

Для цитирования

Михеев М.А. Разработка инструментария проектирования конструкций малых космических аппаратов нанокласса типа CubeSat под возможности серийной роботизированной сборки / III Научно-практическая конференция «Стандартизация: траектория науки», приуроченная ко Всемирному дню стандартов, Москва, 15 октября 2025 г. // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2025. № 6(87). С. 558–566.

УДК 658.51, 629.782

**РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТАРИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ
МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НАНОКЛАССА ТИПА CUBESAT ПОД
ВОЗМОЖНОСТИ СЕРИЙНОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ**

Михеев М.А., аспирант, Самарский государственный технический университет, Россия, г. Самара

В работе представлено комплексное решение по разработке инструментария проектирования конструкций малых космических аппаратов нанокласса типа CubeSat, адаптированных под серийную роботизированную сборку, включающее разработанную систему критериев оценки технологичности конструкций под возможности роботизированной сборки, разработанный алгоритм расчета показателей технологичности конструкции, классификацию требований и ограничений, методологию внедрения инструментария в процесс проектирования аппаратов и экономическое обоснование перехода к роботизированному производству.

Ключевые слова: организация производства, малые космические аппараты, CubeSat, роботизированная сборка, технологичность конструкции, космическая техника, производство.

**DEVELOPMENT OF DESIGN TOOLS FOR SMALL NANO-CLASS SPACECRAFT OF
THE CUBESAT TYPE FOR THE CAPABILITIES OF SERIAL ROBOTIC ASSEMBLY**

Mikheev M.A., postgraduate student, Samara State Technical University, Samara

The paper presents a comprehensive solution for the development of design tools for small nanoclass spacecraft of the CubeSat type, adapted for serial robotic assembly, including a system of criteria for evaluating the manufacturability of structures, an algorithm for calculating the integral index of manufacturability, a classification of requirements and limitations, a methodology for implementing tools in the design process and an economic justification for the transition to robotic production.

Keywords: small spacecraft, CubeSat, robotic assembly, adaptability of construction, space technology, space production.

Бурный рост рынка малых космических аппаратов нанокласса, особенно формата CubeSat, диктует необходимость поиска новых, более эффективных подходов к их производству. Традиционные методы сборки, основанные на ручном труде, становятся узким местом при переходе к созданию многочисленных спутниковых группировок, насчитывающих сотни и тысячи аппаратов. Одним из возможных решений данной проблемы является роботизация сборочных процессов аппаратов.

Проектирование конструкций CubeSat исторически ведется с ориентацией на максимальную функциональность в минимальном объеме и на минимальные массовые характеристики аппарата, без должного внимания к вопросам технологичности конструкции для возможности серийного изготовления. Это приводит к ситуациям, когда легкоосуществимые ручные операции сборки (например, установку нестандартного компонента в труднодоступное место, подключение миниатюрного коннектора и т.д.) невозможно оптимизировать за счет внедрения роботизированных комплексов.

В связи с этим актуальным решением данной проблемы являются разработка новых подходов к проектированию аппарата, разработка инструментария проектирования, который включает в себя различные организационно-технические решения, направленные на автоматизацию и роботизацию процессов производства, а именно:

1. Алгоритм оценки технологичности конструкции под возможности роботизированного производства.

2. Классификацию требований и ограничений к вновь разрабатываемым конструкциям малых космических аппаратов нанокласса типа CubeSat (МКА НК) под возможности роботизированного производства.

3. Рекомендации к проектированию МКА НК CubeSat.

В первую очередь был проведен анализ традиционных процессов проектирования МКА НК и сформированы критерии оценки технологичности конструкции МКА НК:

1. Коэффициент унификации – количественный показатель, отражающий долю стандартизированных (заимствованных, покупных) компонентов (модулей, блоков, сборочных единиц) и интерфейсов в конструкции изделия. Рассчитывается как отношение числа стандартных элементов к общему числу элементов.

$$K_{\text{униф}} = \left(\frac{N_{\text{стандартных}}}{N_{\text{общих}}} \right) \times 100\%$$

Он вводится из-за того, что разработка и изготовление уникальных деталей («кастомных решений») чрезвычайно дороги. Использование стандартных компонентов (блоки, платы и т.д.) резко снижает себестоимость, сокращает сроки проектирования с нуля и изготовления уникальных деталей. Стандартные компоненты есть в наличии у поставщиков. Также стандартные компоненты имеют отработанную и проверенную конструкцию, известные характеристики и режимы отказа.

2. Коэффициент стандартизации – количественный показатель, отражающий долю стандартных изделий (крепежных элементов) в конструкции изделия. Рассчитывается как отношение числа стандартных элементов к общему числу элементов.

$$K_{\text{станд}} = \left(\frac{N_{\text{стандартных}}}{N_{\text{общих}}} \right) \times 100\%$$

Он вводится для того, чтобы при разработке аппарата в конструкции использовалось минимальное количество разных типов крепежа (болтов, винтов и т.д.), что напрямую влияет на время сборки (серийность) и количество роботизированного оборудования (автоматизированных отверток, оснастки). Стандартный крепеж есть в наличии у поставщиков в больших объемах. Также стандартный крепеж имеет отработанную и проверенную конструкцию, известные характеристики и режимы отказа.

3. Модульность – свойство конструкции быть разделенной на функционально и физически обособленные блоки (модули) с четкими интерфейсами взаимодействия. Оценивается временем замены модуля и сложностью его подключения/отключения.

Данный критерий был введен для возможности параллельной сборки и независимого тестирования модулей (например, борткомпьютера, системы питания, полезной нагрузки) на разных участках, предприятиях, что ускоряет общий цикл производства. Также в случае отказа можно быстро заменить неисправный модуль, а не искать дефект на уровне микросхем. В том числе высокая степень модульности конструкции позволяет легко менять конфигурацию аппарата под разные миссии (например, установить новую камеру) без перепроектирования всей системы. С точки зрения сборки роботу легче и быстрее установить несколько крупных модулей, чем сотни мелких деталей.

4. Доступность зон – конструктивная особенность изделия, обеспечивающая возможность беспрепятственного доступа инструмента, оборудования и манипуляторов робота ко всем точкам сборки, крепления и обслуживания. Оценивается наличием/отсутствием «слепых» зон и требуемыми зазорами. Этот критерий был введен из-за

причин, связанных с автоматизацией процессов производства. Например, робот-манипулятор не обладает ловкостью человеческой руки и требует прямолинейного подхода к точке монтажа. Отсутствие досягаемости говорит о невозможности автоматизации. Даже при ручной сборке сложность операции резко возрастает, если сборщик не может подобраться к точке крепления, в том числе визуальный или инструментальный контроль соединений также требует досягаемости. Также ухудшение доступа может привести к травмам персонала или повреждению компонентов при монтаже.

5. Точность – степень соответствия реальных геометрических и массо-инерционных параметров изделия и его компонентов заданным в конструкторской документации значениям. Оценивается в единицах допусков (мм, угловые минуты) и отклонений. Данный критерий был введен из-за возможной неточности сборки критичных узлов (например, оптических систем, антенн, гироскопов), что приводит к полной или частичной потере функциональности аппарата. Также точность изготовления деталей влияет на сборочные операции (стыковку) друг с другом. Накопившиеся погрешности могут сделать окончательную сборку невозможной. Из-за этого также образуются неравномерные зазоры или перекосы, которые создают дополнительные напряжения, вибрации и ведут к преждевременному износу или отказу компонентов, аппарата в целом. Роботы являются высокоточным оборудованием и работают по жестко заданным траекториям. Если реальная деталь имеет отклонения от своей CAD-модели, робот либо не сможет ее установить, либо повредит.

6. ROI (Return on Investment – Возврат на Инвестиции) – финансовый показатель, отражающий окупаемость затрат на внедрение новой технологии (например, интеллектуальной роботизированной производственной ячейки) или на разработку самой конструкции аппарата. Этот показатель рассчитывается как отношение полученной экономии или прибыли к объему вложенных средств.

$$ROI = \left(\frac{\text{Экономия}}{\text{Затраты}} \right) \times 100\%$$

Данный критерий был сформирован из-за причин, где любой инженерный проект, особенно в коммерческой сфере, должен быть экономически целесообразным. Без положительного ROI проект не получит финансирования. Этот показатель позволяет выбрать наиболее выгодный из нескольких вариантов конструкции или технологического процесса. Современные подходы к бизнесу требуют оценивать не только стоимость изготовления, но и затраты на эксплуатацию, обслуживание и утилизацию.

7. Ремонтопригодность – свойство изделия, заключающееся в его приспособленности к предупреждению, обнаружению и устранению отказов путем проведения технического обслуживания и ремонта. Оценивается средним временем восстановления. Чем быстрее устраняется неисправность, тем меньше простой дорогостоящего оборудования (аппарата на орбите или производственной линии на Земле). Также дешевый и быстрый ремонт удешевляет эксплуатацию, хотя ремонт на орбите часто невозможен, ремонтопригодность критична на этапе наземных испытаний, когда можно быстро заменить модуль и продолжить тесты, не пересобирая аппарат с нуля.

8. Стойкость – способность конструкции сохранять свои эксплуатационные характеристики под воздействием механических (вибрации, удары), климатических (температура, влажность, вакуум) и других внешних нагрузок (радиация, ЭМ-помехи). Оценивается через соответствие стандартам (например, NASA GEVS). Аппарат должен гарантированно работать в тех условиях, для которых он создан. Для CubeSat — это колоссальные вибрации при запуске, вакуум, термические циклы и радиация на орбите. Низкая стойкость = высокий риск потери аппарата и провала дорогостоящей миссии. Данный критерий позволяет формализовать требования и создать единые процедуры испытаний (вибростенды, термовакуумные камеры).

Эти семь критериев представляют собой системный взгляд на конструкцию, превращая ее из просто «работающей на бумаге» в технологичную, то есть такую, которую можно эффективно, быстро, качественно и с минимальными затратами собрать, проверить и эксплуатировать в реальных условиях.

После формирования критериев оценки технологичности был разработан алгоритм оценки технологичности конструкций CubeSat под возможности роботизированного производства МКА НК. Входными данными являлись параметры конструкции CubeSat, а выходом — интегральная оценка технологичности. Алгоритм позволяет количественно оценить, насколько конструкция МКА НК CubeSat 12U адаптирована к роботизированному производству.

Первым шагом алгоритма является сбор параметров конструкции:

1. CAD-модель аппарата.
2. Техническая документация (крепления, материалы, интерфейсы).
3. Данные о производственных операциях (время сборки, себестоимость).

Вторым шагом становится оценка критериев технологичности, которые были сформированы ранее по шкале 0–100 баллов. Критерии и формулы к ним представлены в табл. 1.

Таблица 1

Критерии оценки

Критерий	Формула/Логика	Пример расчета
Коэффициент унификации	$K_{\text{униф}} = \left(\frac{\text{стандартные комп.}}{0,85} \right) \times 100$	$\left(\frac{0,92}{0,85} \right) \times 100 = 108 \rightarrow 100$
Коэффициент стандартизации	$K_{\text{станд}} = \left(\frac{\text{стандарт комп.}}{0,85} \right) \times 100$	$\left(\frac{0,92}{0,85} \right) \times 100 = 108 \rightarrow 100$
Модульность	$K_{\text{модульность}} = \left(\frac{15}{\text{время замены комп.}} \right) \times 100$	$\left(\frac{15}{8} \right) \times 100 = 187,5 \rightarrow 100$
Доступность зон	$K_{\text{зоны}} = 100$, если слепые зоны = 0, иначе 0	100
Точность	$K_{\text{точность}} = \left(\frac{0,05}{\text{точность позиционирования}} \right) \times 100$	$\left(\frac{0,05}{0,04} \right) \times 100 = 125 \rightarrow 100$
ROI	$K_{\text{ROI}} = \left(\frac{ROI}{1,2} \right) \times 100$	$\left(\frac{1,25}{1,2} \right) \times 100 = 104 \rightarrow 100$
Ремонтопригодность	$K_{\text{ремонт}} = \left(\frac{30}{\text{время ремонта}} \right) \times 100$	$\left(\frac{30}{25} \right) \times 100 = 120 \rightarrow 100$
Стойкость	$K_{\text{стойкость}} = \left(\frac{\text{резонансная чистота}}{100} \right) \times 100$	$\left(\frac{105}{100} \right) \times 100 = 105 \rightarrow 100$

Третий шаг – нормирование баллов, согласно ограничению максимального значения до 100 баллов.

Далее производится расчет интегрального показателя (ИТК) по формуле:

$$\text{ИТК} = 0,15 \times K_{\text{униф}} + 0,15 \times K_{\text{униф}} + 0,25 \times K_{\text{ROI}} + 0,15 \times K_{\text{ремонт}} + 0,1 \times K_{\text{стойкость}} = 1$$

Пятым шагом будет интерпретация результата. Для удобства интерпретации сформирована таблица 2, где представлены заключения и действия в зависимости от диапазона ИТК.

Таблица 2

Интерпретация результата

Диапазон ИТК	Заключение	Действия
90–100	Идеально для роботизации	Запуск в производство
75–89	Требуется незначительная доработка	Оптимизация 1–2 параметров
60–74	Нужна модернизация	Редизайн ключевых узлов
<60	Непригодна для автоматизации	Полная переработка конструкции

Шестым шагом является формирование отчета, который включает в себя:

1. Таблицу с баллами по критериям.
2. Визуализацию слабых мест.
3. Рекомендации по улучшению (если ИТК < 90).

Седьмым шагом выступает интеграция с CAD-системами. Алгоритм реализуется как плагин для Creo Parametric/SolidWorks. Пример отражен в табл. 3.

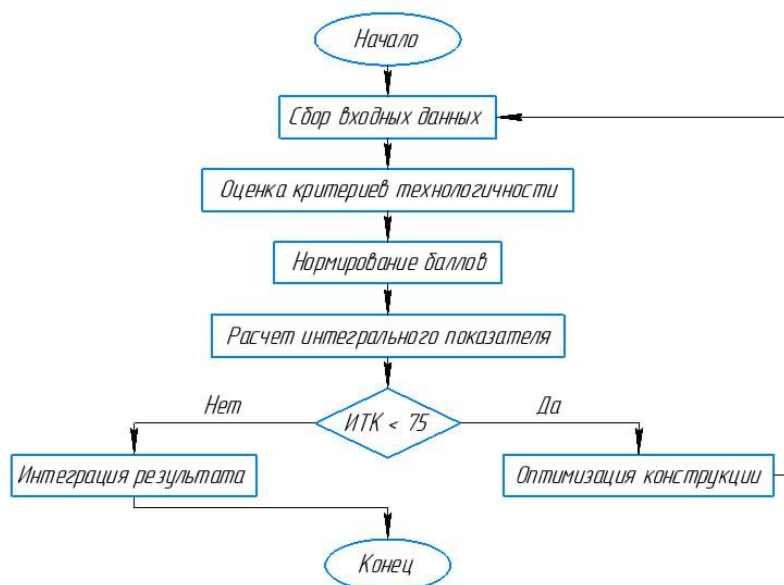
Таблица 3

Алгоритм как плагин

Параметр	Значение	Формула	Балл
Коэффициент унификации	92%	$=\text{MIN}((B2/85)*100, 100)$	100
Модульность	8 мин	$=\text{MIN}((15/B3)*100, 100)$	100

В результате таким образом был разработан алгоритм оценки технологичности конструкций малых космических аппаратов нанокласса типа CubeSat под возможности серийного роботизированного производства, который далее был визуализирован.

В качестве инструмента использовалась блок-схема с указанием последовательности этапов и связей между ними. В итоге структурная схема должна стать руководством для инженеров и разработчиков, помогая систематизировать процесс оценки и оптимизации конструкций для роботизированной сборки. Это повысит эффективность производства и снизит риски ошибок, связанных с человеческим фактором. Методика в виде структурной схемы, которая описывает все ранее рассмотренные действия по оценке технологичности проектируемой конструкции МКА, представлена на рисунке.



Структурная схема оценки технологичности проектируемой конструкции

Далее в рамках данной работы была создана классификация требований и ограничений к конструкциям МКА НК CubeSat для возможности серийного роботизированного производства.

Классификация требований и ограничений представлена в табл. 4.

Таблица 4

Классификация требований и ограничений к конструкциям МКА НК типа CubeSat

№	Требования и ограничения	Категория	Описание	Пример
1	Конструктивные требования	Стандартизация	Использование унифицированных интерфейсов (ISO, ECSS) для совместимости с роботами.	Крепежи ISO 4762, разъемы SpaceUSB.
		Модульность	Разделение на независимые блоки для упрощения автоматизированного монтажа.	Отдельный модуль питания с быстросъемными коннекторами.
		Доступность зон	Обеспечение зазоров ≥ 15 мм для доступа роботов к узлам сборки.	Фланцы для монтажа антенн.
		Геометрия	Максимальная симметрия и отсутствие "слепых" зон.	Каркас с равномерным распределением крепежных точек.
2	Технологические требования	Точность	Допуски позиционирования $\leq \pm 0.05$ мм для совместимости с роботами.	Использование прецизионных шаблонов для пайки плат.
		Автоматизируемость	Конструкция должна позволять выполнение $\geq 95\%$ операций роботами.	Отказ от ручной юстировки (замена на автоматические системы выравнивания).
		Совместимость с ИРПЯ	Интеграция с цифровыми двойниками и IoT-сенсорами.	CAD-модели с метаданными для ROS Industrial.
3	Экономические требования	Себестоимость	Снижение затрат на сборку до $\leq \$70k$ за 12U CubeSat.	Использование стандартных компонентов (экономия 25–30%).
		ROI	Окупаемость внедрения ИРПЯ за ≤ 3 года.	Производство ≥ 50 аппаратов/год.
		Масштабируемость	Возможность увеличения производительности без перепроектирования линии.	Модульная архитектура ИРПЯ (клонирование ячеек).
4	Эксплуатационные требования	Ремонтопригодность	Возможность замены модуля за ≤ 15 минут.	Быстросъемные крепления с RFID-метками.
		Надежность	Соответствие стандартам ECSS-Q-ST-60 (вероятность отказа $\leq 1\%$ за 5 лет).	Использование радиационно-стойкой электроники.
		Адаптивность	Возможность модификации под разные миссии (научные, коммерческие, военные).	Сменные блоки полезной нагрузки.
5	Конструктивные ограничения	Габариты	Максимальные размеры 12U ($\approx 20 \times 20 \times 30$ см) по стандарту CubeSat Design Specification.	Невозможность увеличения объема для дополнительной нагрузки.
		Материалы	Ограниченный выбор материалов (алюминий 6061, композиты) для совместимости с роботами.	Запрет на использование пластиков с низкой теплопроводностью.

№	Требования и ограничения	Категория	Описание	Пример
		Масса	Максимальная масса ≤ 24 кг для 12U (стандарт CalPoly).	Необходимость оптимизации конструкции под роботизированное позиционирование.
6	Технологические ограничения	Точность роботов	Промышленные роботы имеют погрешность ± 0.1 мм, тогда как требуется ± 0.05 мм.	Необходимость доработки конструкций (например, введение компенсационных зазоров).
		Сенсоры	Ограниченное разрешение систем технического зрения (20 мкм vs требуемые 5 мкм).	Использование ИИ-алгоритмов для коррекции погрешностей.
		Программное обеспечение	Отсутствие готовых решений для управления гибридными ИРПЯ.	Разработка кастомных ROS-пакетов.
7	Экономические ограничения	CAPEX	Высокие первоначальные затраты на ИРПЯ (\$3–5 млн).	Необходимость государственных субсидий или партнерских программ.
		Серийность	Роботизация рентабельна только при производстве ≥ 50 аппаратов/год.	Риски для стартапов с малыми заказами.
		Рыночные риски	Быстрое устаревание технологий (цикл обновления 2–3 года).	Внедрение модульных решений для упрощения модернизации.
8	Нормативные ограничения	Стандарты	Обязательное соответствие ECSS, NASA-STD-8739.4.	Сертификация крепежных элементов на вибростойкость.
		Безопасность	Требования к электромагнитной совместимости (ECSS-E-ST-20-07C).	Экранирование компонентов.
		Экология	Запрет на использование свинцовых припоев (директива RoHS).	Переход на бессвинцовые сплавы с высокой температурой плавления.

Следующим этапом были разработаны рекомендации к проектированию МКА НК CubeSat, направленные на различные сферы организации производства, а именно:

1. Внедрение приоритизации требований – системного процесса ранжирования инженерно-технических, экономических и эксплуатационных требований к конструкции или технологическому процессу по степени их важности и влияния на конечный результат. Начать со стандартизации интерфейсов и устранения «слепых» зон, далее внедрить цифровые двойники для проверки технологичности на ранних этапах.

2. Внедрить систему учета ограничений. Например, за счет использования композитных материалов можно снизить массу и при этом сохранить прочность и технологичность конструкции, которая будет создана под особенности роботизированного производства.

3. Внедрение экономической оптимизации. Закупать компоненты у проверенных поставщиков, участвовать в программах господдержки.

Решенные в рамках работы задачи, которые напрямую являются инструментарием проектирования конструкций малых космических аппаратов нанокласса типа CubeSat под возможности серийной роботизированной сборки, позволяют системно подойти к проектированию аппаратов, минимизируя риски и обеспечивая совместимость с роботизированным производством.

Проведенная работа была направлена на решение актуальной проблемы перехода от штучного, единичного производства к серийному роботизированному производству малых

космических аппаратов нанокласса типа CubeSat. Основным препятствием на этом пути является несоответствие существующих конструкций аппаратов требованиям и возможностям автоматизации производства, роботизированного оборудования.

Внедрение предложенного инструментария на ранних этапах проектирования позволит:

1. Сократить время и стоимость перехода к серийному выпуску малых космических аппаратов нанокласса типа CubeSat.

2. Повысить степень автоматизации сборки до 95% и более за счет исключения операций, требующих ручного труда.

3. Минимизировать риски и ошибки, связанные с «человеческим фактором», обеспечивая стабильно высокое качество продукции.

4. Обеспечить экономическую целесообразность создания крупных спутниковых группировок (конstellаций) за счет снижения операционных издержек и повышения масштабируемости производства.

Таким образом, разработанный инструментарий является готовым решением для интеграции в процесс создания многоспутниковых группировок малых космических аппаратов и служит важным шагом на пути к полноценной цифровизации и роботизации процессов производства космического приборостроения.

Список литературы

1. Баринова Е.В. Проектирование и стабилизация наноспутников стандарта CubeSat: монография. – Самара: Изд-во Самарского ун-та, 2023. – 184 с.
2. Белов М.П., Бутаков Г.И. Проектирование конструкций космических аппаратов / Машиностроение. – 2021. – 416 с.
3. ГОСТ Р 56526–2015 Системы космические. Надежность и техническое обслуживание. Требования и общие принципы / Стандартиформ. – 2015. – 32 с.
4. Ефремов И.В., Петров А.Н. Экономическая оценка эффективности технических решений в ракетно-космической отрасли // Космическая техника и технологии. – 2021. – № 3(30). – С. 56–68.
5. Иванов В.А., Сидоров А.В. Методы оценки эффективности инвестиционных проектов в космической отрасли // Экономика и управление. – 2022. – № 4. – С. 78–86.
6. Колесников А.В., Больных Е.А. Проектирование малых космических аппаратов // Вестник СибГАУ. – 2021. – № 2. – С. 12–21.
7. Космическое приборостроение: современные технологии проектирования и производства / Под ред. А.С. Елисеева. – М.: Машиностроение, 2022. – 348 с.
8. Малюх В.Н. Автоматизация проектирования космических систем / МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2021. – 256 с.
9. NASA-STD-8739.4: Стандарт NASA по контролю и обеспечению качества космических систем. – Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства США, 2022. – 215 с.
10. Петров А.А., Никифоров О.В. Малые спутники для космических исследований // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2016. – Т. 3, вып. 4. – С. 22–31.
11. Петров А.П., Сидоров В.В. Автоматизация проектирования космических аппаратов // Космическая техника и технологии. – 2020. – № 1(22). – С. 45–56.
12. Роботизация производства космических аппаратов: учебное пособие / Под ред. В.П. Мишина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023. – 284 с.
13. Смирнов А.И., Николаев В.А. Надежность космических конструкций / Машиностроение. – 2021. – 368 с.
14. Стандарты ECSS-Q-ST-60: Требования к надежности космических изделий. – Европейское космическое агентство, 2021. – 124 с.
15. Федотов А.В., Михайлов В.А. Экономическое обоснование проектных решений в ракетно-космической технике // Космическая техника и технологии. – 2021. – № 2(25). – С. 89–98.

References

1. Barinova E.V. Design and stabilization of nanosatellites of the CubeSat standard: monograph. Samara: Publishing House of Samara University, 2023. 184 p.
2. Belov M.P., Butakov G.I. Designing spacecraft structures / Mechanical engineering. – 2021. – 416 p.
3. GOST R 56526–2015 Space systems. Reliability and maintenance. Requirements and general principles / Standartinform. – 2015. – 32 p.
4. Efremov I.V., Petrov A.N. Economic assessment of the effectiveness of technical solutions in the rocket and space industry // Space engineering and technology. – 2021. – № 3(30). – Pp. 56–68.
5. Ivanov V.A., Sidorov A.V. Methods for evaluating the effectiveness of investment projects in the space industry // Economics and management. – 2022. – No. 4. – pp. 78–86.
6. Kolesnikov A.V., Sick E.A. Designing small spacecraft // Bulletin of SibGAU. – 2021. – No. 2. – Pp. 12–21.

7. Space instrumentation: modern design and production technologies / Edited by A.S. Eliseev, Moscow: Mashinostroenie Publ., 2022, 348 p.
8. Malyukh V.N. Automation of space systems design / Bauman Moscow State Technical University. – 2021. 256 p.
9. NASA-STD-8739.4: NASA Standard for Quality Control and Assurance of Space Systems. – National Aeronautics and Space Administration of the USA, 2022. – 215 p.
10. Petrov A.A., Nikiforov O.V. Small satellites for space research // Rocket and space instrumentation and information systems. 2016. Vol. 3, issue 4. pp. 22–31.
11. Petrov A.P., Sidorov V.V. Automation of spacecraft design // Space engineering and Technology. – 2020. – № 1(22). – Pp. 45–56.
12. Robotization of spacecraft production: a textbook / Edited by V.P. Mishin, Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2023, 284 p.
13. Smirnov A.I., Nikolaev V.A. Reliability of space structures / Mechanical engineering. – 2021. – 368 p.
14. ECSS-Q-ST-60 standards: Requirements for the reliability of space products. – European Space Agency, 2021. 124 p.
15. Fedotov A.V., Mikhailov V.A. Economic justification of design solutions in rocket and space technology // Space engineering and technology. – 2021. – № 2(25). – Pp. 89–98.