

## ИСПЫТАНИЯ ТЕПЛОВОГО МАКЕТА ФОТОПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА С КРИОГЕННОЙ СИСТЕМОЙ ОХЛАЖДЕНИЯ ДЛЯ БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

© 2015 В. И. Зиновьев

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Статья поступила в редакцию 23.11.2015

Приведены результаты экспериментальных исследований теплового макета фотоприемного устройства инфракрасного диапазона для перспективных систем наблюдения из космоса. Подтверждена его работоспособность в части достижения и поддержания заданного криогенного температурного режима, определены энергетические характеристики бортовой криогенной системы охлаждения по потребляемой мощности и холодопроизводительности при использовании газовых криогенных машин. **Ключевые слова:** фотоприемное устройство инфракрасного диапазона, тепловой макет, тепловые режимы, криогенные системы, экспериментальная установка, параметрические и энергетические характеристики.

Для эффективного решения задач наблюдения поверхности Земли из космоса в ИК-диапазоне электромагнитного спектра излучения необходимо достижение высокого пространственного разрешения. Практическая значимость информационных возможностей инфракрасных систем обусловлена также необходимостью обеспечения круглосуточного наблюдения из космоса [1].

Достижение высокого уровня чувствительности и пространственного разрешения в приемлемой полосе захвата в ИК-диапазоне, наряду с решением других проблемных вопросов, достигается использованием широкозахватных фото-приемных устройств (ФПУ-ИК) с длиной фотозоны не менее 160 мм с обеспечением приемлемого энергопотребления и оптимальных массогабаритных характеристик аппаратуры.

Для обеспечения заданных характеристик ИК-приемников в ФПУ при дистанционном зондировании Земли в диапазоне излучения электромагнитного спектра с длинами волн 3...5 мкм необходимо поддерживать эксплуатационную температуру приемников  $77 \pm 1$  К с минимальным разбросом температуры по полю пластины с приемниками [2, 4].

ФПУ-ИК состоит из следующих основных узлов и систем:

– криостата, представляющего собой герметичную вакуумную ёмкость с ИК-иллюминатором, по месту положения совпадающим с выходным зрачком оптической системы телескопа и предназначенного для размещения внутри него модуля фокального узла;

– модуля фокального узла (ФУ), состоящего из фонозащитной блонды со светофильтром и фокального узла, который установлен на основании криостата через термомост [3];

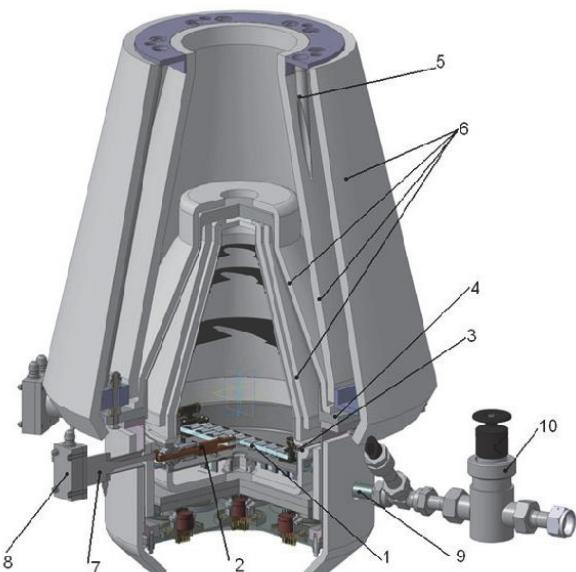
Зиновьев Владимир Иванович, начальник сектора АО «РКЦ «Прогресс», г. Самара. E-mail: csdb@samspace.ru

– комплексной криогенной системы охлаждения (КСО) на базе трех микрокриогенных систем (ГКМ Стирлинга), предназначенной для криостатирования фокального узла, фонозащитной блонды и корпуса криостата;

– переходника, предназначенного для установки ФПУ-ИК на размеростабильной платформе телескопа;

– экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ), предназначенной для минимизации лучистых теплопритоков от элементов конструкции ФПУ-ИК и внешних источников тепла.

На рис. 1 приведена конструктивная схема ФПУ-ИК.



**Рис. 1.** Конструктивная схема ФПУ-ИК:  
1 – линейка с приемниками; 2 – холодопровод; 3 – тепловой макет модуля фокального узла; 4 – криостат; 5 – переходник; 6 – маты ЭВТИ; 7 – охладитель макетного образца ГКМ; 8 – теплообменник СТР; 9 – патрубок для вакуумирования внутреннего объема ФПУ-ИК; 10 – вакуумный вентиль

Для подтверждения работоспособности элементов конструкции ФПУ-ИК, обеспечивающих заданный температурный режим охлаждаемого односпектрального широкоформатного фотоприемного устройства и минимизации тепловой нагрузки на КСО, были разработаны тепловой макет и экспериментальная установка, на которой проведены экспериментальные исследования.

Тепловой макет ФПУ-ИК (ТпМ ФПУ-ИК) предназначен для проведения исследований теплового режима и тепловых характеристик ФПУ-ИК с проработкой конструктивных и технологических решений, принятых для штатного ФПУ-ИК.

При разработке ФПУ-ИК и исследуемого макета были использованы ранее полученные экспериментальные данные по испытаниям теплоизоляции ЭВТИ [5], а также учтены рекомендации по применению аккумулятора холода [6]. Эти публикации, а также настоящая статья являются результатом комплекса работ по созданию перспективной аппаратуры для дистанционного зондирования Земли в ИК диапазоне.

Целью испытаний на экспериментальной установке являлось подтверждение работоспособности ТпМ ФПУ-ИК по достижению и поддержанию температурного режима, получение экспериментальных данных по распределению температуры по конструкции теплового макета и данных по энергетическим характеристикам (потребляемой мощности и холодопроизводительности) газовых криогенных машин (ГКМ) КСО.

При проведении экспериментальных исследований ТпМ ФПУ-ИК решались следующие задачи:

- экспериментальное подтверждение возможности и определение продолжительности захолаживания ТпМ ФПУ-ИК с исходного состояния до заданного температурного режима;

- определение максимальной и средней потребляемой мощности микрокриогенная системы (МКС) КСО и входящих в его состав микрокриогенных систем при захолаживании ТпМ ФПУ-ИК с исходного состояния до температуры криостатирования;

- определение возможности поддержания заданных температурных режимов ТпМ ФПУ-ИК при включенном и отключенном имитаторе тепловой нагрузки (ИТН) гибридных фоточувствительных микросхем (ГФМС) на рабочем и дежурном режимах функционирования ФПУ-ИК;

- определение времени перехода ТпМ ФПУ-ИК с дежурного на рабочий режим после включения ИТН ГФМС и с рабочего на дежурный режим после выключения ИТН ГФМС;

- определение потребляемой мощности и холодопроизводительности МКС КСО на заданных дежурных и рабочих режимах ТпМ ФПУ-ИК;

- оценка влияния температуры криостата ТпМ ФПУ-ИК и температуры криостатирования систем, охлаждающих бленду, на величину холода-

производительности и потребляемой мощности МКС КСО на установившемся режиме;

- оценка возможности захолаживания ТпМ ФПУ-ИК с исходного состояния до заданного температурного режима и поддержания заданных температур при отключении одной или более МКС, охлаждающих бленду;

- определение влияния температуры криостата ТпМ ФПУ-ИК на продолжительность выхода ФПУ-ИК с исходного состояния на установившийся заданный температурный режим;

- оценка теплопритоков (за счет теплопроводности и лучистого теплообмена) от криостата к макету модуля фокального узла;

- разработка рекомендаций для оптимизации конструкции ФПУ-ИК при разработке технологического макета с экспериментальным образцом КСО.

На рис. 2 представлено фото экспериментальной установки с тепловым макетом ФПУ-ИК.

В состав экспериментальной установки входят:

- объект испытаний - ТпМ ФПУ-ИК;

- вакуумная камера ATM2.708.005;

- гермопереходник с электрическими разъемами и гидравлическим коллектором с трубопроводами системы обеспечения теплового режима КСО;

- система терморегулирования МКС;

- блоки управления МКС;

- система управления имитаторами тепловой нагрузки ГФМС на линейке С;

- система электропитания;

- системы регистрации и измерения параметров.

Измеряемые параметры при экспериментальных исследованиях ТпМ ФПУ-ИК приведены в табл. 1.

На рис. 3 приведена схема размещения датчиков и оборудования на тепловом макете ФПУ-ИК.

На рис. 4 приведена схема размещения датчиков и оборудования на тепловом макете ФПУ-ИК и экспериментальной установке.

При исследовании теплового режима ФПУ-ИК с активной КСО температура криостатирования линейки с ГФМС (МКС №1) составляла  $78 \pm 1$  К,



Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки на базе ТпМ ФПУ-ИК

**Таблица 1.** Измеряемые параметры при экспериментальных исследованиях ТпМ ФПУ-ИК

Наименование параметра	Обозначение	Диапазон измерения
Температура растра теплового макета ФУ	T1, T2, T3	77 ... 90K
Температура в месте крепления холодопровода от охладителя ГКМ к растрю	T7	77 ... 150K
Температура в месте крепления холодопровода от охладителя МКС к бленде	T8, T9, T10	
Температура светофильтра бленды	T11	77 ... 150K
Температура фланца бленды	T12	77 ... 150K
Температура конуса бленды	T14, T15	77 ... 150K
Температура основания ФУ	T13	77 ... 150K
Температура «тёплого» фланца проставки	T16	180 ... 273K
Температура «холодного» фланца проставки	T17	77 ... 200K
Температура фланца криостата	T18	180 ... 323K
Температура основания криостата	T19	180 ... 323K
Температура иллюминатора криостата	T20	180 ... 323K
Температура «тёплого» фланца установочной фермы	T34	180 ... 323K
Температура «холодного» фланца установочной фермы	T35	180 ... 323K
Температура теплообменника имитатора РХ	T29	180 ... 323K
Температура корпусов охладителей МКС	T21, T22, T33, T24	273... 373K
Температура корпусов компрессоров МКС	T25, T26, T27, T28	273... 373K
Температура охлаждающей жидкости на входе в СТР	T30	278 ... 298K
Температура корпуса вакуумной камеры	T33	278 ... 313K
Давление в вакуумной камере	P1	$1 \times 10^{-2}$ ... $1 \times 10^{-5}$ Па
Давление в ФПУ-ИК	P2	$1 \times 10^{-2}$ ... $1 \times 10^{-5}$ Па
Мощность, потребляемая МКС № 1, 2, 3, 4	N1, N2, N3,.N4	20...120Вт Упит=27 В
Мощность на нагревателях имитирующих тепловыделение ГФМС	N5	0...1,0 Вт

**Примечание:**

- Параметры температур T1, T2, T3, T7, T8, T9, T10 измерялись термодатчиками бескорпусными диодными.
- Параметры температур T11 – T22, T24, T33 – T35 измерялись термодатчиками ТМ 344.
- Параметры температур T25, T26, T27, T28 измерялись термодатчиками ТСП 9703-02.
- Параметры давления P1, P2 измерялись ионизационным манометрическим преобразователем ПМИ-2.
- Потребляемая мощность ГКМ N1, N2, N3,.N4 измерялась с использованием прибора МС-114.
- Мощность N5 измерялась прибором Б5-85 с точностью  $\pm 0,01$ Вт.

температура криостатирования бленды (МКС №2,4) составляла 94 K, 110K и 130 K.

Эксперименты показали, что длительность выхода ТпМ с исходного состояния на уставившийся дежурный режим составляет 93600 с (26 часов).

Установившаяся максимальная температура бленды (в области размещения ИК-фильтра) на дежурном и рабочем режимах составила T11=130K. Температуры T1, T2, T11 получены при температуре на МКС №2, 4 94,25K.

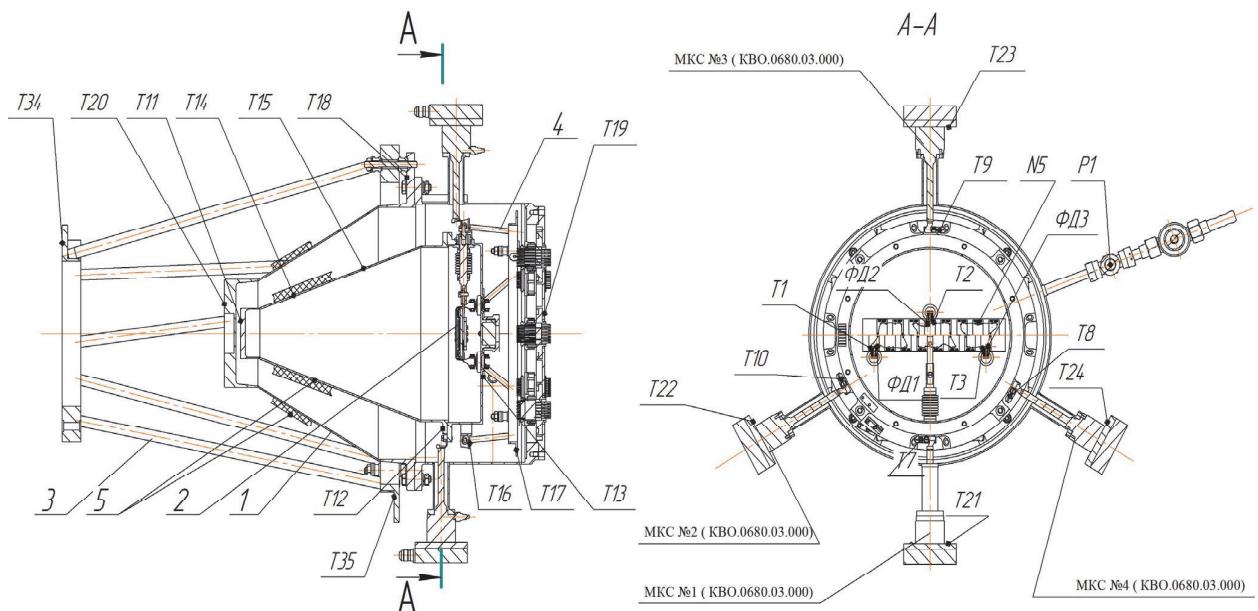
Температуры линейки с ГФМС на дежурном режиме составили: в центральной области T2=76,9K, в периферийной области T1=80,6K. Средний перепад температуры по длине линейки

с ГФМС составлял на дежурном режиме 3,61K, на рабочем – 3,54K.

При задании температуры на МКС №2, 4 равной 110 и 130K температура линейки с ГФМС превышала максимально допустимую температуру на 0,1 и на 1,24K соответственно. При задании на МКС №2 и 4 температуры криостатирования 130K максимальная температура бленды в области размещения ИК-фильтра составила 157,1K (T11).

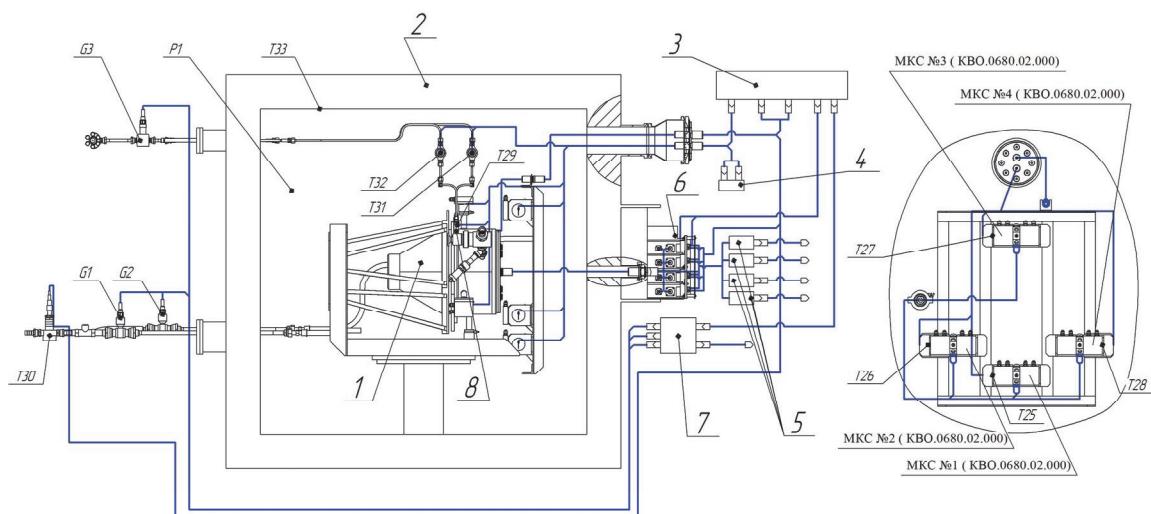
Результаты испытаний ТпМ ФПУ-ИК при проведении эксперимента приведены на рис. 5.

При переходе ТпМ ФПУ-ИК с дежурного на рабочий режим после включения теплового имитатора ГФМС температура линейки (параметры T1 и T2) возросла на величину 2,2 – 4,7K. Температура T7 при



**Рис. 3.** Схема размещения датчиков на тепловом макете ФПУ-ИК:

1 – криостат; 2 – тепловой макет модуля фокального узла; 3 – переходники; 4 – термомос; 5 – ЭВТИ; Т1..Т3, Т7..Т24, Т34, Т35 – датчики температуры; Р1 – вакуумметрический датчик; ФД1..ФД3 – датчики фоновой облученности; Н5 – нагреватель имитирующий тепловыделение ГФМС на линейке в фокальном узле



**Рис. 4.** Схема размещения датчиков и измерительной аппаратуры на ТпМ ФПУ-ИК и экспериментальной установке:

1 – тепловой макет ФПУ-ИК; 2 – вакуумная камера; 3 – комплекс измерительный МИС-400R; 4 – измеритель температуры МИТ2.05; 5 – блок питания Б5-71/1м; 6 – стойка управления ГКМ; 7 – стабилизатор напряжения МЕ-408; 8 – теплообменник; Т25..Т32 – датчики температуры; G1..G3 – датчики расхода; Р1 – датчик вакуумметрический

этом изменилась на  $\pm 1\text{K}$ . Таким образом, повышение температуры линейки определялось мощностью имитатора ГФМС и термическим сопротивлением холодопровода – переходника МКС № 1.

После включения теплового имитатора ГФМС длительность перехода фокального узла с дежурного на установленный рабочий режим составляла 1000 – 1200 с. После выключения имитатора ГФМС длительность перехода фокального узла с рабочего на дежурный режим составляла 1500 – 1700 с.

На рис. 6 приведены графики изменения потребляемой мощности МКС КСО при проведении эксперимента.

Экспериментально определена общая максимальная потребляемая мощность КСО, которая равна 229 Вт, на начальном этапе охлаждения ТпМ ФПУ-ИК. МКС КСО развивали максимальную холодопроизводительность на начальном этапе охлаждения с последующим снижением и выходом на установленный дежурный режим. Максимальные значения потребляемой мощности каждой МКС не превышали 120 Вт.

Установлено, что после включения имитатора тепловой нагрузки на линейке с ГФМС мощностью 0,23 Вт, средний уровень потребляемой мощности МКС возрастал на 5-6 Вт и оставался постоянным до выключения имитатора.

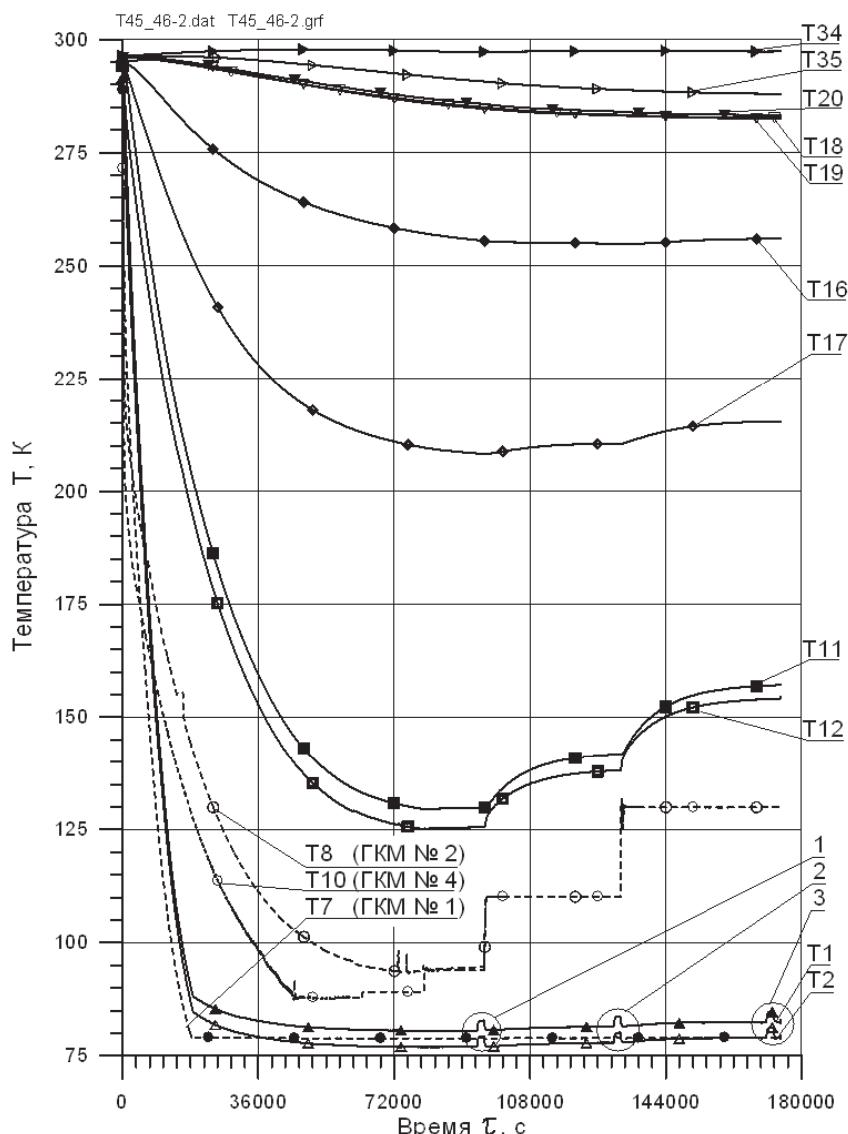


Рис. 5. Результаты испытаний ТпМ ФПУ-ИК при проведении экспериментов

Наиболее эффективным с точки зрения минимизации суммарной потребляемой мощности макетного образца БКСО оказался режим поддержания минимально возможной средней температуры бленды за счет понижения температуры криостатирования МКС №2 и 4, охлаждающих бленду.

На рис. 7 показано изменение температур в месте крепления холодопровода от охладителя МКС №1 к линейке с ГФМС в зависимости от температуры бленды (94K, 110K, 130K), которая поддерживается МКС №2 и №4.

## ВЫВОДЫ

1. В результате исследований подтверждена эффективность конструктивных решений фотоприемного устройства (ФПУ ИК), обеспечивающих минимальные теплопритоки к его элементам, что позволяет поддерживать необходимые температурные режимы на линейке с фоточувствительными микросхемами и размеростабиль-

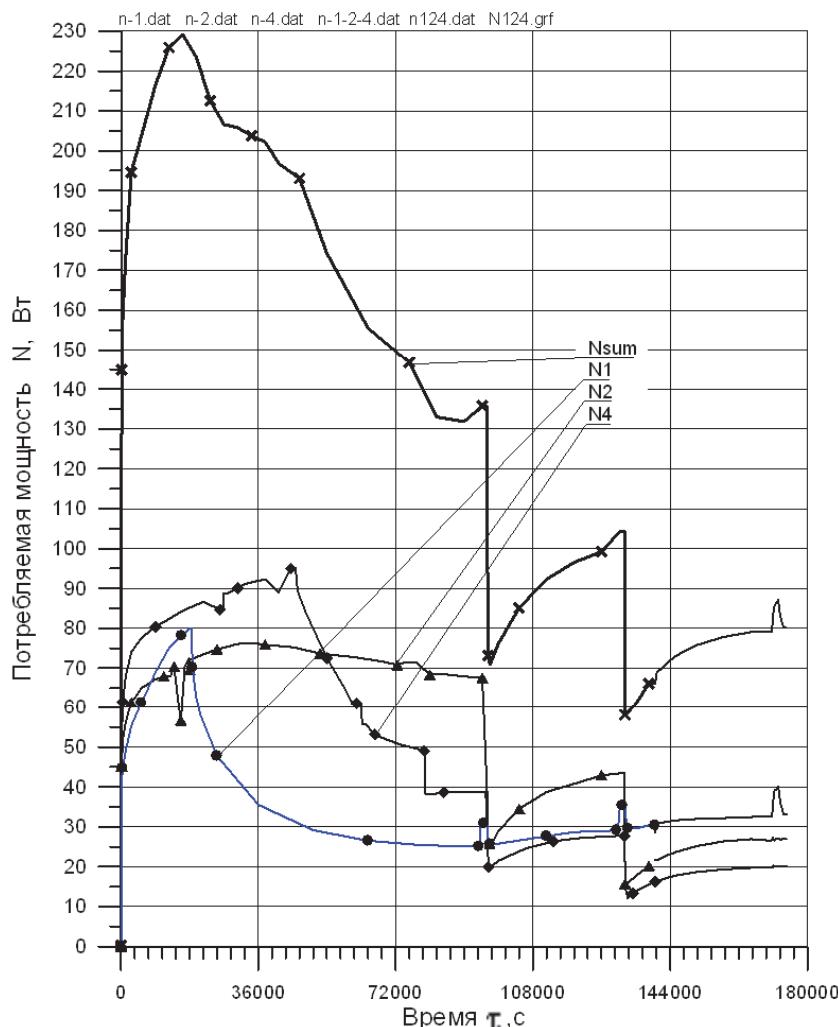
ностью оптической системы в целом.

2. Средний перепад температуры по длине линейки с ГФМС составлял на дежурном режиме 3,61К, на рабочем – 3,54К, вполне приемлемо для требований чувствительности фото-элементов.

3. При задании температуры на бленде в 157 К температура линейки с ГФМС превышала максимально допустимую температуру на 0,1 и на 1,24К соответственно, что также вполне приемлемо для обеспечения необходимой чувствительности и разрешительной способности фотоприёмного устройства.

4. При переходе теплового макета ФПУ-ИК с дежурного на рабочий режим после включения теплового имитатора ГФМС температура линейки увеличивается на величину 2,2 – 4,7К, причем температура холодопровода от ГКМ изменяется всего на  $\pm 1\text{K}$ , что свидетельствует о наличии необходимого располагаемого запаса холода в системе транспортировке тепла.

5. Длительность перехода фокального узла с рабочего на дежурный режим составляла по



**Рис. 6.** Графики изменения потребляемой мощности МКС КСО:

• – МКС №1; Δ – МКС №2; ◇ – МКС №4; X – общая потребляемая мощность МКС КСО

времени менее 30 мин, что приемлемо для программы работы аппаратуры.

6. При воздействии тепловой нагрузкой на линейку с ГФМС мощностью 0,23 Вт, средний уровень потребляемой мощности МКС возрастал на 5...6 Вт, что является несущественным для газовых криогенных машин.

7. Наиболее эффективным, с точки зрения минимизации суммарной потребляемой мощности системы охлаждения, оказался режим поддержания минимально возможной средней температуры бланда за счет понижения температуры криостатирования криогенных систем, охлаждающих бланду.

8. Технологические решения ФПУ ИК позволили уменьшить потребную холодопроизводительность МКС с прогнозируемых 6 Вт до 3,5 Вт, что соответственно снизило энергопотребление газовыми криогенными машинами в два раза.

9. Разработанные рекомендации позволяют при реализации серийного образца ФПУ ИК решить задачу круглосуточного наблюдения Земли из космоса в ИК-диапазоне с разрешением до 1,5 метров, что обеспечивает потребность отраслей

и ведомств и открывает перспективу выхода на международный рынок ДЗЗ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мирошников, М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение (Ленингр. отделение), 1977. 600 с.
2. Криогенные системы / А.М. Архаров, В.П. Беляков, Е.И. Микулин [и др.]. М.: Машиностроение, 1987. 536 с.
3. Зиновьев В.И., Бурдыгин И.А., Воротников Г.В. и др. Термоопора // Патент России № 2439426. 2012. Бюл. №1.
4. Грэзин А.К. и др. Микрокриогенная техника. М.: Машиностроение. 1977. 240 с.
5. Zinov'yev V.I. et al. Experimental investigation of the screen vacuum heat insulation for photo detectors of the infra-red viewing space vehicles / V.I. Zinov'yev, A.I. Dovgyallo, E.K. Krasnochub // International Journal of Engineering and Technology (IJET). Oct-Nov 2014. Vol. 6, No 5.- p2290-2296.
6. Zinov'yev V.I. et al. Testing of spaceboard solid state cryogenic accumulator for IR coolsystem equipment /V.I. Zinov'yev, A.I. Dovgyallo, E.K. Krasnochub/ International Journal of Engineering and Technology (IJET). Oct-Nov 2014. Vol 6, No 5.- p 2361-2367.

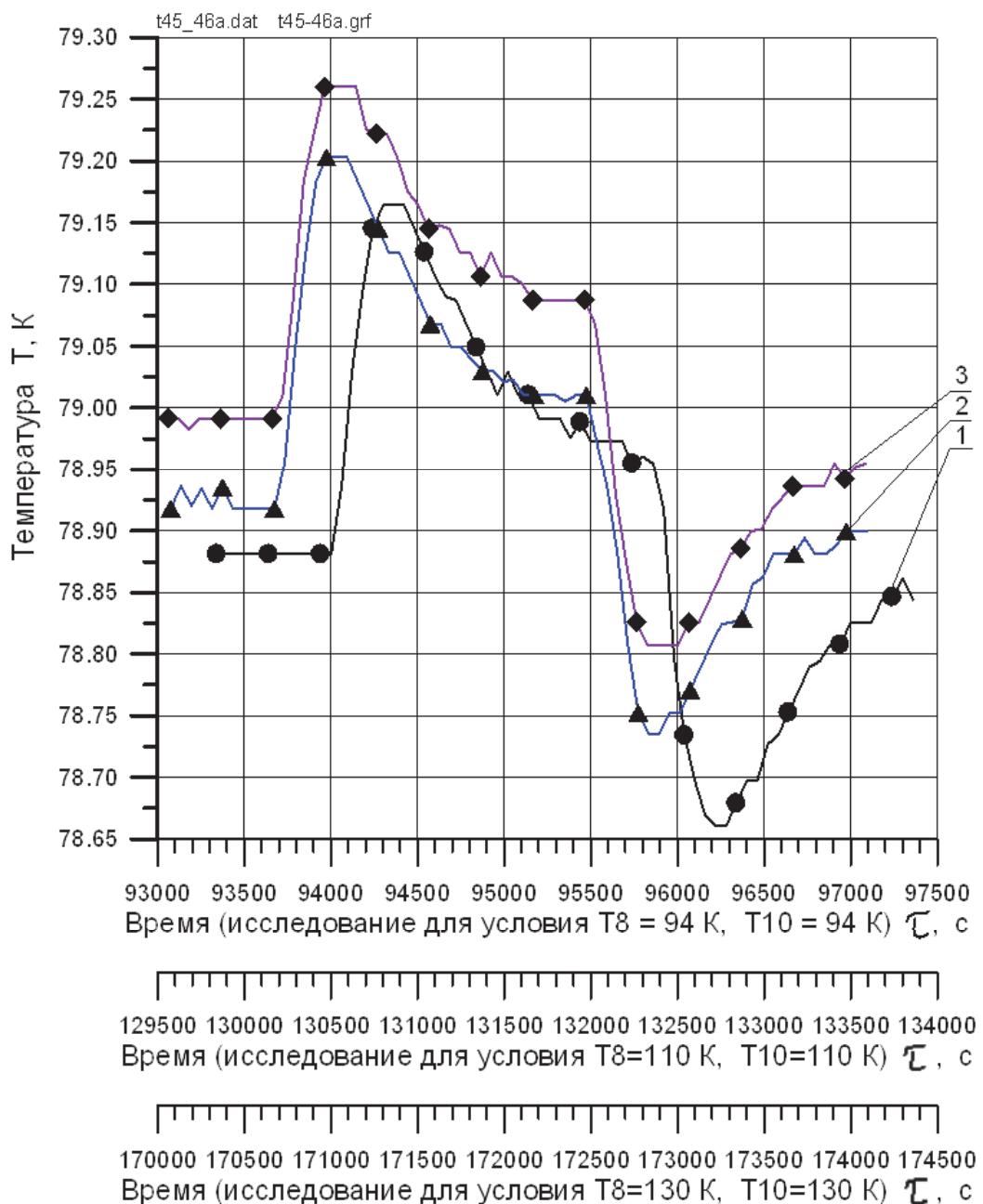


Рис. 7. Изменение температур в месте крепления холодопровода от охладителя МКС №1(Т7) к линейке с ГФМС в зависимости от температуры бланды:

• -  $T_8, T_{10} = 94\text{ K}$ ;  $\Delta$  -  $T_8, T_{10} = 110\text{ K}$ ;  $\diamond$  -  $T_8, T_{10} = 130\text{ K}$

#### TESTING OF THE INFRARED PHOTODETECTOR DEVICE THERMAL LAYOUT FOR ONBOARD CRYOGENIC COOLING SYSTEM

© 2015 V.I. Zinovev

Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov  
(National Research University)

Results of experimental research of heat prototype of photo-receiving device of infrared band for promising observation systems from space are provided. Its working ability for achievement and sustaining of given cryogenic temperature regime is confirmed. Energy characteristics of board cryogenic refrigeration systems on consumed power and cold capacity during the use on gas cryogenic machines are determined.  
*Keywords:* photo-receiving device of infrared band; heat prototype; heat regimes, cryogenic systems, experimental stand, parametric and energy characteristics.

Vladimir Zinovev, Head of Sector, JSC «SRC «Progress».  
E-mail: csdb@samspace.ru