

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий  
институт

Межинститутская базовая кафедра  
«Прикладная физика и космические технологии»  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ В.Е. Косенко  
подпись      инициалы, фамилия  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Разработка системы раскрытия главного зеркала  
космического телескопа «Миллиметрон»  
тема

27.04.03 – «Системный анализ и управление»  
код и наименование направления

27.04.03.06 – «Основы проектирования космических аппаратов»  
код и наименование магистерской программы

Руководитель	_____	профессор МБК ПФиКТ, д-р техн. наук, доцент	<u>В. Е. Чеботарев</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Выпускник	_____		<u>В. Н. Хайдукова</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Рецензент	_____	начальник сектора АО «ИСС»	<u>А. В. Козлов</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Нормоконтролер	_____	профессор МБК ПФиКТ, д-р техн. наук, доцент	<u>В. Е. Чеботарев</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия

Красноярск 2022

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«**СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**»

Институт космических и информационных технологий  
институт

Межинститутская базовая кафедра  
«Прикладная физика и космические технологии»  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ В.Е. Косенко  
подпись      инициалы, фамилия  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022г.

**ЗАДАНИЕ**  
**НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ**  
в форме магистерской диссертации

Красноярск 2022

Студенту: Хайдуковой Валерии Николаевн

фамилия, имя, отчество

группа КИ20-03-6М, направление (специальность) 27.04.03

номер

код

«Системный анализ и управление»

наименование

Тема выпускной квалификационной работы: «Разработка системы раскрытия главного зеркала космического телескопа «Миллиметрон».

Утверждена приказом по университету № 16288/с от 26.10.2021.

Руководитель ВКР: Виктор Евдокимович Чеботарев, профессор МБК «Прикладная физика и космические технологии», д-р техн. наук, доцент.

Исходные данные для ВКР: Исходные данные на разработку конструкторской документации; перечень материалов, разрешенных к применению на бортовом комплексе научной аппаратуры.

Перечень разделов ВКР: Введение, общая характеристика космических телескопов, назначение и область применения КТ «Миллиметрон», система зеркальная КТ «Миллиметрон», система раскрытия главного зеркала, этапы создания консоли, заключение, приложения.

Перечень графического материала: презентация, выполненная с помощью Microsoft Power Point 2016 в количестве 16 слайдов.

Руководитель ВКР

\_\_\_\_\_   
подпись

В.Е. Чеботарев

\_\_\_\_\_   
инициалы и фамилия

Задание принял к исполнению

\_\_\_\_\_   
подпись, инициалы и фамилия студента

В.Н. Хайдукова

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 г.

## РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация по теме «Разработка системы раскрытия главного зеркала космического телескопа «Миллиметрон» содержит 74 страницы, в том числе 52 иллюстрации, 6 таблиц, 18 использованных источников, 3 приложения.

Ключевые слова: КОСМИЧЕСКИЙ ТЕЛЕСКОП «МИЛЛИМЕТРОН», СИСТЕМА ЗЕРКАЛЬНАЯ, СИСТЕМА РАСКРЫТИЯ ГЛАВНОГО ЗЕРКАЛА, КОНСОЛЬ, КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, УГЛЕПЛАСТИКИ.

В ходе написания данной работы были изучены задачи КТ «Миллиметрон», приведены состав и функции системы раскрытия главного зеркала, сформулированы требования к конструкции и материалам. Обозначено, что узлом, отвечающим за удержание лепестков ГЗ в транспортной и рабочей конфигурации и задающим траекторию раскрытия лепестков при переводе из транспортного положения в рабочее, является консоль. С использованием системы автоматизированного проектирования Ansys, было подсчитано необходимое количество слоев углепластика для формования консоли, а также спрогнозировано деформационное поведение при эксплуатации, выбрана технология изготовления и способ формования.

Результатом разработки конструкции консоли является выпущенная конструкторская документация, также был спроектирован раскрой препрега, составлена схема выкладки слоев материала. Практической значимостью разработанной конструкции является однородность материала по всему объему конструкции, что очень важно при эксплуатации в сверхнизких температурах.

Спроектированная конфигурация консоли и методика изготовления позволяют системе раскрытия главного зеркала добиться необходимой точности и жесткости удержания каркасов лепестков главного зеркала при эксплуатации и переводе из транспортного положения в рабочее, что обеспечивает необходимое пространственное положение всех элементов главного зеркала космического телескопа «Миллиметрон».

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	6
1 Общая характеристика космических телескопов .....	8
2 Назначение и область применения КТ «Миллиметрон».....	10
2.1 Общая характеристика КТ «Миллиметрон» .....	11
2.2 Параметры орбиты КТ «Миллиметрон».....	12
2.3 Технические требования к изделию .....	14
2.4 Состав изделия .....	16
3 Система зеркальная телескопа «Миллиметрон».....	18
3.1 Главное зеркало.....	20
3.1.1 Лепесток главного зеркала.....	21
3.1.2 Центральное зеркало .....	22
3.2 Вторичное зеркало .....	23
3.3 Переключающее зеркало.....	24
4 Система раскрытия главного зеркала .....	25
5 Этапы создания Консоли.....	28
5.1 Определение конструкции и габаритов .....	29
5.2 Выбор материала для изготовления .....	33
5.3 Моделирование в программном комплексе Ansys .....	39
5.4 Формование изделия.....	51
5.5 Крепление консоли с ответными деталями .....	58
6 Итоговая конструкторская документация .....	62
Заключение .....	66
Список сокращений .....	68
Список использованных источников .....	69
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	72
ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....	73
ПРИЛОЖЕНИЕ В .....	74

## ВВЕДЕНИЕ

Космонавтика представляет собой совокупность отраслей науки и техники, обеспечивающих исследование и освоение космического пространства и внеземных объектов посредством использования космических аппаратов (КА). По основному назначению космические аппараты делятся на научно-исследовательские, испытательные и специализированные [1].

Испытательные КА применяются для контроля и отработки в условиях полета в космическом пространстве узлов конструкций, агрегатов и частей разрабатываемых образцов и способов их применения. Специализированные космические аппараты решают одну или несколько задач прикладного характера в народно-хозяйственных (коммерческих) или военных целях, например, связи и управления, разведки, навигации.

Научно-исследовательские КА позволяют проводить разнообразные геофизические, астрономические, геодезические, биологические и др. исследования [2]. Применение научно-исследовательских КА делает возможным сбор информации об околоземном пространстве, атмосферных слоях, межпланетной среде и радиационных поясах планеты; исследование тел Солнечной системы; изучение дальнего космоса, осуществляющееся с применением космических телескопов (КТ) и другой специализированной аппаратуры, устанавливаемой на спутнике.

В настоящее время ведутся работы по реализации проекта «Миллиметрон». Концепция научной программы обсерватории «Миллиметрон» нацелена на решение комплекса важных и инновационных задач в области космологии и астрофизики, а именно детальное изучение чёрных дыр, поиск кротовых нор, следов воды, спектральных искажений реликтового излучения. «Миллиметрон» представляет собой 10-метровый телескоп, целевой функцией которого является изучение объектов Вселенной в диапазоне длин волн от 0,02 до 17 мм.

В состав бортового комплекса научной аппаратуры обсерватории «Миллиметрон» входят следующие системы:

- целевые системы: система зеркальная (СЗ), система сбора и передачи информации;

- служебные системы: механические системы, система терморегулирования, система адаптации СЗ, система контроля СЗ.

Согласно требованиям, СЗ изготавливается согласно схеме Кассегрена и имеет главное зеркало параболической формы и гиперболическое вторичное зеркало.

В состав механических систем входят: система раскрытия главного зеркала, система раскрытия криоэкрана, система раскрытия теплозащитных экранов, система раскрытия радиаторов.

Для обеспечения размещения КТ в габаритах зоны полезного груза ракеты-носителя задается, что все крупногабаритные элементы КТ выполняются трансформируемыми, поэтому, главное зеркало, являющееся основным элементом системы зеркальной КТ, будет формироваться из отражающих поверхностей стационарно установленного центрального зеркала и подвижных 24-х лепестков, изменяющих свои линейные и угловые расположения.

Обеспечение геометрической стабильности системы зеркальной КТ «Миллиметрон» при воздействии криогенных температур ставится главной целью при проектировании конструкции телескопа.

В множестве задач, выполнение которых обеспечивает достижение вышеуказанной цели, обозначена задача разработки системы раскрытия главного зеркала, обеспечивающей перевод главного зеркала из транспортного положения в рабочее и сохранение требуемой формы главного зеркала при эксплуатации в диапазоне криогенных температур.

[Изъято: глава 1 стр. 8-9; глава 2 стр. 10-17; глава 3 стр. 18-24; глава 4 стр. 25-27; глава 5 стр. 28-61; глава 6 стр. 62-65; приложение А стр. 72; приложение Б стр. 73; приложение В стр. 74]



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе написания данной работы были изучены общие характеристики космических телескопов, назначение и целевые задачи КТ «Миллиметрон», сформулированы требования, предъявляемые к конструкции системы зеркальной КТ, приведен состав системы зеркальной: описано назначение главного, вторичного и переключающего зеркалов.

По системе раскрытия главного зеркала сформулированы требования к конструкции и материалам, приведено описание всех составных частей системы, обозначено, что узлом, обеспечивающим связь между каркасом лепестка и узлом поворотным и отвечающим за удержание лепестков ГЗ в транспортной и рабочей конфигурации, является консоль, которая также задает траекторию раскрытия лепестков.

Анализ схемы раскрытия главного зеркала позволил выявить места возможного столкновения элементов конструкции: отражающие панели лепестков между собой; отражающие панели лепестков с каркасом лепестка; каркасы лепестков. Следовательно, для консоли были сформулированы требования, по которым консоль для каждого лепестка должна обеспечивать такое соединение каркаса лепестка и поворотного угла, при котором выполняются требования по достижению необходимого пространственного углового позиционирования лепестков на всех этапах раскрытия. Консоль должна выдерживать нагрузку 100 кг и перемещение контрольной точки консоли не должно превышать 1,3 мм.

Основным критерием для выбора материала для изготовления является условие эксплуатации телескопа в диапазоне криогенных температур до 4,2 К.

Для консоли в программном комплексе Ansys, было подсчитано необходимое количество слоев углепластика для формования консоли, а также спрогнозировано деформационное поведение при эксплуатации, выбран способ изготовления, выделено, что перспективным является применение композиционных материалов в конструкциях, т.к. композиты по сравнению с

традиционными материалами позволяют достичь сочетания низкого коэффициента линейного расширения, низкой массы при сохранении высоких прочностных и жесткостных показателей.

Результатом разработки конструкции консоли является выпущенная конструкторская документация: чертеж детали, сборочный чертеж, спецификация, также был спроектирован раскрой препрега, составлена схема выкладки слоев материала. Практической значимостью разработанной конструкции является однородность материала по всему объему конструкции, что очень важно при эксплуатации в сверхнизких температурах. Предложенный способ формования и изготовления консоли позволил избежать конфигурации конструкции, при которой бы фланцы консоли клеивались в участок трубы, следовательно, в разработанной конструкции отсутствуют участки перепадов материалов, границы раздела материалов, клеевой шов, что значительно увеличивает прочность и жесткость конструкции.

По разработанной конструкторской документации с выполнением технических требований были изготовлены образцы консоли. Испытания консоли подтвердили достоверность прочностных программных расчетов, фактическое значение перемещения конструкции в точке контроля совпадает с прогнозируемым значением, результаты испытаний зафиксированы в протоколе испытаний, по которому была выпущена техническая справка по сборочной единице.

Спроектированная конфигурация консоли и методика изготовления позволяют системе раскрытия главного зеркала добиться необходимой точности и жесткости удержания каркасов лепестков главного зеркала при эксплуатации и переводе из транспортного положения в рабочее, что обеспечивает необходимое пространственное положение всех элементов главного зеркала космического телескопа «Миллиметрон».

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

БКНА	–	бортовой комплекс научной аппаратуры;
ВЗ	–	вторичное зеркало;
ГЗ	–	главное зеркало;
ИК-диапазон	–	инфракрасный диапазон;
КА	–	космический аппарат;
КД	–	конструкторская документация;
КЛТР	–	коэффициент линейного теплового расширения;
КМ	–	композиционные материалы;
КР	–	контррефлектор;
КТ	–	космический телескоп;
ММ-диапазон	–	миллиметровый диапазон;
МСС	–	модуль служебных систем;
НЭО	–	наземно-экспериментальная отработка;
ПЗ	–	переключающее зеркало;
ПКМ	–	полимерные композиционные материалы;
САИК	–	система адаптации и контроля;
СБ	–	сборочный чертеж;
СЗ	–	система зеркальная;
СР ГЗ	–	система раскрытия главного зеркала;
УФ-спектр	–	ультрафиолетовый спектр;
ЦЗ	–	центральное зеркало.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Абламейко, С. В. Малые космические аппараты : учебное пособие / С. В. Абламейко, В. А. Саечников, А. А. Спиридонов ; Белорусский государственный университет. – Минск : БГУ, 2012. – 159 с. – ISBN 978-985-518-570-4.
- 2 Чеботарев, В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения : учебное пособие / В. Е. Чеботарев, В. Е. Косенко ; Сибирский государственный аэрокосмический университет.– Красноярск : СибГАУ, 2011. – 488 с. – ISBN 978-5-86433-510-9.
- 3 Петров, Б. Н. Космические исследования и научно-технический прогресс : иллюстрированное научное издание / Б. Н. Петров ; научный редактор Р. Г. Базурин. – Москва : Издательство «Знание», 1971. – 48 с.
- 4 Космическая обсерватория «Миллиметрон» // Научно-производственное объединение им. С. А. Лавочкина: официальный сайт. – 2022. – URL: <https://www.laspace.ru/projects/astrophysics/spectrum-m/> (дата обращения: 15.01.2022).
- 5 Артеменко, Ю. Н. Синтез механизмов ориентации космического телескопа «Миллиметрон» / Ю. Н. Артеменко // Наука и образование. – 2013. №1. – С. 173–184.
- 6 Вшивков, А. Ю. Теплофизический макет пассивной системы терморегулирования космической обсерватории «Миллиметрон» / А. Ю. Вшивков, Е. Н. Головенкин, О. В. Шилкин, Е. Ю. Бакуров // Решетневские чтения. – 2014. – Том 1. – С. 327–329.
- 7 Саяпин, С. Н. Проблемы прецизионности криогенного космического телескопа обсерватории «Миллиметрон», раскрываемого на орбите в окрестностях точки Лагранжа L2 системы Солнце-Земля / С. Н. Саяпин, Ю. Н. Артеменко, Н. В. Мышонкова // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Естественные науки». – 2014. №2. – С. 50–76.

8 Колисниченко, В. «Миллиметрон»: В погоне за кротовыми норами / В. Колисниченко // Журнал «Русский космос» : [сайт]. – 2021. – 20 нояб. – URL: <https://www.roscosmos.ru/33404/> (дата обращения: 09.02.2021).

9 Мартынов, М. Б. Сведения, назначение и состав многофункциональной космической платформы «Навигатор» / М. Б. Мартынов, И. В. Москатиньев, А. С. Митькин // Журнал АО «НПО Лавочкина». – 2017. №1. – С. 9–14.

10 Миссия «Миллиметрон» // Космическая обсерватория «Миллиметрон» АКЦ ФИАН (Millimetron Space Observatory): официальный сайт. – 2022. – URL: <https://millimetron.ru/> (дата обращения: 14.02.2022).

11 Проект АКЦ ФИАН «Миллиметрон» // Астрокосмический центр Учреждения Российской академии наук Физического института им. П. Н. Лебедева РАН (АКЦ ФИАН) : официальный сайт. – 2022. – URL: <http://asc-lebedev.ru/> (дата обращения: 25.02.2022).

12 Авдеев, В. Телескоп в полтора миллиона километров : «Миллиметрон»: как он устроен и для чего нужен / В. Авдеев // Спецномер научно-популярного журнала «Кот Шрёдингера»: [сайт]. – 2018. – 10 окт. – URL: <https://ology.sh/megascience/teleskop-v-poltora-milliona-kilometrov/> (дата обращения: 04.12.2021).

13 ГОСТ 2.102-68. Единая система конструкторской документации Виды и комплектность конструкторских документов = Unified system for design documentation. Types and sets of design documentation: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22.11.2013 № 1627-ст : введен взамен 2.102-68 : дата введения 2014-06-01 / разработан Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт стандартизации и сертификации в машиностроении» (ФГУП «ВНИИНМАШ»), Автономной некоммерческой организацией «Научно-исследовательский центр

CALS-технологий «Прикладная логистика» (АНО НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика»). – Москва : Стандартинформ, 2014. – 15 с.

14 Сухова, Т. А. Определение коэффициента линейного теплового расширения твердых тел : методические указания / Т. А. Сухова, А. Л. Суркаев ; Волгоградский государственный технический университет. – Волгоград : ВПИ, 2013. – 11 с.

15 Бондалетова, Л. И. Полимерные композиционные материалы : учебное пособие / Л. И. Бондалетова, В. Г. Бондалетов ; Томский политехнический университет.– Томск : ТПУ, 2013. – 118 с. – ISBN 978-5-86433-510-9.

16 Первушин, Ю. С. Основы механики, проектирования и технологии изготовления изделий из слоистых композиционных материалов / Ю. С. Первушин, В. С. Жернаков ; Уфимский государственный авиационный технический университет.– Уфа : УГАТУ, 2008. – 303 с. – ISBN 5-86911-626-0.

17 Аюшеев, Т. В. Геометрические вопросы адаптивной технологии изготовления конструкции намоткой из волокнистых композиционных материалов / Т. В. Аюшеев ; Бурятский научный центр. – Улан-Удэ : БНЦ СО РАН, 2005. – 212 с. – ISBN 5-7925-0168-8.

18 Кербер, М. Л. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология / М. Л. Кербер, В. М. Виноградов, В. М. Головкин – СПб : Профессия, 2008. – 560 с. – ISBN 978-5-93913-130-8.

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Институт космических и информационных технологий

Межинститутская базовая кафедра  
«Прикладная физика и космические технологии»  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой  
В.Е. Косенко  
подпись \_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия  
«23» 06 2022г.

Разработка системы раскрытия главного зеркала  
космического телескопа «Миллиметрон»  
тема

27.04.03 – «Системный анализ и управление»  
код и наименование направления

27.04.03.06 – «Основы проектирования космических аппаратов»  
код и наименование магистерской программы

Руководитель

профессор МБК ПФИКТ,  
д-р техн. наук, доцент  
подпись, дата \_\_\_\_\_  
должность, ученая степень

В. Е. Чеботарев  
инициалы, фамилия

Выпускник

подпись, дата \_\_\_\_\_  
23.06.22

В. Н. Хайдуклова  
инициалы, фамилия

Рецензент

начальник сектора  
АО «ИСС»  
подпись, дата \_\_\_\_\_  
должность, ученая степень

А. В. Козлов  
инициалы, фамилия

Нормоконтролер

профессор МБК ПФИКТ,  
д-р техн. наук, доцент  
подпись, дата \_\_\_\_\_  
должность, ученая степень

В. Е. Чеботарев  
инициалы, фамилия

Красноярск 2022