

СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТКИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МКС СПЛИТ – СТИРЛИНГ ДЛЯ ОХЛАЖДАЕМЫХ ФПУ

М.В. Липин, А.В. Громов
ООО НТК "Криогенная техника", Омск, Россия

В рамках Федеральной комплексно – целевой программы развития систем тепловидения и приборов ночного видения ООО «НТК «Криогенная техника» в 2005 году завершена разработка базовых конструкций 3-х классов микрокриогенных систем (МКС) 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».

Результаты разработки докладывались на 19 Международной научно – технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, проходившей в мае 2006г. в г. Москва, и опубликованы в журнале «Прикладная физика» [1].

Разработанные МКС изготавливаются только из отечественных материалов и комплектующих и позволяют криостатировать фоточувствительные элементы (ФЧЭ) фотоприемных устройств (ФПУ) различного типа на температурном уровне (75 ÷80) К при тепловой нагрузке на МКС от 0,3 до 2,0 Вт.

МКС обеспечивают среднюю наработку на отказ 10000 часов, что является достаточным для обеспечения заданных показателей надежности большинства известных отечественных ФПУ, гарантийный срок службы МКС составляет 10,5 лет.

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.

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.

Структурная схема ГКМ приведена на рис. 2.



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

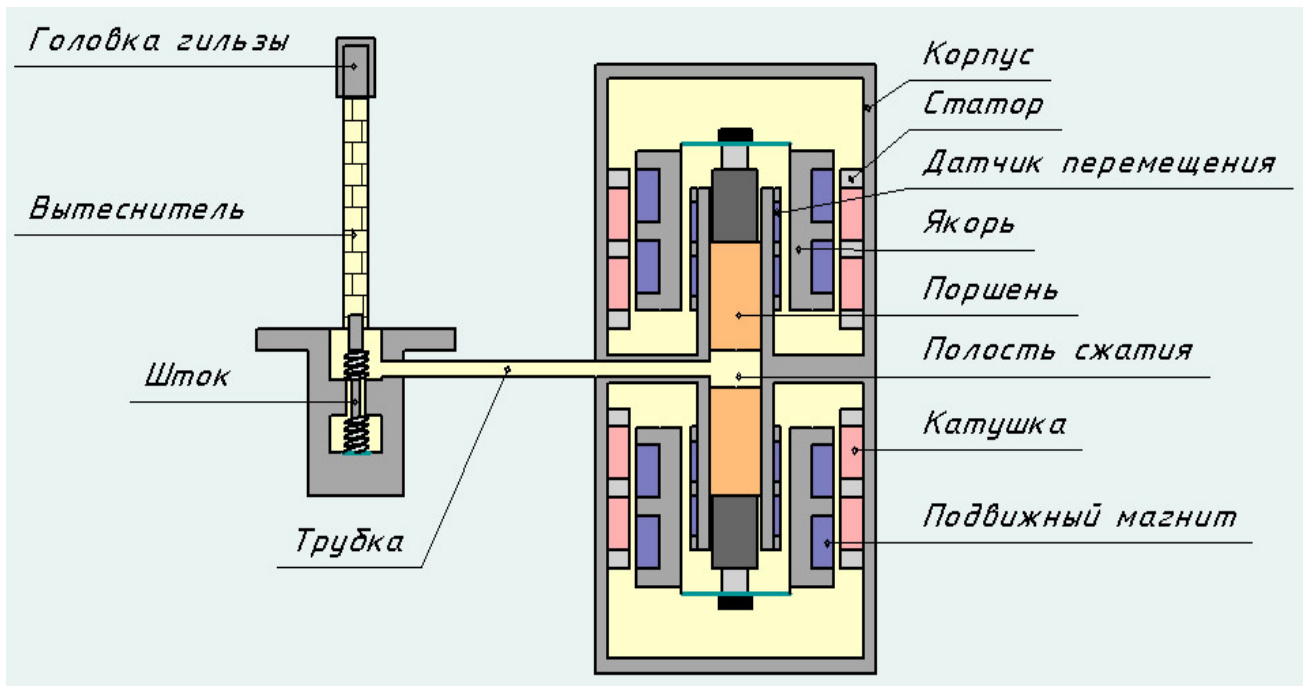


Рис.2 Структурная схема ГКМ

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

БУ выполняет следующие функции:

- обеспечивает противофазное (оппозитное) движение поршней;

- 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 ГKM, для обеспечения безударной работы поршней;
- обеспечивает защиту линейных двигателей от превышения тока.

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

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

Технические характеристики MKC 1, 2 и 3 классов

Таблица 1

Технические характеристики	Модули MKC		
	МСМГ-5А-1,3/80 КВО.0729.000 (1 класс)	МСМГ-3А-0,6/80 КВО.0730.000 (2 класс)	МСМГ-1,5А-0,4/80 КВО.0731.000 (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 - в рабочем режиме	150 100	85 45	55 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

Характеристики разработанных MKC 1, 2 и 3 классов полностью соответствуют требованиям государственного стандарта на унифицированные узлы (модули) первого поколения (ГОСТ РВ 52516-2005) и, в сопоставимых условиях, находятся на уровне современных зарубежных аналогов. MKC обеспечивают работоспособность в диапазоне температур от минус 50°С до плюс 50°С и подтвердили заданные характеристики надежности результатами предварительных и государственных испытаний.

Конструкторской документации MKC присвоена литера «О₁».

В 2007 г. ООО «НТК «Криогенная техника» завершает цикл работ по разработке конструкций МКС Сплит – Стирлинг для криостатирования ФПУ 2-го поколения. Разработаны новые конструкции ГКМ для МКС 1-го и 3-го классов, имеющие существенно улучшенные потребительские качества. Разработана модификация МКС «Модуль – Авиа» [1], адаптированная к более высоким требованиям, предъявленным к МКС 2-го класса.

Внешний вид разработанных ГКМ приведен на рис. 3.



Рис. 3 ГКМ базовых МКС 1, 2 и 3 классов для ФПУ 2-го поколения

Важнейшие характеристики разработанных МКС (в наиболее жестких условиях эксплуатации) приведены в таблице 2.

Технические характеристики МКС для ФПУ 2-го поколения Таблица 2

Технические характеристики	Модули МКС		
	МСМГ-5А-1,3/80 КВО.0739.000 (1 класс)	МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000-03 (2 класс)	МСМГ-1А- 0,3/80 КВО.0736.000 (3 класс)
Диаметр / длина колодца ФП, мм	9/72,5	6/71	-
Максимальная тепловая нагрузка от ФП при температуре (80.5)К, Вт	1,3	0,5	0,3
Приведенная к температуре криостатирования суммарная охлаждаемая масса ФП, г, не более	10	8	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, °С	от -50 до +55	от -60 до +65	от -40 до +50
Средняя наработка на отказ, час	10000	4000	10000
Масса, кг, не более	3,7	2,6	1,5

Типовые зависимости холодопроизводительности от потребляемой мощности для этих МКС при температуре окружающей среды (T_{oc}) + 50°C приведены на рис. 4.

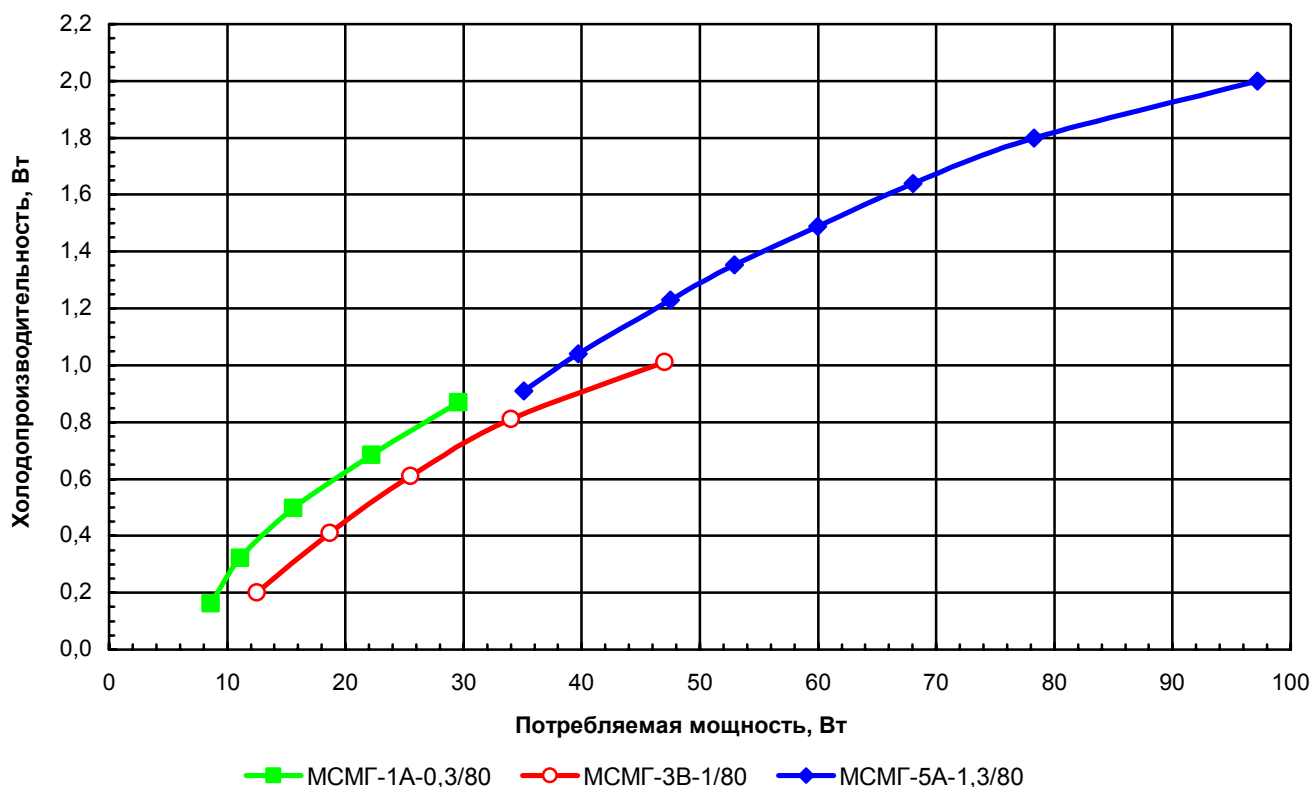


Рис. 4 Типовые характеристики МКС для ФПУ 2-го поколения при $T_{oc} = +50\text{ }^{\circ}\text{C}$

Наибольшей холодопроизводительностью обладает МКС МСМГ-5А-1,3/80 КВО.0739.000 (1-го класса), внешний вид которой показан на рис. 5.



Рис.5 Унифицированный модуль охлаждения фотоприёмника I класса МКС МСМГ-5А-1,3/80 КВО.0739.000.

Масса МКС МСМГ-5А-1,3/80 КВО.0739.000 относительно базовой конструкции уменьшена с 5 до 3,7 кг. Значительно улучшен также и КПД линейных двигателей компрессора, что позволило уменьшить потребляемую мощность МКС в рабочем режиме на 30% при одинаковых тепловых нагрузках, и сократить фактическое время выхода МКС на рабочий режим.

В таблице 3 приведены результаты, полученные при приемосдаточных испытаниях первых трех опытных образцов МКС МСМГ-5А-1,3/80 КВО.0739.000.

Результаты испытаний МКС МСМГ-5А-1,3/80 КВО.0739.000 Таблица 3

	Наименование параметра			
	Время достижения т-ры, мин		Потребляемая мощность МКС, Вт	
	100 К	80 К	пусковой режим	рабочий режим
Требование по ТЗ	–	не более 7	не более 120	не более 70
Т-ра окр. среды	+55°С			
зав. № 074205	4'17"	5'14"	113,94	42,12
зав. № 074206	4'37"	5'39"	85,05	34,83
зав. № 074207	3'28"	4'10"	106,65	34,29
Среднее значение	4'07"	5'01"	101,88	37,08
Т-ра окр. среды	н.к.у.			
зав. № 074205	4'51"	4'35"	72,9	27,3
зав. № 074206	4'29"	5'24"	70,74	27,27
зав. № 074207	3'18"	3'57"	89,1	25,92
Среднее значение	4'13"	4'39"	77,58	26,38
Т-ра окр. среды	-50 °С			
зав. № 074205	3'12"	3'48"	51,78	27,02
зав. № 074206	3'25"	4'13"	42,12	25,27
зав. № 074207	3'04"	3'28"	49,23	25,08
Среднее значение	3'14"	3'30"	47,71	26,12

Типовая диаграмма, показывающая изменение потребляемой мощности и температуры криостатирования в начальный период работы МКС МСМГ-5А-1,3/80 КВО.0739.000 приведена на рис. 5, зависимости холодопроизводительности МКС от потребляемой мощности при температуре окружающей среды + 50°С приведены на рис. 6.

По результатам испытаний можно констатировать, что МКС МСМГ-5А-1,3/80 КВО.0739.000 пригодна для криостатирования фотоприемников крупного или среднего форматов.

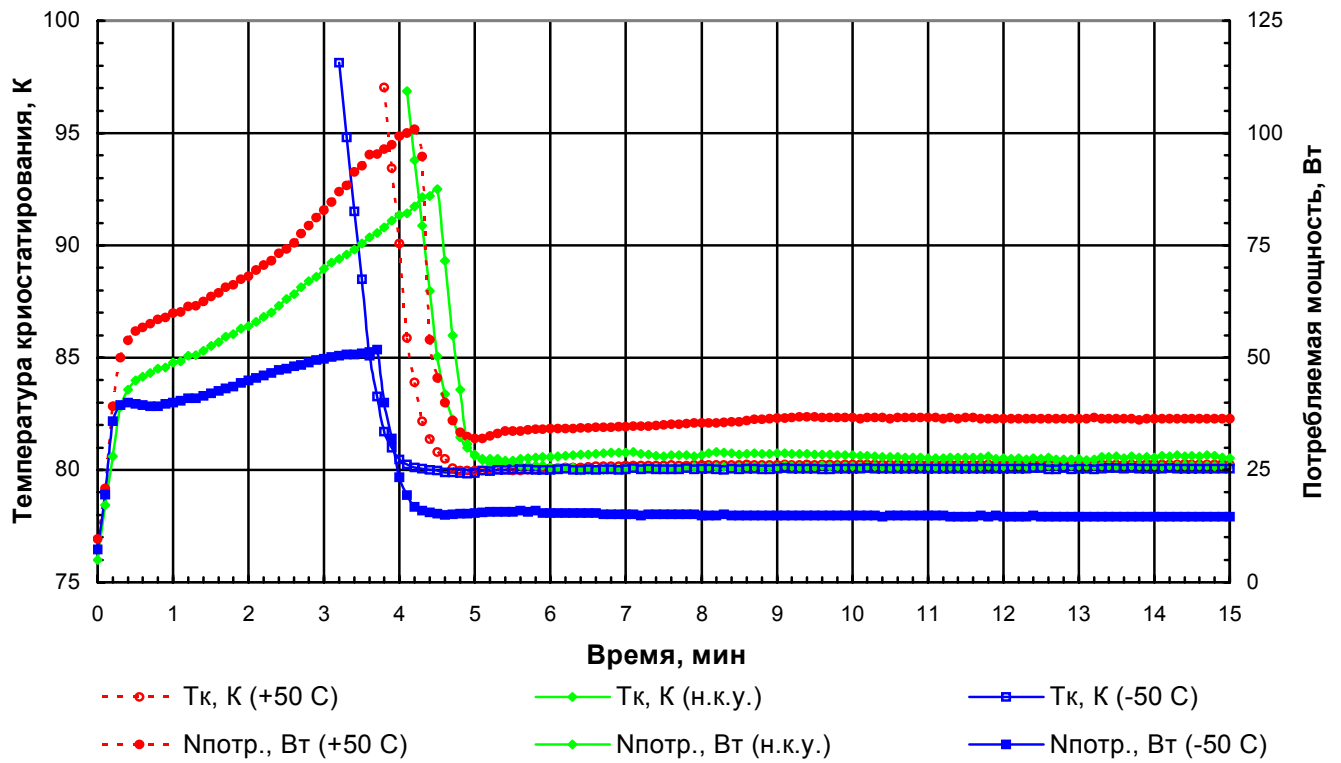


Рис. 5 Изменение потребляемой мощности и температуры криостатирования от времени работы для МКС МСМГ-5А-1,3/80 КВО.0739.000 зав. № 074207.

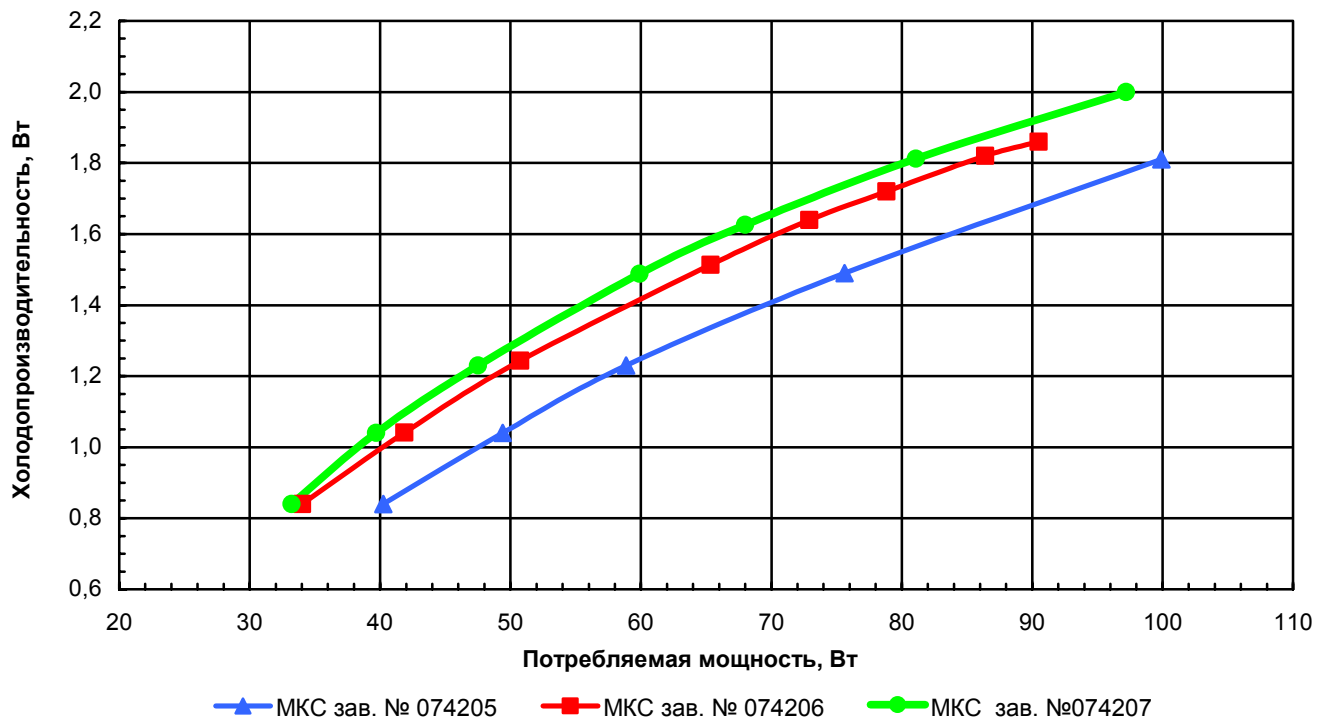


Рис. 6 Зависимость холодопроизводительности от потребляемой мощности для МКС МСМГ-5А-1,3/80 КВО.0739.000 при $T_{oc} = +50^{\circ}C$.

В 2006 – 2007 г.г. проведена модернизация МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000 «Модуль – Авиа», позволившая сохранить время выхода на рабочий режим и потребляемую мощность при увеличении тепловой нагрузки на МКС от ФПУ до 500 мВт и охлаждаемой массы до 5 г. Для этого разработана модификация МКС, имеющая обозначение МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000-03.



Рис. 7 Унифицированный модуль охлаждения фотоприёмника 2 класса МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000-03.

В таблице 4 приведены результаты, полученные при приемосдаточных испытаниях изготовленной партии опытных образцов МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000-03. Испытания МКС проводились с тепловым имитатором ФПУ 384 x 288 элементов, изготовленным ФГУП «НПО «Орион». Имитатор ФПУ имеет вакуумный криостат со стеклянным держателем и, согласно паспортным данным, создает тепловую нагрузку на МКС 0,5 Вт, а его охлаждаемая масса составляет 8 г в эквиваленте меди.

	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. № 041315	5'13"	6'50"	60,0	30,5
зав. № 041318	5'24"	7'22"	55,9	32,1
зав. № 061138	6'06"	7'49"	54,0	35,0
зав. № 061142	5'40"	7'27"	56,6	30,1
зав. № 061140	5'10"	6'44"	56,7	28,4
зав. № 061139	5'24"	7'08"	58,1	31,9
Среднее значение	5'30"	7'13"	56,88	31,33
Т-ра окр. среды	н.к.у.			
зав. № 041315	4'27"	5'50"	44,0	20,0
зав. № 041318	3'47"	5'10"	51,3	21,9
зав. № 061138	5'06"	6'32"	36,6	24,0
зав. № 061142	5'03"	6'27"	39,5	22,2
зав. № 061140	4'51"	6'18"	35,4	18,4
зав. № 061139	5'15"	6'56"	36,5	22,4
Среднее значение	4'45"	6'12"	40,55	21,48
Т-ра окр. среды	-60 °С			
зав. № 041315	5'54"	7'31"	24,0	15,9
зав. № 041318	5'34"	7'20"	25,0	15,7
зав. № 061138	5'30"	7'15"	23,5	16,2
зав. № 061142	6'02"	7'37"	24,3	15,2
зав. № 061140	5'48"	7'33"	22,8	16,1
зав. № 061139	6'00"	7'34"	23,8	16,3
Среднее значение	5'48"	7'28"	23,85	15,9

Типовая диаграмма, показывающая изменение потребляемой мощности и температуры криостатирования в начальный период работы МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000-03 приведена на рис. 8. Из диаграммы видно, что, по показаниям датчика установленного в ФПУ, достижение температуры 80 К происходит за время около 7,5 минут, а затем еще порядка 2-х минут МКС работает с максимальной холодопроизводительностью для захлаживания распределенных охлаждаемых масс ФПУ.

Зависимости холодопроизводительности от потребляемой мощности, экспериментально полученные для МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000-03 при температуре окружающей среды +65 °С приведены на рис. 9.

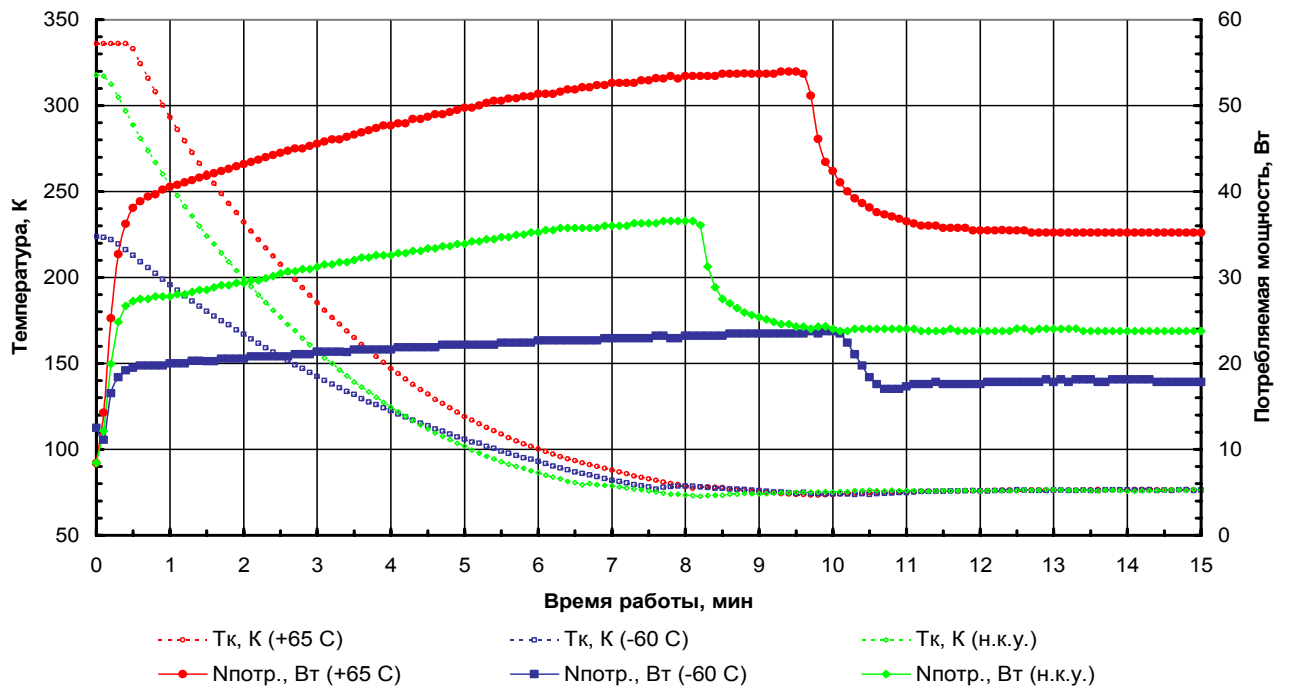


Рис.8 Изменение потребляемой мощности и температуры криостатирования от времени работы для МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000-03 зав. № 061138.

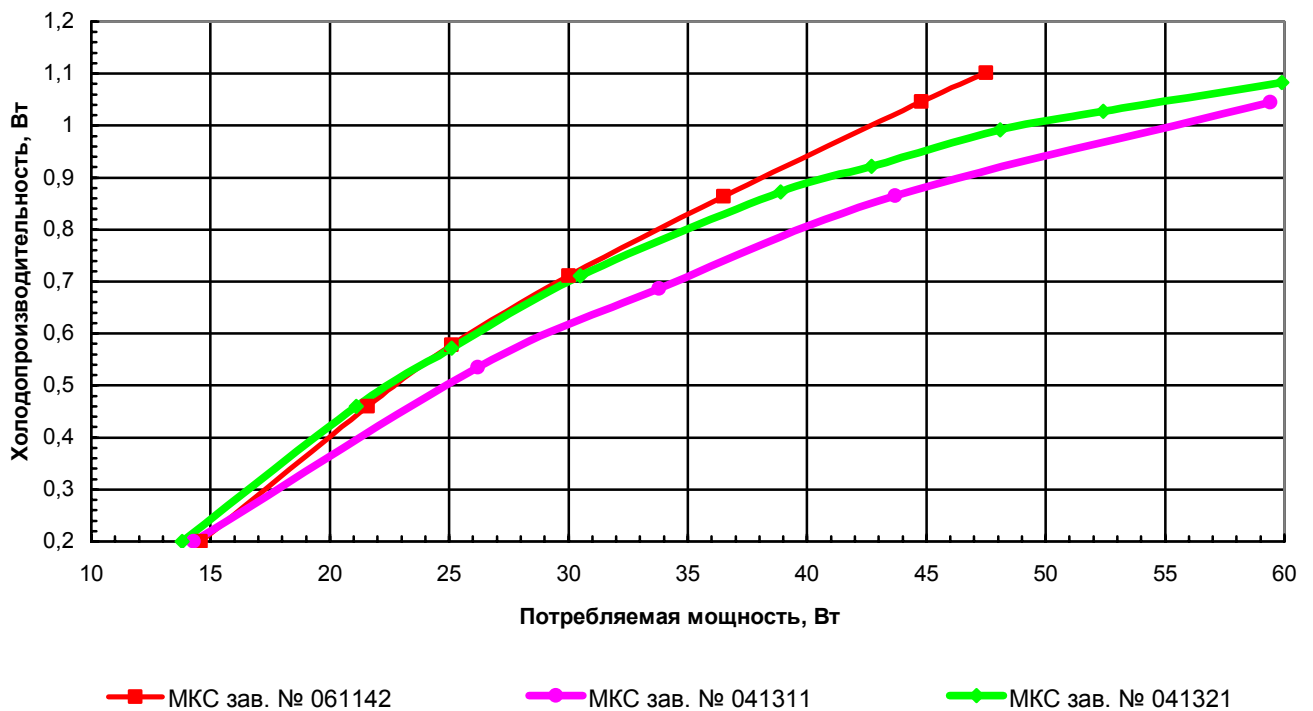


Рис. 9. Зависимость холодопроизводительности от потребляемой мощности для МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000-03 при $T_{oc} = +65\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Получены первые результаты исследований возможности применения МКС МСМГ-3В-1/80 для криостатирования ФПУ на температурный уровень (60 ÷ 65) К. Экспериментальные зависимости холодопроизводительности от потребляемой мощности для МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000-03 зав. № 041321 при температурах криостатирования 78 К и 63 К приведены на рис.10.

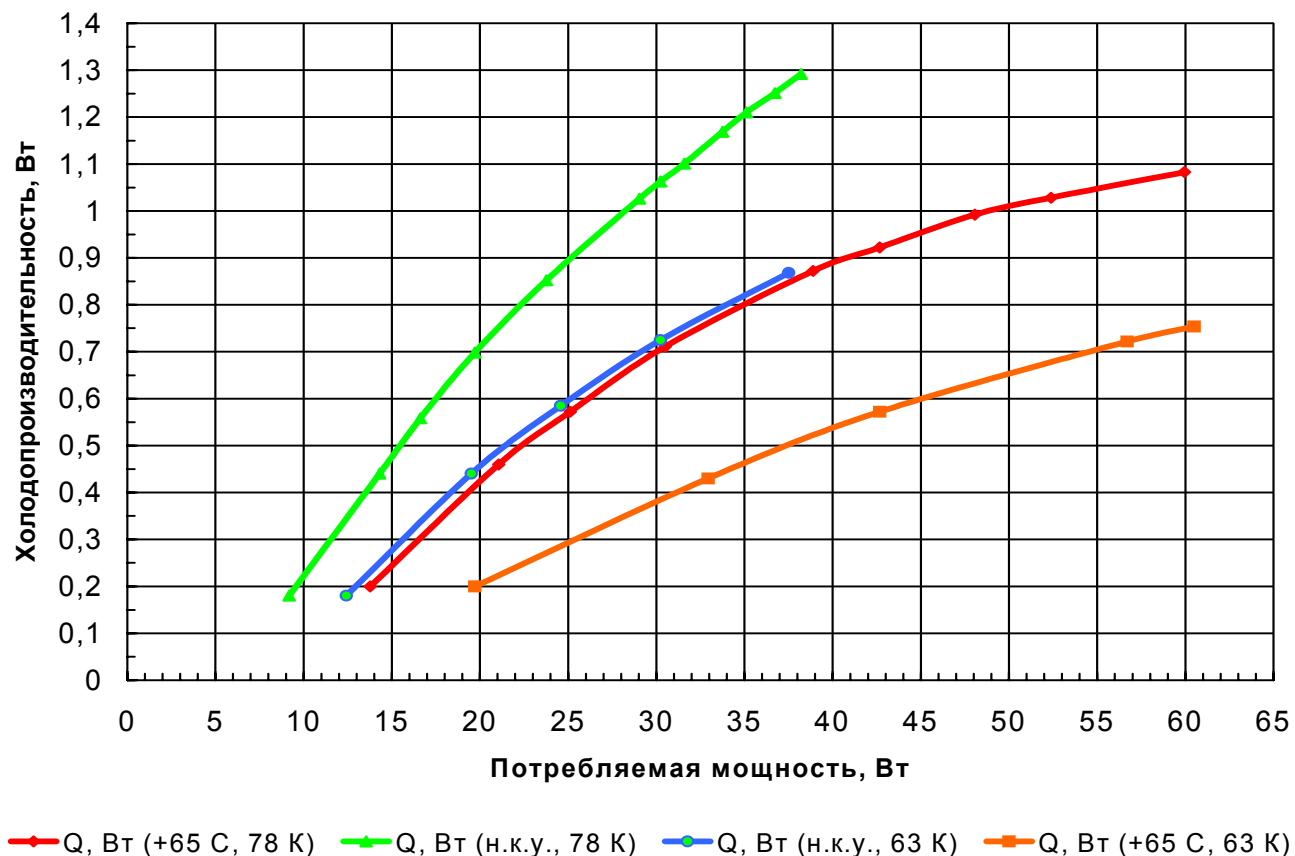


Рис. 10 Зависимости холодопроизводительности от потребляемой мощности для МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000-03 зав. № 041321

В рамках составной части ОКР «Запорожье – 16М» ООО «НТК «Криогенная техника» разработана МКС МСМГ-1А-0,3/80 КВО.0736.000, имеющая минимальные энергопотребление, массу и габариты, соответствующие условиям применения с малоформатными матричными фотоприемниками.

Технические требования, предъявляемые к разрабатывавшейся МКС МСМГ-1А-0,3/80 КВО.0736.000, приведены в табл. 2. Требование по обеспечению средней наработки на отказ 10000 часов определяет необходимость применения в компрессоре МКС линейных двигателей.

Разрабатываемая МКС состоит из ГКМ и БУ, ее внешний вид показан на рис.11.



Рис. 11 Модуль охлаждения фотоприёмника МКС МСМГ-1А-0,3/80 КВО.0736.000

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 при температуре окружающей среды + 50°С потребовала обеспечения холодопроизводительности в пусковом режиме около 900 мВт, что не могло не сказаться на размерах двигателей ГКМ. Масса ГКМ составляет 1,15 кг.

Охладитель ГКМ 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 формата 256 x 256 элементов). Благодаря такому техническому решению тепловая нагрузка на ГКМ 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.

Одним из основных требований к разрабатываемой МКС было уменьшение объема блока управления в два раза по сравнению с базовой МКС 3-го класса МСМГ-1,5А-0,4/80 КВО.0731.000. В процессе проектирования количество плат в БУ удалось уменьшить с 4-х до 2-х, 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 12 приведена фотография БУ в бескорпусном исполнении в сравнении с БУ базовой МКС 3-го класса.

В таблице 5 приведены результаты, полученные при приемосдаточных испытаниях изготовленной партии опытных образцов МКС МСМГ-1А-0,3/80 КВО.0736.000.



Рис.12 БУ в бескорпусном исполнении в сравнении с БУ базовой МКС 3-го класса.

Результаты испытаний МКС МСМГ-1А-0,3/80 КВО.0736.000. Таблица 5

	Наименование параметра		
	Время достижения температуры, мин	Потребляемая мощность МКС, Вт	
		80 К	пусковой режим
Требование по ТЗ	не более 5	не более 30	не более 12
Т-ра окр. среды	+50 °С		
зав. № 054377	4'17"	26,6	11,2
зав. № 054378	4'48"	24,0	10,2
зав. № 054379	4'50"	24,2	11,4
зав. № 054380	4'57"	27,2	10,1
зав. № 054381	4'40"	22,4	9,1
зав. № 054382	4'52"	26,1	9,9
Среднее значение	4'44"	25,1	10,3
Т-ра окр. среды	н.к.у.		
зав. № 054377	4'11"	23,8	7,7
зав. № 054378	4'36"	19,7	7,4
зав. № 054379	4'50"	18,7	8,8
зав. № 054380	4'23"	19,7	8,3
зав. № 054381	4'16"	17,4	7,2
зав. № 054382	4'46"	19,0	7,8
Среднее значение	4'30"	19,7	7,9
Т-ра окр. среды	-50 °С		
зав. № 054377	4'18"	15,6	5,3
зав. № 054378	4'41"	13,2	5,6
зав. № 054379	4'59"	12,0	6,0
зав. № 054380	5'00"	14,2	8,2
зав. № 054381	4'30"	15,8	6,9
зав. № 054382	4'55"	15,9	8,4
Среднее значение	4'44"	14,45	6,7

Типовая диаграмма, показывающая изменение потребляемой мощности и температуры криостатирования в начальный период работы МКС МСМГ-1А-0,3/80 КВО.0736.000 приведена на рис. 13.

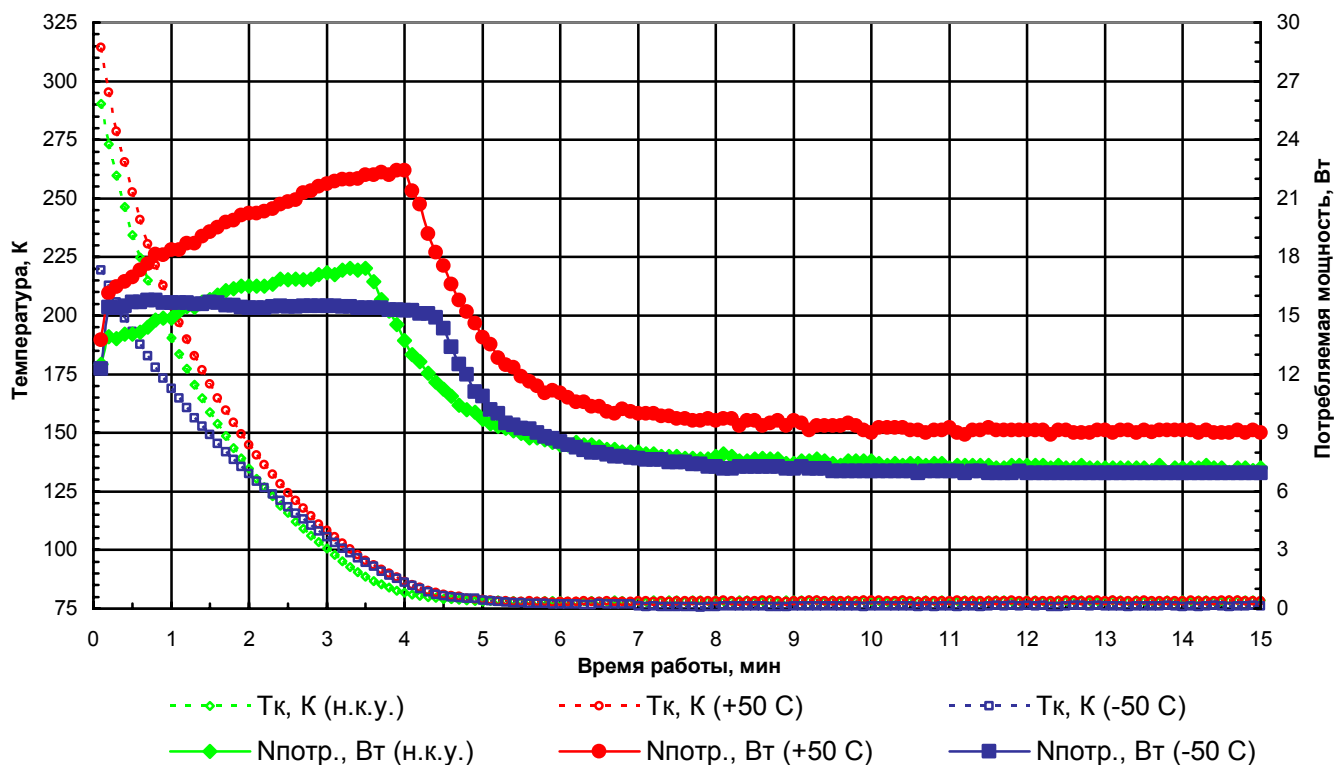


Рис.13 Изменение потребляемой мощности и температуры криостатирования от времени работы для МКС МСМГ-1А-0.3/80 КВО.0736.000 зав. № 054381.

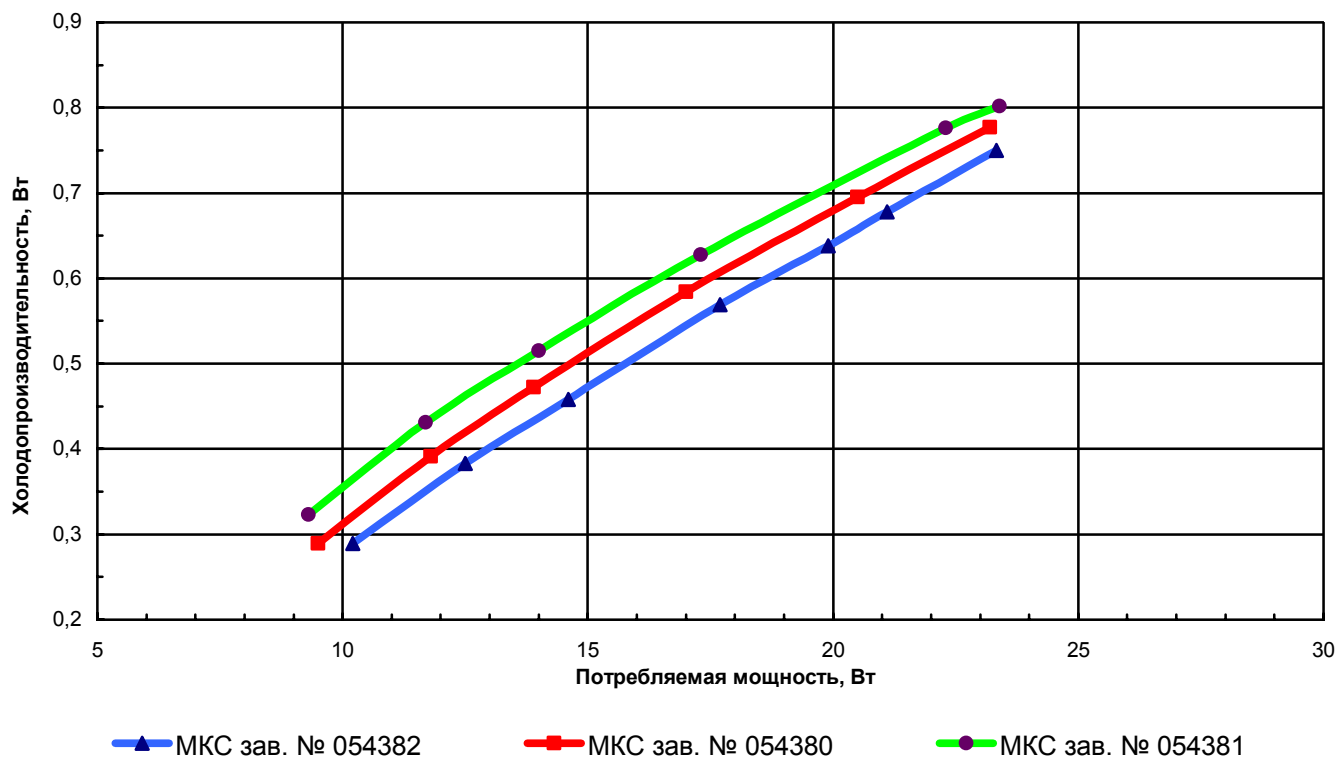


Рис. 14. Зависимость холодопроизводительности от потребляемой мощности для МКС МСМГ-1А-0,3/80 КВО.0736.000 при $T_{oc} = +50\text{ }^{\circ}\text{C}$

Зависимости холодопроизводительности от потребляемой мощности, экспериментально полученные для МКС МСМГ-1А-0,3/80 КВО.0736.000 при температуре окружающей среды +50 °С приведены на рис. 14. Все изготовленные МКС обеспечивают при тепловой нагрузке от ФП 0,3 Вт температуру криостатирования 80,5 К при потребляемой мощности менее 12 Вт.

В течение 2001 – 2007 г.г. ООО «НТК «Криогенная техника» изготовлено и поставлено для использования в НИОКР, выполняемых по заказам Минобороны России, более 150 образцов модульных МКС Сплит – Стирлинга с линейным приводом, разработанных в рамках ОКР «Оператор – Ф» и их модификаций. Технологии изготовления МКС производством освоены, ООО «НТК «Криогенная техника» готово поставлять в любых необходимых количествах.

Говоря о перспективах развития микрокриогенных систем, необходимо с сожалением отметить, что, стремясь обеспечить максимальную компактность приборов, отечественные разработчики ТВП в последнее время предпочитают использовать ФПУ зарубежного производства, укомплектованные интегральными МКС Стирлинга. При этом они предпочитают не упоминать о присущих этому классу машин недостатках (в сравнении со схемой Сплит-Стирлинг с линейным приводом):

- намного более широкий спектр создаваемых вибраций из-за наличия шарикоподшипников и перекладки поршней при работе кривошипно-шатунного механизма;
- частоты создаваемых вибраций меняются во времени, т.к. регулирование температуры криостатирования осуществляется за счет изменения частоты вращения двигателя в широком диапазоне;
- наличие в непосредственной близости от фотоприемника электродвигателя, а следовательно и электромагнитных полей;
- намного меньший ресурс.

В то же время никто не может отрицать, что в развитых странах применение МКС Сплит – Стирлинга в тепловизионных приборах военного назначения продолжается, количество изготовленных МКС достигает десятков тысяч штук.

Технический уровень зарубежных МКС Сплит-Стирлинга за прошедшее время не стоял на месте, появляются МКС с все лучшими характеристиками, как по КПД, так и по ресурсу. В ряде зарубежных стран уже проведена разработка и начат серийный выпуск МКС 2-го поколения, имеющих улучшенные характеристики надежности, например серии LSF фирмы THALES. Наше предприятие технически также готово выполнить разработку аналогичных МКС, предложения о разработке МКС второго поколения с ресурсом 20000 часов подаются нами в Минобороны России уже в течении нескольких лет, с момента выхода в свет первой редакции «Общих технических требований к унифицированным узлам межвидового применения (общим модулям) второго поколения для тепловизионных приборов и каналов», однако ООО «НТК «Криогенная техника» не задействовано в текущих целевых программах. Разработка таких МКС только за счет собственных средств компании, при

отсутствии тенденции к увеличению количества закупаемых Минобороны России образцов МКС, экономически не целесообразна.

Следующим шагом в направлении повышения надежности и потребительских свойств МКС для охлаждения фотоприемников межвидового применения, согласно мировым тенденциям, является разработка МКС на основе пульсационной трубы и компрессора с линейным приводом. За счет отсутствия движущихся частей в охладителе ГКМ возможно почти полное снижение вибраций, действующих на чувствительные элементы ФП, а ресурс подобных систем может быть увеличен до 35 – 40 тысяч часов. При этом возможно использование тех же компрессоров с линейным приводом, что и для базовых МКС Сплит – Стирлинг. В настоящее время многие зарубежные фирмы ведут такие разработки, реальность достижения заявленных характеристик надежности не вызывает сомнений.

Наша компания в инициативном порядке также приступила к исследовательской работе в этом направлении, в настоящее время изготовлен макетный образец МКС с пульсационной трубой на базе компрессора МКС «Модуль – Авиа» (рис. 15), исследования которого предполагается провести до середины 2008 г.

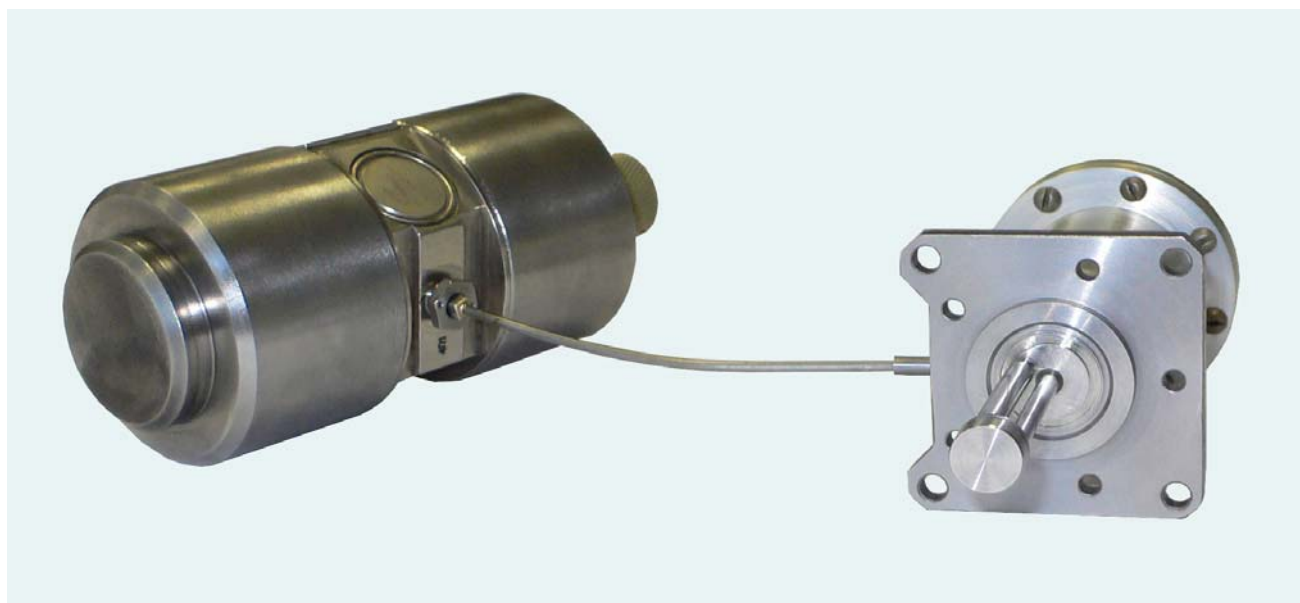


Рис. 15 Макетный образец ГКМ с пульсационной трубой на базе компрессора от ГКМ «Модуль – Авиа».

Хотя мы пока не видим у российских разработчиков фотоприемных устройств изделий, реально имеющих тепловую нагрузку менее 0,2 Вт, ООО «НТК «Криогенная техника» в 2008 г. приступает к разработке миниатюрной ГКМ с линейным приводом с холодопроизводительностью не менее 0,3 Вт и массой не более 0,5 кг. Также в ближайших планах компании разработка МКС на температурный уровень 20 К, для которой у нас уже имеется серьезный научно – технический задел.

Литература

1. М.В. Липин, А.В. Громов Результаты разработки ряда модульных МКС Сплит – Стирлинг для криостатирования ФПУ 1 – го и 2 – го поколений. //Прикладная физика, №2, 2007г., с. 110 – 119.