



Зависимость основных характеристик микроригенной системы Стирлинга для криостатирования фотоприемных модулей от среднего давления цикла

А. В. Самвелов¹, С. Г. Ясев¹, В. В. Старцев¹,
А. С. Москаленко¹, Е. Д. Дектерева¹, О. В. Пахомов²

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

² Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Определяющей составной частью охлаждаемого фотоприемного ИК-модуля, качественно влияющей на его основные характеристики, является микроригенная система. Читателю предложены исследования зависимостей технических характеристик моноблочной микроригенной системы (МКС) Стирлинга от среднего давления криоагента в системе с целью оптимизации.

Ключевые слова: охлаждаемые фотоприемники ИК-диапазона, микроригенные системы Стирлинга, криостатирование

Статья поступила: 24.10.2020

Принята к публикации: 24.11.2020

В отечественной промышленности, астрономии, армии, науке и других сферах жизнедеятельности широко применяются микроригенные системы (МКС) для криостатирования инфракрасных фотодетекторов. МКС является одним из важнейших

Dependence of Main Characteristics of Microcryogenic Stirling System for Cryostatting of Photodetector Modules on The Mean Pressure Cycle

A. V. Samvelov¹, S. G. Yasev¹, V. V. Startsev¹, A. S. Moskalenko¹,
E. D. Dektereva¹, O. V. Pakhomov²

¹ JSC "Optical and Mechanical Design Bureau "ASTROHN",
Lytkarino, Moscow region Russia

² ITMO University, St. Petersburg, Russia

The defining component of the cooled photodetector IR module, which qualitatively affects its main characteristics, is the microcryogenic system. The reader is offered to study the dependences of the technical characteristics of the Stirling monoblock microcryogenic system (MCS) on the average pressure of the cryoagent in the system for the purpose of optimization.

Keywords: cooled IR photodetectors, microcryogenic Stirling systems, cryostatting

Received on: 24.10.2020

Accepted on: 24.11.2020

In domestic industry, astronomy, the army, science and other spheres of life, microcryogenic systems (MCS) are widely used for cryostatting infrared photodetectors. The MCS is one of the most important components of photodetector modules (PDM), which provide cooling of photosensitive structures to the operating temperature. The microcryogenic system largely determines the operational characteristics of the photodetector module [1-3].

Photodetectors of medium and long subbands of infrared radiation waves require low temperatures to suppress intrinsic noise, decrease the rate of thermal generation in a narrow band gap (for semiconductors), increase sensitivity and electri-

компонентов фотоприемных модулей (ФПМ), обеспечивающих охлаждение фоточувствительных структур до рабочей температуры. Микрокриогенная система во многом определяет эксплуатационные характеристики фотоприемного модуля [1-2].

Фотоприемники среднего и длинного поддиапазонов волн ИК-излучения требуют низких температур для подавления собственных шумов, уменьшения темпа тепловой генерации в узкой запрещенной зоне (для полупроводников), повышения чувствительности и электропроводимости. Они предназначены для приема собственного (а также и отраженного) теплового излучения объектов [3]. Иными словами, охлаждение необходимо для обеспечения фотоэлектрических параметров (обнаружительной способности, вольтовой чувствительности и др.) фотоприемного модуля (ФПМ), входящего в состав ИК-аппаратуры. Для этого следует организовать внешнее активное охлаждение ФПМ до криогенных температур [4].

В статье проанализированы зависимости технических характеристик микрокриогенных систем Стирлинга (потребляемой мощности, частоты циклов и быстродействия) микрокриогенной системы для криостатирования фотоприемных модулей от среднего давления цикла.

cal conductivity. They are designed to receive their own (as well as reflected) thermal radiation of objects [4]. In other words, cooling is necessary to ensure the photoelectric parameters (detectivity, voltage sensitivity, etc.) of the photodetector module (PDM), which is part of the IR equipment. For this, it is necessary to organize external active cooling of the PDM to cryogenic temperatures [5].

The article analyzes the dependence of the technical characteristics of Stirling microcryogenic systems (power consumption, cycle frequency and speed) of a microcryogenic system for cryostatting photodetector modules on the average cycle pressure.

Figures 1, 2 shows a microcryogenic system (serial no. 00053), integrated alternately with a thermal model and a photodetector module for research.

The microcryogenic system has successfully passed a series of tests for strength and resistance to external influences.

Figure 3 shows the dependence of the power consumption of the MCS sample in a composition with a thermal simulator (TS) with its own heat flux of 250 mW, measured at the normal climatic conditions, and the reduced cooled mass in copper equivalent, amounting to 4 g.

The microcryogenic system was sequentially filled with different pressures in the range from 2 to 4 MPa, with a step of 0.2 MPa. In valveless pneumatic systems, the filling pressure corresponds to



Рис. 1. Микрокриогенная система MKS500, интегрированная с тепловой моделью АДСГ.405113.001

Fig. 1. Microcryogenic system MKS500, integrated with thermal model ADSG.405113.001



Рис. 2. Микрокриогенная система MKS500, интегрированная с фотоприемным модулем

Fig. 2. Microcryogenic system MKS500, integrated with a photodetector module

На рис. 1, 2 представлена микрокриогенная система, интегрированная поочередно с тепловой моделью и фотоприемным модулем для проведения исследований. Микрокриогенная система успешно прошла серию испытаний на прочность и устойчивость к внешним воздействующим факторам.

На рис. 3 показана зависимость потребляемой мощности образца МКС в составе с тепловым имитатором (ТИ) с собственными теплопритоками 250 мВт, измеряемыми при нормальных климатических условиях (НКУ), и приведенной охлаждаемой массой в медном эквиваленте, составляющей 4 г.

Микрокриогенная система последовательно заполнялась различными величинами давления в диапазоне от 2 до 4 МПа, шагом 0,2 МПа. В бесклапанных пневмосистемах давление заполнения соответствует среднему давлению системы. Во всех экспериментах МКС стабилизировалась при температуре криостатирования 110 К, что требуется для криостатирования hot-детекторов.

Как показывает зависимость стационарной потребляемой мощности МКС (оранжевая кривая) при стабилизированном режиме (110 К), оптимальный участок среднего давления криоагента соответствовал 3,2–4 МПа. Стабилизированная потребляемая мощность на этом участке поддерживалась на уровне $\approx 2,0$ Вт (см. рис. 3). Что касается поведения частоты вращения привода МКС и времени выхода на температуру криостатирования (красная и синяя кривые соответственно), то зависимости указанных характеристик от среднего давления цикла ведут себя практически эквидистантно относительно друг друга и имеют оптимум также на участке 3,2–4 МПа, как и в случае потребляемой мощности.

На рис. 4 приведена серия кривых – зависимостей вышеуказанных характеристик МКС от среднего давления цикла МКС при

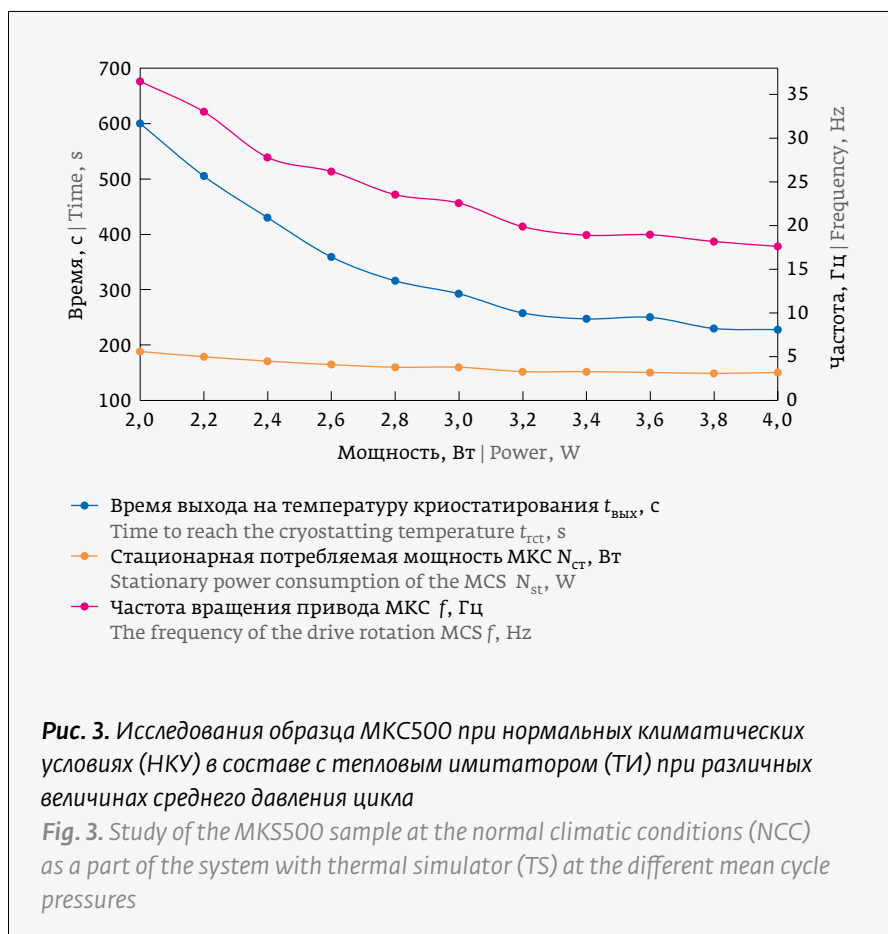


Рис. 3. Исследования образца МКС500 при нормальных климатических условиях (НКУ) в составе с тепловым имитатором (ТИ) при различных величинах среднего давления цикла

Fig. 3. Study of the MKS500 sample at the normal climatic conditions (NCC) as a part of the system with thermal simulator (TS) at the different mean cycle pressures

the average system pressure. In all experiments, the MCS was stabilized at a cryostatting temperature of 110 K, which is required for cryostatting of hot detectors.

As the dependence of the stationary power consumption of the MCS (orange curve) in the stabilized mode (110 K) shows, the optimal section of the average cryoagent pressure corresponded to 3.2–4 MPa. The stabilized power consumption in this section was maintained at a level of ≈ 2.0 W (see Fig. 3). As for the behavior of the drive rotation MCS frequency and the time to reach the cryostatting temperature (red and blue curves, respectively), the dependences of these characteristics on the average cycle pressure behave almost equidistantly relative to each other and have an optimum also in the 3.2–4 MPa region as in the case of power consumption.

Figure 4 shows a series of curves – the dependences of the above characteristics of the MCS on the average pressure of the MCS cycle during operation of the microcryogenic system as part of the ASTRON-640KRT15A35 photodetector module.

The photodetector module ASTRON-640KRT15A35, manufactured by JSC “OMDB “ASTRON”, has

работе микрокриогенной системы в составе с фотоприемным модулем АСТРОН-640КРТ15А35.

Фотоприемный модуль АСТРОН-640КРТ15А35, производства АО «ОКБ «АСТРОН», обладает приведенной охлаждаемой массой 4 г в медном эквиваленте и теплопритоками 150 мВт, замеренными в НКУ.

Поведение зависимостей характеристик МКС, состыкованной с ФПМ, от среднего давления цикла, как и в случае работы МКС в составе с тепловым имитатором, подтвердила, что разработка и изготовление теплового имитатора выполнялись с максимальным приближением к ФПМ с точки зрения теплофизики.

Здесь также показательно, что в диапазоне давлений от 3 до 4 МПа стационарная мощность, время выхода на температуру криостатирования и частота электропривода сохраняются оптимальными и практически неизменными (около 2 Вт, 3 мин. и 12-15 Гц соответственно).

Анализ полученных зависимостей позволяет утверждать следующее: в интервале от 3 до 4 МПа потребляемая мощность, затрачиваемая системой (оранжевая кривая), претерпевает относительно небольшую положительную производную с увеличением среднего давления цикла. Это связано главным образом с проявлением в большей степени неизотермичности сжатия, приводящего тем самым к увеличению потерь от теплопритоков из-за наличия неизотермичности сжатия.

Согласно теории Шмидта [5]

$$N - f \dot{p} V_0 \frac{\delta}{1 + \sqrt{1 - \delta^2}} (\omega \sin(\varphi - \theta) - \sin \theta), \quad (1)$$

где f – частота вращения вала, \dot{p} – среднее давление цикла, V_0 – максимальный объем полости расширения, δ , θ – конструктивные коэффициенты, ω – отношение максимальных объемов полостей, φ – угол фазового сдвига.

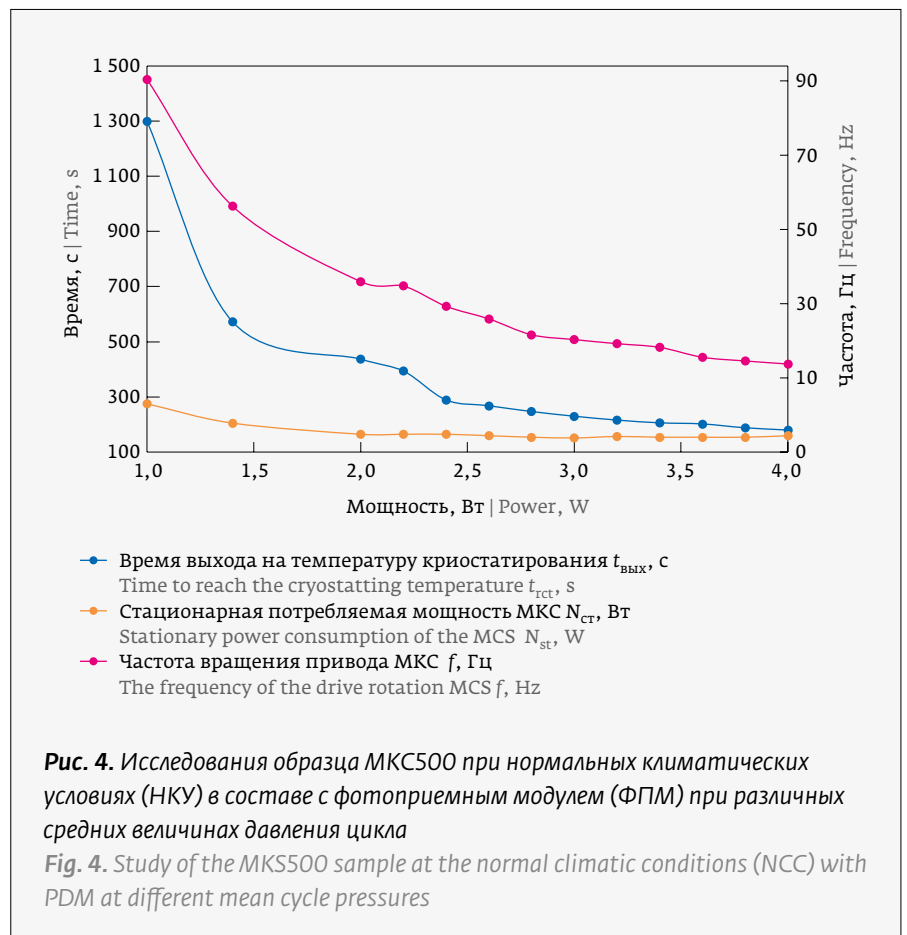


Рис. 4. Исследования образца МКС500 при нормальных климатических условиях (НКУ) в составе с фотоприемным модулем (ФПМ) при различных средних величинах давления цикла

Fig. 4. Study of the MKS500 sample at the normal climatic conditions (NCC) with PDM at different mean cycle pressures

a reduced cooled mass of 4 g in copper equivalent and heat gains of 150 mW, measured in the normal climatic conditions.

The behavior of the dependences of the characteristics of the MCS docked with the PDM on the average pressure of the cycle, as in the case of the operation of the MCS in a composition with a thermal simulator, confirmed that the development and manufacture of the thermal simulator was carried out with the maximum approximation to the PDM from the point of view of thermal physics.

It is also significant here that in the pressure range from 3 to 4 МПа, the stationary power, the time to reach the cryostatting temperature and the frequency of the electric drive remain optimal and practically unchanged (about 2 W, 3 min and 12-15 Hz, respectively).

Analysis of the obtained dependencies allows us to state the following. In the range from 3 to 4 МПа, the power consumed by the system (orange curve) undergoes a relatively small positive derivative with an increase in the average cycle pressure. This is mainly due to the manifestation of a greater degree of non-isothermal compression, thereby leading to



В интервале средних давлений от 1 до 3 МПа идет последовательное падение мощности потребления (см. рис. 4). При этом ближе к значению 1 МПа падение усиливается интенсивнее. Данное поведение можно объяснить тем, что для реализации требуемых характеристик цикла расходуется больше затрат энергии на увеличение частоты вращения вала (f) (роста частоты циклов Стирлинга). На этом участке выражение (1) не работает. Частота вращения вала (красная кривая) как раз подтверждает полученный вывод.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать вывод, что микрокриогенные системы Стирлинга малой полезной мощности (до 1 Вт) иллюстрируют весьма оригинальное поведение основных характеристик в зависимости от среднего давления цикла.

В интервале от 1 до 3 МПа среднего давления цикла зависимость N , n , $\tau=f(\bar{p})$ несет убывающий характер. поскольку рост давления приводит к большей эффективности цикла и, следовательно, требуется меньше затрат энергии как частоты вращения, так и мощности потребления, но до определенного предела, который располагается вблизи значения среднего давления 3 МПа, после которого начинает работать соотношение (1).

В интервале от 3 до 4 МПа зависимости меняются, и с ростом среднего давления кривые n , $\tau=f(\bar{p})$ медленно убывают по значениям, тогда как мощность МКС незначительно подрастает. Это происходит по причине роста теплопритоков МКС из-за неизотермичности сжатия криоагента в компрессоре и других видов необратимости, когда имеет место (1).

Учитывая вышеизложенное, можно сделать вывод, что оптимальное среднее давление цикла данной МКС, иначе говоря, давление ее заправки будет лежать вблизи точки 3 МПа. Поскольку при максимальной эффективности цикла энергопотребление ее минимально, следовательно, термодинамический КПД системы будет максимален.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самвелов А. В., Ясев С. Г., Москаленко А. С., Старцев В. В., Баранов А. Ю., Пахомов О. В. Отечественная микрокриогеника: микрокриогенные системы для фотоприёмных модулей. *Фотоника*. 2020;14(4): 332–337.
2. Самвелов А. В., Ясев С. Г., Москаленко А. С., Старцев В. В., Пахомов О. В. Интегральные микрокриогенные систем Стирлинга

an increase in losses from heat inflows from the presence of non-isothermal compression.

According to Schmidt's theory [5]:

$$N \sim f \bar{p} V_0 \frac{\delta}{1 + \sqrt{1 - \delta^2}} (\omega \sin(\varphi - \theta) - \sin \theta), \quad (1)$$

where f is the shaft rotation frequency, \bar{p} is the average pressure of the cycle, V_0 is the maximum volume of the expansion cavity, δ , θ are the design factors, ω is the ratio of the maximum volumes of the cavities, φ is the phase shift angle.

In the range of average pressures from 1 to 3 МПа, there is a consistent drop in the power consumption (see Fig. 4). At the same time, closer to the value of 1 МПа, the drop increases more intensively. This behavior can be explained by the fact that in order to achieve the required cycle characteristics, more energy is consumed to increase the shaft speed (f) (increase in the frequency of Stirling cycles). Expression (1) does not work in this section. The shaft speed (red curve) just confirms this conclusion.

CONCLUSION

Thus, the conducted studies allow us to conclude that Stirling microcryogenic systems of low useful power (up to 1 W) illustrate a very original behavior of the main characteristics depending on the average cycle pressure.

In the range from 1 to 3 МПа of the average pressure of the cycle, the dependence N , n , $\tau=f(\bar{p})$ has a decreasing character. since an increase in pressure leads to a greater efficiency of the cycle and, therefore, less energy consumption is required, both in the rotation frequency and in the power consumption, but up to a certain limit, which is located near the value of the average pressure of 3 МПа, after which relation (1) begins to work.

In the range from 3 to 4 МПа, the dependences change, and with an increase in the average pressure, the curves n , $\tau=f(\bar{p})$ slowly decrease in values, while the MCS power insignificantly increases. This is due to an increase in the MCS heat flux due to the non-isothermal compression of the cryoagent in the compressor and other types of irreversibility, when (1) takes place.

Considering the above, we can conclude that the optimal average pressure of the cycle of this MCS, in other words, its filling pressure will lie near the point of 3 МПа. Since at the maximum efficiency of the cycle, its energy consumption is minimal, therefore, the thermodynamic efficiency of the system will be maximum.

- в составе криостатируемых фотоприемных модулей на основе матриц длинноволновой ИК-области. *Фотоника*. 2019;13(1): 58–64.
3. **Самвелов А. В.** Микрокриогенные системы Стирлинга в интегральном исполнении с повышенным ресурсом работы. *Прикладная физика*. 2010; 2: 80–82.
 4. **Самвелов А. В., Минаев Д. В., Кошелев П. А., Баранов И. В., Баранов А. Ю., Пахомов О. В.** Исследование микрокриогенной системы Стирлинга в расширенном диапазоне температур криостатирования. *Прикладная физика*. 2017; 4: 89–93.
 5. **Архаров А. М. и др.** *Криогенные системы*. – М.: Машиностроение. 1987.

АВТОРЫ

Самвелов А. В., к. т. н, <https://astrohn.ru>, АО «Оптико-механическое конструкторское бюро «АСТРОН», Лыткарино, Моск. обл., Россия. ORCID: 0000-0001-5840-7626

Ясев С. Г., <https://astrohn.ru>, АО «Оптико-механическое конструкторское бюро «АСТРОН», Лыткарино, Моск. обл., Россия. ORCID: 0000-0003-1792-6849

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

Старцев В. В., к. т. н, главный конструктор, АО «Оптико-механическое конструкторское бюро Астрон», <https://astrohn.ru>, г. Лыткарино, Моск. обл., Россия. ORCID: 0000-0002-2800-544X

Дектерева Е. Д., АО «Оптико-механическое конструкторское бюро Астрон», <https://astrohn.ru>, г. Лыткарино, Моск. обл., Россия. ORCID: 0000-0002-8187-1275

Пахомов О. В., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия. ORCID: 0000-0001-8228-6329

ВКЛАД ЧЛЕНОВ АВТОРСКОГО КОЛЛЕКТИВА

Статья подготовлена на основе работы всех членов авторского коллектива.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Все авторы приняли участие в написании статьи и дополнили рукопись в части своей работы.

REFERENCES

1. **Samvelov A. V., Yasev S. G., Moskalenko A. S., Starcev V. V., Baranov A. YU., Pahomov O. V.** Domestic microcryogenics: microcryogenic systems for photoreceiving modules. *Photonics Russia (Fotonica)*. 2020;14(4): 332–337. DOI: 10.22184/FRos.2020.14.4.332.337
2. **Samvelov A. V., Yasev S. G., Moskalenko A. S., Starcev V. V., Pahomov O. V.** Integral Microcryogenic Stirling Systems as a Part Of Cryostatting Photoreceiving Modules Based On Long Ir Region Matrix. *Photonics Russia (Fotonica)*. 2019;13(1): 58–64. DOI: 10.22184/FRos.2019.13.1.58.64.
3. **Samvelov A. V.** Mikrokrigennyye sistemy Stirlinga v integral'nom ispolnenii s povyshennym resursom raboty. *Prikladnaya fizika*. 2010; 2: 80–82.
4. **Samvelov A. V., Minaev D. V., Koshelev P. A., Baranov I. V., Baranov A. YU., Pahomov O. V.** Issledovanie mikrokrigennoy sistemy Stirlinga v rasshirennom diapazone temperatur kriostatirovaniya. *Prikladnaya fizika*. 2017; 4: 89–93.
5. **Arharov A. M. i dr.** *Kriogennyye sistemy*. – М.: Mashinostroenie. 1987.

ABOUT AUTHORS

Samvelov A. V., Cand. of Scien. (Engin.), JSC "Optical and Mechanical Design Bureau "ASTROHN", Lytkarino, Moscow region Russia. ORCID: 0000-0001-5840-7626

Yasev S. G., JSC "Optical and Mechanical Design Bureau "ASTROHN", Lytkarino, Moscow region Russia. ORCID: 0000-0003-1792-6849

Starcev V. V., Cand. of Scien. (Engin.), chief designer, JSC "Optical and Mechanical Design Bureau "ASTROHN", Lytkarino, Moscow region Russia. ORCID: 0000-0002-2800-544X

Moskalenko A. S., JSC "Optical and Mechanical Design Bureau "ASTROHN", Lytkarino, Moscow region Russia. ORCID: 0000-0002-1657-5015

Dektereva E. D., JSC "Optical and Mechanical Design Bureau "ASTROHN", Lytkarino, Moscow region Russia. ORCID: 0000-0002-8187-1275

Pakhomov O. V., 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 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.



Теплотелевизионный регистратор температуры тела

АСТРОН-ТТ2019

Предназначен для автоматизированного бесконтактного определения людей с повышенной температурой тела на пунктах пропуска и досмотра

АСТРОН
Оптико-механическое конструкторское бюро

140080, МО, г. Лыткарино, ул. Парковая, 1;
тел.: +7 (495) 215-13-82;
v@astrohn.ru, www.astrohn.ru