

УДК 681.2.083, 53.088.4, 535-15
 DOI: 10.51368/1996-0948-2023-4-129-134
 EDN: SFSLAM

PACS: 85.60.Gz, 42.30.Lr, 42.79.Pw



Имитация тепловой нагрузки при контроле характеристик микрокриогенных систем охлаждения фотоприёмных устройств

Е. Д. Коротаев, М. В. Банников, К. О. Болтарь, И. В. Ефимов, А. А. Шаров

Рассмотрены особенности устройства и технологии изготовления имитаторов тепловой нагрузки, предназначенных для контроля параметров микрокриогенных систем фотоприёмных устройств. Приведены основные параметры изготовленных образцов имитаторов в сравнении с зарубежными аналогами. В АО «НПО «Орион» созданы имитаторы тепловой нагрузки для контроля микрокриогенных систем холодопроизводительностью 0,5–0,75 Вт.

Ключевые слова: микрокриогенная система, имитатор тепловой нагрузки, теплоприток, держатель, фотоприёмное устройство.

Для охлаждения фотоприёмных устройств (ФПУ) инфракрасного диапазона, в том числе матричных, в настоящее время широко используются микрокриогенные системы (МКС), работающие по обратному одноступенчатому циклу Стирлинга. Особенностью конструкции ФПУ, использующих подобные микрокриогенные системы, является наличие гильзы-держателя на холодном торце которого

размещается охлаждаемое ФПУ. В замкнутом объёме гильзы-держателя, заполненном рабочим газом (как правило, гелием) находится поршень-регенератор, совершающий возвратно-поступательные движения от тёплого конца гильзы к холодному и обратно (прямой и обратный такт).

Основными характеристиками МКС, определяющими возможности их применения для задач охлаждения конкретных ФПУ в заданных условиях эксплуатации являются:

- температура криостатирования, $T_{кр}$;
- холодопроизводительность, измеряемая в единицах мощности (Вт);
- время достижения температуры криостатирования, t ;
- потребляемая мощность МКС.

Для контроля перечисленных характеристик МКС необходим имитатор ФПУ, обеспечивающий, кроме имитации охлаждаемой массы ФПУ, также и воспроизведение внутреннего тепловыделения ФПУ (теплопритока), $Q_{фпу}$.

В АО «НПО «Орион» созданы имитаторы тепловой нагрузки для контроля микрокриогенных систем холодопроизводительностью 0,5–0,75 Вт. Внешний вид имитатора представлен на рисунке 1. На рисунке имитатор состыкован с МКС модели Крио 1000 разработки АО «НПО «Орион».

Коротаев Евгений Дмитриевич¹, инженер 1 кат.
Банников Максим Викторович¹, и.о. начальника НТЦ.

Болтарь Константин Олегович^{1,2}, нач. НТК, д.ф.-м.н., профессор.

Ефимов Илья Владимирович¹, гл. специалист.

Шаров Александр Александрович^{1,3}, зам. нач. НТК, к.т.н.

¹ АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

E-mail: orion@orion-ir.ru

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет).

Россия, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер. 9.

³ Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК).

Россия, 105064, Москва, Гороховский пер., 4.

Статья поступила в редакцию 31.07.2023

После доработки 9.08.2023

Принята к публикации 13.08.2023

Разработаны два исполнения имитатора: с колпаком, имеющим окно из германия, аналогично устройству типового инфракрасного ФПУ, и с колпаком из ковара (сплав 29НК-ВИ). Устройство имитатора в каждом исполнении

иллюстрируют рисунок 2а и рисунок 2б, соответственно. На рисунке 2в показаны внешние габариты имитатора, аналогичные для обоих исполнений.



Рис 1. Внешний вид имитаторов тепловой нагрузки АО «НПО «Орион» (имитатор состыкован с МКС Крюо 1000)

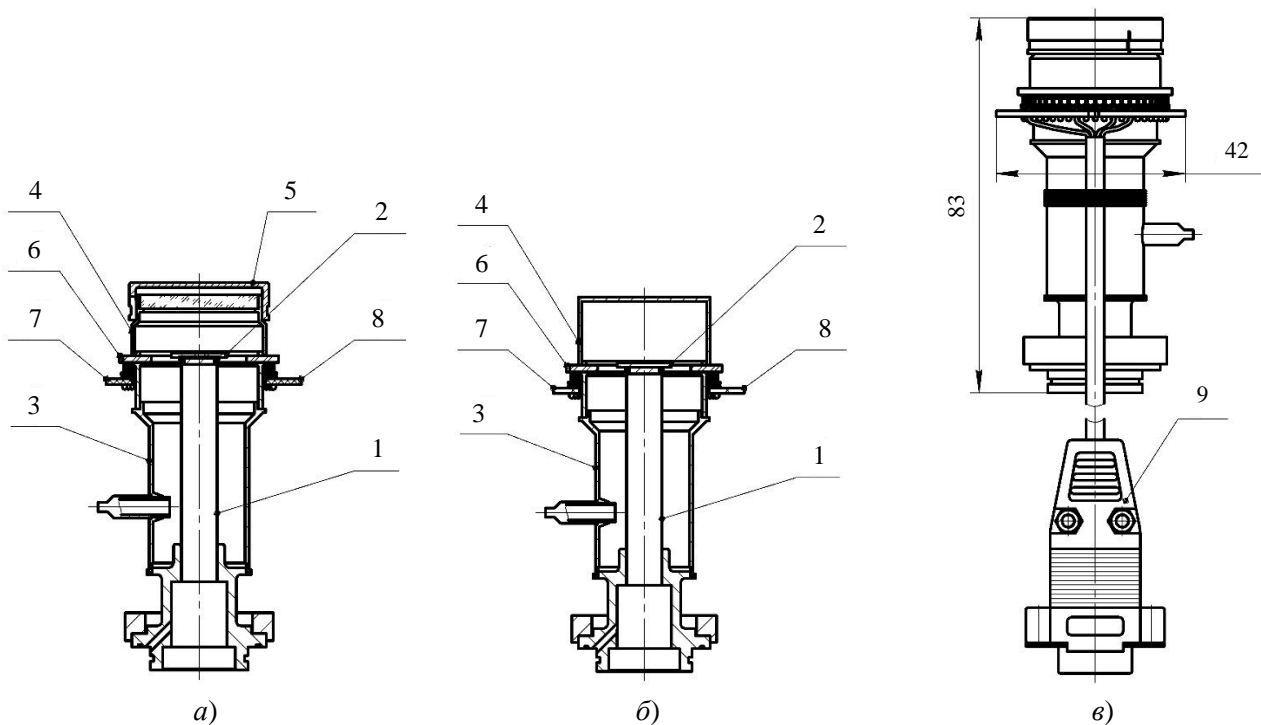


Рис. 2. Устройство имитаторов тепловой нагрузки АО «НПО «Орион»: а) – имитатор с окном из германия; б) – имитатор с колпаком из сплава 29НК-ВИ; в) – внешние габариты имитатора. 1 – держатель; 2 – растр; 3 – корпус со штенгелем; 4 – колпак; 5 – крышка; 6 – металлокерамический узел; 7, 8 – печатные платы; 9 – технологический разъем

Имитатор (см. рис. 2) представляет собой конструкцию, состоящую из держателя 1 с закреплённым на нём растром 2 из лейкосапфира, вакуумированного корпуса 3 со штенгелем и колпака 4. В имитаторе с колпаком, имеющим окно из германия, присутствует дополнительная крышка 5, предназначенная

для защиты окна. На растре 2 нанесены электропроводящие контакты для установки электронных элементов. От растра методом микросварки выведены проводники (золотые проволоки) на металлокерамический узел 6, служащий для передачи электрического сигнала из вакуума во внешнюю среду. К метал-

локерамическому узлу присоединены две печатные платы 7 и 8, служащие для передачи сигналов и управления работой имитатора. Для поддержания необходимой степени вакуума во внутренней полости корпуса имитатора на металлокерамическом узле устанавливается узел геттера (газопоглотителя) (на рисунке не показан). Подключение имитатора к измерительным приборам осуществляется через технологический разъём 9 типа DB9.

Исполнение имитатора с окном из германия позволяет использовать имитатор для определения влияния оптической засветки на систему, обеспечивает возможность наблюдения реакции вакуумного криогенного корпуса на воздействие ударных и вибрационных нагрузок, влияние климатических условий и т. п. В то же время исполнение с колпаком из изготовленным из ковара, напротив, позволяет исключить влияние оптического излучения от посторонних предметов на теплоприток имитатора.

Имитатор с колпаком, имеющим окно из германия, используется, прежде всего, для исследовательских целей: определение влияния засветки на систему; учет возможных ударных и вибрационных нагрузок; оценка влияния климатических условий и т. п.

Как правило, собственная тепловая нагрузка (теплоприток) имитатора меньше предельной нагрузки, на которую рассчитана работа МКС. Для имитации полной тепловой нагрузки, выделяемой ФПУ, на растре установлены резисторы, выполняющие функцию дополнительных источников теплоты, на которые подаётся добавочная мощность, определяемая исходя из сопротивления резистора. Электрическая схема имитатора представлена на рисунке 3. Резисторы R1 и R2 установлены параллельно и подключены к регулируемому источнику постоянного тока. Одним из важнейших элементов имитатора являются датчики температуры, размещённые, как и резисторы, на растре имитатора. Датчик температуры производства АО «НПО «Орион» представляет собой полупроводниковый диодный датчик, работа которого основана на изменении характеристик $p-n$ -перехода под воздействием температуры. Напряжение на диоде всегда пропорционально его температуре, что позволяет изготовить датчик с высокой точностью измерения. Питание термодатчика VD1 (рис. 3)

также осуществляется постоянным током в 0,5 мА. Термодатчик VD2 изначально не имеет выводов на технологический разъём XS1 – он выполняет роль резервного и в случае обрыва или выхода из строя термодатчика VD1 его можно оперативно подключить взамен вышедшего из строя, не нарушая герметичный объём вакуумного криостата имитатора. Также возможен вариант подключения датчика VD1 одновременно с датчиком VD2 для повышения точности измерения температуры.

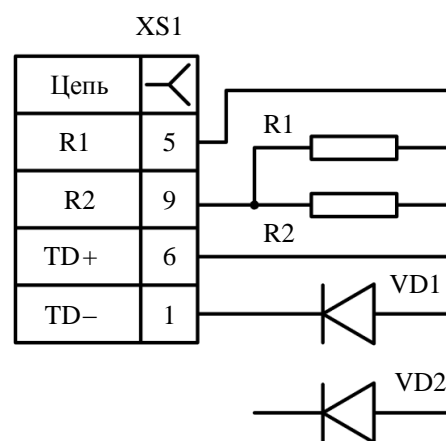


Рис. 3. Электрическая схема имитатора АО «НПО «Орион»: R1, R2 – резисторы на 430 Ом; VD1, VD2 – датчики температуры диодного типа; XS1 – технологический разъём

При изготовлении имитаторов одним из критичных элементов технологического процесса является получение вакуумплотных соединений в деталях корпуса имитатора, прежде всего, держателя. В АО «НПО «Орион» для решения этой задачи применён метод индукционной пайки с применением токов высокой частоты (ТВЧ). Частота токов ТВЧ, используемых при пайке, может достигать мегагерц. Как известно [1], принцип индукционной пайки заключается в том, что соединяемые металлические детали и припой, помещённые в электромагнитное поле индуктора, нагреваются индуцированными вихревыми токами. Припой расплавляется и происходит смачивание поверхности металла припоем или припоем и флюсом (при использовании флюса) – в результате обеспечивается герметичное соединение.

При выполнении индукционной пайки одновременно по двум и более плоскостям

есть риск возникновения остаточных паяльных напряжений. Для исключения этого эффекта индукционная пайка производится последовательно в каждой из плоскостей соединения. При этом для соединения пайкой деталей имитатора выбран припой марки ПСр40. Данный припой является твёрдым и легкоплавким и применяется для «твёрдой» пайки сталей. Важной особенностью припоя ПСр40 является то, что его использование позволяет осуществлять пайку при температуре ниже температуры высокого отпуска сталей (например, при 595–605 °С). Данная марка припоя выбрана также благодаря способности сохранять пластичность при застывании. При изменении размеров деталей в процессе охлаждения, припой, благодаря своей пластичности, принимает форму соединяемых деталей, не теряя свойств связующего вещества.

При изготовлении узлов имитаторов в АО «НПО «Орион» применяется два основных способа индукционной пайки. Первый способ – пайка в вакууме, который позволяет исключить образование окисной плёнки на соединяемых поверхностях и окисление припоя, а также обеспечивает получение паяного шва без пустот и полостей, что гарантирует герметичность соединения. Однако, процесс пайки в вакууме является длительным и требует применения дорогостоящего оборудования, в связи с чем предложен более простой и эффективный способ соединения деталей индукционной пайкой на открытом воздухе с использованием флюса. Особенность этого способа состоит в том, что при пайке, для защиты от воздействия окружающей среды и улучшения распространения расплавленного припоя, флюсом покрывается вся поверхность детали, подвергаемой пайке, а не только место соединения. Перед началом пайки поверхности соединяемых деталей и припой должны быть полностью покрыты флюсом. Практическое применение этого способа индукционной пайки при изготовлении гильз-держателей имитаторов показало его высокую эффективность и гарантированное обеспечение герметичного соединения деталей.

Проверка герметичности получаемого соединения осуществляется методом определения натекания газа (гелия) в полость гильзы-держателя имитатора. Для этого полость

гильзы-держателя откачивают вакуумным течеискателем и обдувают имитатор тонкой ламинарной струей гелия с низким потоком. Испытания показали, что узлы, изготовленные предложенным методом, обеспечивают скорость натекания газа в рабочую полость течеискателя менее 10^{-12} (мбар·л)/с.

Как было отмечено выше, ключевой характеристикой имитатора тепловой нагрузки является значение тепловыделения (теплопритока). Известны два основных метода измерения теплопритоков, разработанные для оценки характеристик охлаждаемых ИК-приёмников. Согласно первому методу, регламентированному в [2], определяется время испарения жидкого азота в количестве 0,1 г из залитого в криостат (в нашем случае – держатель имитатора). В основе данного метода измерения лежит уравнение теплового баланса между теплопритоком к имитатору тепловой нагрузки из окружающей среды, количеством теплоты, зависящем от времени и затрачиваемым на испарение жидкого азота, залитого в криостат и на повышение температуры паров от 77 К до температуры верхней части криостата.

Для определения теплопритоков имитатора используется выражение, которое вытекает из 1-го начала термодинамики [2, 3]:

$$Q = G \cdot [r + \bar{c} \cdot (T_g - 77)] \quad (1)$$

где Q – теплоприток из внешней среды, Вт; G – расход испарившегося жидкого азота, г/с; $r = 198$ Дж/г – теплота испарения азота, поглощаемая системой (скрытая теплота); $\bar{c} = 1,06$ Дж/(г·К) – среднеарифметическая теплоемкость азота в диапазоне температур 283 К – 77 К; T_g – температура отходящих паров азота на уровне верхнего среза криостата (гильзы-держателя).

Для оценки теплопритока используют параметр G – величину расхода стабильно испаряющегося жидкого азота в момент времени $t_{\text{стаб}}$. Время стабильного испарения азота находится в интервале $t_{\text{крит}} > t_{\text{стаб}} \geq t_{\text{крит}} - 20$ [с], где $t_{\text{крит}}$ – время, резкого уменьшения расхода азота.

Данный способ даёт надёжные результаты при измерении теплопритоков фотоприёмников и ФПУ, оснащённых т. н. «заливными» азотными криостатами, когда во время работы

ФПУ в криостате находится азот в жидкой фазе.

Для измерения теплопритоков ФПУ, охлаждаемых с помощью газовых криогенных машин, когда жидкая фаза внутри держателя ФПУ отсутствует, более корректным является метод, предложенный в работах [4] и [5], смысл которого состоит в исключении составляющей теплопритока, учитывающей тепло-содержание испарившегося азота в процессе охлаждения криостата. Отличие метода от описанного выше состоит в том, что на участке стабилизированного испарения измеряют расход газообразного азота G_i для произвольного момента времени t_i и определяют теплоприток по формуле:

$$Q_i = G_i \cdot \rho \cdot r, \quad (2)$$

где ρ – плотность газообразного азота, г/см³.

По данным измерений Q_i для ряда моментов t_i методом аппроксимации находят зависимость теплопритока от времени в виде:

$$Q_i = a \exp[b(t_k - t_i)], \quad (3)$$

где t_k – конечный момент времени, когда расход азота становится равным нулю.

Подставляя в формулу (3) значение времени $(t_k - t_i) = 0$, можно получить истинное значение теплопритока $Q = a$.

Этот метод использовался для определения теплопритоков имитаторов тепловой нагрузки, созданных в АО «НПО «Орион», как обеспечивающий наиболее объективную оценку данного параметра. При этом следует отметить, что результаты, получаемые первым и вторым методами, имеют существенное расхождение. Так, например, для одного из образцов имитаторов тепловой нагрузки фирмы Ricor [6] при использовании метода, регламентированного в [2], получено значение теплопритока $Q = 0,317$ Вт, в то время, как метод, предложенный в [4] и [5] дает значение $Q = 0,162$ Вт. Очевидно, что использование значения теплопритока имитатора, полученного первым методом, при определении пара-

метров МКС привело бы к существенному завышению оценки характеристик МКС.

Измерение теплопритоков 5 штук образцов имитаторов тепловой нагрузки фирмы Ricor выбранным методом даёт среднее значение теплопритока на уровне $Q = 0,184$ Вт. Для теплопритоков образцов имитаторов разработки АО «НПО «Орион» получены значения Q на том же уровне.

Заключение

В АО «НПО «Орион» созданы отечественные имитаторы тепловой нагрузки, предназначенные для контроля основных характеристик микрокриогенных систем фотоприёмных устройств инфракрасного диапазона спектра и отработана технология их изготовления. Разработанные имитаторы, в отличие от зарубежных аналогов, имеют модификацию с колпаком, содержащим входное окно из германия, что позволяет расширить область его применения, прежде всего, для исследовательских целей, таких как определение влияния оптической засветки на систему, возможность наблюдения реакции вакуумного криогенного корпуса на воздействие ударных и вибрационных нагрузок, влияние климатических условий и т. п.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вологдин В. В. и др. Индукционная пайка. – Л.: Машиностроение, 1989.
2. Руководящий технический материал. Приемники излучения криостатные. Метод определения теплопритоков на уровне 77 К. РТМ 3-1033-77, 1977.
3. Стефани Е. П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. – М.: Энергия, 1972.
4. Карпов В. В., Козырев М. Е., Кузнецов Н. С., Ильин А. С., Марущенко А. В., Никологорский С. В. / Научно-технический журнал «Контенант». 2015. Т. 14. № 3. С. 95–101.
5. Карпов В. В., Козырев М. Е., Кузнецов С. А. Способ измерения теплопритоков охлаждаемых ИК-приёмников. Патент РФ RU 2791432 C1 G01R 17/00, G01F 5/00. Оpubл. 07.03.2023, бюл. № 7.
6. <http://www.ricor.com>

Simulation of heat load during characterisation control of micro cryogenic cooling systems of photodetectors

*E. D. Korotaev*¹, *M. V. Bannikov*¹, *K. O. Boltar*^{1,2}, *I. V. Efimov*¹ and *A. A. Sharov*^{1,3}

¹ Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

² Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institutskii per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

³ Moscow State University of Geodesy and Cartography
4 Gorohovskii per., Moscow Region, 105064, Russia

Received 31.07.2023; revised 9.08.2023; accepted 13.08.2023

The features of the device and manufacturing technology of thermal load simulators designed to control the parameters of miniature cryocoolers of photo-detectors are considered. The main parameters of the manufactured samples of simulators are given in comparison with foreign analogues. Thermal load simulators for monitoring miniature cryocoolers with a cooling capacity of 0.5–0.75 W have been created at Orion R&P Association.

Keywords: miniature cryocoolers, thermal load simulator, heat gain, cold finger, photo-detector.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-4-129-134

REFERENCES

1. Vologdin V. V. et al., Induction soldering, Leningrad, Mashinost., 1989 [in Russian].
2. Cryostat radiation detectors. Heat leakage measurement method at the level of 77 K. Technical Guides 3-1033077
3. Stefani E. P., Bases of calculation of adjustment of regulators of thermal power processes, Moscow, Energia, 1972 [in Russian].
4. Karpov V. V., Kozirev M. E., Kuznetsov N. S., Ilyin A. S., Marushenko A. V. and Nikologorskiy S. V., Kontenant **14**, 95 (2015) [in Russian].
5. Karpov V. V., Kozirev M. E. and Kuznetsov N. S. The method for measuring heat gains in cooled IR photo-detectors. Patent RU 2791432. 2023.
6. <http://www.ricor.com>