



Отечественная микроригеника: микроригенные системы для фотоприемных модулей

А. В. Самвелов¹, С. Г. Ясев¹, А. С. Москаленко¹,
В. В. Старцев¹, А. Ю. Баранов², О. В. Пахомов²

¹ АО «Оптико-механическое конструкторское бюро
«АСТРОН», Лыткарино, Моск. обл., Россия

² Санкт-Петербургский университет точной механики
и оптики (Университет ИТМО), Санкт-Петербург, Россия

Создан типоразмерный ряд микроригенных систем Стирлинга для фотоприемных модулей, работающих в ИК-диапазонах спектра 3–5 мкм и 7–14 мкм. Ряд включает четыре типа систем обратного цикла Стирлинга интегрального и дифференциального исполнения. Представлены результаты испытаний холодопроизводительностью 400, 500, 750 мВт (77 К, +60 °С). При проектировании и изготовлении систем были использованы технологические решения, повышающие эффективность и ресурс работы в диапазоне температур криостатирования 70–150 К.

Ключевые слова: микроригенные системы Стирлинга, пусковая мощность, стационарный режим, температура криостатирования

Статья поступила: 24.03.2020

Принята к публикации: 24.04.2020

ВВЕДЕНИЕ

Визуализация изображения, сканирование, прицеливание, наведение, дистанционное зондирование в круглосуточном режиме в любых погодных условиях требуют использование охлаждаемых ИК-модулей. Неотъемлемая часть ИК-модулей – миниатюрные системы охлаждения, называемые микроригенные системы Стирлинга (МКС) [1].

Технологии фотоэлектроники – критические технологии, определяющие степень технологи-

Domestic Microcryogenics: Microcryogenic Systems for Photo Detectors

A. V. Samvelov¹, S. G. Yasev¹, A. S. Moskalenko¹, V. V. Startsev¹,
A. Yu. Baranov², O. V. Pakhomov²

¹ Optical-Mechanical Design Bureau ASTROHN JSC, Lytkarino, Moscow Region, Russia

² St. Petersburg University of Precision Mechanics and Optics (ITMO University), St. Petersburg, Russia

A standard series of Stirling microcryogenic systems has been created for photoreceiving modules operating in the IR spectral ranges of 3–5 microns and 7–14 microns. The series includes four types of Stirling reverse cycle systems of integral and differential execution. The results of tests with a cooling capacity of 400, 500, 750 mW (77K, +60 °C) are presented. In the design and manufacture of systems, technological solutions were used that increase the efficiency and service life in the temperature range of cryostatting 70–150K.

Keywords: Stirling microcryogenic systems, starting power, stationary mode, cryostatting temperature

Received: 24.03.2020

Accepted: 24.04.2020

INTRODUCTION

Image visualization, scanning, aiming, pointing, remote sensing around the clock in all weather conditions require the use of cooled IR modules. An integral part of IR modules is miniature cooling systems called Stirling microcryogenic systems (MCS) [1].

Photoelectronics technologies are critical technologies that determine the degree of technological development of machine vision, artificial intelligence, unmanned navigation. However, the level of modern photoelectronics in many respects depends on the technology of cooled photoreceiving modules (PRM) and cryostatic microcryogenic systems. The stability of the photoelectric charac-

ческого развития машинного зрения, искусственного интеллекта, беспилотной навигации. Но уровень современной фотоэлектроники во многом зависит от технологии охлаждаемых фотоприемных модулей (ФПМ) и криостатирующих микрокриогенных систем. От МКС зависит стабильность фотоэлектрических характеристик фотоприемных устройств: вольтовая и токовая чувствительности, обнаружительная способность, эквивалентная шуму разность температур и др.



Рис. 1. Микрокриогенные системы MKC750 и MKC400CP

Fig. 1. Microcryogenic systems MKS750 and MKS400SR

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящее время российские предприятия не обеспечивают серийный выпуск эффективных МКС Стирлинга. Отечественному заказчику важно не только иметь возможность приобретать российские МКС для криостатирования ФПМ, главное – иметь возможность выбора высокоэффективных МКС, с необходимыми теплоэнергетическими характеристиками, в удобной компоновке для разрабатываемой аппаратуры [2, 3]. В АО «ОКБ «АСТРОН» создан модельный ряд эффективных МКС Стирлинга. Для целей выпуска типоразмерного ряда необходимо провести испытания и определить значения параметров приборов.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования является созданный в АО «ОКБ «АСТРОН» модельный ряд, включающий четыре типа МКС Стирлинга интегрального и дифференциального исполнения холодопроизводительностью 400, 500, 750 мВт (77K, 60 °C). При проектировании МКС для повышения эффективности и ресурса МКС были использованы инновационные технологические решения. В пусковой период система работает с максимальным числом оборотов, обеспечивая требуемое время готовности. При достижении рабочей температуры криостатирования система переходит в режим, обеспечивающий лишь подавление теплопритоков. Таким образом, МКС работает в режиме энергосбережения. Особенности эксплуатации МКС определяют жесткие требования к виброактивности. Основные характеристики МКС, разработанные и выпускаемые АО «ОКБ «АСТРОН», указаны в таблице. Внешний облик микрокриогенных систем представлен на рис 1 и 2.

Микрокриогенные системы прошли пусковые испытания при нормальных климатических условиях

teristics of photoreceiving devices depends on the MCS: volt and current sensitivity, detection ability, temperature difference equivalent to noise, etc.

PROBLEM DESCRIPTION

At present, Russian enterprises do not provide serial production of effective Stirling MCS. It is important for the domestic customer not only to be able to purchase Russian MCSs for cryostatization of the PRM, the main thing is to be able to choose highly efficient MCS, with the necessary heat and power characteristics, in a convenient layout for the equipment being developed [2, 3]. ASTROHN DB JSC has created a range of effective Stirling MCS. For the purpose of producing a standard size range, it is necessary to conduct tests and determine the values of the parameters of the devices.



Рис. 2. Микрокриогенные системы MKC500 и MKC400CL

Fig. 2. Microcryogenic systems MKS500 and MKS400SL

Таблица

| Характеристика | Модель | | | |
|---|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| | МКС400СР | МКС400СЛ | МКС500 | МКС750 |
| Конструктивное исполнение | Сплит Стирлинг (ротационный) | Сплит Стирлинг (линейный) | Интегральный Стирлинг | Интегральный Стирлинг |
| Холодопроизводительность, мВт (при $T_e = 77$ К и $T_{oc} = 60$ °С) | 400 | 400 | 500 | 750 |
| Потребляемая мощность, Вт (при $T_e = 77$ К и $T_{oc} = 60$ °С) – в пусковом режиме – в стационарном режиме | ≤ 30 ≤ 8 | ≤ 35 ≤ 10 | ≤ 20 ≤ 7 | ≤ 35 ≤ 10 |
| Время выхода на $T_e = 77$ К при $T_{oc} = 60$ °С, с | ≤ 5 ($m_{охл.} = 3$ г) | ≤ 5 ($m_{охл.} = 3$ г) | ≤ 5 ($m_{охл.} = 3,5$ г) | ≤ 5 ($m_{охл.} = 6$ г) |
| Масса, г | 500 | 550 | 450 | 600 |
| Напряжение питания, В | 24^{+3}_{-2} | 24^{+3}_{-2} | 24^{+3}_{-2} | 24^{+3}_{-2} |

(НКУ), а также при воздействии повышенной температуры окружающей среды $T_{oc} = 50$ °С в составе с тепловыми моделями КНГУ.32.50.00. Графики испытаний иллюстрируют рис. 3–6.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Конструктивное исполнение микрокриогенной системы модели МКС400СР выполнено по схеме сплит Стирлинг (ротационный). При испытании прибор запускали в составе с тепловым имитатором с собственными теплопритоками 200 мВт. Поток измеряли при НКУ. Охлаждаемая масса тепловой модели в медном эквиваленте составила 4 г.

Как видно из графика (рис. 3), время выхода на режим криостатирования МКС при НКУ составляет 5 минут 20 секунд, при температуре окружающей среды $T_{oc} = 50$ °С время пускового режима составило 7 минут 30 секунд. При этом пусковая мощность системы не превышала 18 Вт. В стационарном режиме мощность потребления МКС доходила до 5,5 Вт. При температуре окружающей среды $T_{oc} = 50$ °С величины достигали соответственно значений 21,5 Вт и 6,1 Вт. Давление заправки МКС криоагентом 3,4 МПа.

Следующая система из разработанного ряда охлаждающих систем – МКС400СЛ. Система выполнена по схеме сплит Стирлинг (линейный). В испытаниях МКС400СЛ запускали с той же тепловой моделью, как и предыдущую систему. График демонстри-

PURPOSE OF RESEARCH

The object of the study is the model range created at ASTROHN DB JSC, which includes four types of Stirling MCS of integral and differential design with a cooling capacity of 400, 500, 750 mW (77K, 60 °C). When designing the MCS, to increase the efficiency and resource of the MCS, innovative technological solutions were used. During the start-up period, the system operates at maximum speed, providing the required availability time. When the operating temperature of cryostatization is reached, the system switches to a mode providing only suppression of heat inflows. Thus, the MCS operates in power saving mode. The MCS operation features determine stringent requirements for vibration activity. The

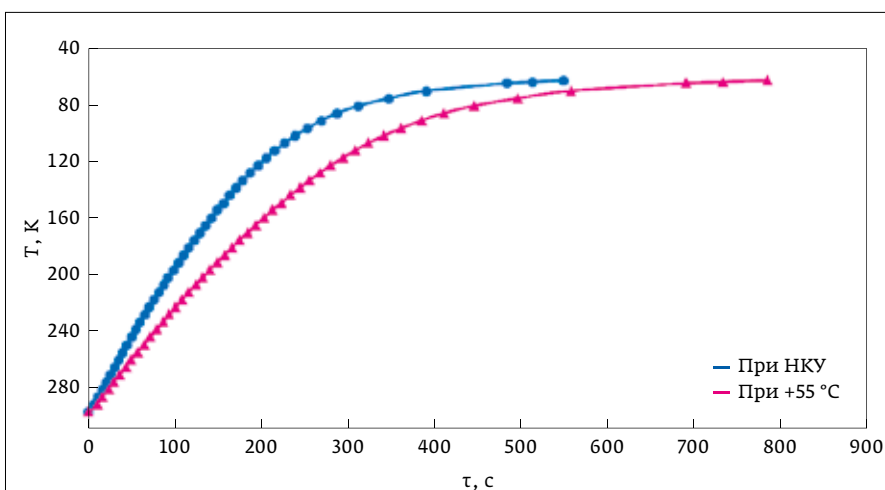


Рис. 3. График испытаний МКС400СР: пуск при НКУ и при повышенной температуре окружающей среды ($T_{oc} = 50$ °С)

Fig. 3. Test schedule MKS400SR: start-up at low voltage switchgear and at elevated ambient temperature ($T_{ea} = 50$ °C)

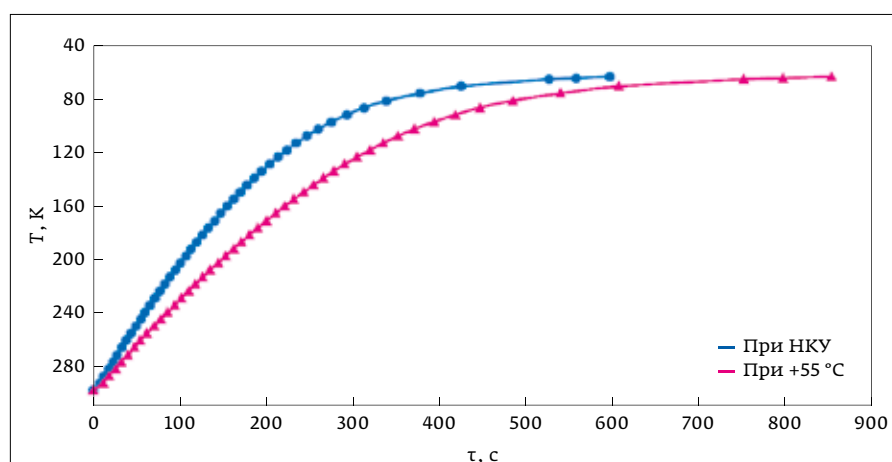


Рис. 4. График испытаний MKS400СЛ: пуск при НКУ и при повышенной температуре окружающей среды ($T_{oc}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Fig. 4. Test schedule MKS400SL: start-up at low voltage switchgear and at elevated ambient temperature ($T_{ea}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$)

рует (рис. 4), что время выхода на режим криостатирования МКС при НКУ составило 5 минут 45 секунд, при температуре окружающей среды $T_{oc}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ время достигло значения 8 минут 15 секунд. При этом пусковая мощность системы при НКУ составляла 20,5 Вт. Стационарная мощность потребления МКС была 5,8 Вт. При температуре окружающей среды $T_{oc}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ величины соответственно равнялись 23,2 Вт и 6,4 Вт. Давление заправки МКС криоагентом 3,2 МПа.

В основе конструкции системы охлаждения МКС500 лежит схема интегральный Стирлинг. При испытаниях систему запускали в составе с тепловым имитатором с собственными теплопритоками 220 мВт, измеряемыми при НКУ. Охлаждаемая масса тепловой модели в медном эквиваленте составляет 4 г.

По графику (рис. 5) видно, что время выхода на режим криостатирования МКС при НКУ составляло 4 минут 32 секунды, а при температуре окружающей среды $T_{oc}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ время увеличилось до 6 минут 28 секунд. При этом пусковая мощность системы составляла 17,3 Вт. Потребление мощности в стационарном режиме также демонстрировало энергоэффективность и не превышало 4,6 Вт. При температуре окружающей среды $T_{oc}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ значения мощности достигали соответственно

main characteristics of the MCS, developed and manufactured by ASTRON DB JSC, are shown in the table. The external appearance of microcryogenic systems is shown in Figs. 1 and 2.

Microcryogenic systems underwent start-up tests under normal climatic conditions (NCC), as well as under the influence of elevated ambient temperature $T_{amb}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ in combination with thermal models of KNGU.32.50.00. Test graphs are illustrated in Fig. 3–6.

TEST RESULTS

The design of the microcryogenic system of the MKS400SR model is performed according to the Stirling split (rotational) scheme. During

testing, the device was launched as part of a heat simulator with its own heat gain of 200 mW. Streams were measured under NCC. The cooled mass of the thermal model in copper equivalent was 4 g.

As can be seen from the graph (Fig. 3), the time to reach the MCS cryostatting mode under NCC is 5 minutes 20 s, at an ambient temperature of $T_{amb}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$, the start-up time was 7 minutes 30 s. In this case, the starting power of the system did not exceed 18 W. In stationary mode, the power consumption of the MCS reached 5.5 W. At ambient temperature $T_{amb}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$, the values reached 21.5 W and 6.1 W, respectively. The MCS

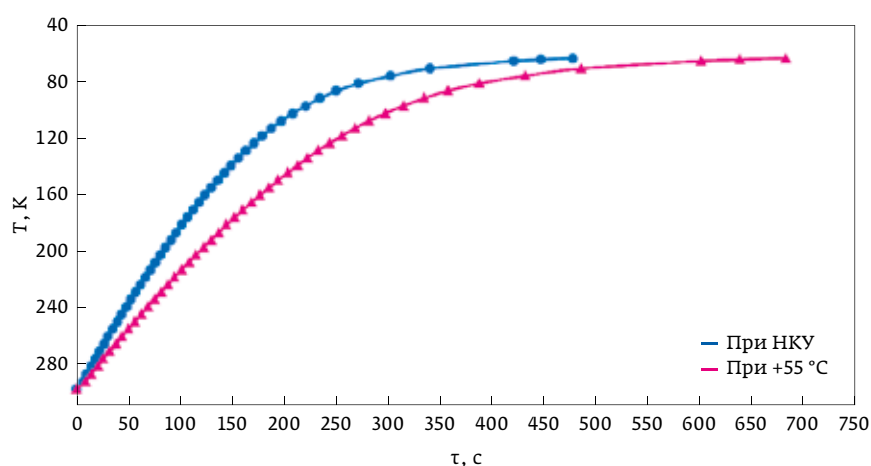


Рис. 5. График испытаний MKS500: пуск при НКУ и при повышенной температуре окружающей среды ($T_{oc}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Fig. 5. Test schedule MKS500: start-up at low voltage switchgear and at elevated ambient temperature ($T_{ea}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$)

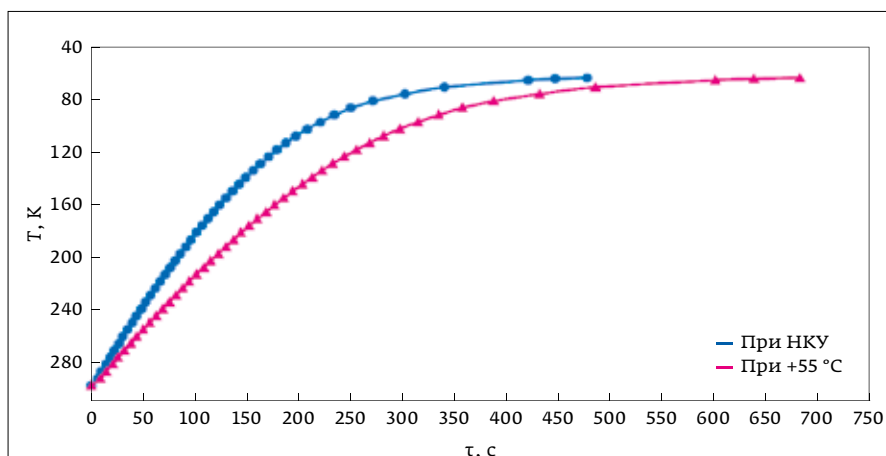


Рис. 6. График испытаний MKS750: пуск при НКУ и при повышенной температуре окружающей среды ($T_{oc}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Fig. 6. Test schedule MKS750: start-up at low voltage switchgear and at elevated ambient temperature ($T_{ea}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$)

19,6 Вт и 5,9 Вт. Давление заправки МКС криоагентом 3,5 МПа.

Система MKS750 выполнена в конструкции интегральный Стирлинг. При испытаниях его запускали в комплексе с тепловым имитатором с собственными теплопритоками 310 мВт. Измерения проводили при НКУ. Охлаждаемая масса тепловой модели в медном эквиваленте составляет 7 г.

График рабочих испытаний (рис. 6) показывает, что время выхода на режим криостатирования МКС при НКУ составляло 4 минуты 55 секунд и при температуре окружающей среды $T_{oc}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ увеличивалось до 6 минут 48 секунд. При этом пусковая мощность потребления МКС достигает 6,7 Вт. Стационарная мощность потребления МКС достигает 6,7 Вт. При температуре окружающей среды $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ величины приобретают соответствующие значения 29,6 Вт и 8,3 Вт. Давление заправки МКС криоагентом 4,6 МПа.

МКС проходят испытания с тепловыми моделями КНГУ.32.50.00 по наработке на отказ. Тепловая нагрузка к тепловым моделям измерялась весовым способом без учета влияния энтальпии отходящих паров. Дополнительная тепловая нагрузка в криозону тепловых моделей при испытаниях не подавалась.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Типоразмерный ряд микрокриогенных систем обратного цикла Стирлинга охватывает область требуемых значений в диапазоне температур криостатирования 70–150 К. Испытания показали работоспособность микрокриогенных систем и воспроизводимость рабочих параметров. Типоразмерный ряд предназначен для комплектации унифицированных фотоприемных

refueling pressure with a cryoagent of 3.4 МПа.

Another device from the developed range of cooling systems is the MKS400SL. The system is made according to the Stirling split (linear) scheme. In tests, the MKS400SL was launched with the same thermal model as the previous system. The graph demonstrates (Fig. 4) that the time to reach the MCS cryostatting mode under NCC was 5 minutes 45 s, at ambient temperature $T_{amb}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ the time reached 8 minutes 15 s. At the same time, the starting power of the system under NCC was 20.5 watts. The stationary power consumption of the MCS was 5.8 watts. At ambient tem-

perature $T_{amb}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$, the values were 23.2 W and 6.4 W, respectively. MCS refueling pressure with a cryogenic agent was 3.2 МПа.

The design of the MKS500 cooling system is based on the integrated Stirling circuit. During testing, the system was launched as part of a heat simulator with its own heat input of 220 mW, measured under NCC. The cooled mass of the thermal model in copper equivalent is 4 g.

According to the graph (Fig. 5), the time to reach the MCS cryostatting mode under NCC was 4 minutes 32 s, and at ambient temperature $T_{amb}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ the time increased to 6 minutes 28 s. The starting power of the system was 17.3 watts. Power consumption in stationary mode also demonstrated energy efficiency and did not exceed 4.6 watts. At ambient temperature $T_{amb}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$, the power values reached 19.6 W and 5.9 W, respectively. MCS refueling pressure with a cryogenic agent was 3.5 МПа.

The MKS750 device is made in the integrated Stirling design. During testing, it was launched in conjunction with a thermal simulator with its own heat input of 310 mW. The measurements were carried out under NCC. The cooled mass of the thermal model in copper equivalent is 7 g.

The schedule of operational tests (Fig. 6) shows that the time to reach the MCS cryostatting mode under NCC was 4 minutes 55 s, and at an ambient temperature of $T_{amb}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ it increased to 6 minutes 48 seconds. The starting power of the system was 26.3 watts. The stationary power consumption of the MCS reaches 6.7 watts. At an ambient temperature of $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, the values acquire the corresponding values of 29.6 W and



модулей (ФПМ), работающих в ИК-диапазонах спектра 3–5 мкм и 7–14 мкм. Основу ФПМ составляют фоточувствительные матрицы форматов 128×128, 256×256, 320×256 и 640×512 элементов на основе InSb, KPT, технологии QWIP's, а также *hot detector's*, обеспечивающих тактико-технические характеристики оптико-электронных комплексов перспективных ВВСТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самвелов А. В., Ясев С. Г., Москаленко А. С., Старцев В. В., Пахомов О. В. Интегральные микрокриогенные систем Стирлинга в составе криостатируемых фотоприемных модулей на основе матриц длинноволновой ИК-области. *Фотоника*. 2019; 13(1): 58–64. DOI: 10.22184 / FRos.2019.13.1.58.64.
2. Колесников А. М., Самвелов А. В., Словеснов К. В. Микрокриогенные системы Стирлинга в интегральном исполнении с повышенным ресурсом работы. *Прикладная физика*. 2010; 2: 80–82.
3. Трошкин Ю. С., Чапкевич А. Л., Горбунов Е. К., Посевин О. П., Самвелов А. В. Микрокриогенная система (МКС) с газовой криогенной машиной Стирлинга интегрального типа для охлаждения фоточувствительных элементов. *Прикладная физика*. 1999; 3: 60–65.

REFERENCES

1. Samvelov A. V., Yasev S. G., Moskalenko A. S., Startsev V. V., Pakhomov O. V. Integral microcryogenic stirling systems as a part of cryostatting photoreceiving modules based on long ir region matrix. *Photonics Russia*. 2019; 13(1): 58–64. DOI: 10.22184 / FRos.2019.13.1.58.64.
2. Kolesnikov A. M., Samvelov A. V., Slovesnov K. V. Mikrokrigennye sistemy Stirlinga v integral'nom ispolnenii s povyshennym resursom raboty. *Prikladnaya fizika*. 2010; 2: 80–82.
3. Troshkin YU. S., Chapkevich A. L., Gorbunov E. K., Posevin O. P., Samvelov A. V. Mikrokrigennaya sistema (MKS) s gazovoj kriogennoj mashinoj Stirlinga integral'nogo tipa dlya ohlazhdeniya fotochuvstvitel'nyh elementov. *Prikladnaya fizika*. 1999; 3: 60–65.

АВТОРЫ

Самвелов Андрей Витальевич, канд. техн. наук, samv-andrej@yandex.ru начальник исследовательского центра "Микрокриогенные системы" АО "ОКБ "АСТРОН", <https://astrohn.ru>, член-корр. Международной академии холода, Лыткарино, Моск. обл., Россия
ORCID: 0000-0001-5840-7626

Ясев Сергей Геннадьевич, руководитель проекта "Микрокриогенные системы", АО «Оптико-механическое конструкторское бюро «АСТРОН», <https://astrohn.ru>, Лыткарино, Моск. обл., Россия
ORCID: 0000-0003-1792-6849

Москаленко Александр Сергеевич, начальник вакуумного участка, АО «Оптико-механическое конструкторское бюро «АСТРОН», <https://astrohn.ru>, Лыткарино, Моск. обл., Россия
ORCID: 0000-0002-1657-5015

Старцев Вадим Валерьевич, канд. техн. наук, главный конструктор, АО «Оптико-механическое конструкторское бюро Астрон», <https://astrohn.ru>, г. Лыткарино, Моск. обл., Россия.
ORCID: 0000-0002-2800-544X

Баранов Александр Юрьевич, профессор практики, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
ORCID: 0000-0003-2465-4642

Пахомов Олег Всеволодович, доцент кафедры криогенной техники, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
ORCID: 0000-0001-8228-6329

ВКЛАД ЧЛЕНОВ АВТОРСКОГО КОЛЛЕКТИВА

Статья подготовлена на основе многолетней работы всех членов авторского коллектива.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов. Все авторы приняли участие в написании статьи и дополнили рукопись в части своей работы.

8.3 W. MCS refueling pressure with a cryogenic agent was 4.6 MPa.

The MCS is being tested with thermal models of KNGU.32.50.00 MTBF. The thermal load to the thermal models was measured by the gravimetric method without taking into account the influence of the enthalpy of the exhaust vapor. Additional thermal load in the cryozone of thermal models was not supplied during testing.

CONCLUSION

The standard size range of microcryogenic Stirling reverse cycle systems covers the range of required values in the range of cryostatting temperatures of 70–150K. Tests have shown the performance of microcryogenic systems and reproducibility of operating parameters. The size range is intended for the assembly of standardized photoreceiving modules (PRMs) operating in the infrared ranges of the spectrum of 3–5 microns and 7–14 microns. The PRM is based on photosensitive matrices of formats 128×128, 256×256, 320×256 and 640×512 elements based on InSb, KPT, QWIP's technology, as well as *hot detectors*, which provide the tactical and technical characteristics of the optoelectronic complexes of promising armaments and military and special purpose equipment.

ABOUT AUTHORS

Samvelov Andrey Vitalievich, Cand. of Tech. Sci., samv-andrej@yandex.ru, head of research center "Micro-cryogenic systems" JSC "OKB "ASTRON", <https://astrohn.ru>, Corresponding member of the international Academy of Cold, Lytkarino, Mosk. region, Russia
ORCID: 0000-0001-5840-7626

Yasev Serey Gennadevich, Project Manager "Microcryogenic Systems", JSC "Optical and Mechanical Design Bureau" ASTRON ", <https://astrohn.ru>, Lytkarino, Moscow. region, Russia
ORCID: 0000-0003-1792-6849

Moskalenko Alexander Sergeevich, head of the vacuum section, JSC "Opto-mechanical Design Bureau" ASTRON ", <https://astrohn.ru>, Lytkarino, Mosk. region, Russia
ORCID: 0000-0002-1657-5015

Startsev Vadim Valerevich, Cand. of Tech. Sci., Chief Designer, JSC Astron Optical-Mechanical Design Bureau, <https://astrohn.ru>, Lytkarino, Mosk. region, Russia.
ORCID: 0000-0002-2800-544X

Baranov Alexander Yurievich professor of practice, ITMO University, St. Petersburg, Russia
ORCID: 0000-0003-2465-4642

Pakhomov Oleg Vsevolodovich, Associate Professor, Department of Cryogenic Engineering ITMO University, St. Petersburg, Russia
ORCID: 0000-0001-8228-6329

CONTRIBUTION BY THE MEMBERS OF THE TEAM OF AUTHORS

The article was prepared on the basis of many years of work by all members of the team of authors.

CONFLICT OF INTEREST

The authors claim that they have no conflict of interest. All authors took part in writing the article and supplemented the manuscript in part of their work.