

## **Формирование фоно-целевой обстановки для оптико-электронных систем ракетно-космического назначения**

**Богданов И.В.\*, Величко А.Н.\*\***

*Конструкторское бюро точного машиностроения имени А.Э. Нудельмана,  
ул. Введенского, 8, Москва, 117342, Россия*

*\*e-mail: [bogdanov113@gmail.com](mailto:bogdanov113@gmail.com)*

*\*\*e-mail: [vel110909@rambler.ru](mailto:vel110909@rambler.ru)*

### **Аннотация**

В статье представлены результаты исследований по формированию фоно-целевой обстановки в угловом поле оптико-электронных приборов ракетно-космического назначения. Полученные данные были использованы при создании стенда фоно-целевой обстановки предназначенного для отработки алгоритмов обнаружения, селекции и сопровождения объектов регистрации. Представлены фотографии стендового оборудования.

**Ключевые слова:** стенд, фоно-целевая обстановка, оптико-электронные приборы, инфракрасные, измерения.

### **Введение**

Развитие электронной элементной базы в области повышения радиационной стойкости и электромагнитной совместимости, уменьшения энергопотребления и массогабаритных параметров позволяет всё более активно применять оптико-электронные приборы (ОЭП) в составе космических аппаратов (КА). Примером этого является создание спутников серии «Ресурс», «Космос», «Микрон», «Фаза» и «Метеор», которые работают, преимущественно, в ультрафиолетовом (УФ) и

видимом (ВД) спектральных диапазонах. Широкое применение, особенно в задачах связанных с дистанционным зондированием Земли (ДЗЗ), противоракетной и противокосмической обороны, защитой от метеоритов и наблюдением за космическим пространством, также находят КА с ОЭП, работающими в инфракрасной (ИК) области спектра [1]. Такие ОЭП должны иметь возможность обнаруживать, распознавать, идентифицировать и удерживать в своём угловом поле точечные быстродвижущиеся объекты, энергетические и спектральные характеристики которых близки к характеристикам окружающего фона [2-5].

В связи с этим, при проектировании ОЭП актуальной становится задача формирования фоно-целевой обстановки (ФЦО) для баллистических и орбитальных объектов наблюдения, которая бы адекватно отражала реальные условия применения. Сложность создания моделей ФЦО в лаборатории заключается в возможностях воспроизведения фоно-целевых ситуаций со спектральными, температурными и динамическими характеристиками соответствующими открытому космосу (низкотемпературный фон, глубокий вакуум, перепады температур объектов).

Таким образом, разработка научно обоснованных технических решений по формированию фоно-целевой обстановки представляет собой актуальную проблему отечественного космического приборостроения.

### **Особенности фоно-целевой обстановки в оптическом диапазоне**

Для оценки значений энергетических потоков излучаемых теми или иными объектами, их принято различать по угловому размеру, который они занимают в угловом поле ОЭП. Таким образом, объекты могут быть точечными (т.е. бесконечно

малыми и бесконечно удалёнными по отношению к ОЭП), площадными и протяжёнными. Площадными принято называть такие излучатели, которые частично перекрывают угловое поле, а протяжёнными те, которые полностью заполняют собой угловое поле обзора. Состав ФЦО определяется, в первую очередь, целевым назначением и чувствительностью ОЭП, а также спектральным диапазоном работы. ФЦО складывается из совокупности объектов регистрации и фоновых космических объектов (ФКО). К объектам регистрации относятся КА и баллистические объекты, а к ФКО техногенные объекты (космический «мусор») и естественный космический фон, включающий в себя как протяжённые астрономические объекты (звёздные скопления, туманности, галактики и т.п.), так и точечные небесные тела (отдельные звёзды, планеты и астероиды). Для адекватного моделирования условий работы ОЭП необходимо провести тщательный анализ тех объектов ФЦО, которые могут попадать в его угловое поле.

К техногенным объектам относятся выработавшие свой ресурс КА и их элементы, последние ступени ракетносителей и обломки различного искусственного происхождения. Размеры космического «мусора» колеблются в диапазоне от 0,01 до 10 м. Типичные материалы, из которых они изготовлены, это сталь и алюминий. Характерной особенностью таких объектов является их «холодное состояние», в связи с отсутствием работающей электроники, двигательных установок и других технических устройств.

Фоновое космическое излучение естественного происхождения в космическом пространстве обусловлено собственной светимостью звёзд и звёздных скоплений, однако за счет перерасеяния звёздного света на других небесных объектах и

межзвездной пыли в общей светимости космоса выделяются следующие составляющие:

– непосредственно звездная составляющая, наблюдаемая в виде пространственно разрешённых точечных источников или в виде протяженных ярких участков, пространственное разрешение отдельных звёзд в которых при решении целевых задач ОЭП не представляется актуальным;

– светимость наиболее ярких планет, в том числе Луны, за счет рассеяния солнечного света;

– диффузный галактический свет, включающий рассеянную на галактических объектах и пыли компоненту звёздного света. В диффузный галактический свет обычно включается и свечение пространственно неразрешённых звезд.

КА разнообразны по своим формам и размерам. В данный момент, на околоземной орбите находится более 3000 работающих аппаратов, для решения телекоммуникационных, метеорологических, навигационных, картографических и научных задач. Их антенны, блоки служебных систем (электронных и оптических), нерабочие поверхности солнечных батарей и радиаторы, как правило, окрашены белой эмалью и имеют смешанный диффузно-зеркальный характер излучения.

Баллистические цели это тела вращения симметричные относительно продольной оси, в основном конусы. Их длина составляет от 0,7 до 2 м с диаметром основания от 0,2 до 0,6 м. Их принято подразделять на лёгкие и тяжёлые цели. Первый тип обычно представляют собой надувные баллоны из металлизированной плёнки или сетчатой конструкции из металлических пружин. Тяжёлые цели – это

корпус из теплозащитного материала, в котором размещается двигатель. На корпусе, обычно закреплено несколько лёгких целей [6].

Воспроизведение светоэнергетических характеристик объектов регистрации составляющих ФЦО является важной задачей при отработке алгоритмов обнаружения, селекции и сопровождения в процессе разработки и испытаний экспериментальных образцов ОЭП КА. Другой актуальной задачей, рассматриваемой в процессе разработки систем регистрации космических объектов, является формирование фоновой обстановки, соответствующей условиям работы ОЭП КА.

### **Способы формирования фоно-целевой обстановки в лабораторных условиях**

На сегодняшний день лабораторные стенды для формирования ФЦО достаточно широко распространены. Одни представляют собой стенды имитации отдельных объектов (Солнца, Земли, звёзд), а другие моделируют сложную ФЦО (небо+облака, Земля+атмосфера+космос, звёзды+космос, и т.п.) [7]. В качестве излучателей, моделирующих излучение Солнца, принято использовать разрядные лампы с ксеноновым наполнением, так как их спектральная светимость (представлена на рисунке 1) в ВД диапазоне наиболее близка к солнечной, а цветовая температура находится в диапазоне от 5200 до 6200 К.

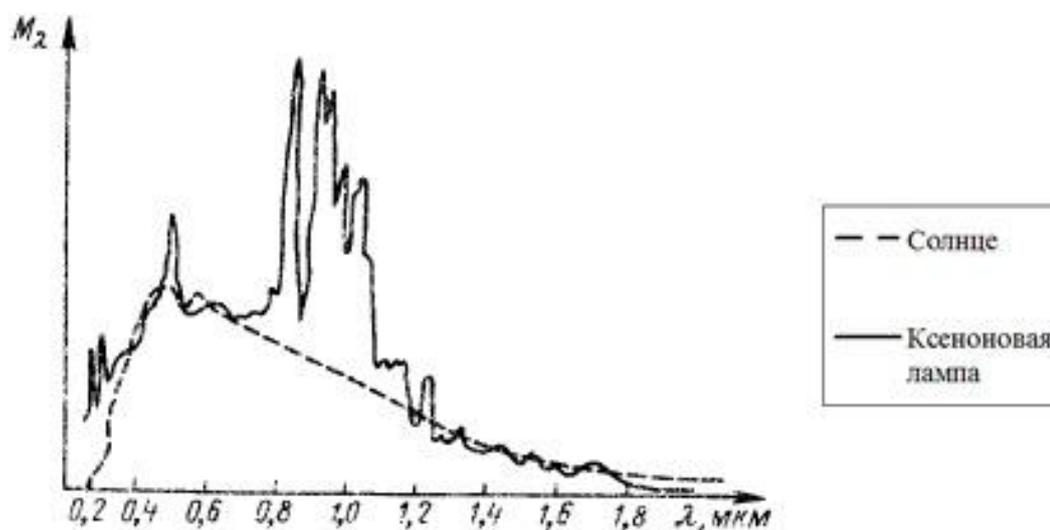


Рисунок 1 – Поверхностная плотность излучения Солнца и ксеноновой лампы

При проведении некоторых видов испытаний (например, тепловакуумных) возможно использование состоящих из нескольких ламп крупногабаритных стендов по моделированию солнечного излучения, построенных на принципе суммирования световых потоков. Каждая лампа снабжается рефлекторами, а излучение от них с помощью зеркального коллиматора переносится в виде параллельного пучка на световой щит. На нём формируется световое пятно значительных размеров (диаметром от 2 до 12 м) с плотностью мощности до  $1400 \text{ Вт/м}^2$ . Оптическая схема одного из таких стендов, ТБК-120 [8], представлена на рисунке 2.

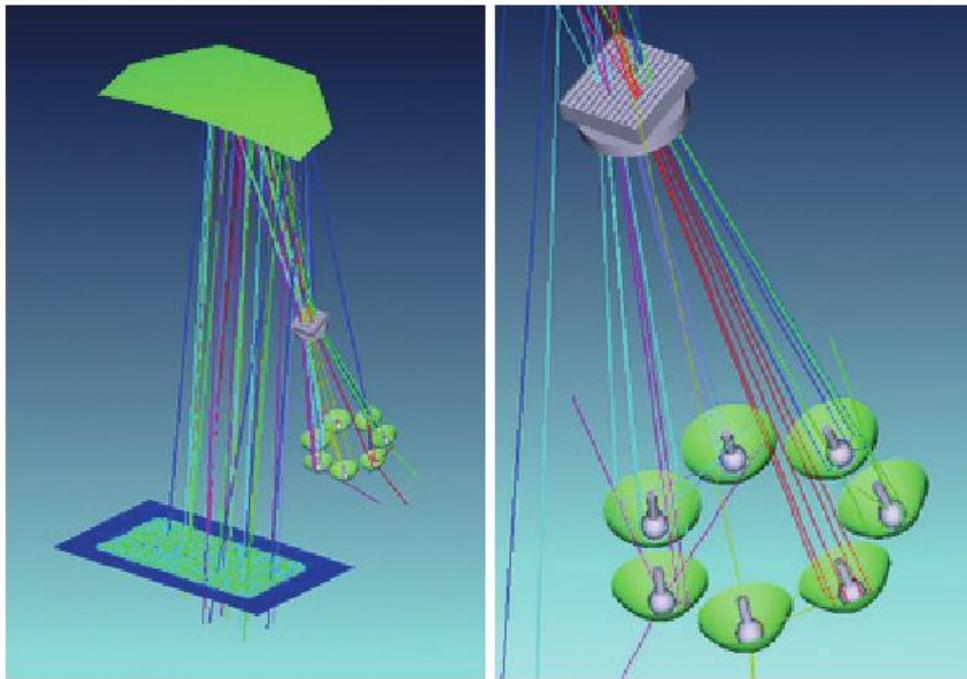


Рисунок 2 – Оптическая схема имитатора Солнца ТБК-120

Однако, ОЭП работающие в космическом пространстве неспособны обнаруживать объекты расположенные в одном угловом поле с Солнцем без применения специальных светофильтров многократно снижающих чувствительность приёмника излучения. Поэтому при создании ФЦО характерной для таких приборов целесообразно моделировать только боковую солнечную помеху (солнечный блик). Для этого подходит использование одного источника излучения. В качестве излучателя могут также выступать не только разрядные, но и галогенные лампы. Они имеют меньшие габаритные размеры, стоимость, более простую схему подключения и в них отсутствует пульсация свечения. При использовании их в стендах ФЦО следует учитывать, что температура таких ламп вдвое меньше, чем у ксеноновых и составляет 3000 К.

Классический имитатор звезды представляет собой изображение точечного бесконечно удалённого объекта в заданном спектральном диапазоне. Современные

стенды могут быть перестраиваемыми и создавать изображение звёзд разных классов. Это достигается благодаря использованию излучения от нескольких источников, применением диспергирующих и дифракционных оптических систем [9-13]. Звёзды принято классифицировать по их температуре – начиная от холодных коричневых карликов с температурой 700-1500 К и заканчивая горячими голубыми гигантами с температурой до 70000 К.

Излучение объектов в ИК области спектра характеризуется, в основном, тремя параметрами: коэффициент теплового излучения, температура и размер излучающей области. Моделирование излучения таких объектов производится широким классом тепловых приборов (глобары, штифты Нернста и т.п.). В качестве прецизионных ИК излучателей (в диапазоне длин волн от 1,5 до 25 мкм) традиционно применяются модели абсолютно чёрных тел (АЧТ). Они различаются как по рабочим температурным диапазонам (от 80 и до 700 К) [14], так и по размерам излучающей области (до 350 мм). У моделей АЧТ коэффициент собственного излучения близок к единице и они имеют стабильную в течении всего времени работы температуру. Всё это позволяет существенно повысить качество проводимых с такими излучателями работ, корректнее оценивать уровень сигнала от источника и, соответственно, более адекватно моделировать объекты ФЦО.

ФЦО может быть разнообразна не только по своему спектральному составу излучения и энергетической светимости, но и по пространственному распределению излучающих объектов. В зависимости от условий работы ОЭП он может регистрировать в своём угловом поле как точечные, так и площадные объекты излучения. Для моделирования такой ФЦО применяются наборы различных масок –

диафрагмы с небольшими круглыми отверстиями или по форме объектов наблюдения.

### Стенд фоно-целевой обстановки

Сложность моделировании условий реальной ФЦО заключается в необходимости обеспечения минимального уровня аппаратного фонового излучения от конструктивных элементов, попадающих в угловое поле ОЭП. Другим препятствием является ослабления излучения в атмосфере, главным образом, в среднем и дальнем ИК диапазоне (рисунок 3).

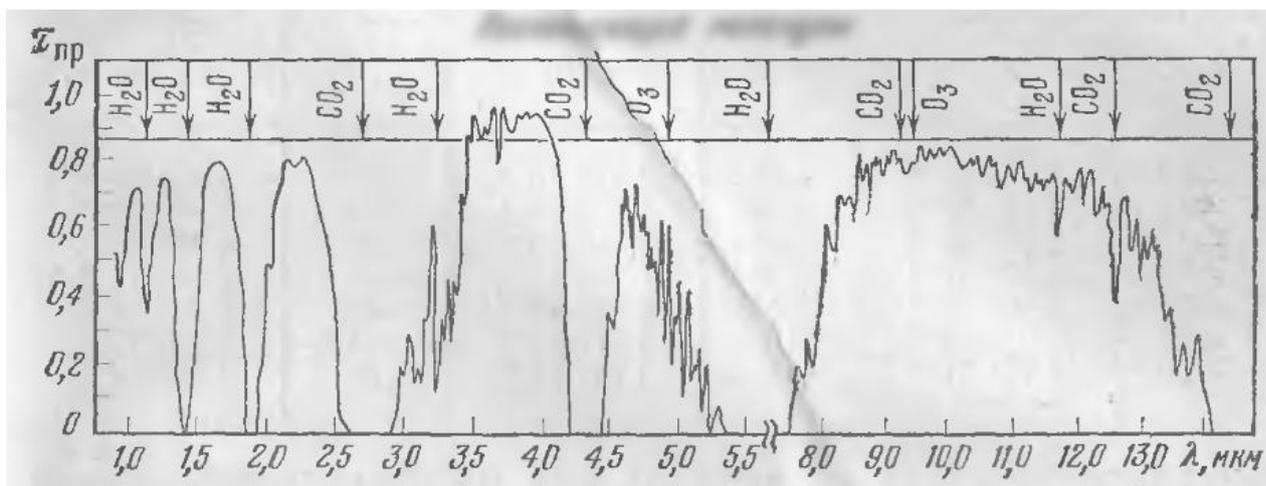


Рисунок 3 – Спектральный коэффициент пропускания атмосферы

При создании стендов для моделирования «бесконечно удалённых» точечных объектов с угловыми размерами, не превышающими 1', используют коллимирующие оптические системы с фокусными расстояниями от 2 до 3 м. Если лабораторные испытания проходят в нормальных климатических условиях [15], то спектральный коэффициент пропускания на такой трассе будет снижаться на 20% в диапазоне от 5,5 до 7,5 мкм (см. рисунок 4) [16].

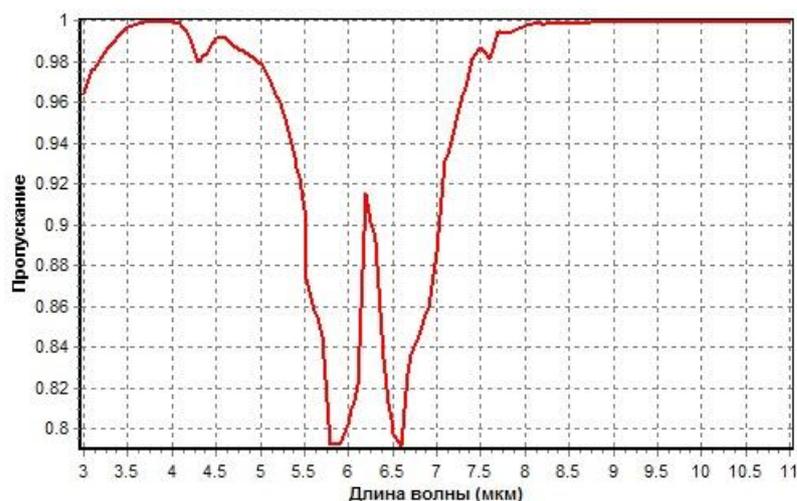


Рисунок 4 – Спектральный коэффициент пропускания атмосферной трассы протяжённостью 2 м

Это может существенно снизить эффективность обработки алгоритмов, основанных на сравнении сигналов в разных спектральных диапазонах.

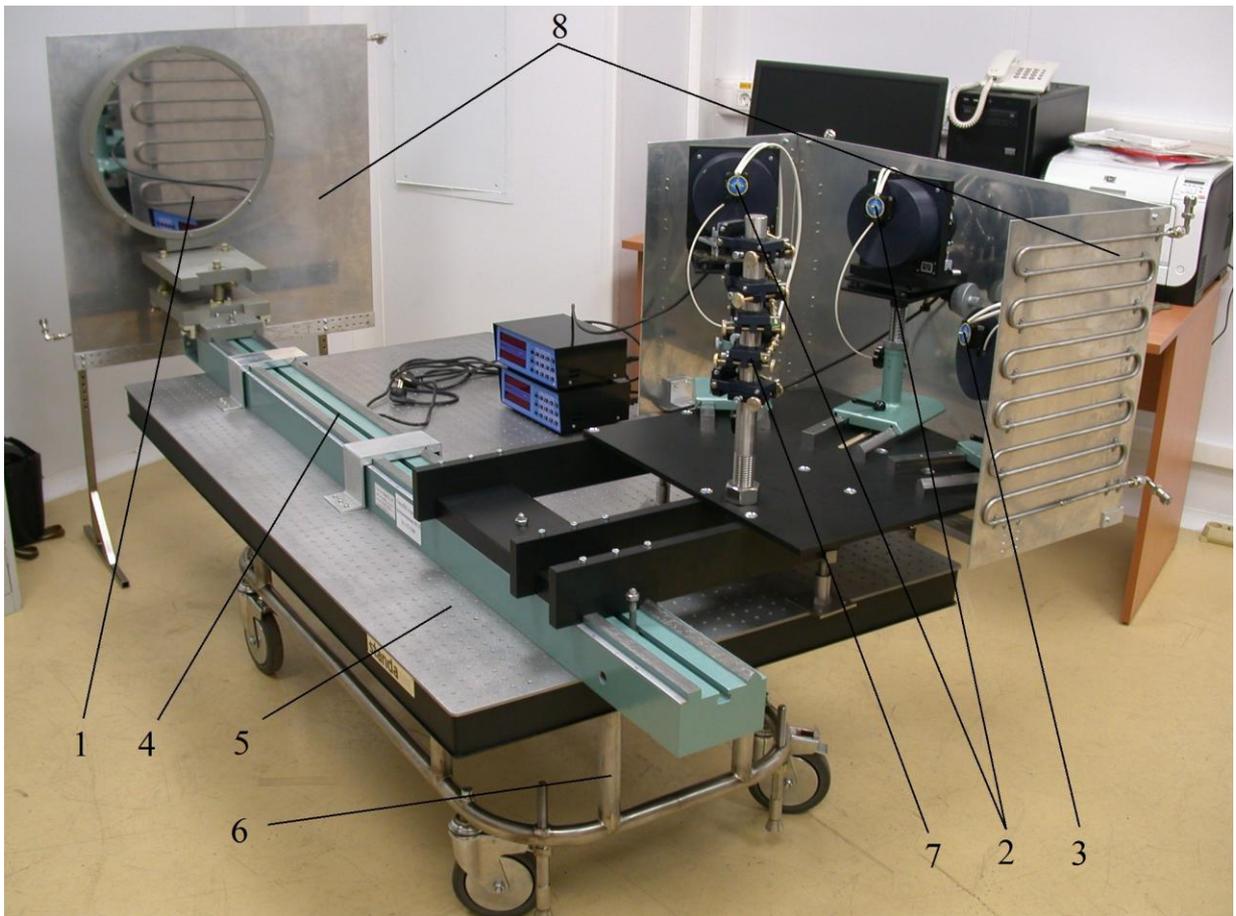
Поэтому для уменьшения фоновых засветок от элементов конструкции стенда, а также для устранения влияния атмосферы предложено формировать модели ФЦО в вакуумных, охлаждаемых до криогенных температур, камерах. Создание специальных вакуумных камер, отвечающих всем перечисленным требованиям космической ФЦО, требует значительного времени, а также существенных материальных и финансовых затрат. В АО «КБточмаш им. А.Э. Нудельмана» реализация модели (стенда) ФЦО для обработки алгоритмов работы ОЭП в условиях космоса была осуществлена на имеющейся базе лабораторного комплекса, включающего в себя вакуумную камеру (возможность понижения атмосферного давления до  $10^{-6}$  мм рт.ст.) и приспособления для установки внутри неё технологического оборудования. Для уменьшения фоновых засветок внутри камеры были установлены специальные термоэкраны, представляющие собой

широкоформатные панели, на обратной стороне которых проложены трубки для прокачки хладагента. Внутренние габариты камеры составляют 2,5 м в диаметре и 3 м в глубину. Она представлена на рисунке 5.



Рисунок 5 – Вакуумная камера

На основании (см. рисунок 6) размещается двухметровая станина из набора оптической скамьи ОСК-2ЦЛ. На ней закреплены четыре модели АЧТ, световые приборы УФ и ВД диапазонов, обоймы с диафрагмами, различающиеся по форме и размеру отверстия, коллиматор, система плоских зеркал, термоэкраны и приспособление для испытуемого изделия.



1 – коллиматор; 2 – модели АЧТ; 3 – источники излучения УФ и ВД диапазонов; 4 – станина; 5 – оптическая содовая столешница; 6 – технологическая тележка; 7 – система плоских зеркал; 8 – термоэкраны.

Рисунок 6 – Основные элементы станда ФЦО

Стенд ФЦО построен по чисто зеркальной оптической схеме, что позволяет исключить влияние хроматических aberrаций и свести к минимуму монохроматические (в небольшом угловом поле, порядка  $1-2^\circ$ ).

Выходной зрачок длиннофокусного объектива зеркального коллиматора, формирующего изображение малоразмерных объектов, сопряжен с входным зрачком контролируемого ОЭП. Уменьшение габаритных размеров станда, а также устранение центрального экранирования достигается путём применения системы из

плоских зеркал. Для юстировки стенда оправы коллиматора, каждого плоского зеркала и источников снабжены угловыми и линейными подвижками в двух взаимноперпендикулярных плоскостях.

Предварительные испытания, проведённые на стенде, показали возможность реализации распределения температур объектов регистрации ФЦО в угловом поле ОЭП. Вместе с тем, обнаружилось нестабильность поддержания заданных температурных контрастов объектов относительно фона, которая, как предполагается, возникает из-за теплообмена излучением между моделями АЧТ и диафрагмами.

### **Выводы**

Разработан стенд ФЦО, в котором реализована работа объектов комического применения соответствующих угловым размерам и температурам реальных объектов. В стенде ФЦО использованы прецизионные излучатели на базе моделей АЧТ, специальное вакуумное оборудование для создания условий космического пространства и оборудование для температурных условий. В процессе исследования и моделирования работы ОЭП были рассмотрены особенности формирования ФЦО для отработки алгоритмов обнаружения и селекции объектов регистрации для теле-теповизионных каналов ОЭП ракетно-космического назначения. При этом актуальной является задача поддержания температурного контраста воспроизводимых на стенде объектов регистрации, которая усложняется теплообменом между элементами конструкции источников излучения.

## Библиографический список

1. Люхин А.В., Умбиталиев А.А. Задачи космических оборонных видеоинформационных систем // Вопросы радиоэлектроники. Техника телевидения. 2013. № 2. С. 3-14.
2. Бельский А.Б., Чобан В.М. Математическое моделирование и алгоритмы распознавания целей на изображениях, формируемых прицельными системами летательного аппарата // Труды МАИ. 2013. № 66. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=40856>
3. Ковин С.Д., Сагдуллаев Ю.С. Спектрозональное телевидение и тепловидение в задачах селекции и идентификации объектов // Вопросы радиоэлектроники. Техника телевидения. 2013. № 2. С. 123-136.
4. Савченко Д.И. Алгоритмы решения задачи нумерации отождествлённых целей в информационно-управляющих системах // Труды МАИ. 2013. № 69. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=43300>
5. Савченко Д.И. Повышение характеристик отождествления целевой информации накоплением принимаемых решений // Труды МАИ. 2013. № 69. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=43302>
6. Сергеев И.Д., Яковлев В.Н. Соловцов Н.Е. Военный энциклопедический словарь ракетных войск стратегического назначения. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1999. – 632 с.
7. Федосеев В.И., Колосов М.П. Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов. – М.: Логос, 2007. –248 с.

8. Крат С.А., Христин В.В., Шаров А., Шляхтин М., Филатов А.А. Крупногабаритные имитаторы солнечного излучения для тепловакуумных испытаний негерметичных космических аппаратов // Фотоника. 2014. Т. 44. № 2. С. 12-19.
9. Лапин М.В. Имитатор излучения звезды. Патент № 746696. Бюлл. № 25, 07.07.1980.
10. Красностанов Р.Г., Куприянов Е.С., Трайбер А.С., Григорович А.М., Пекки Г.Р., Свирский А.Н. Устройство для имитации звезды на фоне неба. Патент № 871182. Бюлл. № 37, 07.10.1981.
11. Красностанов Р.Г., Трайбер А.С. Имитатор звезды. Патент № 903956. Бюлл. №5, 07.02.1982.
12. Куприянов Е.С., Пестряков М.Г., Кудинов В.П. Имитатор спектра звезды. Патент № 963071. Бюлл. № 36, 30.09.1982.
13. Бабенко Ю.Г., Бурлий Э.П. Коллиматорный имитатор звёздного неба. Патент № 505003. Бюлл. №8, 28.02.1976.
14. Огарев С.А., Самойлов М.Л. Прецизионные источники ИК-излучения типа чёрное тело для радиометрии, радиационной термометрии и тепловидения // Труды XXIV Международной научно-технической конференции и школы по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – М.: НПО "Орион", 2016. С. 481-485.
15. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды (с Изменениями № 1, 2, 3, 4, 5). ГОСТ 15150-69. – М.: Изд-во стандартов, 1969. - 53 с.

16. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. – М.: Советское радио, 1978. – 400 с.