

УДК 621/37/39:621.59

Бортовые криогенные системы охлаждения оптико-электронных приборов перспективных изделий

В. И. Карагузов, В. И. Ляпин, А. В. Громов
ООО НТК "Криогенная техника", г. Омск, Россия

В. М. Крошин, Е. К. Красночуб
ЦСКБ, г. Самара, Россия

При разработке бортовых криогенных систем охлаждения (БКСО) оптико-электронных приборов определяющее значение имеет ряд специфических требований. Для БКСО перспективных изделий, таких как 14Ф20М и "Кристалл-ВИД" характерными являются наличие нескольких объектов, охлаждаемых на разных температурных уровнях, значительные их габаритные размеры, длительный ресурс работы БКСО, жесткие ограничения по ряду других параметров. Эти требования в значительной степени определяют схемные и конструктивные решения БКСО и в наибольшей степени могут быть удовлетворены в комбинированных схемах с промежуточным теплоносителем, редкоземельными рабочими телами и теплоемкими насадками.

Применение БКСО в аэрокосмической технике позволяет значительно улучшить ее тактико-технические характеристики, а в целом ряде случаев без БКСО вообще невозможно выполнение поставленных задач.

Успехи космических программ по исследованию процессов в земной сфере и космическом пространстве, а также программ оборонного и двойного назначения в значительной степени определяются достижениями криогенной и холодильной техники и, в частности, той ее области, в которой создаются системы для охлаждения оптико-электронных приборов. Это приборы инфракрасного, видимого, радиочастотного, гамма- и рентгеновского диапазо-

нов, которые служат для наблюдения и изучения атмосферы и земной поверхности, для изучения сверхслабых магнитных полей, астрономии, для фундаментальных научных исследований, для систем наблюдения, обнаружения и наведения.

К БКСО аэрокосмического комплекса предъявляются специфические требования, значительно отличающиеся от требований к БКСО другого назначения. К таким требованиям относятся более длительный ресурс работы, высокая надежность, малое энергопотребление, связанное с автономностью, высокий КПД, лимитированный отвод теплоты от БКСО, малые масса и габаритные размеры, низкие значения вибраций и шума, малые значения вращательных моментов, специфические требования по энергопитанию и ряд других.

Элементами приборов, требующих охлаждения, являются детекторы излучения, дефлекторы, оптические элементы, экраны, электронные и коммутирующие схемы, а в некоторых случаях и целые приборы.

Тенденции последних лет показывают, что к орбитальным космическим аппаратам (КА) стали предъявляться повышенные требования по времени активного существования (до 5—10 лет) и по насыщенности оптико-электронной аппаратурой, что накладывает серьезные ограничения на ее энергопотребление и массогабаритные характеристики.

В ряде случаев существующие БКСО не удовлетворяют как по отдельным требованиям, так и по всему комплексу требований. Эти системы имеют недостаточную термодинамическую эффективность и, как следствие, высокое энергопотребление.

Температурный уровень, холодопроизводительность, ресурс, надежность, энергопотребление, КПД, габаритные размеры и масса — это основные параметры, по которым осуществляется выбор БКСО. Численные значения этих параметров выбираются исходя как из требований приборов, так и возможностей аэрокосмической техники. Практически во всех космических и ракетных применениях требования по габаритным размерам, массе и энергопотреблению должны быть минимальными. В ряде случаев, кроме требований по мощности, лимитируется и суточное энергопотребление.

Требования, предъявляемые к БКСО орбитальных КА, отличаются в зависимости от времени активного существования КА. Так, ресурс БКСО малогабаритных КА (МКА) составляет 2—10 тыс. ч, в то время как в системах наблюдения и раннего оповещения средних и крупных КА требования к ресурсу — от 30 до 100 тыс. ч.

Другие требования к БКСО обусловлены особенностями запуска и посадки КА. Конструкции БКСО должны быть устойчивыми к механическим, в том числе и ударным нагрузкам, исключать возможность механического резонанса с конструкцией КА, исключать или сводить к минимуму вращательные моменты, а также быть устойчивыми к внешним воздействиям.

Кроме того, к БКСО КА предъявляются специфические требования, связанные с функционированием на орбите: требования по флуктуациям и перерывам энергопотребления, разным режимам работы на теневой и световой сторонах, отводу теплоты от БКСО, пожаровзрывобезопасности, минимизации вибраций и вращательных моментов, а также ряд других. К БКСО орбитальных КА предъявляются жесткие требования не только по массе и габаритным размерам, но и по их размещению внутри аппарата.

Различные БКСО имеют свои оптимальные температурные диапазоны, поэтому достаточно часто используются комбинированные БКСО, в которых строится каскад из ступеней, работающих по различным термодинамическим циклам. Наиболее перспективными для аэрокосмических применений явля-

ются комбинированные БКСО с магнитокалорическими (МК) и термомеханическими ступенями. Это связано со специфическими требованиями к БКСО орбитальных КА, таким как компоновка, размещение, работа в вакууме и другим. В результате приходится применять комбинированные БКСО даже в тех случаях, когда в них используется один охладитель.

При разработке БКСО аэрокосмического назначения, исходя из условий функционирования, тактико-технических характеристик КА и поставленных задач, определяются технические требования к БКСО, условия их стыковки с фотоприемными устройствами (ФПУ), системами обеспечения теплового режима (СОТР), системами электропитания, подвода и отвода теплоты. По итогам анализа всего комплекса требований разрабатываются несколько схемотехнических решений с учетом компоновки БКСО и размещения ее на борту КА.

Применение редкоземельных материалов (РЗМ) в МК-ступенях и в насадках регенераторов в термомеханических регенеративных БКСО позволяет значительно улучшить их характеристики: понизить температуру криостатирования и энергопотребление, повысить холодопроизводительность и КПД. Улучшение этих параметров в конечном счете приводит к уменьшению массы БКСО и систем обеспечения, что особенно важно для бортовых исполнений БКСО.

Успешная работа по созданию БКСО для аэрокосмических применений в значительной мере зависит от правильного анализа существующих схем и, как следствие, от правильного их выбора.

Вариант исполнения КА, таких как 14Ф20М и “Кристалл-ВИД”, требующих охлаждения бленды и корпуса ФПУ, показан на рис. 1. Отличительная особенность этой схемы — использование одного нагнетателя в трех циркуляционных контурах, охлаждающих нагрузки на разных температурных уровнях.

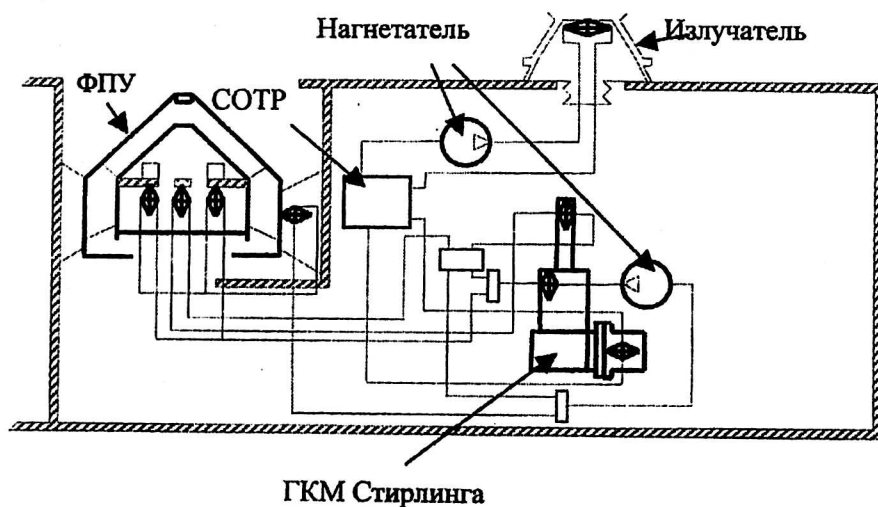


Рис. 1. Комбинированная БКСО с двухступенчатой ГКМ Стирлинга и циркуляционным контуром

Для вариантов исполнения КА с длительным временем активного существования (5—15 лет) и сильно лимитированным энергопотреблением оптимальным решением является схема, показанная на рис. 2.

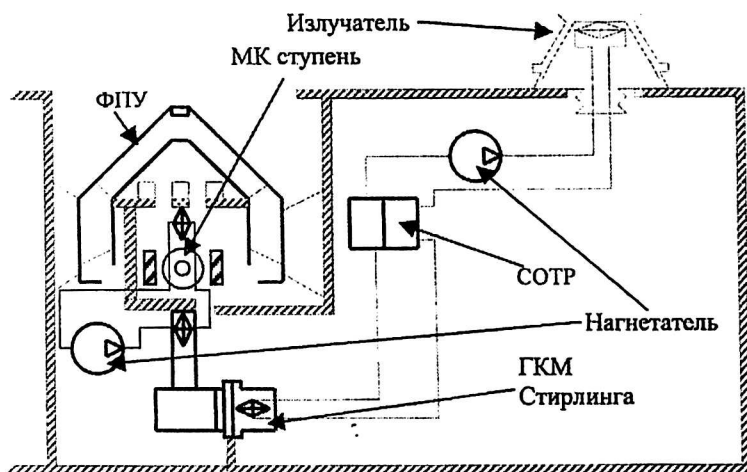


Рис. 2. Комбинированная БКСО с ГKM Стирлинга, МК-ступенью и циркуляционными контурами

В этом случае используется одноступенчатый термомеханический охладитель на базе ГKM Стирлинга или пульсационной трубы, который через холодопроводы охлаждает коммутаторы и бленду. Для охлаждения линейки фотоэлементов используется МК-ступень охлаждения на температурный уровень 20—30 К с отводом теплоты на термомеханический охладитель на азотном температурном уровне. Отвод теплоты от термомеханической ступени производится через СОТР на пассивный излучатель.

При работе КА на солнечной стороне энергетически выгодно использовать комбинированную БКСО на базе ГKM Вюлемье с использованием тепла солнечной энергии от солнечного концентратора. ГKM Вюлемье работает на тепловой энергии, получаемой от солнечного концентратора и передаваемой через теплопровод. В этом случае электроэнергия расходуется только на привод вытеснителей.

Применение в БКСО в качестве первой ступени ГKM Вюлемье, а в качестве второй — магнитокалорического охладителя позволяет получить минимальное энергопотребление, в особенности на солнечной стороне. На рис. 3 приведен вариант исполнения такой комбинированной БКСО. Холод от ГKM Вюлемье и МК-ступени передается к объектам охлаждения циркуляционными контурами.

При работе КА на теневой стороне резко ограничивается энергопотребление БКСО как электрической, так и тепловой энергии. Для вариантов исполнения КА, работающих на теневой стороне, оптимальной является схема, приведенная на рис. 4.

Для того чтобы обеспечить работоспособность БКСО с ГKM Вюлемье на теневой стороне предусмотрен высокотемпературный тепловой аккумулятор, который запасает теплоту на солнечной стороне, и криогенный аккумулятор, который запасает холод при работе бортовой системы электропитания на полной мощности. В результате БКСО может охлаждать объекты даже при сильно ограниченном энергопотреблении на теневой стороне.

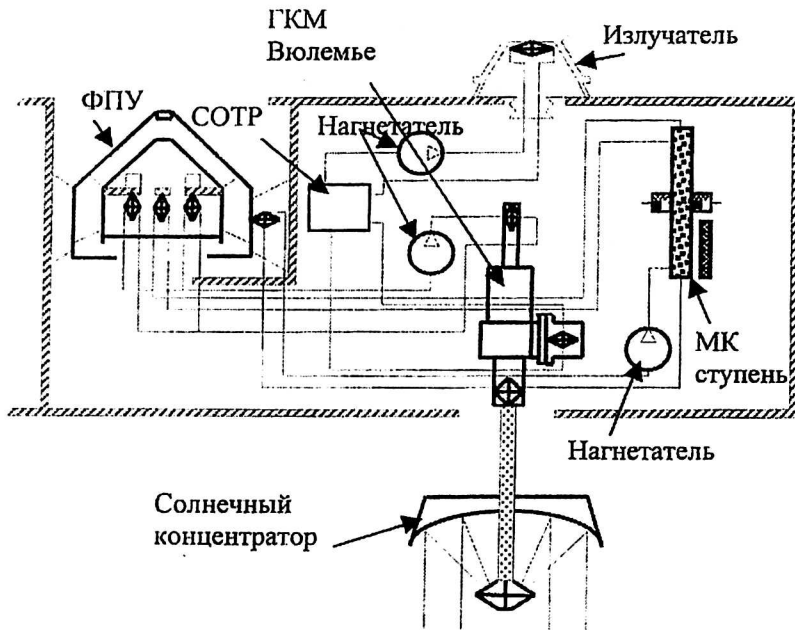


Рис. 3. Вариант исполнения комбинированной БКСО с ГКМ Воюлемье, МК-ступенью и циркуляционными контурами

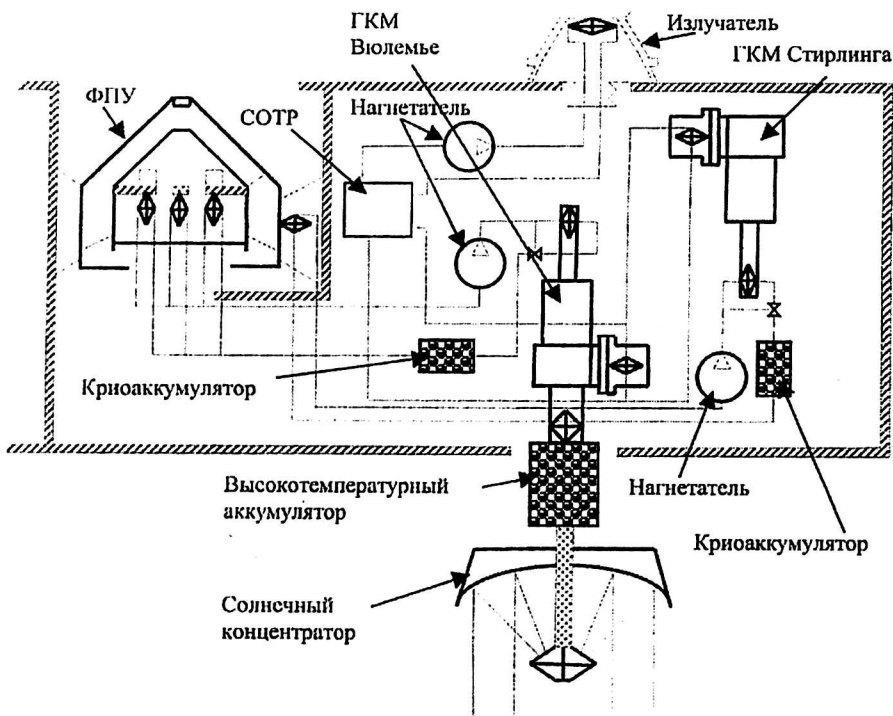


Рис. 4. БКСО на базе ГКМ Стирлинга, ГКМ Воюлемье с использованием тепла солнечного излучения и тепловыми аккумуляторами

Требования к размерам малогабаритных КА диктуют условия применения упрощенных схемных и конструктивных решений на базе одноступенчатой ГКМ Стирлинга, которая охлаждает одновременно три объекта. Тепловая развязка между линейкой фотоэлементов, коммутаторами, блендой и ГКМ Стирлинга, а также подвод холода осуществляются через холодопроводы.

Такое решение осуществимо только при возможности размещения ГКМ Стирлинга вблизи ФПУ. В противном случае выбирается вариант исполнения МКА, в котором холод от ГКМ Стирлинга последовательно подводится ко всем объектам охлаждения с помощью одного циркуляционного контура.

В ряде случаев для циркуляционных контуров БКСО и роторных МК-ступеней могут быть использованы не только механические, но и электростатические, электромагнитные перистальтические, реверсивные электростатические мембранные нагнетатели с длительным ресурсом работы и малым энергопотреблением.

В связи с изложенным можно сделать вывод, что использование комбинированных БКСО с РЗМ может быть рациональным в большинстве областей, где требуется охлаждение, при условии правильного выбора схем и конструктивных решений таких БКСО, а также подбора оптимальных рабочих тел и теплоемких насадок.

On-board cryogenic refrigeration systems for optoelectronic devices of the future articles

V. I. Karagusov, V. I. Lyapin, A. V. Gromov
NTK "Kriogennaya Tekhnika Ltd.", Omsk, Russia

V. M. Kroshin, E. K. Krasnochub
TsSKB, Samara, Russia

When developing the on-board cryogenic refrigeration systems (OCRSs) of the optoelectronic devices, it is necessary to bear in mind a number of specific requirements being a matter of principle. As for OCRSs of the future articles, such as 14Φ20M and "Crystal-VID", the most specific features being the presence of several objects cooled at different temperature levels; their considerable dimensions; long OCRSs service life; severe limitations applying to a number of other parameters. These requirements specify to a considerable degree the design and circuit of OCRSs and most fully are realized in the combined circuits with intermediate heat-transfer agents, rare-earth working bodies and heat-capacious packings.