



**СибАК**  
www.sibac.info

ISSN 2308-5991  
9 772308 599548 >

СБОРНИК СТАТЕЙ ПО МАТЕРИАЛАМ LV МЕЖДУНАРОДНОЙ  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

# ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ – от теории к практике



№ 2 (50)

г. НОВОСИБИРСК, 2016



# ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ – ОТ ТЕОРИИ К ПРАКТИКЕ

*Сборник статей по материалам  
LV международной научно-практической конференции*

№ 2 (50)  
Февраль 2016 г.

Издается с октября 2011 года

Новосибирск  
2016

## Оглавление

### **Секция «Аэрокосмическая техника и технологии» 8**

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
НА ПРИМЕРЕ СОЗДАНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ГОЛОВКИ  
ЗВЕЗДНОГО ДАТЧИКА 8

Елубаев Сулеймен Актлеуович  
Альбазаров Бахытжан Шапагатович  
Тен Владимир Валентинович  
Шамро Александр Валентинович  
Сухенко Анна Сергеевна

ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ  
С СОЛНЕЧНЫМ ПАРУСОМ 18  
Поляхова Елена Николаевна  
Королев Владимир Степанович

### **Секция «Безопасность жизнедеятельности человека, промышленная безопасность, охрана труда и экология» 32**

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ЭТАПЫ ПРОВЕДЕНИЯ  
ЭКСПЕРТИЗЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ  
ПРОЕКТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ 32

Колобов Андрей Николаевич  
Колобов Николай Сергеевич  
Старостина Екатерина Александровна  
Пестов Александр Владимирович  
Кайсарова Евгения Анатольевна  
Кондрацкий Вадим Дмитриевич

ПЛАНИРОВАНИЕ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ЛОКАЛИЗАЦИИ  
И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙ  
НА ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ 37

Колобов Андрей Николаевич  
Колобов Николай Сергеевич  
Старостина Екатерина Александровна  
Пестов Александр Владимирович  
Кайсарова Евгения Анатольевна  
Кондрацкий Вадим Дмитриевич



## СЕКЦИЯ

### «АЭРОКОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ»

#### ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ СОЗДАНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ГОЛОВКИ ЗВЕЗДНОГО ДАТЧИКА

**Елубаев Сулеймен Актлеуович**

заведующий лабораторией,

ДТОО «Институт космической техники и технологий»,

Республика Казахстан, г. Алматы

E-mail: [elubaev.s@istt.kz](mailto:elubaev.s@istt.kz)

**Альбазаров Бахытжан Шапагатович**

ведущий научный сотрудник,

ДТОО «Институт космической техники и технологий»,

Республика Казахстан, г. Алматы

E-mail: [albazarov.b@istt.kz](mailto:albazarov.b@istt.kz)

**Тен Владимир Валентинович**

ведущий научный сотрудник,

ДТОО «Институт космической техники и технологий»,

Республика Казахстан, г. Алматы

E-mail: [ten.v@istt.kz](mailto:ten.v@istt.kz)

**Шамро Александр Валентинович**

заведующий сектором,

ДТОО «Институт космической техники и технологий»,

Республика Казахстан, г. Алматы

E-mail: [shamro.a@istt.kz](mailto:shamro.a@istt.kz)

**Сухенко Анна Сергеевна**

заведующий сектором,

ДТОО «Институт космической техники и технологий»,

Республика Казахстан, г. Алматы

E-mail: [suhenko.a@istt.kz](mailto:suhenko.a@istt.kz)

## DESIGN OF OPTICAL SYSTEMS BY THE EXAMPLE OF OPTICAL HEAD OF STAR TRACKER

**Suleimen Yelubayev**

*head of laboratory, AALR "Institute of space technique and technology",  
Kazakhstan, Almaty*

**Bakhytjan Albazarov**

*leading researcher, AALR "Institute of space technique and technology",  
Kazakhstan, Almaty*

**Vladimir Ten**

*leading researcher, AALR "Institute of space technique and technology",  
Kazakhstan, Almaty*

**Alexander Shamro**

*sector manager, AALR "Institute of space technique and technology",  
Kazakhstan, Almaty*

**Anna Sukhenko**

*sector manager, AALR "Institute of space technique and technology",  
Kazakhstan, Almaty*

*Работа выполнена в рамках РБП 076 «Прикладные научные исследования в области космической деятельности, транспорта и коммуникаций».*

### АННОТАЦИЯ

В работе представлена методика проектирования оптической системы с использованием современного программного продукта (Zemax). Представлены основные требования к звездному датчику, к его оптической системе, анализ получаемых изображений. Также представлен анализ характеристик звездного датчика, созданного на основе представленного проектирования оптической системы с блендой.

### ABSTRACT

The paper presents a methodology for designing the optical systems using modern software (Zemax). The basic requirements to the star tracker, requirements to its optical system and analysis of the images are presented.

Also it is presented an analysis of characteristics of star tracker that was created on the base of design of the optical system with the lens hood.

**Ключевые слова:** фокусное расстояние; апертура; звездная величина; линза; ориентация космического аппарата; программное обеспечение Zemax.

**Keywords:** focal length; aperture; star magnitude; lens, orientation of the spacecraft; Zemax software.

В статье описан процесс проектирования и создания оптической системы звездного датчика для использования в современных космических аппаратах (КА). Как правило, при проектировании КА используются комплектующие, имеющие летную историю, следовательно, продукты фирм, завоевавших место на мировом рынке. Для Республики Казахстан, начинающей развивать свою космическую индустрию, задачей является создание собственных комплектующих, позволяющих использовать их для будущих отечественных КА. К таким комплектующим относится звездный датчик (ЗД), процесс разработки которого включает в себя разработку и создание оптической головки, математического обеспечения (МО) обработки получаемого изображения.

Поскольку ЗД должен позволять определять угловое положение КА с точностью до нескольких угловых секунд, то МО должно обеспечивать определение координат звезд с большой точностью. Современные ЗД, например [1, с. 11; 2, с. 27], используют в качестве детекторов CCD, CMOS датчики. Для получения изображения звезд с субпиксельной точностью необходимо постобработка «размазанного» на несколько пикселей изображения звезды – нахождения центраида этого изображения. Разрабатываемое МО для обработки изображения звезды требует, чтобы изображение было равномерно «размазано» на 5–6 пикселей используемой матрицы. В рассматриваемом случае это составляет величины не более 96 мкм. Следует отметить, что «размазывание» не может быть произвольным.

Получение необходимого изображения звезды накладывает основное требование к оптической системе (ОС) ЗД. Так при требовании на полный угол зрения не менее  $20^\circ$  и необходимости иметь не менее 3-х звезд в поле зрения, достаточным является использование каталога звезд до +5.5 звездной величины (при частоте обновления 2 Гц, квантовой эффективности детектора до 50 % и собственных шумах детектора не более 5 электронов в секунду). Это позволяет определить требование к апертуре оптической системе: не менее 20 мм. При требовании для габаритных требований



к оптической головке с блендой ( $200 \times 200 \times 300 \text{ мм}^3$ ), общая длина до фокальной плоскости оптической головки должна быть спроектирована минимальной (для системы выбрано значение в 65 мм). Спектральный диапазон работы ОС — от 0.42 мкм до 0.8 мкм. Температурный диапазон работы от  $-20$  град. до  $+50$  град Цельсия.

Бленда проектируется и создается из требования, чтобы минимальный угол направления оптической оси ЗД на Солнце, при котором сохраняются функциональные характеристики прибора, составлял 40 градусов.

Как правило, в качестве оптической системы головки звездного датчика выбираются линзовые (диоптрические) системы со сферическими поверхностями. Требования, предъявляемые к оптической головке: ограниченность размеров, большая светосила (величина  $F\#$  — отношение фокусного расстояния к апертуре у большинства подобных систем находится в диапазоне от 1 до 2), а также равномерность пятна рассеяния по полю зрения и ограниченность его размеров приводит к необходимости рассматривать многолинзовые системы.

При использовании линз со сферическими поверхностями, системы с количеством элементов меньше 6 не позволили получить изображение точечного источника, соответствующего выдвинутым требованиям. Использование программного продукта Zemax при проектировании, позволило получить необходимые результаты. Минимизация потерь принимаемого излучения, как это принято, достигается проведением просветления линз.

На рисунке 1 приведена 6 – линзовая система со сферическими поверхностями и диафрагмой, расположенной на 1 – ой поверхности. Апертура данной системы 20 мм, эффективное фокусное расстояние 40.053 мм,  $F\# = 1.998$ , общая длина от 1 – ой поверхности до фокальной плоскости – 60.8 мм.

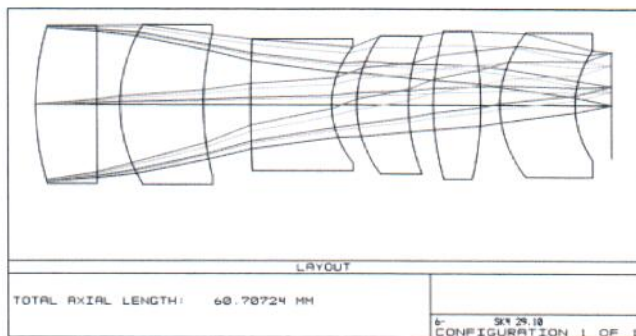


Рисунок 1. 6-линзовая оптическая система

Проведенный анализ полученной ОС показал, что ее как оптические, так и габаритные параметры отвечают поставленным требованиям.

На рисунке 2 показаны изображения точечного источника для различных длин волн в требуемом спектре и на рисунке 3 – для различных углов, в которые попадает точечный источник зрения (длины волн и углы расположения источника указаны на рисунках).

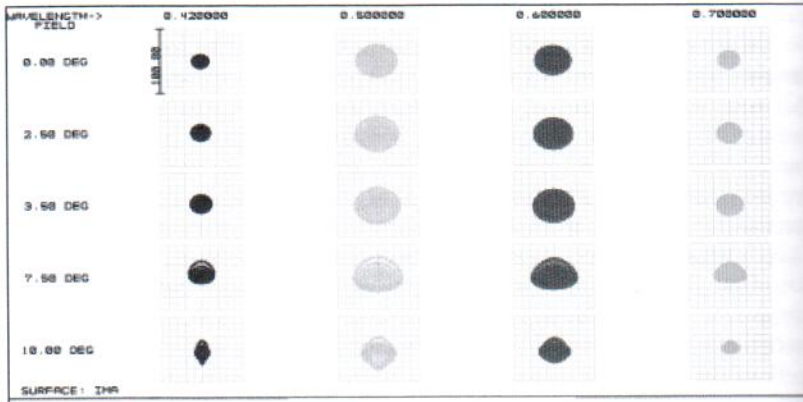


Рисунок 2. Спот-диаграммы, получаемые оптической системой в зависимости от спектра излучения и угла поля зрения

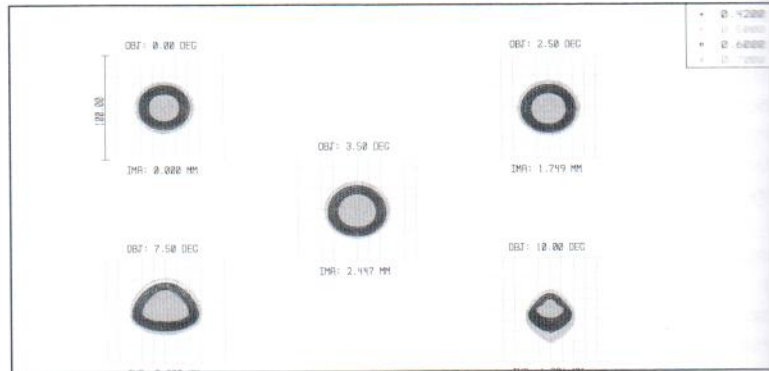
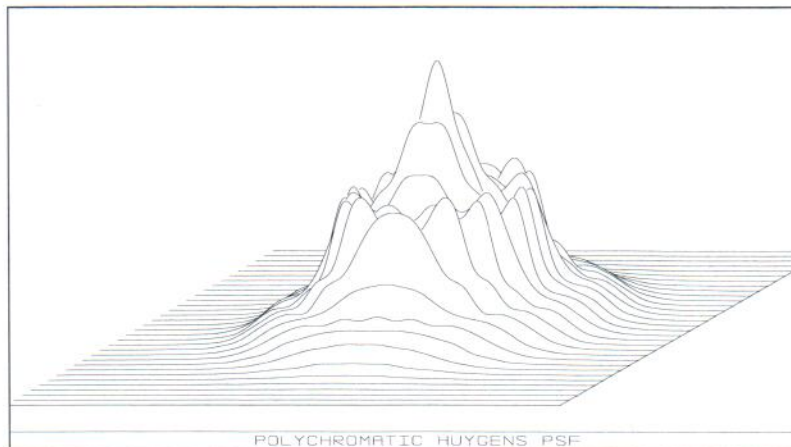


Рисунок 3. Полихроматические спот-диаграммы в зависимости от угла поля зрения



Приведенные иллюстрации показывают качественное распределение излучения от точечного источника и демонстрируют соответствие общепринятым для пятна рассеяния, получаемого оптической системой звездного датчика [3, с. 2]. Для определения этих количественных величин – необходимо провести анализ распределения энергии получаемого излучения в пятне изображения и значения функции распределения точки (ФРТ) в пикселях.

На рисунке 4 приводится функция рассеяния точки на оптической оси по модели Гюйгенса и на рисунке 5 – геометрические размеры пятна рассеяния и распределение энергии в пятне. Размеры пятна около 65 мкм по обеим осям (от -32 мкм до +32 мкм) и видно, что энергия от точечного источника полностью распределена внутри данного пятна, отсутствует «зашумление» соседних пикселей.

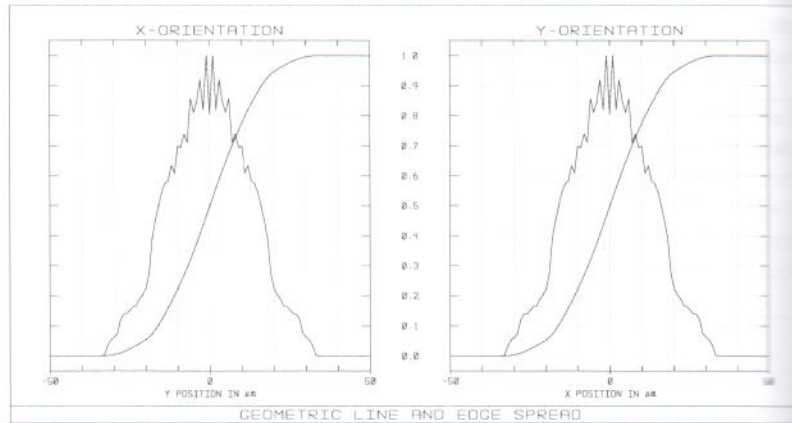


**Рисунок 4. ФРТ на оси, вычисленная по методу Гюйгенса**

Данный размер пятна, меньший, чем размер 3.5 пикселей на 20 %, оставлен намеренно, чтобы был запас по размеру при допусках на изготовление линз и сборку системы. При необходимости увеличения размеров пятна рассеяния – достаточно будет сделать дефокусировку системы.

Был проведен анализ аналогичных данных по полю зрения 3Д, который показал, что качественная структура пятна изображения точечного источника остается прежней, при некотором изменении его размеров, распределения интенсивности излучения.

Важнейшим фактором при проектировании оптических систем является реализуемость спроектированной системы, т. е. чувствительность ее на различные механические отклонения от проектных величин, а также на отклонения величины толщин линз и их кромок.



**Рисунок 5. Размер пятен рассеяния точки на оси и распределение энергии в пятне (температура +20 град Цельсия, воздух)**

При анализе на чувствительность к точности изготовления линз и сборке приняты следующие допуски, не влияющие на оптические характеристики системы:

- точность соблюдения радиуса кривизны сферических поверхностей линз – 0.1 мм;
- точность на соблюдение толщин линз и расстояний между линзами – 0.05 мм;
- точность центрирования линз в ОС – 0.05 мм;
- допуск на точность соблюдения показателя преломления стекол – 0.001;
- допуск на отклонения числа Аббе стекол – 1 %.

Принятые допуски были выбраны из возможностей инструментов, используемых при изготовлении линз, сборке всей системы и проведения контроля точности.

Также в процессе проектирования проводился анализ чувствительности системы на изменения во внешней среде: температуры, давления (замена воздуха на вакуум), который показал, что изменения оптических характеристик не превышают принятые допуски. Учет влияния ионизирующего излучения на оптические

свойства компонент осуществлен включением в состав двух линз, изготовленных из радиационно-стойких стекол. Так входная линза изготовлена из стекла К 108.

Таким образом, после изготовления оптических элементов и сборки, ожидалось, что система должна иметь приемлемые характеристики. Это было проверено путем ввода в ПО Zemax геометрических параметров, измеренных с учетом точности приборов, как компонент, так всей системы.

На рисунках 6 и 7 демонстрируются некоторые оптические характеристики собранной системы.

Анализ представленных рисунков показывает, что реализованная ОС отвечает предъявляемым требованиям по размеру пятна рассеивания, также, как и спроектированная оптическая система. Рисунок 7 также показывает на возможность получения необходимого его размера путем изменения расстояния до фокальной плоскости.

Одной из важных характеристик (которая в итоге оказывает существенное влияние на возможности КА) звездного датчика является минимальный угол между оптической осью и направлением на Солнце, при котором еще возможно функционирование ЗД – так называемый exclusion angle. Такая же характеристика вводится для минимального угла между внешней частью освещенной части диска Земли и оптической осью. Бленда должна обеспечивать как минимум 40–45 градусов для Солнца и 30–35 для Земли, иначе эксплуатация ЗД на низких (до 1000 км) околоземных орбитах практически теряет смысл. Хорошие образцы обеспечивают 35–40 градусов для Солнца и 30–35 для Земли, а лучшие (например, ОГ ЗД Hydra) – менее 30 градусов для Солнца и Земли.

При моделировании проектирования бленды ЗД в среде Matlab были приняты следующие допущения: типичные значения глубины ямы детекторов – 100–500 тысяч электронов, а конструкция бленды подбиралась таким образом, чтобы засветка от Солнца и/или Земли в фокальной плоскости не превышала 30–40 % глубины ямы пикселей детектора при заданном минимальном угле между оптической осью и Солнцем/Землей. Для удовлетворения этого требования фотоны, прибывающие с углом более заданного (например, 40 градусов), должны испытать как минимум 5–8 отражений в бленде до достижения поверхности детектора. Минимально необходимое количество отражений зависит от коэффициентов отражения внутренних элементов бленды и требуемого минимального угла.

Так как поверхность бленды является рассеивающей, при компьютерном моделировании часто используется метод Монте-Карло – направление дальнейшего распространения «фотона» после очередного



отражения выбирается случайно с распределением вероятностей направлений, которое зависит от свойств покрытия поверхности.

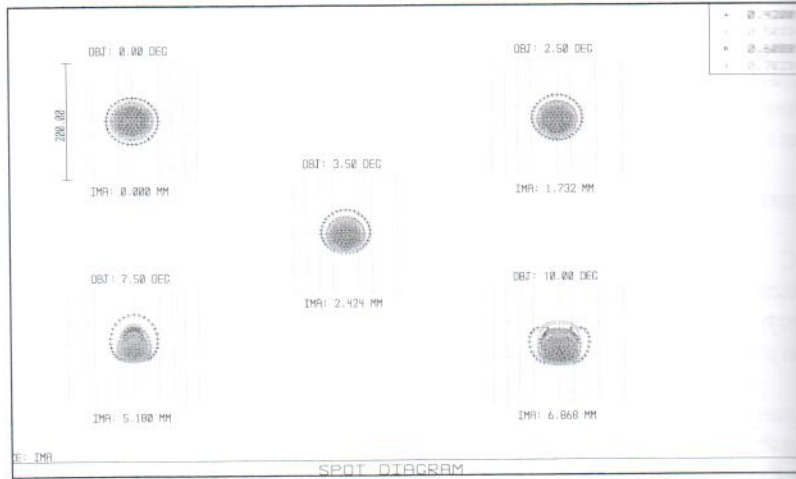


Рисунок 6. Изображения точки в зависимости от угла поля зрения, получаемые созданной системой

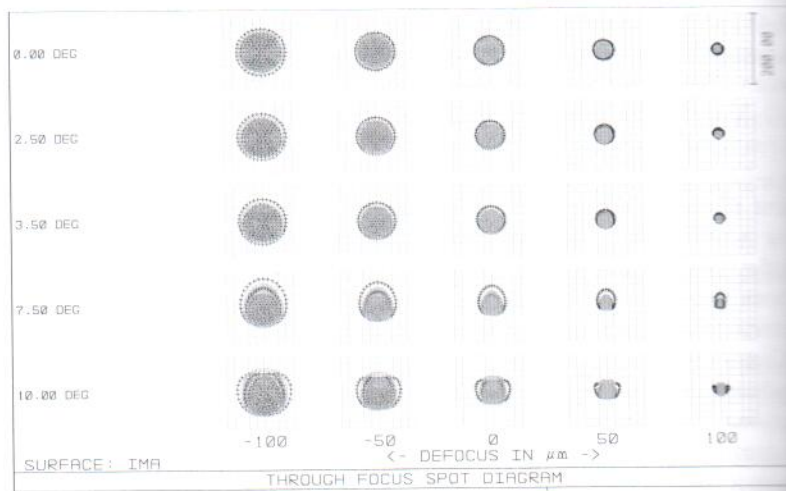
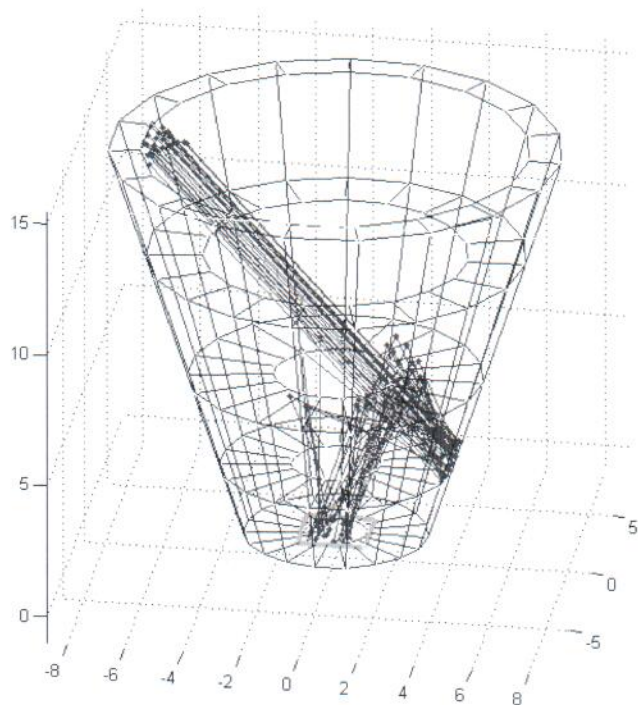


Рисунок 7. Изображения точки при различных положениях фокальной плоскости, созданной системы

Проведено моделирование нежелательной засветки от Солнца для предельного угла от оптической оси в 40 градусов. На рисунке 8 иллюстрируется результат моделирования хода лучей в бленде.



**Рисунок 8. Моделирование нежелательной засветки ЗД**

По результатам моделирования была изготовлена бленда, внутренняя поверхность была покрыта краской, имеющей низкий коэффициент отражения (не более 2 %).

Результаты полевых испытаний созданной ОС (съемка ночного неба в условиях высокогорья – 2700 м), показали полное соответствие полученных данных с результатами моделирования.

Таким образом, описаны этапы проведения проектирования оптической головки ЗД, включая ее бленду, представлен анализ созданной на этой основе системы, проведено сравнение результатов моделирования и функциональных испытаний. В дальнейшем, для создания протолетной модели, предполагается проведение ее полных наземных испытаний.

### Список литературы:

1. Дятлов С.А., Бессонов Р.В. Обзор звездных датчиков ориентации космических аппаратов // Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов: сборник трудов Всерос. научно-техн. конф. (Таруса, 22–25 сентября 2008 г.). – Таруса, 2008. – С. 12–31.
2. Ключников М.В. Звездный датчик и его использование для полетной фотограмметрической калибровки оптико-электронной аппаратуры дистанционного зондирования Земли: дис. канд. техн. наук. – М., 2005. – С. 27–28.
3. Leijtens J., Vliegthart W., Lampridis D. A new star (sensor) is born // Proc. of Int. conf. on Space Optics. – Greece, 2010. – [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/228107687\\_A\\_NEW\\_STAR\\_SENSOR\\_IS\\_BORN](https://www.researchgate.net/publication/228107687_A_NEW_STAR_SENSOR_IS_BORN) (Дата обращения: 29.02.2016).

### ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ С СОЛНЕЧНЫМ ПАРУСОМ

**Поляхова Елена Николаевна**

канд. физ.-мат. наук, доц.  
Санкт-Петербургский государственный университет  
РФ, г. Санкт-Петербург  
E-mail: [pol@astro.spbu.ru](mailto:pol@astro.spbu.ru)

**Королев Владимир Степанович**

канд. физ.-мат. наук, доц.  
Санкт-Петербургский Государственный Университет  
РФ, г. Санкт-Петербург  
E-mail: [yokorol@spbu.ru](mailto:yokorol@spbu.ru)