



ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОКРИОГЕННЫЕ СИСТЕМЫ СТИРЛИНГА В СОСТАВЕ КРИОСТАТИРУЕМЫХ ФОТОПРИЕМНЫХ МОДУЛЕЙ НА ОСНОВЕ МАТРИЦ ДЛИННОВОЛНОВОЙ ИК-ОБЛАСТИ

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

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

²Санкт-Петербургский университет точ-
ной механики и оптики (Университет ИТМО),
Санкт-Петербург

Важнейшей составной частью охлаждаемых фотоприемных модулей является микрокриогенная система криостатирования, во многом определяющая технико-эксплуатационные характеристики изделия. В АО «ОКБ «АСТРОН» разработаны и внедрены в производство конструкции микрокриогенных систем криостатирования. Данная разработка является составной частью программы развития АО «ОКБ «АСТРОН», где разработаны и запущены в производство фотоприемные модули диапазона 7–14 мкм размером 384 × 288 и 640 × 480 элементов.

Одним из важнейших направлений реализации «Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации», утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 года № 642, являются технологии оптоэлектроники и фотоэлектроники. Технологии фотоэлектроники – критические технологии, определяющие степень технологического развития государства. Уровень современной фотоэлектроники, в свою очередь, во многом определяется развитием технологий новых поколений, охлаждаемых фотоприемных модулей (ФПМ) и микрокриогенных систем к ним.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Отечественные производители различных типов охлаждаемых фотоприемных устройств нуждаются в крупносерийном производстве микрокриоген-

INTEGRAL MICROCRYOGENIC STIRLING SYSTEMS AS A PART OF CRYOSTATING PHOTORECEIVING MODULES BASED ON LONG IR REGION MATRIX

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

¹JSC "Optical-Mechanical Design Bureau "ASTRON",
Mytishchi, Moscow region

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

The most important component of the cooled photoreceiving modules is the micro cryogenic cryostat system, which largely determines the technical and operational characteristics of the product. JSC "ODB "ASTORN" has developed and put into production the designs of microcryogenic cryostatting systems. This development is an integral part of the ASTRON's development program, where the photoreceiving modules of the 7–14 μm band with the size of 384 × 288 and 640 × 480 elements are developed and put into production.

One of the most important areas of implementation of the "Strategy of scientific and technological development of the Russian Federation", approved by Decree of the President of the Russian Federation No. 642 dated December 1, 2016, is the technology of optoelectronics and photoelectronics. Photoelectronics technologies are the critical ones that determine the degree of technological development of the state. The level of modern photoelectronics, in turn, is largely determined by the development of new generation technologies, cooled photoreceiving modules (PRM) and their microcryogenic systems.

SETTING THE PROBLEM

Domestic manufacturers of various types of cooled photoreceiving devices require large-scale production of microcryogenic systems (MCS) with higher efficiency, lower weight and size indicators and a life of up to 20 thousand hours and more.

ных систем (МКС) с более высоким КПД, пониженными массогабаритными показателями и с ресурсом до 20 тысяч часов и выше. На сегодняшний день в России отсутствует выпуск качественных микрокриогенных систем (МКС), удовлетворяющих производителей ФПМ, тогда как за рубежом ведутся активные работы по увеличению срока эксплуатации существующих криоохладителей, проводится разработка и освоение производства принципиально новых систем для криостатирования.

В АО «ОКБ «АСТОРН» разработаны и внедрены в производство конструкции МКС, способные конкурировать с лучшими аналогичными по классу зарубежными образцами систем охлаждения.

При проектировании МКС АО «ОКБ «АСТРОН» были использованы способы и технологические решения для повышения эффективности, улучшения массогабаритных, энергетических и ресурсных показателей интегральных МКС холодопроизводительностью 500 и 750 мВт (при НКУ и $T_e=80$ К), работающих по замкнутому обратному термогазодинамическому регенеративному циклу Стирлинга с внутренней регенерацией тепла, в качестве рабочего тела которого используется сверхчистый газообразный гелий.

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ МКС

Разработанные МКС (рис. 1) – это микромодули, состоящие из поршневых машин и теплообменных аппаратов в виде единого блока. Отсутствует запорная арматура, уменьшены размеры и масса, улучшены энергетические показатели.

Специфика цикла таких МКС основана на процессах компримирования и экспансии криоагента, сопровождающихся теплообменом между полостями с различными температурами, нестационарностью процессов в теплообменных аппаратах, флюктуациями температур, потерями холодопроизводительности различной природы. Указанные обстоятельства в значительной степени затрудняют математическое моделирование подобных устройств. Максимально полный учет потерь холодопроизводительности МКС – залог повышения их эффективности.

Полная холодопроизводительность идеального цикла Стирлинга:

$$Q_e = MRT_e \ln(V_1/V_2),$$

где M – массовый расход газа-криоагента; R – газовая постоянная рабочего газа; T_e – температура криостатирования; V_1, V_2 – объемы полостей сжатия и расширения, соответственно.

Today, no high-quality microcryogenic systems (MCS) are produced in Russia that may satisfy the manufacturers of PRM, while abroad there is an active systematic increase in the life of existing cryo-coolers, development and mastering of the production of fundamentally new systems for cryostatting is underway.

JSC "ODB "ASTORN" has developed and put into production the designs of the MCS, capable of competing with the best foreign-class cooling systems of the same class.

When designing the MCS, the specialists of JSC "ODB "ASTRON" applied the methods and process solutions to improve efficiency, improve the weight and size, energy and operational life indicators of the integrated MCSs with a cooling capacity of 500 and 750 mW (under normal climatic conditions and $T_e=80$ K) operating in a closed reverse thermogasdynamic regeneration Stirling cycle with internal heat recovery, using ultrapure helium gas as the working medium.

FEATURES OF THE MCS DESIGN

The developed MCS (Fig. 1) are the micromodules consisting of piston machines and heat exchangers in the form of a single unit. They have no valves, reduced size and weight, improved energy performance.

The specificity of the cycle of such MCSs is based on the processes of compression and expansion of the cryoagent, accompanied by heat and mass transfer between cavities with different temperatures, non-stationarity of processes in heat exchangers, temperature fluctuations, and loss of cooling capacity of various nature. These circumstances greatly



Рис. 1. Микрокриогенные системы АО «ОКБ» АСТРОН»
Fig. 1. Microcryogenic systems by JSC "ODB ASTRON"

Полезная холодопроизводительность охладителя Стирлинга:

$$Q_{\text{п}} = Q_e - \Delta Q,$$

где $\Delta Q = Q_{\text{нед.}} + Q_{\text{тп}} + Q_{\text{пер.}} + Q_{\text{вт}} + Q_{\text{гидр.}} + Q_{\text{проч.}}$ - потери холодопроизводительности от неэффективности теплообмена в регенераторе, теплопритоков по элементам конструкции, перетечек криоагента, переноса тепла вытеснителем, гидравлические потери, прочие потери, соответственно [1-3].

МКС данного класса - это также высокоточный механизм, детали которого выполняются на прецизионных станках с точностью 0,1 мкм и повторяемостью 1 мкм. АО «ОКБ» АСТРОН» обладает парком таких станков. На рис. 2 представлены некоторые прецизионные детали МКС.

МКС в интегральном исполнении обладают достаточно высокой эффективностью, поскольку разделение блоков при реализации цикла сплит-Стирлинг увеличивает «мертвый» объем полостей устройства, гидравлические потери в каналах, а главное, затрудняется возможность достижения оптимального угла фазового сдвига между максимальным объемом полости сжатия и минимальным давлением полости расширения [3].

МКС оснащена электродвигателем с регулируемым числом оборотов, что позволяет в стационарном режиме поддерживать температуру криостатирования при низком энергопотреблении (менее 3-4 Вт). Малое энергопотребление отражается на повышении ресурса МКС и аппаратуры в целом, уменьшении уровня вибровоздействия на фотоприемный модуль (ФПМ), что весьма важно для получения требуемых фотоэлектрических параметров. В качестве привода МКС используется высокоэффективный моментный электродвигатель в облегченном исполнении совместной разработки ООО «Модем-Техно» и АО «ОКБ «АСТРОН». Двигатель состоит из статора, состоящего из девяти обмоток, и ротора, выполненного из редкоземельного магнитного материала в кольцевом исполнении. На валу электродвигателя установлен датчик положения Холла. Электронный блок управления регулирует работу электродвигателя, обеспечивая питание обмоток статора. Величина и продолжительность

сложат математическое моделирование таких устройств. Наиболее полное учёт потерь холодопроизводительности МКС является ключом к повышению их эффективности.

Общая холодопроизводительность идеального цикла Стирлинга:

$$Q_e = MRT_e \ln(V_1/V_2),$$

где M - массовый расход рабочего газа; R - газовая постоянная рабочего газа; T_e - температура криостатирования; V_1, V_2 - объём полостей сжатия и расширения, соответственно.

Полезная холодопроизводительность Стирлинга:

$$Q_{\text{п}} = Q_e - \Delta Q,$$

где $\Delta Q = Q_{\text{нед.}} + Q_{\text{тп}} + Q_{\text{пер.}} + Q_{\text{вт}} + Q_{\text{гидр.}} + Q_{\text{проч.}}$ - потери холодопроизводительности от неэффективности теплообмена в регенераторе, теплопритоков по элементам конструкции, перетечек криоагента, теплопередачи по топливу, гидравлические потери, прочие потери, соответственно [1-3].

МКС этого класса также является высокоточным механизмом, детали которого выполняются на прецизионных станках с точностью 0,1 мкм и повторяемостью 1 мкм. АО «ОКБ «АСТРОН» имеет парк таких станков. На рис. 2 представлены некоторые прецизионные детали МКС.

Интегральные МКС обладают достаточно высокой эффективностью, поскольку разделение блоков при реализации цикла сплит-Стирлинг увеличивает «мертвый» объем полостей устройства, гидравлические потери в каналах, а главное, трудно достичь оптимального угла фазового сдвига между максимальным объемом полости сжатия и минимальным давлением полости расширения [3].



Рис. 2. Прецизионные детали МКС
Fig. 2. MCS precision parts



подаваемого тока формируется по показаниям датчиков Холла и термодатчика в зоне криостатирования ФПМ. Электронный блок управления выполняется встроенным в электродвигатель. Важным элементом конструкции двигателя является изолирующий экран, разделяющий полость электродвигателя и внутренний объем МКС. Это позволяет исключить попадание посторонних частиц со стороны статора в газовую полость машины.

В пусковой период система работает с максимальным числом оборотов, обеспечивая требуемое время готовности. При достижении рабочей температуры криостатирования система переходит на режим с числом оборотов, обеспечивающим лишь подавление теплопритоков, которые при интегральной стыковке МКС и ФПМ не превышают 0,2-0,3 Вт. Таким образом, МКС работает в режиме энергосбережения в пусковом периоде, потребляя до 30 Вт, а в стационаре не более 3-4 Вт. Это значительно снижает виброактивность МКС, что особенно важно для основного режима работы ФЭМ, а пониженное число оборотов, кроме того, открывает путь совершенствования конструкции и технологии в вопросах подбора антифрикционных материалов для доведения ресурса работы ФПМ до 10 000 часов и более.

Поскольку система работает по обратному циклу Стирлинга с использованием постоянного количества криоагента, значительно возрастает влияние утечек и перетечек, газовыделений, «мертвого» объема, гидравлических потерь и др. В связи с этим используемые технологические процессы должны соответствовать возросшим требованиям, предъявляемым к производству МКС.

Одной из главных особенностей данной МКС является наличие в рабочем объеме системы встроенных теплообменных аппаратов. Это объясняет сложный характер протекания процессов в цикле, затрудняет оценку влияния изменения каждого параметра и конструктивного фактора на холодопроизводительность и эффективность системы, поскольку эти изменения влияют не только на процессы в конкретном элементе системы, но и на весь рабочий цикл.

Основной причиной снижения эффективности МКС являются потери в регенераторе. В зависимости от уровня криостатирования, размеров и типа системы потери могут составлять от 30 до 90% располагаемой мощности охлаждения. Это объясняется спецификой работы встроенных регенераторов, так как газовые полости регенератора включены в рабочий объем МКС. Они составляют около 70% всего «мертвого» объема системы, т.е. являются одной из основных причин уменьшения удельной холодопроизводительности, а следовательно, и эффек-

maximum volume of the compression cavity and the minimum expansion cavity pressure [3].

The MCS is equipped with an electric motor with an adjustable rotational speed, which makes it possible to maintain the temperature of cryostatting at low power consumption (less than 3-4 W). Low power consumption is reflected in the increase in the life of the MCS and the equipment as a whole, the decrease in the level of vibration of the photoreceiving module (PRM), which is very important for obtaining the required photoelectric parameters. As the MCS drive, a highly efficient torque motor is used in a lightweight version jointly developed by LLC "Modem-Tekhno" and JSC "ODB "ASTRON". The motor consists of a stator with nine windings and a rotor made of a rare-earth magnetic material in a ring design. The Hall position sensor is installed on the shaft of the electric motor. The electronic control unit regulates the operation of the electric motor, supplying power to the stator windings. The magnitude and duration of the supplied current is formed according to the indications of the Hall sensors and a thermal sensor in the zone of the PRM cryostatting. The electronic control unit is built into the motor. An important element in the motor design is an insulating screen separating the cavity of the electric motor and the internal volume of the MCS. This eliminates the ingress of foreign particles from the stator side into the gas cavity of the machine.

During the start-up period, the system operates with the maximum number of revolutions, providing the required readiness time. When the working temperature of cryostatting is reached, the system switches to a mode with a speed that provides only suppression of heat leakages, which, when integrated, do not exceed 0.2-0.3 W for the MCS and PRM. Thus, the MCS operates in the energy-saving mode in the start-up period, consuming up to 30 W, and in the stationary mode - no more than 3-4 W. This significantly reduces the MCS's vibratory activity, which is particularly important for the main mode of operation of the PEM, and the reduced number of revolutions also opens the way for improving the design and technology in the selection of anti-friction materials to bring the PRM working life up to 10,000 hours or more.

Since the system operates following the reverse Stirling cycle using a constant amount of a cryogenic agent, the impact of leaks and overflows, outgassing, dead volume, hydraulic losses, etc. significantly increases. Therefore, the processes used must meet the increased requirements for the production of the MCS.



тивности МКС. Следствием этого является жесткое ограничение на размеры регенератора [1].

Специфику конструкции регенераторов МКС определяют главным образом большие удельные поверхности насадки регенератора (от 10^4 до $5 \cdot 10^4$ м²/м³) и также малые поперечные размеры теплопередающих элементов и малый гидравлический диаметр каналов регенератора (от 0,1 мм и менее), благодаря чему она является высокоэффективным фильтрующим материалом. Встроенные регенераторы чувствительны к степени чистоты рабочего тела. Затвердевающие примеси, продукты газовой выделенной и износа, осаждаются в «холодных» сечениях регенератора, резко увеличивают гидравлическое сопротивление и, следовательно, уменьшают холодопроизводительность МКС. В проходном сечении регенератора ламинарный поток газа характеризуется перепадом давления под влиянием сил трения и, согласно уравнению Дарси-Вейсбаха, равен:

$$\Delta p = (\xi \cdot \rho \cdot v^2 \cdot l) / 2 \cdot d_{\text{экв}},$$

где ξ – коэффициент сопротивления силам трения; ρ – удельный вес газа; v – средняя скорость движения газа в зазоре; l – длина канала; $d_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр канала.

При ламинарном течении гелия в сечении регенератора (режим, при котором эквивалентный диаметр много меньше длины канала) $\xi = 64v / (v \cdot d_{\text{экв}})$, v – кинематическая вязкость газа [4]. Тогда $\Delta p = 32 \cdot v \cdot \rho \cdot v^2 \cdot l / d_{\text{экв}}^2$.

Таким образом, перепад давления вследствие сил трения прямо пропорционален средней скорости гелия в сечении регенератора и обратно пропорционален квадрату эквивалентного диаметра $\Delta p \sim v / d_{\text{экв}}^2$. А поскольку объемный расход проходящего газа: $G = v \cdot S$, где S – площадь поперечного сечения канала ($S \sim d_{\text{экв}}^2$), то в итоге перепад давления по длине регенератора меняется достаточно ощутимо с изменением эквивалентного диаметра (пропорционально 4-й степени).

Наиболее распространена насадка регенератора из проволочных сеток, она позволяет в значительной степени упростить технологию изготовления регенератора и повысить его эффективность за счет равномерного распределения металла по объему аппарата. Сетка изготавливается из мягкой отожженной проволоки диаметром 30 мкм.

Оптимальная компоновка регенератора МКС данного типа – размещение внутри вытеснителя. Такой вариант конструктивного решения используется в разрабатываемой МКС, это позволяет

One of the main features of this MCS is the availability of built-in heat exchangers in the working volume of the system. This explains the complex nature of the processes in the cycle, makes it difficult to assess the impact of changes in each parameter and design factor on the cooling capacity and efficiency of the system, since these changes affect not only the processes in a particular element of the system, but also the entire working cycle.

The main reason for the decrease in the efficiency of the MCS is the regenerator losses. Depending on the level of cryostatting, the system's size and type, the losses can be from 30 to 90% of the available cooling capacity. This is explained by the specifics of the operation of the embedded regenerators, since the gas cavities of the regenerator are included in the MCS's working volume. They constitute about 70% of the total "dead" volume of the system, i. e. they are one of the main reasons for reducing the specific cooling capacity, and, therefore, the efficiency of the MCS. As a consequence, a strict limitation on the size of the regenerator occurs [1].

The design peculiarity of the MCS regenerators is mainly determined by the large specific surfaces of the regenerator nozzles (from 10^4 to $5 \cdot 10^4$ м²/м³) as well as the small transverse dimensions of the heat transfer elements and the small hydraulic diameter of the regenerator channels (from 0.1 mm or less), so that it is highly effective filtering material. Built-in regenerators are sensitive to the degree of purity of the working fluid. Hardening impurities, gassing and wear products, while precipitating in the "cold" sections of the regenerator, dramatically increase the hydraulic resistance and, therefore, reduce the cooling capacity of the MCS. In the flow section of the regenerator, the laminar gas flow is characterized by a pressure drop caused by friction forces and, according to the Darcy-Weisbach equation, is equal to:

$$\Delta p = (\xi \cdot \rho \cdot v^2 \cdot l) / 2 \cdot d_{\text{экв}},$$

where ξ is the coefficient of resistance to friction forces; ρ is the specific gravity of the gas; v is the average gas velocity in the gap; l is the channel length; $d_{\text{экв}}$ – equivalent channel diameter.

In the case of helium laminar flow in the regenerator section (the mode when the equivalent diameter is much less than the channel length) $\xi = 64v / (v \cdot d_{\text{экв}})$, v is the kinematic viscosity of the gas [4]. Then $\Delta p = 32 \cdot v \cdot \rho \cdot v^2 \cdot l / d_{\text{экв}}^2$.

Thus, the pressure drop due to friction forces is directly proportional to the average velocity of helium

уменьшить поперечные размеры низкотемпературной части. Поскольку для увеличения срока службы системы уменьшено число циклов, уменьшены ходы поршня и вытеснителя, то это дает возможность несколько увеличить их диаметр и получить рациональные размеры регенератора [2].

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ МКС

Особенности эксплуатации МКС определяют жесткие требования к виброактивности. Допустимые колебания холодного цилиндра системы в различных плоскостях не должны превышать 10–20 мкм. Это требование обеспечивается выбором размеров механизма и уравниванием возникающих сил инерции и моментов вращающихся масс. Правильный выбор кинематических соотношений механизма движения способствует улучшению габаритных и ресурсных характеристик систем. В данной системе вопросы уравнивания играют важную роль, поскольку она конструктивно реализует интегральный цикл Стирлинга, не имеющий гибких развязок [5].

МКС включает в себя двухрядный кривошипно-шатунный механизм, который обеспечивает привод компрессорного поршня и вытеснителя, причем давление над и под вытеснителем практически одинаково и отличается только влиянием гидравлического сопротивления регенератора. Угловое расположение поршней («гамма»-схема) обеспечивает максимальную эффективность цикла, т.к. в таком исполнении реализуется оптимальный фазовый сдвиг перемещения поршней [6].

Весьма важным моментом, необходимым для нормальной работы МКС, является чистота газо-

in the regenerator section and inversely proportional to the squared equivalent diameter $\Delta p \sim v/d_{\text{экв}}^2$. And since the volume flow rate of the passing gas: $G = v \cdot S$, where S is the cross-sectional area of the channel ($S \sim d_{\text{экв}}^2$), then the resulting pressure drop along the regenerator varies quite noticeably with the change equivalent diameter (proportional to the power of 4).

The wire-meshed nozzle of the regenerator is the most common one, it allows you to greatly simplify the manufacturing technology of the regenerator and increase its efficiency due to the uniform distribution of metal throughout the apparatus. The mesh is made of soft annealed wire with a diameter of 30 microns.

The optimal layout of the regenerator of the MCS of this type is to be accommodated inside the displacer. This constructive solution is used in the developed MCS, it allows to reduce the lateral dimensions of the low-temperature part. Since in order to increase the operational life of the system, the number of cycles is reduced, the travels of the piston and displacer are reduced, all this makes it possible to slightly increase their diameter and obtain efficient regenerator sizes [2].

ENSURING SUSTAINABLE OPERATION OF THE MCS

The features of the operation of the MCS define stringent requirements for vibratory activity. Permissible vibrations of the cold cylinder of the system in different planes should not exceed 10–20 μm . This requirement is met by the choice of the size of the mechanism and the balancing of the inertia forces that arise and the moments of the rotating masses. The correct choice of the



вых полостей, обеспечивающая работоспособность системы в течение всего срока службы без дозаправки и замены криоагента.

Все детали системы содержат растворенные в их глубине или адсорбированные на поверхности газы. Эти газы следует предварительно удалить, так как они будут выделяться в рабочий объем системы, загрязняя ее газовую полость, высаживаясь в регенераторе, уменьшая тем самым холодопроизводительность МКС, а также долговечность и надежность работы системы [7].

Обеспечение требуемых надежности и долговечности работы МКС предъявляет особые требования к кондиции криоагента. Проведенные работы показали, что наиболее полно соответствует требуемым нормам газообразный гелий высокой чистоты с объемной долей 99,9999% по гелию.

ОСОБЕННОСТИ ИНТЕГРАЦИИ МКС

Полностью собранная и заполненная гелием МКС поступает на интеграцию с МФПУ. Учитывая специфику узла сопряжения МКС с ФПМ, процесс интеграции достаточно сложен и представляет собой ответственный комплекс технологических операций, поскольку в его процессе нарушается герметичность МКС, газовые полости вступают в контакт с окружающим воздухом, устанавливаются новые статические уплотняющие элементы в место стыковки МКС с ФПМ, проверяются допуски формы и размеров рабочей пары гильза-вытеснитель. В связи с этим технология интеграции МКС с ФПМ требует более тщательного контроля, повышенных требований к чистоте помещения и проведению операций по вакуумированию внутренней полости МКС и заправке гелием с последующей проверкой герметичности системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Суслов А. Д. и др.** Криогенные газовые системы. М.: Машиностроение, 1982. *Suslov A. D. i dr. Kriogenne gazovye sistemy. M.: Mashinostroenie, 1982.*
2. **Штейн Л. Л.** Вопросы криогенной техники. М.: Цинтихимнефтомаш, 1968. *SHtejn L. L. Voprosy kriogennoj tekhniki. M.: Cintihimneftomash, 1968.*
3. **Грезин А. К., Зиновьев В. С.** Микрокриогенная техника. М.: Машиностроение, 1977. *Grezin A. K., Zinov'ev V. S. Mikrocriogennaya tekhnika. M.: Mashinostroenie, 1977.*
4. **Малков М. П.** Справочник по физико-техническим основам криогеники. М.: Энергоиздат, 1985. *Malkov M. P. Spravochnik po fiziko-tekhnicheskim osnovam kriogeniki. M.: Energoizdat, 1985.*
5. **Пластинин П. И.** Поршневые компрессоры. М.: Колос, 2000. *Plastinin P. I. Porshnevye kompressory. M.: Kolos, 2000.*
6. **Грезин А. К.** Криогенное и холодильное оборудование и технологии, в 2-х частях. Омск: АО «Сибкриотехника», 1997. *Grezin A. K. Kriogennoe i holodil'noe oborudovanie i tekhnologii, v 2-h chastyah. Omsk: AO "Sibkriotekhnika", 1997.*
7. **Титушина В. П., Валыгина К. В.** Расчет вакуумных систем. М.: МЭИ, 1975. *Titushina V. P., Valygina K. V. Raschet vakuumnyh sistem. M.: MEI, 1975.*

kinematic relations of the movement mechanism contributes to the improvement of the overall and resource characteristics of the systems. In this system, the balancing issues play an important role, since it constructively implements the Stirling integral cycle, which does not have flexible junctions [5].

The MCS includes a two-row crank mechanism that drives the compressor piston and the displacer, and the pressure above and below the displacer is almost the same and differs only in the influence of the hydraulic resistance of the regenerator. The angular arrangement of the pistons ("gamma" scheme) ensures maximum cycle efficiency, since in this design, the optimum phase shift of the piston movement is implemented [6].

A very important issue, necessary for the normal operation of the MCS, is the purity of the gas cavities, which ensures the system's operation during the entire operational life without refueling and replacing the cryoagent.

All parts of the system contain gases dissolved in their depth or adsorbed on the surface. These gases should be removed in advance, since they will be released into the working volume of the system, contaminate its gas cavity, precipitate in the regenerator, thereby reducing the cooling capacity of the MCS, as well as the durability and reliability of the system [7].

Ensuring the required reliability and durability of the MCS is especially demanding towards the condition of the cryoagent. The works carried out showed that the highest purity helium gas with a volume fraction of 99.9999% for helium most fully meets the required standards.

FEATURES OF THE MCS INTEGRATION

Fully assembled and filled with helium, the MCS enters the integration with MPRD. Considering the specifics of the MCS interface unit with PRM, the integration process is rather complicated and is a responsible set of technological operations, since the MCS tightness is violated due to its implementation, the gas cavities come in contact with the surrounding air, new static sealing elements are installed at the MCS docking site with PRM, tolerances of the shape and size of the working pair of a sleeve-displacer are checked. In this regard, the process of integrating the MCS with PRM requires more careful monitoring, increased demands on the room cleanliness and conducting operations on evacuating the internal cavity of the MCS and filling it with helium, followed by checking the tightness of the system.