

УДК 629.76/.78-027.31

М.Р. Нургузин, А.Т. Калиев\*, Б.Р. Жумажанов

АО «Национальная компания «Қазақстан Ғарыш Сапары», Республика Казахстан, г. Астана

\*E-mail: a.kaliev@gharysh.kz

### Особенности проектирования и анализа механической части оптических систем

Статья посвящена технологии проектирования и анализа механической части 3D модели оптической полезной нагрузки (ОПН), используемой в целях дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Приведено краткое описание возможностей использования программного продукта Solid Works, для проектирования оптических систем и его возможностей. Описаны этапы проектирования механической структуры оптической полезной нагрузки на примере катадиоптрической системы [1]. Представлены факторы, учитываемые при проектировании и результаты анализа на статические нагрузки, на основе смоделированной 3D модели.

В основе статьи лежит работа, проведенная во время стажировки специалистов АО «Национальная компания «Қазақстан Ғарыш Сапары» (КГС) в рамках проекта «Создание космической системы ДЗЗ Республики Казахстан» («Создание КС ДЗЗ РК»). Работы велись совместно со специалистами компаний EADS Astrium (Франция) и SSTL (Великобритания).

Статья дает общее представление о методе проектирования оптической полезной нагрузки для малых КА.

**Ключевые слова:** проектирование, этапы, катадиоптрическая система, технологии, ДЗЗ, механическая часть.

M. Nurguzhin, A. Kaliyev, B. Zhumazhanov

### Modern methods of design and analysis of optical systems on example of the off-axis catadioptric system

The article is devoted to the technology of mechanical design and analysis of the 3D model of the optical payload. Optical payload (OPN) is used for the remote sensing (RS) on small satellites. A brief description of the software used for the design of optical systems and some of its features are presented. The basic stages of the design of mechanical parts of the optical payload are described on the example of a catadioptric system. Some of the factors considered at designing and results of the static analyses of the optical system are presented, after which it is possible to provide a preliminary 3D model of the system.

The article is based on the work done by the specialists of the JSC «National company «Kazakhstan Gharysh Sapary» in frames of the project «Creation of the remote sensing space system of the Republic of Kazakhstan». The works are done in collaboration with the specialists of companies EADS Astrium (France) and SSTL (Great Britain).

The article presents the general view of modern methods of developing optical payloads for small satellites.

**Keywords:** design, phases, catadioptric system, technologies, remote sensing, mechanical part.

М.Р. Нургожин, А.Т. Қалиев, Б.Р. Жумажанов

### Осьтен тыс катадиоптрикалық жүйе мысалында оптикалық жүйелерді жобалау және сараптау замануи әдістері

Мақала оптикалық пайдалы жүктеменің механикалық бөлігін жобалау және сараптау технологиясына арналады. Оптикалық пайдалы жүктеме (ОПЖ) кіші ғарыш аппараттарында (КА) Жерді қашықтан зондтау (ЖКЗ) мақсатында пайдаланылады. Оптикалық жүйені жобалау пайдаланылатын бағдарламалық продуктының қысқаша сипаттамасы келтірілген және оның кейбір мүмкіндіктері көрсетілген. Оптикалық пайдалы жүктеменің механикалық бөлігінің жобалаудың негізгі кезеңдері катадиоптрикалық жүйенің мысалында мазмұндалған. Жобалау кезінде ескерілген кейбір факторлар және оптикалық жүйенің статикалық анализінің нәтижелері ұсынылған, сол нәтижелер негізінде айтылмыш жүйенің 3D моделін құрауға болады.

Мақала «Қазақстан Ғарыш Сапары» Ұлттық компаниясы» акционерлік қоғамы мамандарының «Қазақстан Республикасы ЖКЗ ғарыш жүйесін жасау» жобасы шеңберінде жасалған жұмыс негізінде жазылған. Жұмыстар EADS Astrium (Франция) және SSTL (Ұлыбритания) мамандарымен бірлесіп жүргізілді.

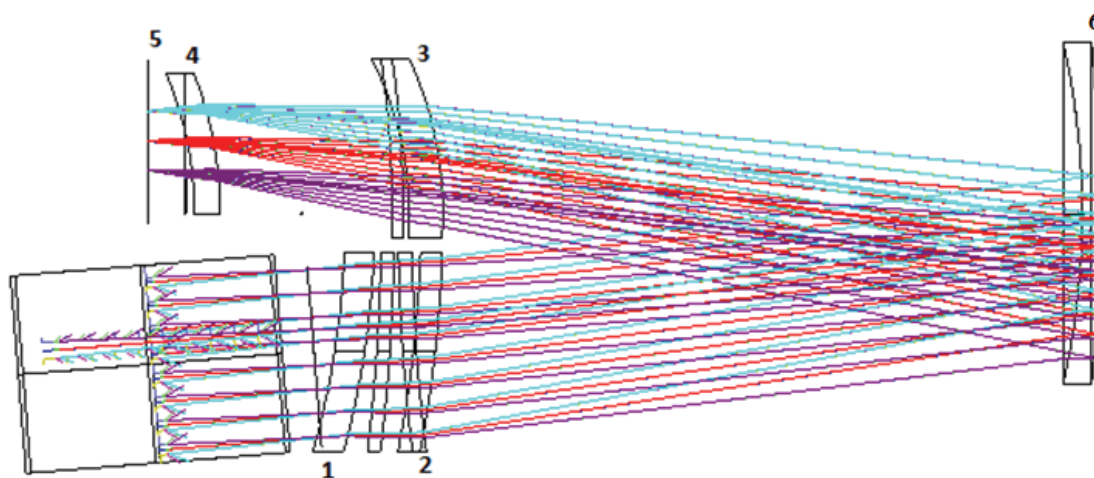
Мақала кіші ғарыш аппараттарына оптикалық пайдалы жүктемесін жасаудың замануи әдістері туралы жалпы мәлімет береді.

*Түйін сөздер:* жобалау, кезендер, катадиоптрикалық жүйе, технологиялар, ЖҚЗ, механикалы бөлік.

## Введение

Настоящая статья является продолжением описания технологии проектирования оптической полезной нагрузки, согласно европейским стандартам к созданию космической техники. Следует отметить, что телескоп проектировался не в качестве упражнения, а как оптический

инструмент, который предполагался использоваться на собственном научно-технологическом КА. Оптическая система, спроектированная согласно системным требованиям, удовлетворяющим требованиям миссии, была описана в статье [1]. На рис.1 приведен результат проектирования, полученный с использованием ПО Zemax.



**Рисунок 1** – Оптическая схема катадиоптрической системы. Цифрами обозначены расположение корректирующих линз (1, 2, 3, 4), фокальной плоскости (5) и зеркала Манжена (6)

особенностью данной системы является расположение корректирующих линз (1, 2, 3, 4) и фокальной плоскости (5) относительно оптической оси инструмента.

Компоновка всех составляющих элементов в единую систему является задачей механической части проектирования ОПН.

Учет указанных особенностей, а также расположение телескопа на верхней панели космического аппарата потребовали введение ряда изменений при проектировании не только механической части полезной нагрузки, но и оптической схемы. К ним можно отнести варьирование расстояния между двумя группами корректирующих линз 1, 2 и 3, 4. Данное расстояние должно быть минимальным для его физической реализации, и при этом не влияло на оптические характеристики. Кроме того, расположение телескопа на верхней панели КА потребовало включение нового элемента – преломляющего зеркала.

## Этапы проектирования механической структуры оптической полезной нагрузки

Проектирование элементов механической системы телескопа с учетом минимизации массо-габаритных характеристик было проведено с использованием ПО Solid Works.

Создание оптической полезной нагрузки включает в себя следующие процессы: проектирование с проведением анализа проектных решений, выработка философии моделирования для проведения испытаний, сборка и валидация ОПН, интегрирование ее с платформой КА. В свою очередь, этап проектирования включает в себя проектирование составных частей ОПН: оптической системы, цепи электроники и механической части – выбор материала для создания телескопа, определение размеров, удовлетворяющих массо-габаритному бюджету полезной нагрузки и необходимым требованиям к механическим

нагрузкам. Проектирование и анализ оптической системы телескопа представлены в работе [1].

Проектирование механической структуры проводилось после определения оптической схемы телескопа с его основными характеристиками – размером апертуры, полем зрения, физическими размерами оптических и электронных элементов, определения и утверждения основных требований к механической конструкции телескопа с учетом международных стандартов и требований заказчика.

К основным требованиям, касающихся механической структуры, учитываемыми в данном подходе к проектированию рассмотрены требования, определяющие массу и габаритные размеры оптической полезной нагрузки, а также способность выдерживать предельные статические нагрузки:

- внешние размеры механической структуры по оси X и Y не должны превышать 720×827 мм;
- общая масса конструкции телескопа не должна превышать 50 кг;
- механическая структура должна выдерживать нагрузки при ускорении величиной в 10 g (выбранная величина ускорения может варьироваться, т.к. надо знать, какой будет выбран ракетоноситель для запуска, поэтому в качестве примера была выбрана предельная величина).

В соответствии с основными требованиями спроектирована общая механическая структура системы, проработаны методы крепления как всей системы в целом к панели КА, так и

методы крепления линз и преломляющего зеркала к самой структуре системы. Таким образом, был сформирован облик системы, представленный на рисунке 2.

Полученная механическая структура является сборкой из отдельных узлов и элементов. На рис. 2 и на рис. 3 показано крепление линз внутри телескопа, состоящего из четырех отдельных узлов, которые соединяются с помощью болтов. Так же стоит отметить, что для крепления линз должен использоваться специальный клей, обладающий необходимыми физическими свойствами для обеспечения надежную склейку линз с креплениями.

Спроектированная механическая структура позволяет сделать выбор материалов для ее изготовления, включая соединяющие узлы механических частей и деталей. При этом учитываются все факторы, влияющие на оптические и механические характеристики телескопа, соответствие его требованиям по массе: коэффициенты температурного расширения материалов, способность конструкции выдерживать статические и динамические нагрузки, факторы космической среды. Материалом основной структуры выбран углепластик, преимуществом которого является низкий коэффициент теплового расширения  $(-1,5.. .0,5) \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  и низкая плотность (1450 кг/м<sup>3</sup> до 2000 кг/м<sup>3</sup>), высокая прочность и жесткость, в сравнении с характеристиками стали, но гораздо легче (по удельным характеристикам превосходит высокопрочную сталь, например 25 ХГСА) [2].

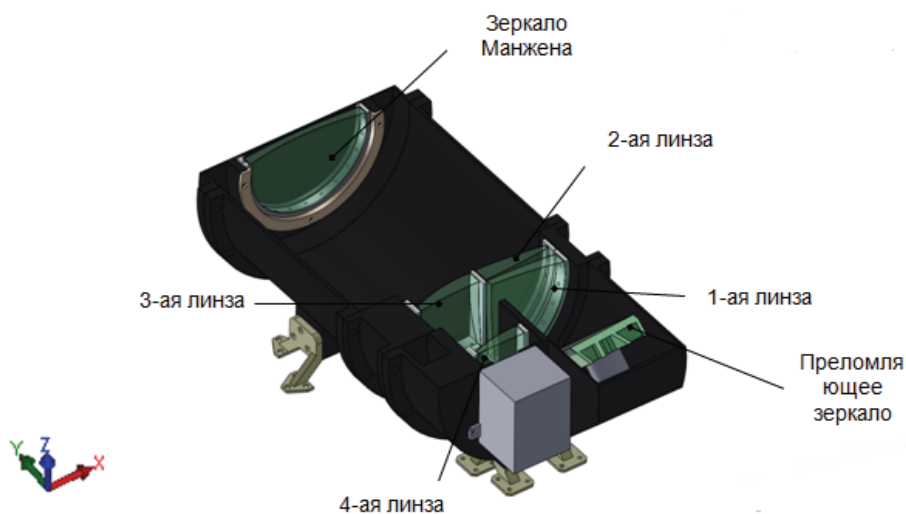


Рисунок 2 – Общий вид спроектированной системы в разрезе

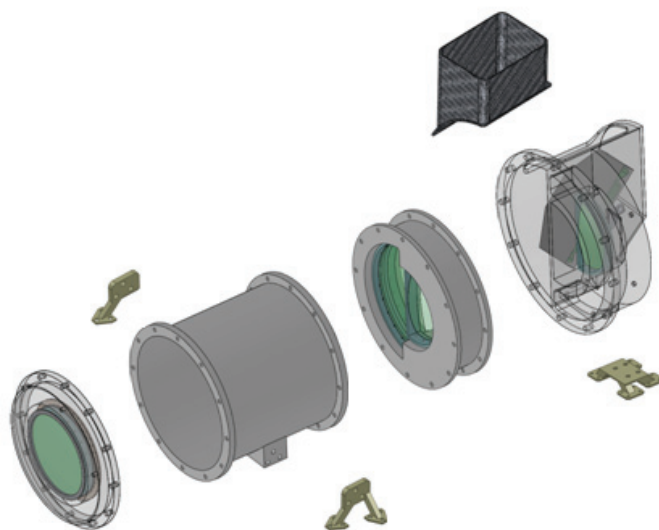


Рисунок 3 – Составные элементы телескопа

Для креплений линз и сошек с целью увеличения прочностных характеристик был выбран сплав титана. Также в процессе проектирования определяется последовательность сборки в единую систему с определением вспомогательных отверстий для соединения и крепления элементов, т.е. прорабатывается технологичность спроектированных элементов и всей модели в целом. На рис. 4 показан результат данной стадии проектирования – внешний вид телескопа в собранном виде, включая блок фокальной плоскости.

#### Анализ на воздействие статических нагрузок

Анализ на статические нагрузки производился с помощью ПО Solid Works: узлы и крепления системы проверены на возникающие напряжения, перемещения и деформации.

Весь процесс проектирования проводился в итерационном режиме и, при возникновении несоответствий на более поздних этапах, структура дорабатывается с учетом этих несоответствий.

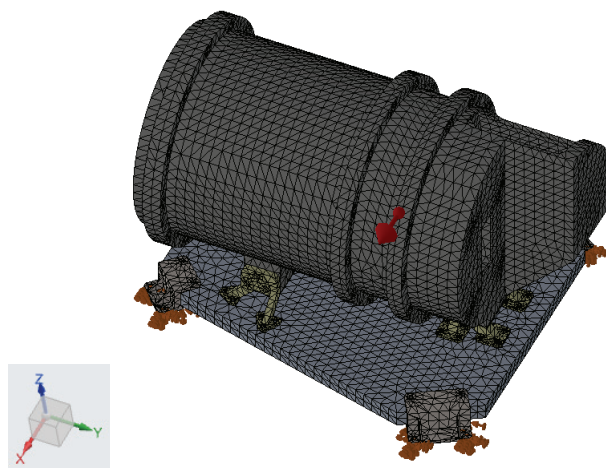
Сделанный анализ позволяет получить 3D модель полезной оптической нагрузки, были рассмотрены случаи нагрузок в направлении X

и Z, возникающие вследствие действия ускорения. Для предварительного расчета было взято ускорение со значением в 10 g.

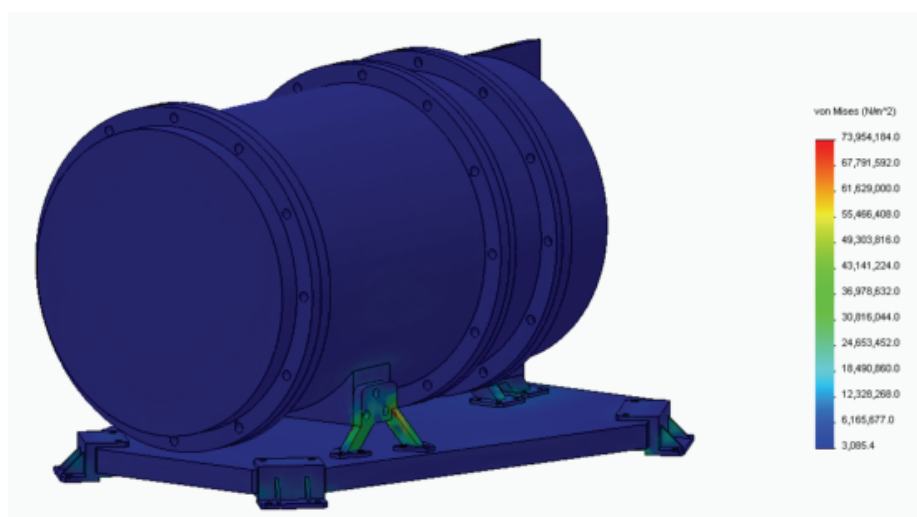
Анализ проектной модели проводился по отчетам, полученными с помощью ПО Solid Works в текстовом формате по заданным основным физическим характеристикам (масса, модуль упругости и т. д.), использованных при расчете, а также по информации о сетке (количество элементов, тип сетки, количество узлов, размеры элементов, толерантность), с учетом использованных материалов для модели.

На рис. 4 показана используемая сетка конечных элементов, сгенерированная посредством ПО Solid Works, а также указано направление действия ускорения и точки закрепления модели. Рисунки 5-7 отображают максимальные значения напряжений, перемещений и деформаций, возникающие при приложении ускорения 10 g и воздействие его на элементы конструкции.

На рис. 5, приведена эпюра, из которой следует, что наибольшее напряжение возникнет в области показанной красным цветом, а именно в конструкции сошки. Максимальное значение напряжения – 73,954 МПа, минимальное – 3,085 МПа.



**Рисунок 4** – Конечно-элементная модель



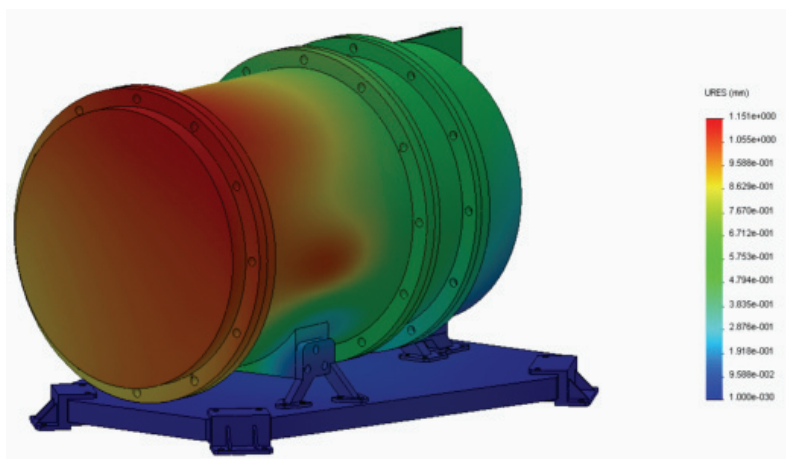
**Рисунок 5** – Максимальные значения напряжений  
(максимальные значения указаны в верхней строчке столбца справа)

Из анализа максимальных напряжений, испытываемых конструкцией, следует, что она способна выдержать предельную статическую нагрузку, возникающую при запуске. Так допустимое напряжение для металла, из которого сделаны сошки (Ti-6Al-4V(SS)) равно 940 МПа, в зависимости от получения и обработки может достигать до 1400 МПа, а также предел текучести равен 827-1060 МПа [3], что значительно ниже полученных при

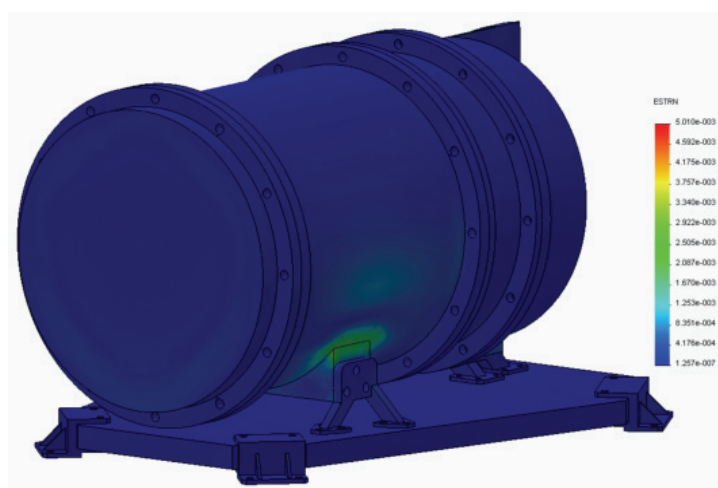
анализе значений.

На рис. 6 эпюра показывает область наибольшего перемещения элементов конструкции при нагрузке, красным цветом показана область перемещения.

На рис. 7 эпюра показывает, что максимальные значения деформаций возникают в местах крепления сошки с механической структурой телескопа.



**Рисунок 6** – Максимальные значения перемещений



**Рисунок 7** – Максимальные значения деформаций

Кроме статических нагрузок, испытываемых полезной нагрузкой КА, воздействие которых было проанализировано, механическая конструкция как телескопа, так и всего КА подвергается динамическим (вибрационным, акустическим) нагрузкам, возникающих при запуске. Поскольку анализ на динамические нагрузки проводится после определения механической конструкции платформы, на которую интегрируется полезная нагрузка, с построением конечно-элементной модели КА в целом, этот анализ будет проведен при определении используемого ракетопносителя. Выбор ракетопносителя

определил те динамические нагрузки, которые испытывает аппарат при выводе на орбиту.

### Заклучение

Описанный в статье процесс проектирования механической структуры телескопа и проведенный анализ на воздействие статических нагрузок, соответствует требованиям, предъявляемым к стадии рассмотрения PDR (Preliminary Design Review), используемых в SSTL.

**References**

- 1 Murzakulov G., Nurguzhin M., Albazarov B., Zhumazhanov B. Modern methods of design and analysis of optical systems on example of the off-axis catadioptric system // Al-Farabi KazNU bulletin, physics series. – 2013. – №1(44). – С.95-100.
- 2 Mechanical properties of carbon fiber composites for environmental applications, Rodney Andrews and Eric Grulke – Chemical and Materials Engineering Department, University of Kentucky, Lexington, Geoff Kimber, Center for Applied Energy Research, University of Kentucky, Lexington. – 1999. – KY 40511-8433, Washington. – P.589.
- 3 Mounting optics in optical instruments, Paul R. Yoder, Jr, 2002, The International Society for Engineering Bellingham. – 2002. – ISBN-13: 978-0-8194-4332-8, ISBN: 0-8194-4332-8. – P.354-358.

*Авторы выражают благодарность Тен В.В и Альбазарову.Б.Ш. за участие в постановке задачи, полезные рекомендации и замечания.*