

Результаты разработки ряда модульных МКС Сплит-Стирлинг для криостатирования ФПУ 1 и 2 поколений

М.В. Липин, А.В. Громов

ООО «НТК «Криогенная техника», Омск, Россия

На протяжении почти 50-и лет наша компания является разработчиком и изготовителем микрокриогенных систем (МКС) Стирлинга и Сплит – Стирлинга с высокими показателями надежности. В основном эти изделия предназначены для криостатирования фотоприемных устройств (ФПУ), используемых в военной и космической технике.

В конце прошлого века для криостатирования ФПУ искусственных спутников Земли серий «Ресурс – О», «Изумруд – М», «Метеор – 3» и межпланетного аппарата «Фобос» были разработаны МКС Стирлинга с ресурсом от 2-х до 5-и тысяч часов, позволившие организовать постоянное наблюдение за определенными участками земной поверхности, а также расширить научные представления о развитии Солнечной системы [1, 2].

В рамках Федеральной комплексно – целевой программы развития систем тепловидения и приборов ночного видения нашим предприятием разработаны базовые конструкции 3-х классов микрокриогенных систем Сплит-Стирлинг с линейным приводом, предназначенных для криостатирования многоэлементных фотоприемников (ФП) перспективных модульных тепловизионных приборов (ТВП) наблюдения и прицеливания нового поколения для всех родов войск. ОКР выполнялась по заданию Минобороны России и имела шифр «Оператор-Ф».

МКС обеспечивают среднюю наработку на отказ 10000 часов, что является достаточным для обеспечения заданных показателей надежности большинства известных отечественных ФПУ.

МКС состоят из газовой криогенной машины (ГКМ), являющейся источником холода, и блока управления (БУ), управляющего работой линейного электропривода машины.

Внешний вид разработанных ГКМ показан на рисунке 1.

Доклад на XIX Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 23-26 мая 2006 г., Москва.

Опубликован в журнале «Прикладная физика», №2, 2007 г., с. 110-119.



Рис. 1. ГКМ базовых МКС 1, 2 и 3 классов

ГКМ работает по обратному циклу Стирлинга с использованием постоянного количества криоагента (гелия) и состоит из компрессора и охладителя, соединенных трубопроводом, позволяющим изменять ориентацию охладителя относительно компрессора, снизить вибро- и электромагнитные воздействия от компрессора на ФПУ. Компрессор имеет два линейных электродвигателя (ЛД), каждый из которых состоит из статора с двумя катушками и якоря с двумя рядами постоянных магнитов. Якоря двигателей соединены с поршнями, и осуществляют синхронное оппозитное перемещение в цилиндре, что позволяет полностью уравновесить компрессор.

Особенностью конструкции является то, что движение якорей постоянно корректируется блоком управления по сигналам установленных в компрессоре датчиков положения.

БУ выполняет следующие функции:

- управляет амплитудой перемещения поршней в зависимости от температуры криостатирования и температуры окружающей среды;
- центрирует якоря (поршни) компрессора относительно середины статора для обеспечения максимальных перемещений поршней при выходе на режим;
- поддерживает заданный уровень суммарного перемещения поршней независимо от среднего давления газа в компрессоре;
- выравнивает амплитуду перемещения поршней с целью минимизации уровня вибраций в процессе работы;
- компенсирует возмущения (удары, вибрации, линейные ускорения), действующие на корпус работающей ГКМ, для обеспечения безударной работы поршней;
- обеспечивает противофазное (оппозитное) движение поршней;

- обеспечивает защиту линейных двигателей от превышения тока.

Поддержание температуры криостатирования осуществляется по сигналу датчика температуры, установленного в фотоприемнике.

Важнейшие характеристики разработанных МКС (в наиболее жестких условиях эксплуатации) приведены в таблице 1.

Характеристики разработанных МКС 1, 2 и 3 классов полностью соответствуют требованиям недавно появившегося государственного стандарта на унифицированные узлы (модули) первого поколения и, в сопоставимых условиях, находятся на уровне современных зарубежных аналогов. МКС обеспечивают работоспособность в диапазоне температур от минус 50°С до плюс 50°С, подтвердили заданные характеристики надежности, имеют прогрессивные схемные решения, изготавливаются только из отечественных материалов и комплектующих.

Технические характеристики МКС 1, 2 и 3 классов

Таблица 1

| Технические характеристики | Модули МКС | | |
|--|--------------------|--------------------|---------|
| | 1 класс | 2 класс | 3 класс |
| Диаметр / длина колодца ФП, мм | 9/72,5 | 6/71 | 6/71 |
| Максимальная тепловая нагрузка от ФП при температуре (80±2)К, Вт | 1,3 | 0,6 | 0,4 |
| Приведенная к температуре криостатирования суммарная охлаждаемая масса ФП, г, не более | 10 | 5 | 4 |
| Время выхода на рабочий режим, мин, не более | 7 | 5 | 6 |
| Потребляемая мощность, Вт, не более | | | |
| - в пусковом режиме | 150 | 85 | 55 |
| - в рабочем режиме | 100 | 45 | 30 |
| Питание от сети постоянного тока, В | 27,5 ⁺² | 27,5 ⁺² | 12,2 |
| Температура окружающей среды, °С | от -50 до +50 | | |
| Средняя наработка на отказ, час | 10000 | 10000 | 10000 |
| Масса, кг, не более | 5 | 3 | 2,3 |

МКС позволяют криостатировать фоточувствительные элементы (ФЧЭ) фотоприемных устройств различного типа на температурном уровне (80 ± 2) К при тепловой нагрузке на МКС от 0,3 до 2,0 Вт. МКС 1 класса предназначены для работы с тепловыми нагрузками от 0,8 до 2,0 Вт, МКС 2 класса – от 0,4 до 0,8 Вт, МКС 3 класса – от 0,3 до 0,5 Вт. Энергопотребление в рабочем режиме при температуре окружающей среды плюс 50°С составляет от 100 до 30 Вт соответственно.

Соответствие МКС заданным требованиям подтверждено результатами предварительных и государственных испытаний.

В сентябре 2005г. ОКР «Оператор-Ф» принята Государственной комиссией.

Разработанные в ОКР «Оператор-Ф» базовые конструкции позволили в короткий срок создать несколько модификаций МКС, учитывающих особенности применения в конкретных образцах военной техники, и присвоить РКД на них литеры «О» и «О₁».

Внешний вид модификации МКС 1 класса МСМГ-5А-1,7/80 КВО.0729.000-02, примененной в тепловизионной аппаратуре вертолетов МИ-24ПН приведен на рисунке 2.



Рис.2. МКС МСМГ-5А-1,7/80 КВО.0729.000-02

Внешний вид модификации МКС 2 класса МСМГ-3А-0,6/80 КВО.0730.000-01, примененной в тепловизионной аппаратуре морской техники, приведен на рисунке 3.

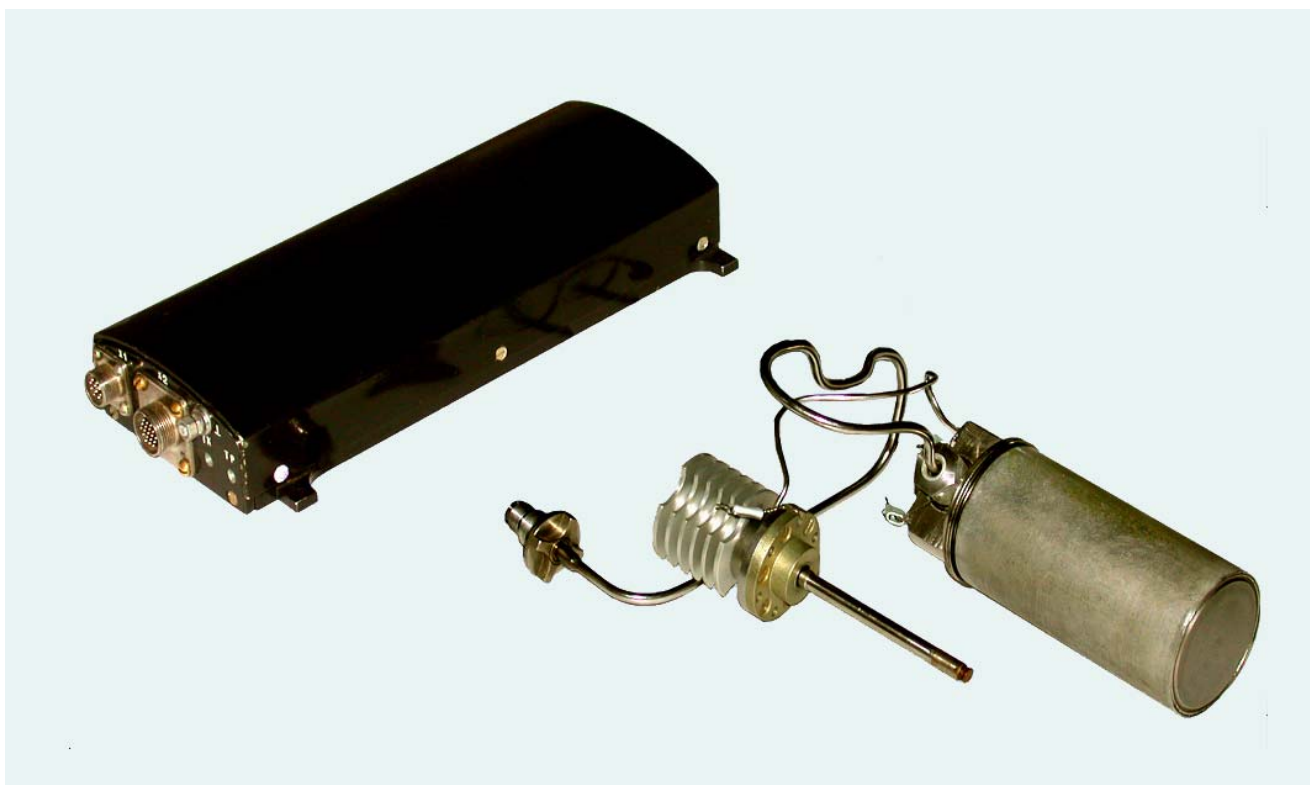


Рис. 3. МКС МСМГ-3А-0,6/80 КВО.0730.000-01

В таблицах 2 и 3 приведены результаты, полученные в процессе приемосдаточных испытаний изготовленных партий опытных образцов МКС МСМГ-5А-1,7/80 КВО.0729.000-02 (1-го класса) и МСМГ-3А-0,6/80 КВО.0730.000-01 (2-го класса).

Результаты испытаний МКС МСМГ-5А-1,7/80 КВО.0729.000-02 Таблица 2

| | Наименование параметра | | | |
|-------------------------|----------------------------|--------------|-------------------------------|---------------------|
| | Время достижения т-ры, мин | | Потребляемая мощность МКС, Вт | |
| | 100 К | 80 К | пусковой режим | рабочий режим |
| Требования по ТЗ | не более 7 | – | не более 150 | не более 100 |
| Т-ра окр. среды | +50 °С | | | |
| зав. № 044354 | 5'30" | 7'07" | 145,8 | 74,3 |
| зав. № 044330 | 5'49" | 7'33" | 132,3 | 74,3 |
| зав. № 044355 | 5'33" | 7'11" | 129,6 | 70,2 |
| зав. № 044356 | 5'03" | 6'25" | 148,5 | 63,4 |
| зав. № 054054 | 4'25" | 5'43" | 148,2 | 69,7 |
| зав. № 044357 | 5'08" | 6'40" | 149,9 | 67,5 |
| зав. № 044358 | 5'27" | 7'17" | 147,2 | 78,3 |
| Среднее значение | 5'16" | 6'51" | 143,1 | 71,1 |
| Т-ра окр. среды | н.к.у. | | | |
| зав. № 044354 | 5'32" | 7'20" | 118,8 | 68,9 |
| зав. № 044330 | 5'13" | 6'40" | 113,4 | 52,9 |
| зав. № 044355 | 5'34" | 7'07" | 118,8 | 64,2 |
| зав. № 044356 | 4'57" | 6'43" | 126,9 | 54,0 |
| зав. № 054054 | 3'31" | 4'33" | 133,5 | 58,1 |
| зав. № 044357 | 4'26" | 5'38" | 135,0 | 56,7 |
| зав. № 044358 | 4'45" | 6'03" | 126,9 | 62,1 |
| Среднее значение | 4'51" | 6'18" | 124,8 | 59,6 |
| Т-ра окр. среды | -50 °С | | | |
| зав. № 044354 | 3'35" | 4'40" | 94,5 | 27,0 |
| зав. № 044330 | 3'40" | 5'02" | 65,5 | 26,1 |
| зав. № 044355 | 4'01" | 5'25" | 64,3 | 31,3 |
| зав. № 044356 | 2'57" | 3'39" | 105,3 | 38,9 |
| зав. № 054054 | 2'09" | 2'49" | 88,3 | 22,4 |
| зав. № 044357 | 2'38" | 3'33" | 93,2 | 25,4 |
| зав. № 044358 | 3'00" | 4'10" | 83,7 | 29,4 |
| Среднее значение | 3'09" | 4'11" | 85,0 | 28,6 |

| | Наименование параметра | | | |
|-------------------------|----------------------------|--------------|-------------------------------|--------------------|
| | Время достижения т-ры, мин | | Потребляемая мощность МКС, Вт | |
| | 100 К | 80 К | пусковой режим | рабочий режим |
| Требования по ТЗ | не более 5 | - | не более 85 | не более 45 |
| Т-ра окр. среды | +50°C | | | |
| зав.№ 044309 | 3'20" | 4'00" | 78,46 | 24,81 |
| зав.№ 044310 | 3'27" | 4'12" | 69,91 | 24,11 |
| зав.№ 044365 | 3'33" | 4'09" | 83,4 | 26,79 |
| зав.№ 044516 | 3'18" | 3'54" | 70,09 | 21,57 |
| зав.№ 044544 | 3'32" | 4'08" | 81 | 29,16 |
| зав.№ 044574 | 4'27" | 5'26" | 49,16 | 25,64 |
| зав.№ 054039 | 4'25" | 5'24" | 51,58 | 26,3 |
| Среднее значение | 3'43" | 4'28" | 69,09 | 25,48 |
| Т-ра окр. среды | н.к.у. | | | |
| зав.№ 044309 | 3'03" | 3'36" | 72,2 | 20,82 |
| зав.№ 044310 | 3'02" | 3'39" | 63,02 | 18,72 |
| зав.№ 044365 | 3'06" | 3'39" | 75,54 | 21,73 |
| зав.№ 044516 | 3'01" | 3'33" | 55,06 | 18,08 |
| зав.№ 044544 | 3'03" | 3'32" | 76,95 | 24,03 |
| зав.№ 044574 | 3'38" | 4'20" | 42,8 | 15,51 |
| зав.№ 054039 | 3'48' | 4'26" | 48,06 | 20,7 |
| Среднее значение | 3'14" | 3'51" | 61,95 | 19,94 |
| Т-ра окр. среды | -50°C | | | |
| зав.№ 044309 | 2'40" | 3'18" | 42,22 | 14,28 |
| зав.№ 044310 | 3'15" | 4'12" | 34,15 | 13,31 |
| зав.№ 044365 | 2'33" | 3'03" | 41,59 | 12,06 |
| зав.№ 044516 | 2'35" | 3'03" | 36,19 | 8,11 |
| зав.№ 044544 | 2'36" | 3'05" | 38,6 | 10,8 |
| зав.№ 044574 | 3'13" | 3'56" | 25,09 | 8,36 |
| зав.№ 054039 | 3'10" | 3'52" | 30,55 | 9,2 |
| Среднее значение | 2'52" | 3'33" | 35,49 | 10,96 |

Типовые диаграммы, показывающие изменение потребляемой мощности и температуры криостатирования в начальный период работы МКС 1-го и 2-го классов приведены на рисунках 4 и 5.

Изменение потребляемой мощности и температуры криостатирования от времени работы для МКС МСМГ-5А-1,7/80 КВО.0729.000-02 зав. № 044356.

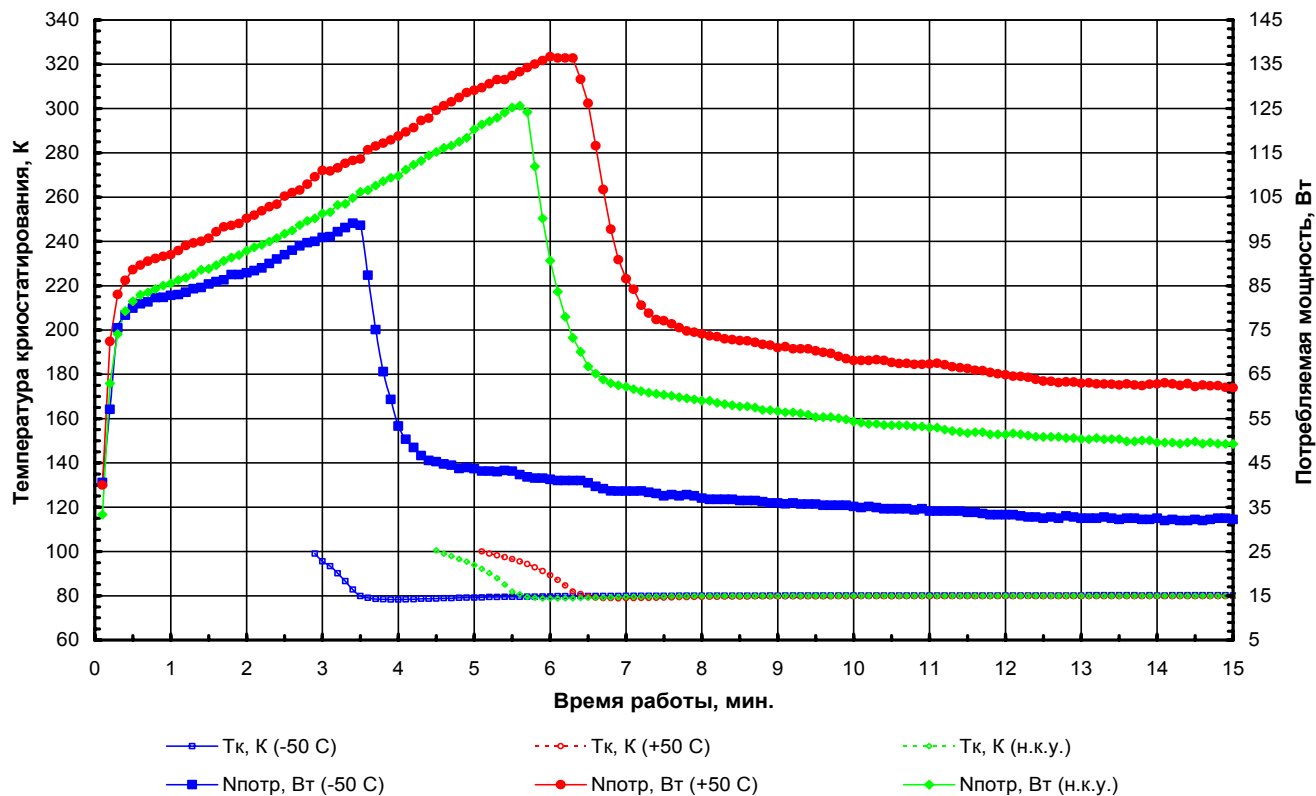


Рис. 4.

Изменение потребляемой мощности и температуры криостатирования от времени работы для МКС МСМГ-3А-0,6/80 КВО.0730.000-01 зав. № 044310

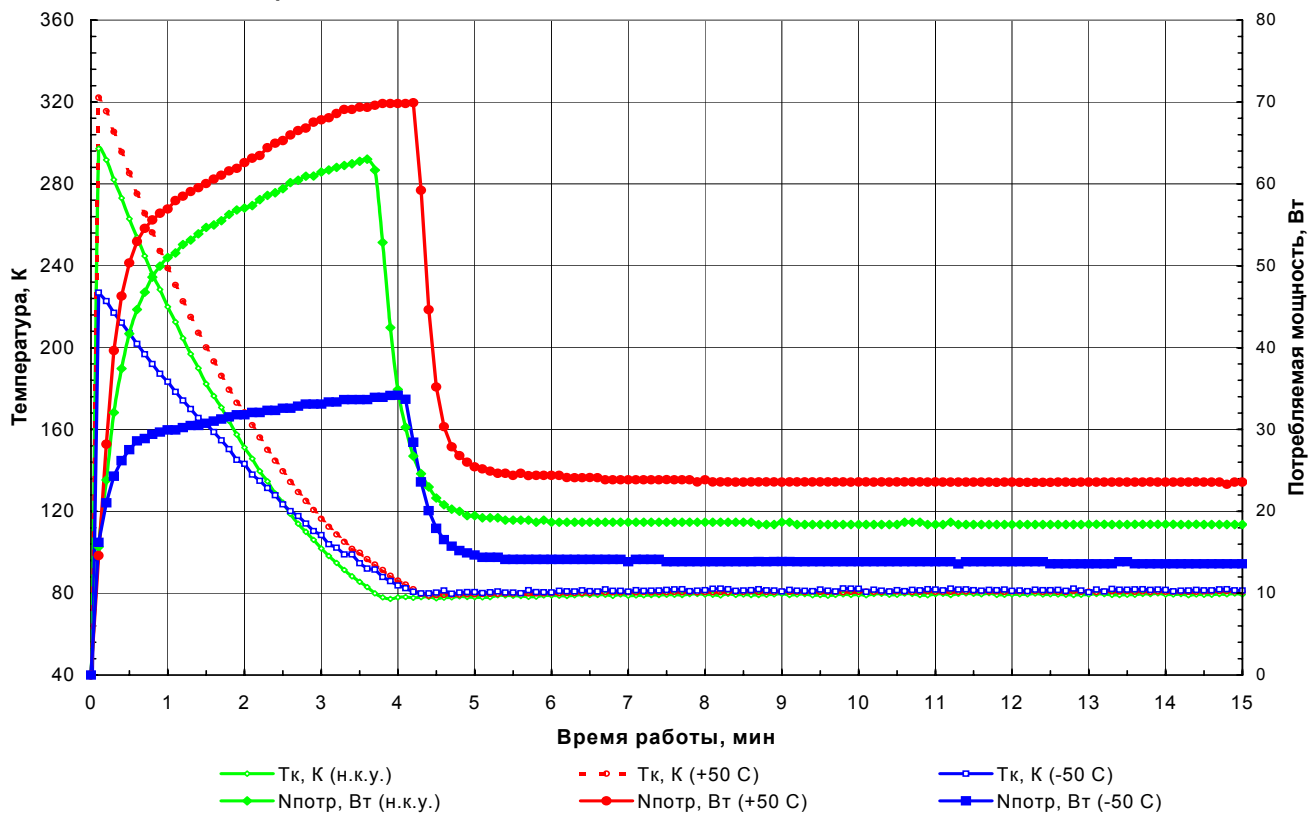


Рис.5

В рамках отдельной ОКР «Модуль-Авиа-МОФ» ООО «НТК «Криогенная техника» разработана МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000 для тепловизионных каналов (ТПВК) II-го поколения, имеющая улучшенные характеристики энергопотребления по сравнению с базовой МКС 2-го класса и предназначенная для работы в более широком диапазоне рабочих температур (от -60°C до $+65^{\circ}\text{C}$).

Внешний вид МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000 приведен на рисунке 6.



Рис. 6 МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000

Конструкция МКС аналогична базовым, но для обеспечения работоспособности в расширенном диапазоне рабочих температур пришлось ее несколько усложнить: в конструкцию компрессора ГКМ введен экран между статором и якорем ЛД, снижающий загрязнения рабочего газа.

Технические характеристики разработанной МКС приведены в таблице 4 (колонка 2).

Технические характеристики МКС для ФПУ 2-го поколения Таблица 4

| Технические характеристики | Модули МКС | | |
|--|---|---|---|
| | МСМГ-5А-1,3/80 | МСМГ-3В-1/80 | МСМГ-1А-0,3/80 |
| Диаметр / длина колодца ФП, мм | 9/72,5 | 6/71 | - |
| Максимальная тепловая нагрузка от ФП при температуре $(80_{-5})\text{K}$, Вт | 1,3 | 0,35 | 0,3 |
| Приведенная к температуре криостатирования суммарная охлаждаемая масса ФП, г, не более | 10 | 6 | 3,5 |
| Время выхода на рабочий режим, мин, не более | 7 | 8 | 5 |
| Потребляемая мощность, Вт, не более | | | |
| - в пусковом режиме | 120 | 60 | 30 |
| - в рабочем режиме | 70 | 35 | 12 |
| Питание от сети постоянного тока, В | 27_{-5}^{+2} | $27_{-3}^{+2,4}$ | 12_{-2} |
| Температура окружающей среды | От -50°C до $+55^{\circ}\text{C}$ | От -60°C до $+65^{\circ}\text{C}$ | От -40°C до $+50^{\circ}\text{C}$ |
| Средняя наработка на отказ, час | 10000 | 10000 | 10000 |
| Масса, кг, не более | 5 | 3 | 1,5 |

В настоящее время предварительные испытания МКС завершены, в том числе подтверждены показатели безотказности и долговечности МКС. На рисунке 7 показано изменение основных характеристик МКС: времени выхода на рабочий режим ($\tau_{\text{вых.}}$), потребляемой мощности в пусковом ($N_{\text{пуск.}}$) и рабочем ($N_{\text{реж.}}$) режимах при испытаниях по подтверждению назначенного ресурса 6000 часов. Видно, что изменение характеристик МКС за это время невелико, все характеристики по завершению испытаний находятся в пределах требований ТЗ.

**Изменение времени выхода на режим и потребляемой мощности МКС
МСМГ-3В-1,0/80 КВО.0733.000 зав. №211360 при испытании на долговечность.**

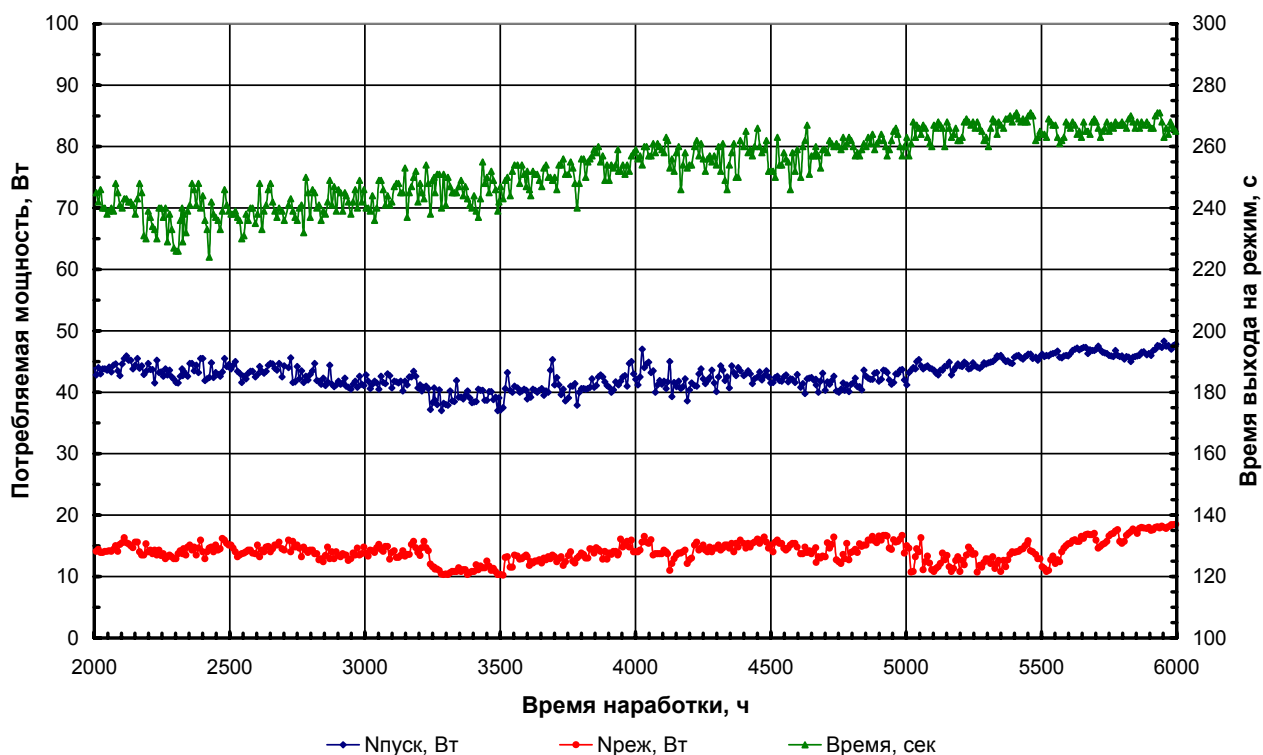


Рис. 7

В таблице 5 приведены результаты, полученные при проведении приемосдаточных испытаний изготовленной партии опытных образцов МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000.

| | Наименование параметра | | | |
|-------------------------|----------------------------|-------------------|-------------------------------|--------------------|
| | Время достижения т-ры, мин | | Потребляемая мощность МКС, Вт | |
| | 100 К | 80 К | пусковой режим | рабочий режим |
| Требование по ТЗ | – | не более 8 | не более 60 | не более 35 |
| Т-ра окр. среды | +65°С | | | |
| зав. № 313490 | 4'08" | 5'15" | 58,6 | 17,8 |
| зав. № 211370 | 4'19" | 5'10" | 59,4 | 16,0 |
| зав. № 212350 | 4'33" | 5'33" | 55,1 | 15,1 |
| зав. № 211360 | 4'01" | 5'01" | 59,4 | 15,4 |
| зав. № 044038 | 4'59" | 5'59" | 52,8 | 16,1 |
| зав. № 041322 | 3'58" | 4'43" | 58,8 | 14,0 |
| зав. № 041315 | 4'22" | 5'28" | 59,4 | 16,2 |
| зав. № 041318 | 4'33" | 5'49" | 56,7 | 18,4 |
| Среднее значение | 4'23" | 5'19" | 59,3 | 16,5 |
| Т-ра окр. среды | н.к.у. | | | |
| зав. № 313490 | 4'16" | 3'40" | 40,1 | 10,0 |
| зав. № 211370 | 4'08" | 5'00" | 39,4 | 11,3 |
| зав. № 212350 | 3'40" | 4'27" | 41,3 | 9,7 |
| зав. № 211360 | 3'17" | 3'56" | 43,2 | 9,7 |
| зав. № 044038 | 4'19" | 5'08" | 49,1 | 11,1 |
| зав. № 041322 | 3'45" | 4'22" | 35,6 | 9,7 |
| зав. № 041315 | 3'49" | 4'42" | 44,8 | 10,3 |
| зав. № 041318 | 4'01" | 5'12" | 41,6 | 12,2 |
| Среднее значение | 3'41" | 4'26" | 42,9 | 10,8 |
| Т-ра окр. среды | -60 °С | | | |
| зав. № 313490 | 3'00" | 4'05" | 32,4 | 6,8 |
| зав. № 211370 | 2'42" | 3'25" | 36,8 | 6,2 |
| зав. № 212350 | 4'09" | 5'08" | 27,5 | 6,7 |
| зав. № 211360 | 2'41" | 3'22" | 34,8 | 6,5 |
| зав. № 044038 | 3'36" | 4'34" | 24,4 | 5,9 |
| зав. № 041322 | 4'14" | 5'07" | 20,2 | 8,6 |
| зав. № 041315 | 2'35" | 3'22" | 44,0 | 7,3 |
| зав. № 041318 | 2'50" | 3'38" | 33,0 | 6,2 |
| Среднее значение | 3'38" | 4'31" | 28,8 | 7,2 |

Типовая диаграмма, показывающая изменение потребляемой мощности и температуры криостатирования в начальный период работы МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000 приведена на рис. 8.

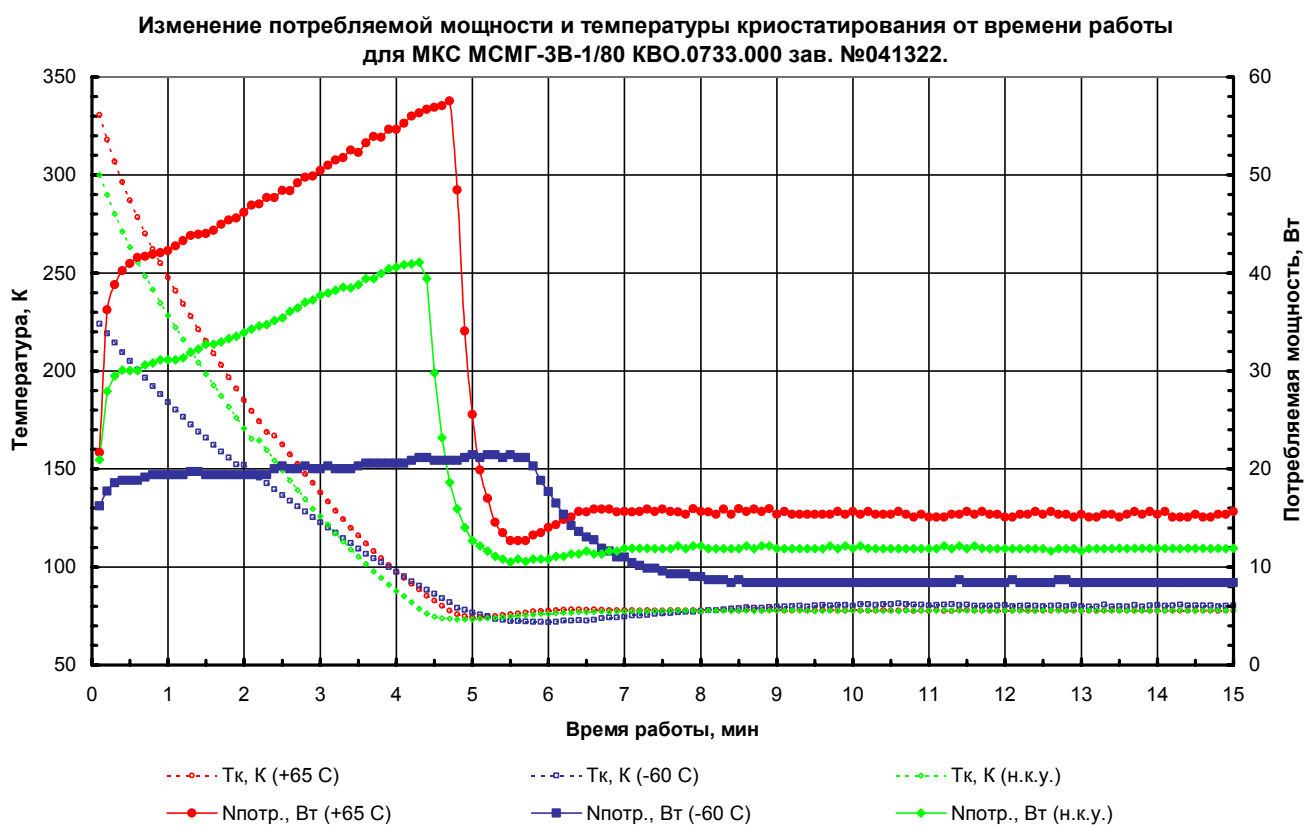


Рис.8

РКД на МКС присвоена литера «О», в настоящее время завершаются государственные испытания МКС в составе аппаратуры применения.

В течение 2001 – 2005 г.г. ООО «НТК «Криогенная техника» изготовлено и поставлено для использования в НИОКР, выполняемых по заказам Минобороны России, порядка 130 образцов модульных МКС с линейным приводом, разработанных в рамках ОКР «Оператор – Ф» и ОКР «Модуль – Авиа – МОФ» и их модификаций. Изготовление МКС производством освоено, ООО «НТК «Криогенная техника» готово их поставлять в любых необходимых количествах.

В настоящее время нашему предприятию Управлением по развитию базовых военных технологий и специальных проектов Минобороны России поручена еще одна работа – мы являемся соисполнителями ОКР «Запорожье – 16М», в рамках которой разрабатывается МКС Сплит - Стирлинга, имеющая минимальные энергопотребление, массу и габариты, соответствующие условиям применения в носимых тепловизионных приборах.

Технические требования, предъявляемые к разрабатываемой МКС МСМГ-1А-0,3/80 КВО.0736.000, приведены в табл. 4 (колонка 3). Требование по обеспечению средней наработки на отказ 10000 часов определяет необходимость применения в компрессоре МКС линейных двигателей.

Разрабатываемая МКС состоит из ГКМ и БУ.

Общий вид ГКМ показан на рисунке 9 в сравнении с ГКМ «Модуль – Авиа».

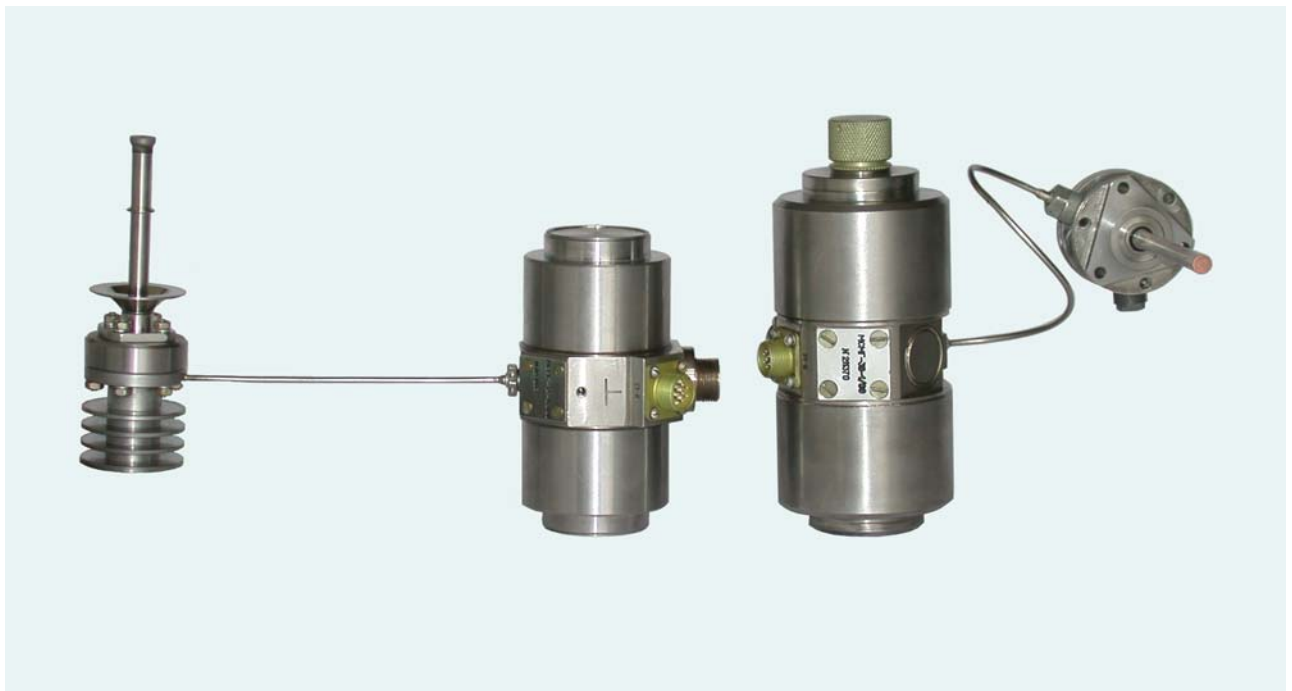


Рис.9 ГKM МКС МСМГ-1А-0,3/80 КВО.0736.000 в сравнении с ГKM «Модуль – Авиа».

Охладитель ГKM имеет общую с фотоприемником тонкостенную гильзу – держатель, с фланцем для приварки наружного корпуса ФП. Непосредственно на головку гильзы устанавливаются чувствительные элементы ФП (матрица на основе силицида платины). Благодаря такому техническому решению тепловая нагрузка на ГKM снижается, по сравнению с двустенной конструкцией, на величину 120 – 150 мВт. Внутренние размеры гильзы-держателя в процессе проектирования были ограничены, исходя из необходимости сохранить возможность работы ФП с дроссельными теплообменниками.

Компоновка компрессора повторяет уже опробованную в МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000. Объем разработанного компрессора значительно, почти на 40 % меньше, чем у МКС «Модуль-Авиа». Необходимость обеспечения времени выхода МКС на рабочий режим не более 5 минут потребовала обеспечения холодопроизводительности в пусковом режиме около 900 мВт, что не могло не сказаться на размерах двигателей ГKM. Масса ГKM составляет 1,15 кг.

Одним из основных требований к разрабатываемой МКС было уменьшение объема блока управления в два раза по сравнению с существующей базовой МКС 3-го класса. В процессе проектирования объем БУ удалось уменьшить с 720 см³ (120x100x60 мм) до 300 см³ (120x100x25 мм) за счет применения в блоке управления современной элементной базы иностранного производства, в том числе цифровых процессоров.

На рисунке 10 приведена типовая зависимость холодопроизводительности от потребляемой мощности при повышенной рабочей температуре среды для МКС МСМГ-1А-0,3/80, в сравнении с экспериментально полученными данными для МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000 («Модуль-Авиа») и данными для зарубежных охладителей этого класса, известными по литературе [3, 4, 5, 6].

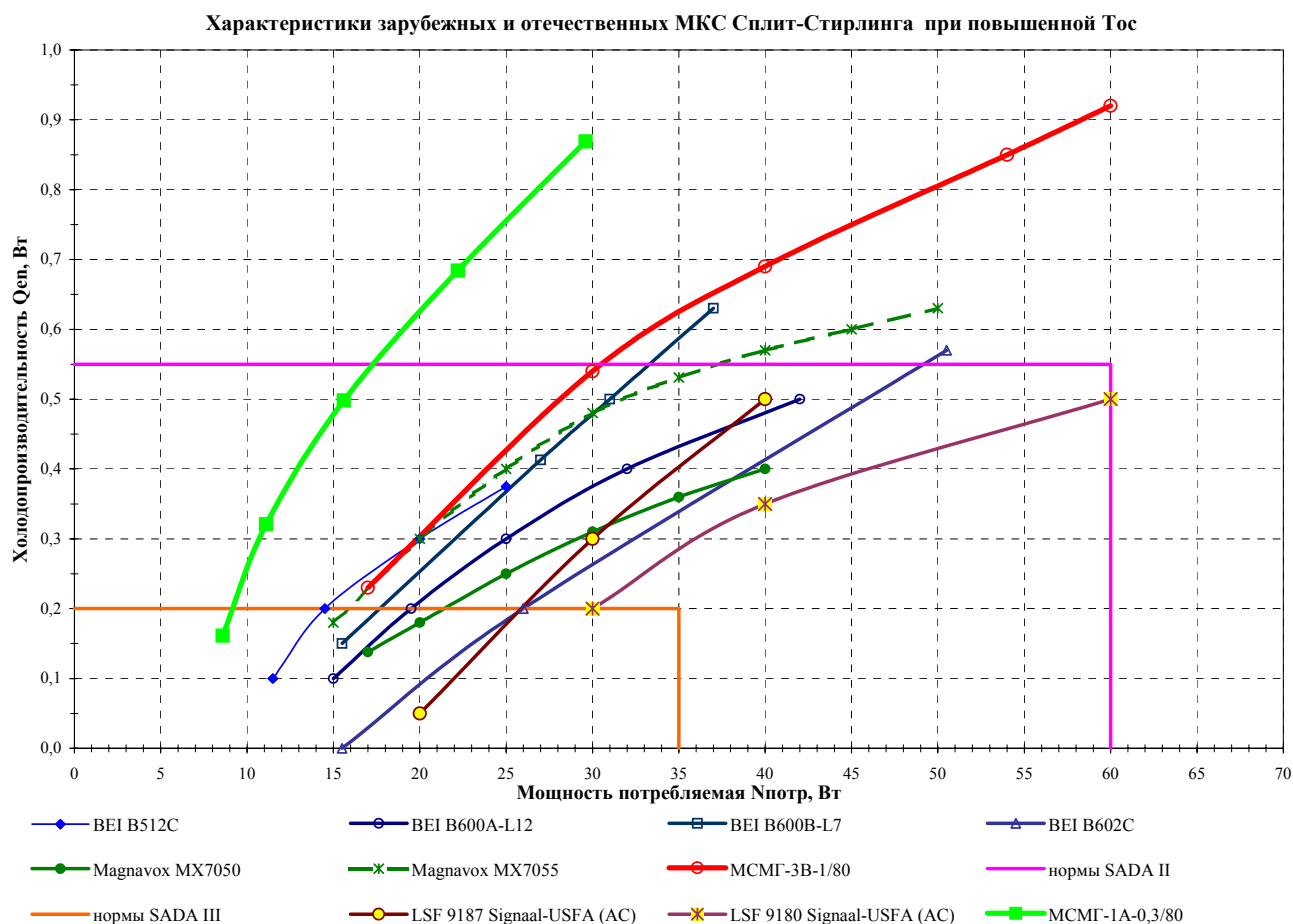


Рис.10

В инициативном порядке ООО «НТК «Криогенная техника» ведутся работы по совершенствованию конструкции МКС 1-го класса. Разработан и изготавливается в настоящее время новый компрессор ГКМ, эффективность ЛД в котором ожидается на 20 – 25% выше, чем в существующем. По результатам типовых испытаний характеристики МКС 1-го класса предполагается улучшить до значений, указанных в колонке 1 таблицы 4.

Обзор ближайших перспектив в разработке МКС с высокой надежностью будет неполным, если не упомянуть, что ООО «НТК «Криогенная техника» продолжается разработка МКС с назначенным ресурсом 25000 часов для космического применения. В настоящее время изготовлены 4 экспериментальных образца МКС МСМГ-17Г-10/80 КВО.0734.000, проводятся их автономные испытания. Для обеспечения ресурса 25000 часов в конструкцию ГКМ введены шариковые опоры поршней и сверхтвердые алмазоподобные покрытия направляющих поршней.

Внешний вид МКС приведен на рис. 11.

Основные технические характеристики МКС:

холодопроизводительность на уровне 80К – 10 Вт, не менее;

потребляемая мощность – 400 Вт, не более;

назначенный ресурс – 25000 ч;

масса МКС 17 кг;

определяющие размеры составных частей МКС: компрессор – $\varnothing 88 \times 420$ мм, охладители - $\varnothing 60 \times 415$ мм, БУ - $\varnothing 140 \times 250$ мм.



Рис. 11 МКС МСМГ-17Г-10/80 КВО.0734.000

В настоящее время основные усилия ООО «НТК «Криогенная техника», в части МКС Сплит-Стирлинга, сосредоточены на улучшении совместимости разработанных МКС с ФПУ 1 и 2 поколений. Предприятие продолжает работы по повышению надежности разработанных конструкций, в результате которых возможно улучшение их показателей безотказности до значения средней наработки на отказ 13000 часов.

Литература

1. *М.В. Липин, В.П. Филиппов, Н.Н. Левшакова.* //Создание МКС Стирлинга холодопроизводительностью 3,2 Вт на 80К с ресурсом 5000 часов. //Криогенное и холодильное оборудование и технологии. Сборник научных трудов, МАХ, выпуск №1, АО «Сибкриотехника», Омск, 1997, с. 69-73.

2. *Грезин А.К.* //ОАО «Сибкриотехника» – 40 лет в криогенике. Реальность и перспективы криогенных технологий. //Криогенное и холодильное оборудование и технологии. Сборник научных трудов, МАХ, юбилейный выпуск, ОАО «Сибкриотехника», Омск, 1999, с.3-14

3. *M.Meijers, A.A.J.Benschop and J.C.Mullie* “High reliability coolers under development at Signaal-USFA”, SPIE vol. 4130, 2000, pp. 385-393.

4. *C.S.Keung and R.Narayan* “Compact, dual-piston Stirling cryocoolers for IR imaging systems”, SPIE vol. 2224, 1994, pp. 180-188.

5. *S.W.K. Yuan, D.T. Kuo, A.S. Loc and T.D. Lody* “Performance and Qualification of BEI’S 600 mW Linear Motor Cooler”, Advances in Cryogenic Engineering Conference 45, NY, 1999, pp. 251-257.

6. *D.T. Kuo, A.S. Loc, T.D. Lody and S.W.K. Yuan*, “Cryocooler Life Estimation And its Correlation With Experimental Data”, *Advances in Cryogenic Engineering Conference 45*, NY, 1999, pp. 267-273.