities is becoming extremely urgent. At the same time, carrying out such measures as non-destructive testing of the technical condition, forecasting the remaining life of technological equipment, timely partial replacement of its components

and their repair, resulting in an increase in the service life of these facilities, become economically and technically feasible.

The article discusses the main types and methods of non-destructive control of technological equipment of groundbased space infrastructure facilities, which allow for the examination of materials or parts, assemblies, in order to assess their integrity, properties, composition, and measurement of geometric characteristics by detecting and localizing defects and measuring their parameters using methods that do not impair the subsequent operation, suitability, and reliability. The specified methods are implemented using various non-destructive control devices, the set of which is currently characterized by a large nomenclature and variety of corresponding measuring instruments, having different technical, cost characteristics and parameters of functioning.

The relevance of developing a methodology for substantiating the requirements for the composition of the instrument-dase of the non-destructive control laboratory has been shown, the practical implementation of which is aimed at the formation of a set diagnostic equipment that solves the tasks of assessing the technical condition of control objects with the greatest efficiency, as well as predicting the remaining life of the elements, systems, timely partial replacement of maintenance components and their repair, which result in an increase in the service life of groundbased space infrastructure facilities, become economically and technically feasible. The proposed methodology is based on the use of mathematical models that use normalized estimates of weighted averages for the attractiveness of diagnostic laboratory equipment, such as reliability, sensitivity, accuracy, informativeness, performance, cost, safety, and others. The practical significance of the developed methodology is shown and recommendations for its application are formulated.

**Keywords:** non-destructive testing, technological equipment, ground-based space infrastructure, technical condition, instrument base, diagnostic equipment, evaluations, indicators, alternatives.

---

## Введение

В настоящее время обеспечение эксплуатационной надежности и безопасности технологического оборудования (ТО) объектов наземной космической инфраструктуры (ОНКИ) приобретает особую актуальность в связи с усложнением современных конструкций, интенсификацией режимов их работы и ростом циклических нагрузок, оказывающих существенное влияние на ресурс техники [1]. В связи с этим комплекс мероприятий, включающий контроль технического состояния (ТС), прогнозирование статочного ресурса элементов, а также своевременную замену и ремонт компонентов ТО, приобретает экономическую и техническую целесообразность, поскольку позволяет увеличить сроки службы ОНКИ.

Как показано в [2–6], основными методами определения ТС узлов и агрегатов ТО ОНКИ являются методы неразрушающего контроля (НК), представляющие совокупность физических методов исследования, позволяющих выявлять дефекты без нарушения целостности объекта и сохранения его эксплуатационных характеристик. При этом современный рынок приборов НК отличается широкой номенклатурой средств измерений и диагностики, варьирующихся по техническим, стоимостным характеристикам и эксплуатационным параметрам. Данное многообразие обуславливает высокую актуальность решения задачи научно обоснованного выбора состава приборной базы лаборатории НК ТО ОНКИ.

Коллективом авторов военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского разработана методика обоснования требований к составу приборной базы лаборатории НК ТО ОНКИ.

Функциональная схема лаборатории НК ТО объектов ОНКИ представлена на рисунке 1 (разработана авторами).

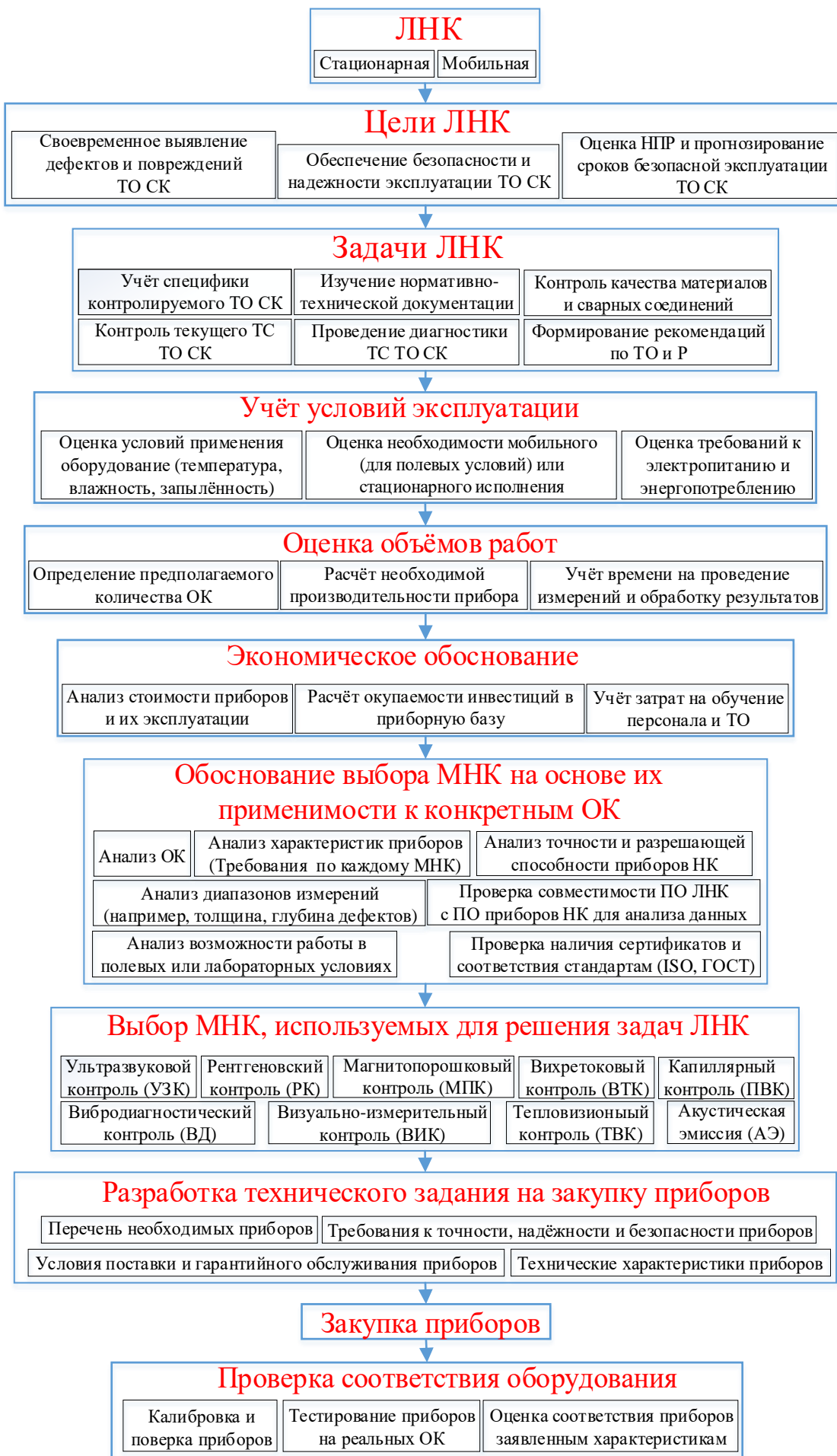


Рисунок 1 – Функциональная схема лаборатории НК ТО объектов НКИ

Национальным стандартом ГОСТ Р 56542-2019 определены следующие виды и методы НК: ультразвуковой, акустико-эмиссионный, вихретоковый, магнитопорошковый, визуально-оптический, радиационный и др. [7].

Математические модели формирования состава приборной базы лаборатории НК ТО объектов НКИ

Обоснование состава приборной базы лаборатории НК сводится к выбору определенных диагностических средств из множества однотипных образцов. Критерием отбора при этом выступает принцип их рационального использования для наиболее эффективного выполнения лабораторией своих целевых задач.

Обозначим через  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$  множество доступных альтернатив (однотипных средств НК), а через  $K = \{k_1, \dots, k_m\}$  – множество показателей их оценки. В таком случае задача оптимизации заключается в выделении из дискретного множества  $X$  альтернативы, наилучшим образом удовлетворяющей совокупности критериев, сформированных на основе показателей  $K$ .

Как показано в [3, 4], формирование множества указанных показателей является ключевым этапом решения оптимизационной задачи, который должен базироваться на анализе технических характеристик диагностического оборудования и его потребительских свойств (включая экономическую целесообразность). При этом показатели подразделяются на количественные (выражаемые численно) и качественные (описываемые в категориальных терминах). Для построения математических моделей принятия решения качественные показатели, как правило, преобразуются в количественные эквиваленты.

Оценка однотипных образцов средств измерений и диагностики по качественным показателям базируется на сопоставлении их технологических возможностей и, как следствие, нередко носит субъективный характер, выражаемый в бинарных категориях «лучше/хуже». Рассмотрим ситуацию: два средства НК обладают сопоставимым функционалом программного обеспечения (ПО), но различаются интерфейсом, тогда как у третьего образца ПО отсутствует. По показателю «ПО» первые две альтернативы заведомо предпочтительнее третьей, однако в силу близости характеристик первых двух образцов по данному

показателю их ранжирование затруднено. В подобных случаях количественные оценки привлекательности данных альтернатив по рассматриваемому критерию целесообразно уравнивать. Если же приоритетность данного показателя в общей системе критериев высока, то даже при максимальной близости функционала допускается их дифференцированное масштабирование [4].

В ряде случаев квантификация качественных показателей по упорядоченной шкале не представляет сложности. Например, для приборов, реализующих вибродиагностический метод НК такой показатель, как «взрывозащищенное исполнение», регламентируется ГОСТ Р 51330.0-99 и обозначается символьной маркировкой (например, 1Ex[ib]sIIAT4X и 2ExnLIIBT6X). Анализ структуры маркировки показывает, что первый символ кодирует уровень взрывозащиты, что позволяет однозначно сопоставить данному качественному показателю количественную оценку.

Таким образом, качественные показатели характеризуют преимущественно эксплуатационную технологичность диагностического оборудования: трудоемкость, обслуживания, степень унификации, удобство эксплуатации, универсальность применения и проч.

Показатели количественной оценки диагностического оборудования лаборатории НК делятся на технические, оперативные и экономические.

Необходимо учитывать возможную корреляцию между показателями: увеличение (уменьшение) одного может вызывать соответствующее изменение другого. В таких случаях зависимый показатель лучше исключить, чтобы не создавать избыточность данных в математической модели [8].

Исходя из условий эксплуатации средств диагностики на ОНКИ, можно сформулировать перечень общих показателей для выбора наилучшей модели из однотипных при оптимизации состава приборной базы лаборатории НК (таблица 1).

Основные показатели оценки качества однотипных средств НК

Свойство	Тип показателя	Показатели свойства	Требования к показателю и его оценке
Надежность	Количественный	Среднее время безотказной работы Вероятность безотказной работы Ремонтопригодность Сохраняемость Коэффициент готовности Срок службы	Обязательны
Чувствительность	Количественный	Разрешающая способность Выявляемость дефектов Коэффициент чувствительности	Обязательны
Точность (достоверность)	Количественный	Относительная погрешность измерения Вероятность корректного измерения	Обязательны
Информативность	Количественный / Качественный	Определяется функциональными возможностями сбора и обработки информационных параметров	Рекомендуемы
Оперативность (производительность)	Количественный	Среднее время: – подготовки прибора к измерениям; – регистрация диагностического параметра; – обработки и интерпретации результата измерения	Рекомендуемы
Стоимость	Количественный	Затраты: – на приобретение; – на эксплуатацию; – на ремонт	Обязательны
Безопасность	Количественный	Взрывозащищенное исполнение Степень (класс) защиты от факторов окружающей среды (температурная, пыле- и влагозащищенность)	Желательны
Конструктивное исполнение	Количественный / Качественный	Габаритные размеры Масса Транспортабельность	Обязательны
Режимы работы	Количественный	Рабочая температура Рабочее давление Рабочая влажность Устойчивость к электромагнитным помехам (для электроприборов) Длительность автономной работы	Обязательны
Простота (эргономичность)	Качественный	Экспертная оценка	Рекомендуемы
Универсальность	Количественный	Коэффициент универсальности	Рекомендуемы

**Замечание:** здесь и далее под основным показателем качества понимается комплексный критерий, который может включать несколько частных оценочных характеристик рассматриваемого оборудования.

В таблице 1 приведен лишь базовый перечень общих показателей оценки качества однотипных средств НК, рекомендуемых для учета при выборе наиболее приемлемой альтернативы. Применительно к конкретным типам средств измерений состав дополнительных показателей определяется технической документацией и зависит от их назначения, реализованного метода дефектоскопии, а также заложенного эксплуатационного функционала.

Основным источником информации для выбора количественных и качественных показателей оценки диагностического оборудования служит техническая и эксплуатационная документация на соответствующее средство НК. Однако некоторые важные показатели качества могут отсутствовать в паспортных данных или не приводиться в явном виде. Согласно [3, 4, 8], в таких случаях рекомендуется определять их экспериментально либо рассчитывать на основе доступных исходных данных. Например, показатель «вероятность безотказной работы»  $P(t)$  (рисунок 2), характеризующий надежность оборудования может быть вычислен с использованием интенсивности отказов  $\lambda$  которая обычно указывается в паспорте. Расчет проводится по выражению [9]:

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (1)$$

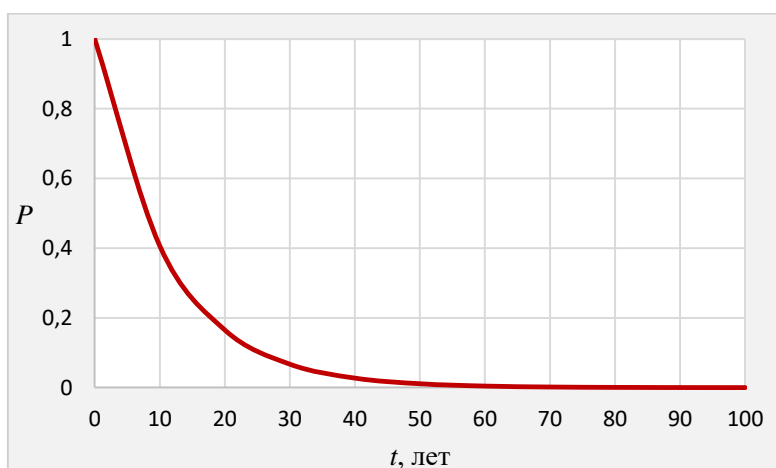


Рисунок 2 – График функции  $P(t)$  при  $\lambda = 0,1$  года-1

Методы расчета экономических, оперативных и технических показателей качества сложных технических систем подробно изложены в работах [9–12], а также регламентированы соответствующими стандартами и нормативными документами [13–20].

В настоящей работе предлагается рассмотреть следующий подход к разработке математической модели, предназначенной для оптимизации состава приборной базы лаборатории НК.

Многообразие однотипных средств НК и большое число показателей для их сравнительной оценки позволяют рассматривать описанное выше множество альтернатив  $X$  как множество Парето. Его ключевая особенность заключается в отсутствии альтернативы, доминирующей над остальными по всем показателям одновременно. Выбор наиболее предпочтительного варианта из множества Парето представляет собой сложную задачу, не имеющую абсолютно оптимального решения. В связи с этим неизбежен компромисс, предполагающий предпочтение одних показателей привлекательности за счет других. Подобные задачи решаются, как правило, методами экспертных оценок. Одной из возможных стратегий выбора оптимальной альтернативы из множества однотипных средств НК при формировании приборной базы лаборатории НК является принятие решения в условиях определенности на основе средневзвешенных показателей привлекательности диагностических средств.

Обозначим оценку  $i$ -ой альтернативы из множества  $X$  по  $j$ -му показателю из множества  $K$ , как  $G_{ij}$ . Тогда матрица оценок размерностью  $m \times n$  будет описываться следующим выражением:

$$G_{mn} = \begin{bmatrix} G_{11} & \dots & G_{1n} \\ \dots & G_{ij} & \dots \\ G_{m1} & \dots & G_{mn} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $m$  – количество альтернатив;  $n$  – количество показателей.

Как правило, в данной матрице степень важности (приоритет) одних показателей по сравнению с другими будет выше, так как последние оказывают большее влияние на принятие решения, то есть являются более весомыми (предпочтительными) при оценке альтернативы в целом. Веса показателей

определяются на основе экспертных оценок, поэтому процесс их взвешивания (агрегирования) носит в большей степени субъективный характер. Вместе с тем в настоящее время существует большое количество методов по расчету весов соответствующих показателей, которые позволяют существенно снизить меру субъективности при определении последних [21].

Определим вес  $j$ -го показателя переменной  $W_j$  (является безразмерной величиной). Тогда вектор-столбец значений весов может быть описан следующими выражениями:

$$\begin{bmatrix} G_{11} & \dots & G_{1n} \\ \dots & G_{ij} & \dots \\ G_{m1} & \dots & G_{mn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} W_1 \\ \dots \\ W_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} \cdot W_1 + \dots + G_{1n} \cdot W_n \\ \dots \\ G_{m1} \cdot W_1 + \dots + G_{mn} \cdot W_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ \dots \\ F_m \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$F_i = \sum_{j=1}^n G_{ij} \cdot W_j, \quad i=1,2,\dots,m, \quad (4)$$

где  $F_i$  – функция полезности (целевая функция) для  $i$ -ой альтернативы.

В целях принятия оптимального решения необходимо рассчитать значения целевых функций для каждой альтернативы и в качестве лучшего решения выбрать ту альтернативу, для которой функция полезности максимальна (минимальна).

При этом в матрице, описываемой выражением (2), показатели оценки различных критериев будут иметь разную размерность, поэтому необходимо выполнить нормализацию показателей, то есть привести их к безразмерному виду для корректного сравнения и использования последних в целевой функции. Кроме того, одни показатели в матрице (2) подлежат максимизации, то есть чем больше значение показателя, тем лучше, а другие – минимизации, то есть чем меньше значение показателя, тем лучше.

Как показано в работах [21–24], наиболее предпочтительным способом нормализации данных разной размерности при решении оптимизационных задач является минимаксный метод. Так, для максимизации рассматриваемых показателей используется следующее выражение:

$$G'_{ij} = \frac{G_{ij} - G_{\min(j)}}{G_{\max(j)} - G_{\min(j)}}, \quad (5)$$

где  $G'_{ij}$  – нормализованное значение показателя  $i$ -й альтернативы по  $j$ -му показателю;  $G_{\min(j)}$  – минимальное значение  $j$ -го показателя по альтернативам;  $G_{\max(j)}$  – максимальное значение  $j$ -го показателя по альтернативам.

При минимизации показателей применяется следующее выражение:

$$G'_{ij} = \frac{G_{\max(j)} - G_{ij}}{G_{\max(j)} - G_{\min(j)}}. \quad (6)$$

В данных преобразованиях независимо от того, ведется ли максимизация или минимизация показателей, альтернативе, имеющей наилучший показатель привлекательности, присваивается значение 1, наименее привлекательной – значение 0. При этом остальные альтернативы имеют промежуточные значения.

Вместе с тем данный подход при выборе наиболее предпочтительного состава диагностического оборудования из множества однопольных образцов может привести к неверному решению при анализе рассчитанных значений функций полезности. Приведем пример. Пусть сравниваются две альтернативы A1 и A2 по таким показателям, как «надежность» и «достоверность» (таблицы 2 и 3).

Таблица 2

Исходные данные для расчета значений функции полезности

Альтернативы	Надежность	Достоверность
	W=0,4	W=0,6
A1	0,2	7
A2	7	6,8

Таблица 3

Нормализованные данные и значения функции полезности

Надежность	Достоверность	F
W=0,4	W=0,6	
0	1	0,6
1	0	0,4

Анализ приведенных в таблицах 2 и 3 данных показывает, что у рассматриваемых альтернатив значения критериев привлекательности по показателю «достоверность» практически одинаковые, а по показателю

«надежность» существенным образом различаются. При этом весовые коэффициенты имеют схожие значения с небольшим приоритетом по показателю «достоверность». Тогда по значениям функций полезности F следует выбрать альтернативу A1 в качестве оптимальной, но данное решение противоречит здравому смыслу, так как предпочтительной становится альтернатива с низким значением критерия по показателю «надежность». При этом альтернатива A2 с высоким показателем надежности и с достоверностью, сравнимой с альтернативой A1, отвергается.

Аналогичная ситуация возникает, когда для нормализации применяется формула z-масштабирования [21]:

$$G'_{jj} = \frac{G_{ij} - \mu_j}{\sigma_j}, \quad (7)$$

где  $\mu_j$  – среднее арифметическое распределения показателей по j-му показателю;  
 $\sigma_j$  – стандартное отклонение распределения показателей по j-му показателю.

Указанные противоречия могут быть нивелированы путем применения выражений абсолютного масштабирования. Так, для максимизации показателей целесообразно использовать следующее выражение:

$$G'_{jj} = \frac{|G_{ij}|}{|G_{\max(j)}|}. \quad (8)$$

В случае минимизации применяется следующая формула:

$$G'_{jj} = 1 - \frac{|G_{ij}|}{|G_{\max(j)}|}. \quad (9)$$

При использовании выражений (8) и (9) данные, представленные в таблице 3, трансформируются в значения, приведенные в таблице 4.

Нормализованные данные и значения функции полезности

Надежность	Достоверность	F
W=0,4	W=0,6	
0,03	1	0,61
1	0,97	0,98

После выполнения описанных выше преобразований матрица, представленная выражением (2), трансформируется в матрицу с нормализованными показателями оценки однотипных диагностических средств

$$G'_{mn} = \begin{bmatrix} G'_{11} & \dots & G'_{1n} \\ \dots & G'_{ij} & \dots \\ G'_{m1} & \dots & G'_{mn} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

и имеет следующий вид:

При этом функция полезности для  $i$ -ой альтернативы может быть представлена следующим выражением:

$$F'_i = \sum_{j=1}^n G'_{ij} \cdot W_j, \quad i=1,2,\dots,m \quad (11)$$

К основным экспертным мероприятиям, выполняемым в процессе подготовки данных для решения рассматриваемой в данной работе оптимизационной задачи, относятся следующие:

- выбор показателей оценки привлекательности приборов НК и их ранжирование по важности (приоритету);
- присвоение качественным показателям численных значений;
- формирование для каждого показателя качества средств измерений минимальных требований (ограничений) к его значениям;
- вычисление значений весовых коэффициентов локальных показателей в

соответствии с их важностью по правилу фиксированной суммы, т.е.  $\sum_{j=1}^n W_j = \text{const}$ .

Требования к ранжированию показателей оценки оборудования лаборатории НК по приоритету, которые в конечном итоге определяют их вес,

могут значительно различаться в зависимости от целей формирования приборной базы, а именно:

- формирование приборной базы НК для мирной (стабильной) военно-политической обстановки (ВПО);
- формирование приборной базы НК для обстановки военной опасности (угрозы).

Так, например, для периода военной опасности на первый план выдвигаются требования по повышению оперативности (производительности), точности и чувствительности приборов НК. Требования же к другим показателям (стоимости, эргономичности, универсальности и проч.) могут быть существенно снижены. Поэтому для различных периодов ВПО должна быть реализована своя математическая модель оптимального выбора приборов НК из множества подобных альтернатив:  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ .

В формализованном виде задача оптимизации состава диагностических средств лаборатории НК для мирной ВПО (модель 1) описывается следующим комплексом выражений:

$$\begin{cases} F'_i = \sum_{j=1}^n G'_{ij} \cdot W_j \rightarrow \max, & i = 1, 2, \dots, m; \\ \sum_{j=1}^n W_j = \text{const}; \\ G_j \geq R_j, \end{cases} \quad (12)$$

где  $W_j$  – вес  $j$ -го показателя диагностического средства для мирной ВПО;  $R_j$  – установленное экспертным путем граничное условие (минимальное значение) для  $j$ -го показателя оценки качества оборудования НК (в условных единицах измерения – для качественных показателей, в натуральных единицах – для количественных показателей,).

В формализованном виде задача оптимизации формирования приборной базы для периода военной опасности (модель 2) может быть представлена с помощью следующего комплекса выражений:

$$\begin{cases} F'_i = \sum_{j=1}^n G'_{ij} \cdot W'_j \rightarrow \max, & i = 1, 2, \dots, m; \\ \sum_{j=1}^n W'_j = \text{const}; \\ G_j \geq R_j, \end{cases} \quad (13)$$

где  $W'_j$  – вес  $j$ -го показателя прибора НК для ВПО в условиях военной опасности.

Если диагностическое средство не удовлетворяет граничному условию по любому из показателей, его исключают из дальнейшего рассмотрения в качестве альтернативы.

Наиболее сложным аспектом при решении рассматриваемой в работе задачи является вычисление весов локальных показателей с учетом их уровня предпочтения. При этом, как показано в работе [21], простым и эффективным способом их вычисления является метод базового показателя. Его вариант при

условии фиксированной суммы ( $\sum_{j=1}^n W_j = 1$ ) может быть рассмотрен следующим образом.

Множество локальных показателей дифференцируют по степени важности на  $k$  сегментов, при этом данные сегменты могут содержать от 1 до  $n$  показателей. Самому младшему (базовому) сегменту, содержащему несущественные показатели, присваивают минимальное значение ранга  $\omega_k$  равное 1. Остальным сегментам присваивают значения рангов в соответствии со степенью превосходства их показателей относительно показателей базового сегмента.

Веса показателей базового сегмента  $W_k$  вычисляются с помощью следующего выражения:

$$W_k = \frac{1}{\sum_{i=1}^k \omega_i}. \quad (14)$$

Веса показателей  $i$ -ого сегмента  $W_i$  вычисляются на основе следующей формулы:

$$W_i = W_k \cdot \omega_i. \quad (15)$$

Данный способ вычисления значений весовых коэффициентов позволяет задавать численное значение ранга  $\omega_i$  для сегмента самых значимых показателей, определяющего их приоритет над наименее значимыми показателями.

В работе [21] рассмотрены различные способы вычисления значений весовых коэффициентов, к основным из которых относятся методы попарного сравнения коэффициентов, методы на основе анализа взаимосвязей показателей важности оценочных критериев и формальные методы. В связи с тем, что каждому указанному методу присущи как свои достоинства, так и недостатки, крайне сложно сделать выбор в пользу одного из них на основе оценки средневзвешенных показателей предпочтения. В связи с этим целесообразно производить вычисление значений весов показателей одновременно разными (например, тремя описанными выше) способами. Далее, рассчитав значения целевых функций  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  по каждому из показателей, принимать соответствующее решение по их среднему значению, используя следующее выражение:

$$F = \frac{F_1 + F_2 + F_3}{3} \quad (16)$$

Алгоритм обоснования требований к составу приборной базы лаборатории НК ТО НКИ

Данный алгоритм в различные периоды ВПО включает в себя выполнение следующих этапов:

Этап 1. Определение множества альтернатив и показателей. Для этого необходимо сформировать множество всех доступных для анализа в качестве альтернатив однотипных средств измерений  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ , множество показателей оценки альтернативных вариантов  $K = \{k_1, \dots, k_m\}$ , а также определить соответствующие веса показателей, например,  $W_j$  – вес  $j$ -го показателя прибора НК для мирной ВПО,  $W'_j$  – вес  $j$ -го показателя прибора НК для условий военной опасности.

Этап 2. Формирование матрицы оценок  $G$  (выражение (2)).

Этап 3. Нормализация оценок  $G_{ij}$  для каждого показателя (выражения (8) – (10)).

Этап 4. Расчет значений целевой функции  $F_i$  для каждой альтернативы (выражения (12) – (13)).

Этап 5. Выбор оптимальной альтернативы с максимальным значением  $F_i$ .

Этап 6. Исключение альтернатив, не удовлетворяющих граничным условиям.

Этап 7. Расчет величин весов показателей методом базового показателя (выражения (14) – (15)).

Этап 8. Верификация результатов с использованием нескольких методов расчета весовых коэффициентов показателей.

Этап 9. Принятие решения исходя из средних значений целевой функции (выражение (16)).

Схема алгоритма обоснования требований к составу приборной базы лаборатории НК ТО НКИ представлена на рисунке 3 (разработана авторами).

Предлагаемая в публикации методика может быть использована для разработки технического задания на оснащение лаборатории НК ТО НКИ, при этом внедрение автоматизированных систем для расчета значений весовых коэффициентов и целевых функций повысит оперативность принятия соответствующих решений.

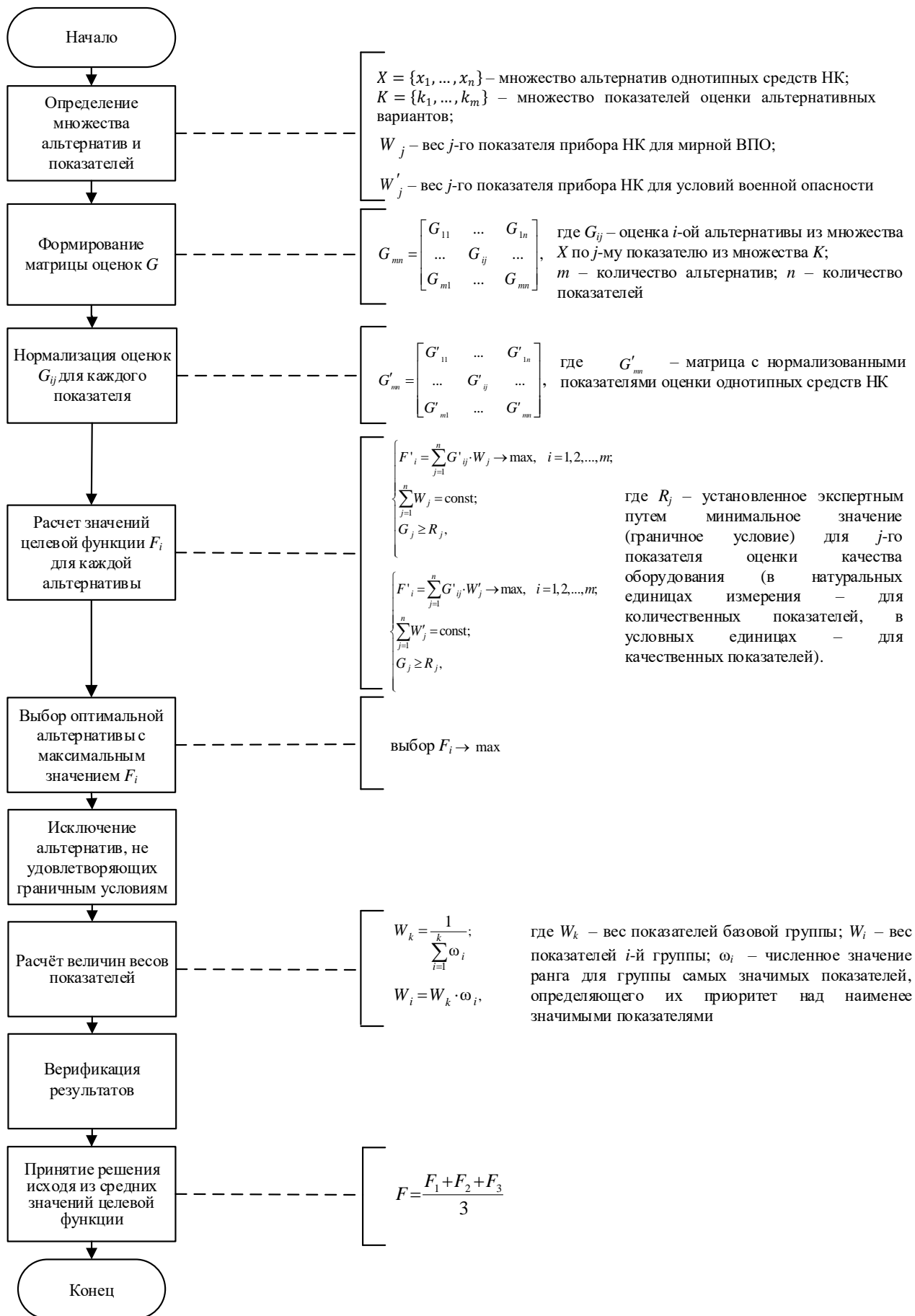


Рисунок 3 – Схема алгоритма обоснования требований к составу приборной базы лаборатории НК

## Заключение

В работе показано, что одними из основных методов определения технического состояния ТО НКИ являются методы НК, позволяющие провести исследования материалов или деталей, узлов, с целью оценки их целостности, свойств, состава и измерения геометрических характеристик путем обнаружения и локализации дефектов, измерения их параметров способами, не ухудшающими последующую эксплуатационную пригодность и надежность. Указанные методы реализуются с помощью различных приборов НК, множество которых характеризуется в настоящее время большой номенклатурой и разнообразием соответствующих средств измерений, имеющих различные технические, стоимостные характеристики и параметры функционирования.

В работе обоснована актуальность методики обоснования требований к составу приборной базы лаборатории НК ТО НКИ, позволяющей осуществить выбор наиболее предпочтительного состава диагностического оборудования на основе многокритериальной оценки характеристик и параметров функционирования последнего.

Предлагаемая в публикации методика основана на построении математических моделей, в которых применяются нормализованные оценки средневзвешенных показателей привлекательности диагностического оборудования, таких как надежность, чувствительность, точность, информативность, производительность, стоимость, безопасность и др. Реализация предложенной методики позволяет сформировать комплект диагностического оборудования, обеспечивающий решение всего спектра целевых задач по определению технического состояния контролируемого объекта с наибольшей эффективностью.

Таким образом, представленная методика может быть использована для обоснования требований к составу приборной базы лаборатории НК ТО НКИ в целях выполнения конкретных задач определения ТС объектов контроля, а также при проведении оценивания эффективности применения диагностических средств по назначению.

---

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

## Список источников

1. Медведев А.А. Инновационные подходы при создании ракетно-космической техники : монография. 2-е изд. М. : Издательство «Доброе слово и Ко», 2020. 400 с.
2. Неразрушающий контроль и диагностика : справочник / под ред. В.В. Ключева. М. : Машиностроение, 1995. 488 с.
3. Ерофеев М.Ю. Способы повышения эффективности системы неразрушающего контроля объектов наземной космической инфраструктуры с использованием ранжированных сетевых моделей / Aviation, space-rocket hardware. Королев, 2016. С. 10–14.
4. Методы и средства визуально-измерительного контроля труднодоступных узлов ракетно-космической техники / В.И. Батшев, А.С. Мачихин, А.В. Горевой и др. // Современные методы технической диагностики и неразрушающего контроля деталей и узлов. 2022. № 2. С. 27–36.
5. Волков В.М. Надежность машин и тонкостенных конструкций. Н. Новгород : издательство ИГТУ, 2011. 365 с.
6. Острейковский В.А. Теория надежности. М. : Высшая школа, 2003. 464 с.
7. ГОСТ Р 56542-2019. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. М. : Стандартинформ, 2019. 12 с. Дата введения: 30.10.2019.
8. Крайний В.И. Разработка метода комплексирования информации многопараметрового неразрушающего контроля для обнаружения внутренних дефектов сложных конструкций // Наука и образование : науч. изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2018. № 10. С. 253–268.

9. Розенберг И.Н., Замышляев А.М., Прошин Г.Б. Совершенствование системы управления содержанием эксплуатационной инфраструктуры с применением современных информационных технологий // Надежность. 2009. № 4. С. 14–22.
10. Сапожников В.В., Лыков А.А., Ефанов Д.В. Понятие предотказного состояния // Автоматика, связь, информатика. 2011. № 12. С. 6–8.
11. Машиностроение : энциклопедия в 40 т. Т. III-7: Измерения, контроль, испытания и диагностика / под ред. В.В. Ключева. М. : Машиностроение, 1996. 464с.
12. Острейковский В.А. Старение и прогнозирование ресурса оборудования атомных станций. М. : Энергоатомиздат, 1994. 204 с.
13. РМГ 115-2019. Государственная система обеспечения единства измерений. Калибровка средств измерений. Алгоритмы обработки результатов измерений и оценивания неопределенности : рекомендации по межгосударственной стандартизации / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. М. : Стандартинформ, 2019. 35 с. Дата введения: 30.09.2019.
14. ГОСТ Р 56512-2015. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. Типовые технологические процессы: национальный стандарт Российской Федерации / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. М. : Стандартинформ, 2016. 60 с. Дата введения: 06.07.2015.
15. ГОСТ 23660-79. Система технического обслуживания и ремонта техники. Обеспечение ремонтпригодности при разработке изделий / Государственный комитет СССР по стандартам. М. : 1979. 26 с. Дата введения: 28.05.1979.
16. ГОСТ 21623-76. Система технического обслуживания и ремонта техники. Показатели для оценки ремонтпригодности. Термины и определения: межгосударственный стандарт / Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР. М. : 1979. 14 с. Дата введения 09.03.1979.
17. ГОСТ 22952-78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Методы расчета показателей ремонтпригодности по статистическим

данном / Государственный комитет СССР по стандартам. М. : 1978. 26 с. Дата введения: 28.05.1978.

18. МИ 1317-2004. Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров : рекомендация / Федеральное государственное унитарное предприятие ВНИИ метрологической службы. М. : 2004. 53 с. Дата введения: 28.12.2002.

19. ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч. 6. Использование значений точности на практике / Госстандарт России. М. : Стандартинформ, 2009. 50 с. Дата введения: 23.04.2002.

20. ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения : национальный стандарт Российской Федерации / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. М. : Стандартинформ, 2011. 27 с. Дата введения 13.12.2011.

21. Постников В.М., Спиридонов С.Б. Методы выбора весовых коэффициентов локальных критериев // Наука и образование : науч. изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 6. С. 267–287.

22. Минимизация потенциальной экологической опасности при размещении отходов / И.Л. Манжуров, Д. Берг, Б.А. Коробицын и др. // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. URL: <http://www.scienceeducation.ru/119-15034>.

23. Шамсутдинова Т.М. Лабораторные работы. Методы поддержки принятия решений : методические указания. Уфа : Издательство Башкирского государственного аграрного университета, 2018. 14 с.

24. Human development report 2011. Sustainability and equity: a better future for all. NY : United Nation Development Programme, 2011. 185 p.

## References

1. Medvedev A.A. *Innovatsionnye podkhody pri sozdanii raketno-kosmicheskoi tekhniki* [Innovative approaches at the development of rocket and space technology], monograph, 2nd edition, Moscow, izdatel'stvo "dobroe slovo i Ko", 2020, 400 p.
2. *Nerazrushayushchii kontrol' i diagnostika* [Non-destructive testing and diagnostics], handbook, ed. by V.V. Klyuev. Moscow, Mashinostroenie, 1995, 488 p.
3. Erofeev M.Yu. *Sposoby povysheniya effektivnosti sistemy nerazrushayushchego kontrolya ob'ektov nazemnoi kosmicheskoi infrastruktury s ispol'zovaniem ranzhirovannykh setevykh modelei* [Methods of increasing the efficiency of the non-destructive control system of ground-based space infrastructure facilities using ranked network models], Aviation, space-rocket hardware, Korolev, 2016. pp.10–14.
4. Batshev V.I., Machikhin A.S., Gorevoy A.V., Khokhlov D.D., Naumov A.A., Perfilov A.M., Kaloshin V.A. *Sovremennye metody tekhnicheskoi diagnostiki i nerazrushayushchego kontrolya detalei i uzlov*. 2022. pp.27–36.
5. Volk V.M. *Nadezhnost' mashin i tonkostennykh konstruktsii* [Reliability of machines and thin-walled structures]. Nizhny Novgorod, Publishing house of ISTU, 2011, 365 p.
6. Ostreikovskiy V.A. *Teoriya nadezhnosti* [Theory of reliability], Moscow, Vysshaya shkola, 2003, 464 p.
7. GOST R 56542-2019. *Kontrol' nerazrushayushchii. Klassifikatsiya vidov i metodov* [Non-destructive testing. classification of types and methods], Moscow, Standartinform, 2019, 12 p.
8. Krainy V.I. *Nauka i obrazovanie: nauch. izd. MGTU im. N.E. Baumana*, 2018, no. 10, pp. 253–268.
9. Rosenberg I.N. *Nadezhnost'*, 2009. no. 4. pp.14–22.
10. Sapozhnikov V.V. *Avtomatika, svyaz', informatika*, 2011, no. 12, pp. 6–8.
11. *Mashinostroenie: entsiklopediya v 40 t. T. III-7: Izmereniya, kontrol', ispytaniya i diagnostika* [Mechanical engineering: Encyclopedia in 40 vol. Vol. III -7: Measurements, control, testing and diagnostics], ed. by V.V. Klyuev, Moscow, Mechanical Engineering. 1996, 464 p.

12. Ostreikovskiy V.A. *Starenie i prognozirovaniye resursa oborudovaniya atomnykh stantsiy* [Aging and resource forecasting of nuclear power plant equipment], Moscow, Energotomizdat, 1994. 204 p.

13. RMG 115-2019. *Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenii. Kalibrovka sredstv izmerenii. Algoritmy obrabotki rezul'tatov izmerenii i otsenivaniya neopredelennosti: rekomendatsii po mezhgosudarstvennoi standartizatsii* [The state system of ensuring the uniformity of measurements. Calibration of measuring instruments. Algorithms for processing measurement results and estimating uncertainty: Recommendations on interstate standardization]: official publishing house, Moscow, Standartinform, 2019, 35 p.

14. GOST R 56512-2015. *Kontrol' nerazrushayushchii. Magnitoporoshkovyi metod. Tipovye tekhnologicheskie protsessy* [The control is non-destructive. The magnetic powder method. Standard technological processes], Moscow, Standartinform, 2016, 60p.

15. GOST 23660-79. *Sistema tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta tekhniki. Obespechenie remontoprigodnosti pri razrabotke izdelii* [The system of technical maintenance and repair of equipment. Ensuring maintainability during product development], Moscow, Gosudarstvennyi komitet SSSR po standartam, 1979, 26 p.

16. GOST 21623-76. *Sistema tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta tekhniki. Pokazateli dlya otsenki remontoprigodnosti. Terminy i opredeleniya: mezhgosudarstvennyi standart* [The system of technical maintenance and repair of equipment. Indicators for assessing maintainability. Terms and definitions], Moscow, Gosudarstvennyi komitet SSSR po standartam, 1979, 14 p.

17. GOST 22952-78. *Sistema tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta tekhniki. Metody rascheta pokazatelei remontoprigodnosti po statisticheskim dannym* [The system of technical maintenance and repair of equipment. Methods for calculating maintainability indicators based on statistical data], Moscow, Gosudarstvennyi komitet SSSR po standartam, 1978, 26 p.

18. MI 1317-2004. *Rekomendatsiya. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenii. Rezul'taty i kharakteristiki pogreshnosti izmerenii. Formy predstavleniya. Sposoby ispol'zovaniya pri ispytaniyakh obraztsov produktsii i kontrole ikh parametrov: rekomendatsiya* [Recommendation. The state system of ensuring the

uniformity of measurements. Measurement error results and characteristics. Forms of representation. Methods of use in testing product samples and monitoring their parameters: recommendation], Moscow, 2004. 53 p.

19. GOST R ISO 5725-6-2002. *Tochnost' (pravil'nost' i pretsizionnost') metodov i rezul'tatov izmerenii. CH. 6. Ispol'zovanie znachenii tochnosti na praktike* [Accuracy (correctness and precision) of measurement methods and results. Part 6. The use of accuracy values in practice], Moscow, Standartinform, 2009. 50 p.

20. GOST R 8.736-6-2011. *Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenii. Izmereniya pryamyie mnogokratnye. Metody obrabotki rezul'tatov izmerenii. Osnovnyie polozheniya : natsional'nyi standart Rossiiskoi Federatsii* [The state system of ensuring the uniformity of measurements. The measurements are direct and multiple. Methods of processing measurement results. The main provisions], Moscow, Standartinform, 2011, 27 p.

21. Postnikov V.M., Spiridonov S.B. *Nauka i obrazovanie : nauch. izd. MGTU im. N.E. Baumana*, 2015, no. 6, pp. 267–287

22. Manzhurov. I.L., Berg D., Korobitsyn B.A. et al. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2014, no. 6. Available at: <http://www.scienceeducation.ru/119-15034>.

23 Shamsutdinova. T. M. *Laboratornye raboty. Metody podderzhki prinyatiya reshenii : metodicheskie ukazaniya* [Laboratory work. Decision support methods. Methodological guidelines], Ufa, Bashkir state agrarian university publishing house, 2018, 14 p.

24. *Human development report 2011. Sustainability and equity: a better future for all*. NY, United Nation Development Programme, 2011. 185 p.

### **Информация об авторах**

**Алексей Михайлович Астанков**, начальник лаборатории(научно-исследовательской), Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9236-2292>; e-mail: [vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru)

**Станислав Феликсович Стельмах**, кандидат военных наук, старший научный сотрудник, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г.

Санкт-Петербург, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6146-4508>;  
e-mail: [vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru)

**Наталья Владимировна Головчинская**, научный сотрудник, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9425-8260>; e-mail: [vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru)

### Information about the authors

**Alexey M. Astankov**, Head of Research Laboratory, Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9236-2292>;  
e-mail: [vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru)

**Stanislav F. Stelmakh**, Candidate of Military Sciences, Senior Researcher, Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6146-4508>; e-mail: [vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru)

**Natalia V. Golovchinskaya**, Researcher, Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9425-8260>;  
e-mail: [vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru)

---

Получено 7 октября 2025 ● Принято к публикации 3 декабря 2025 ● Опубликовано 27 февраля 2026  
Received 7 October 2025 ● Accepted 3 December 2025 ● Published 27 February 2026

---