

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, по заданию Минобороны России, 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.

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. Такая компоновка позволяет 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

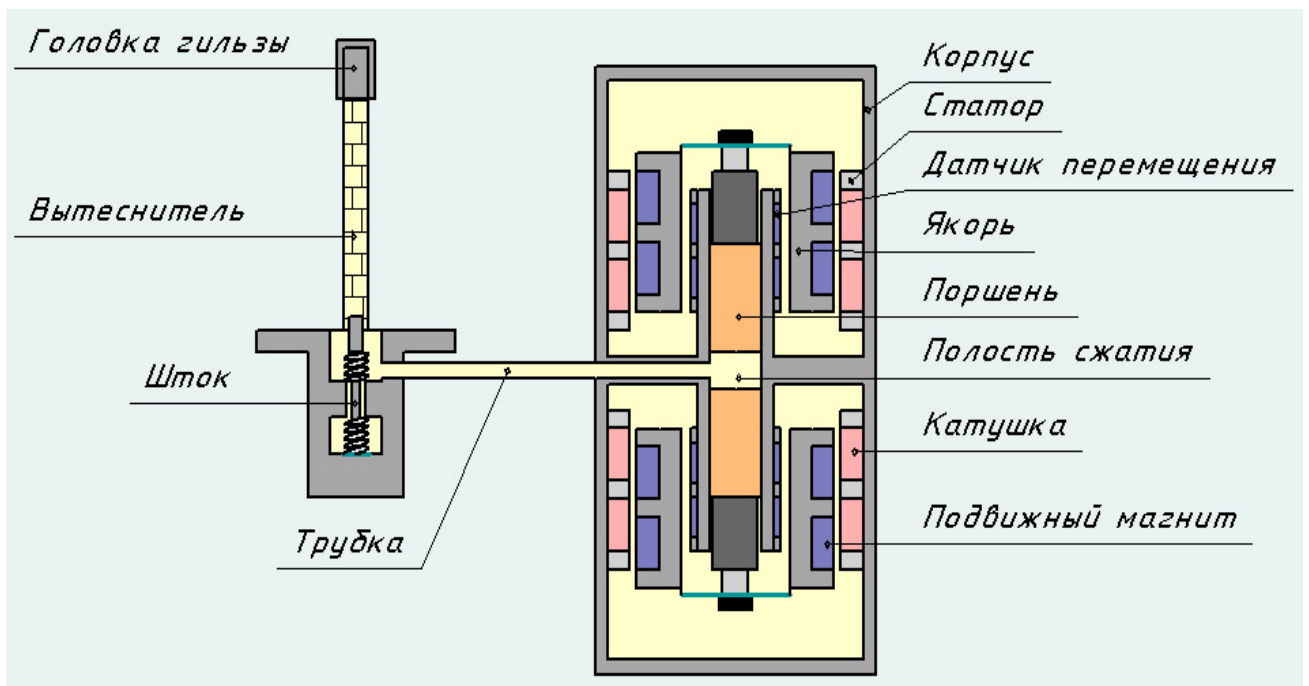


Рис.2 Структурная схема ГКМ

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 ГКМ, 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 МКС (в наиболее жестких условиях эксплуатации) приведены в таблице 1.

Технические характеристики МКС 1, 2 и 3 классов

Таблица 1

Технические характеристики	Модули МКС		
	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	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

Характеристики разработанных МКС 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. МКС 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 МКС присвоена литера «О₁».

В 2007 г. ООО «НТК «Криогенная техника» завершило 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	6	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
Объем компрессора ГКМ, см ³ , не более	393	261	161
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.

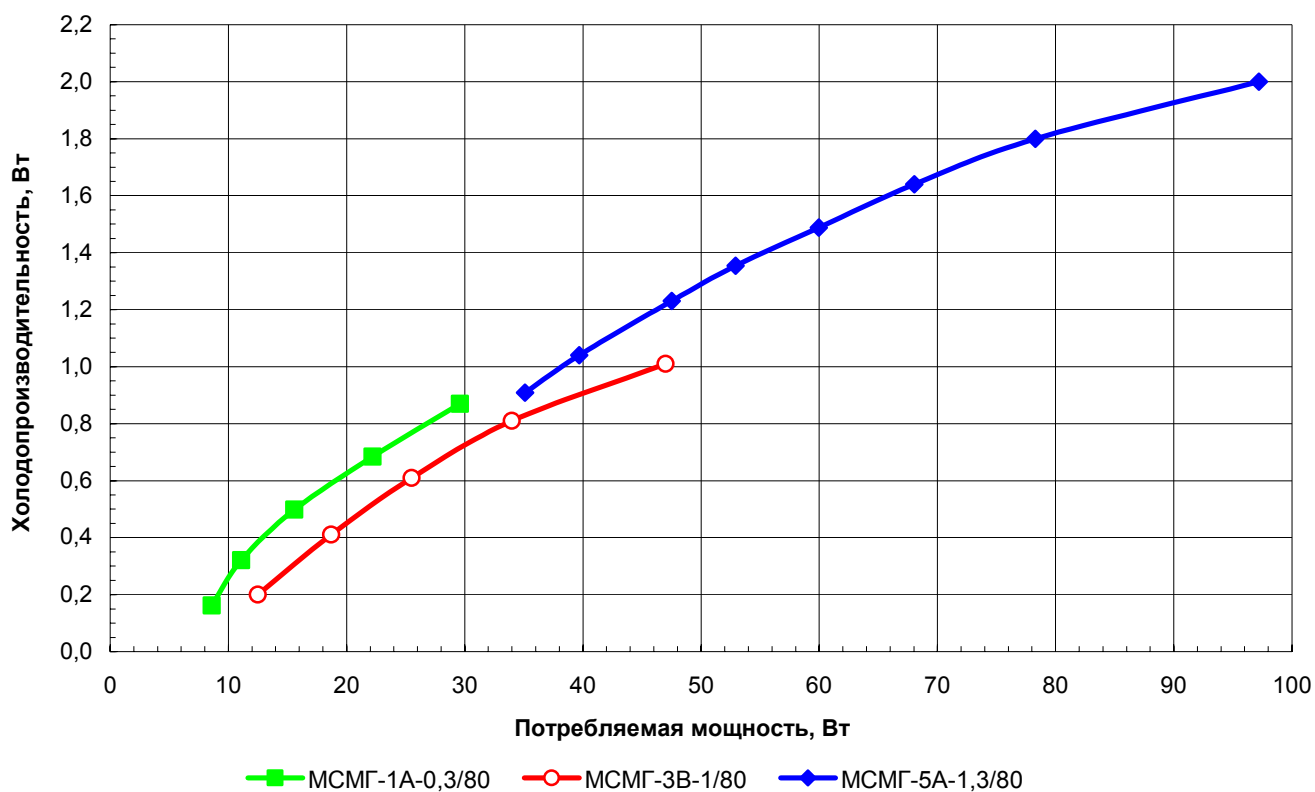


Рис. 4 Типовые характеристики МКС для ФПУ 2-го поколения при $T_{oc} = +50^\circ\text{C}$

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 6	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

Зависимости холодопроизводительности МКС от потребляемой мощности при температуре окружающей среды + 50°С приведены на рис. 5.

В конструкции узла стыковки охладителя МКС 1-го класса с ФП традиционно использовано устройство демпфирующее теплопередающее (УДТ), упрощающее стыковку, но создающее определенные потери при передаче тепла теплопроводностью. В настоящее время для МКС 1-го класса разработана новая конструкция охладителя без УДТ, предназначенная для стыковки с ФП, имеющими такие же размеры колодца криостата (диаметр 9 мм и глубину 72,5 мм). Эффект, полученный от замены охладителей на двух опытных образцах МКС МСМГ-5А-1,3/80 КВО.0739.000, показан на рис. 6. Исследования новой конструкции охладителей для МКС 1-го класса будут завершены в ближайшее время.

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

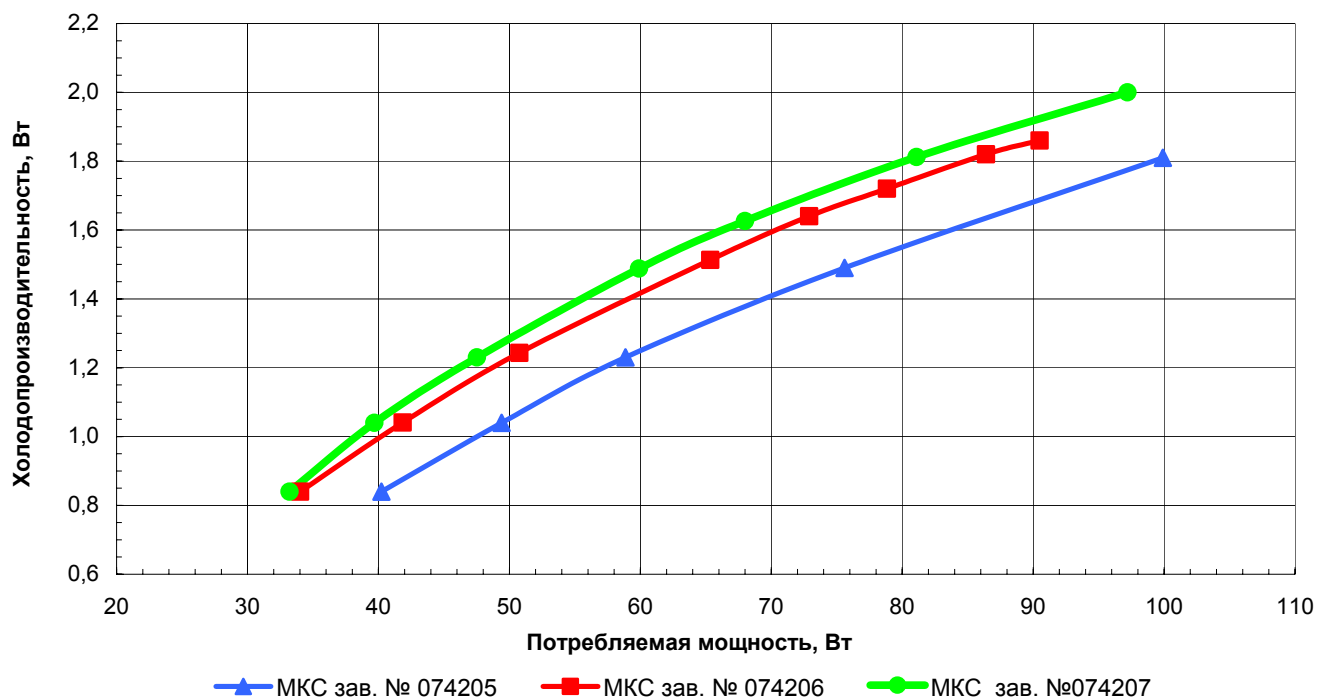


Рис. 5 Зависимость холодопроизводительности от потребляемой мощности для МКС МСМГ-5А-1,3/80 КВО.0739.000 при $T_{oc} = +50^{\circ}C$.

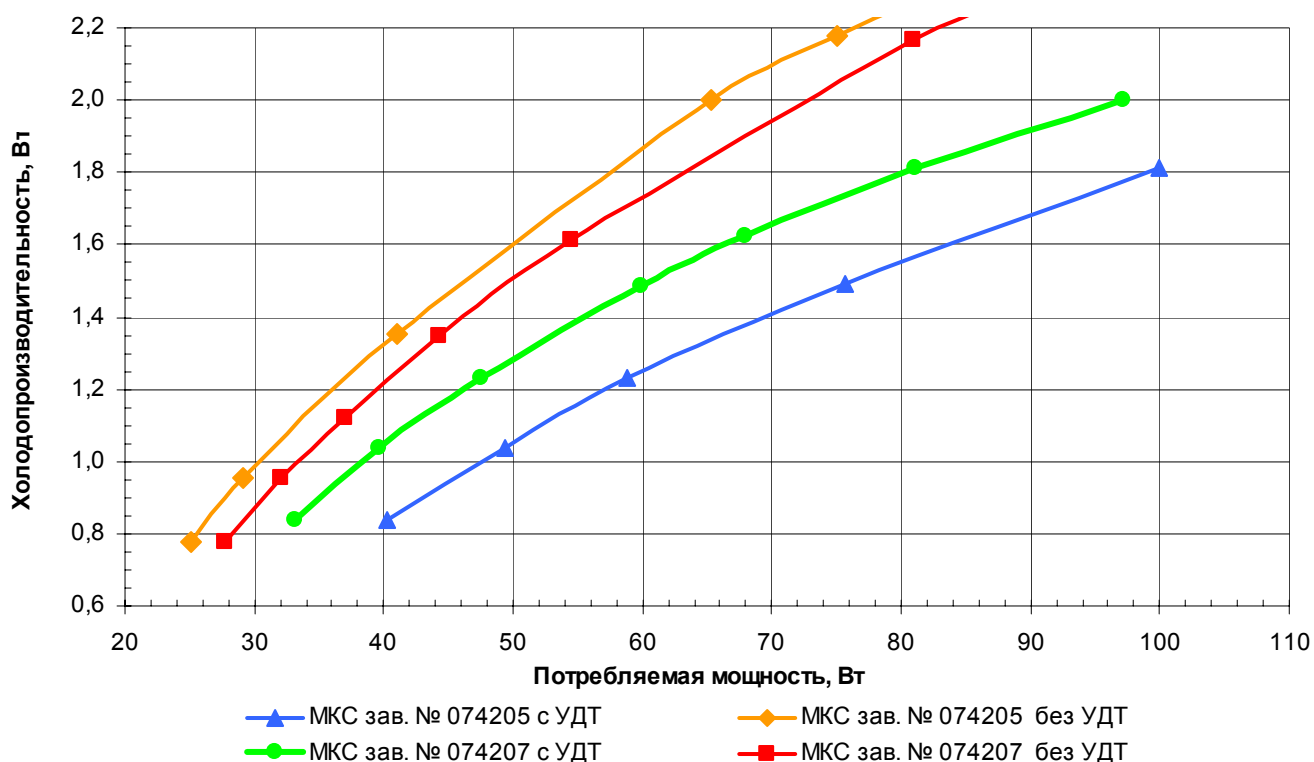


Рис. 6 Зависимость холодопроизводительности от потребляемой мощности при $T_{oc} = +50^{\circ}C$ для МКС МСМГ-5А-1,3/80 КВО.0739.000 с разной конструкцией охладителей.

В 2006 – 2007 г.г. проведена модернизация МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000 «Модуль – Авиа» [1], 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 8 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.

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. 8.

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.9.

	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

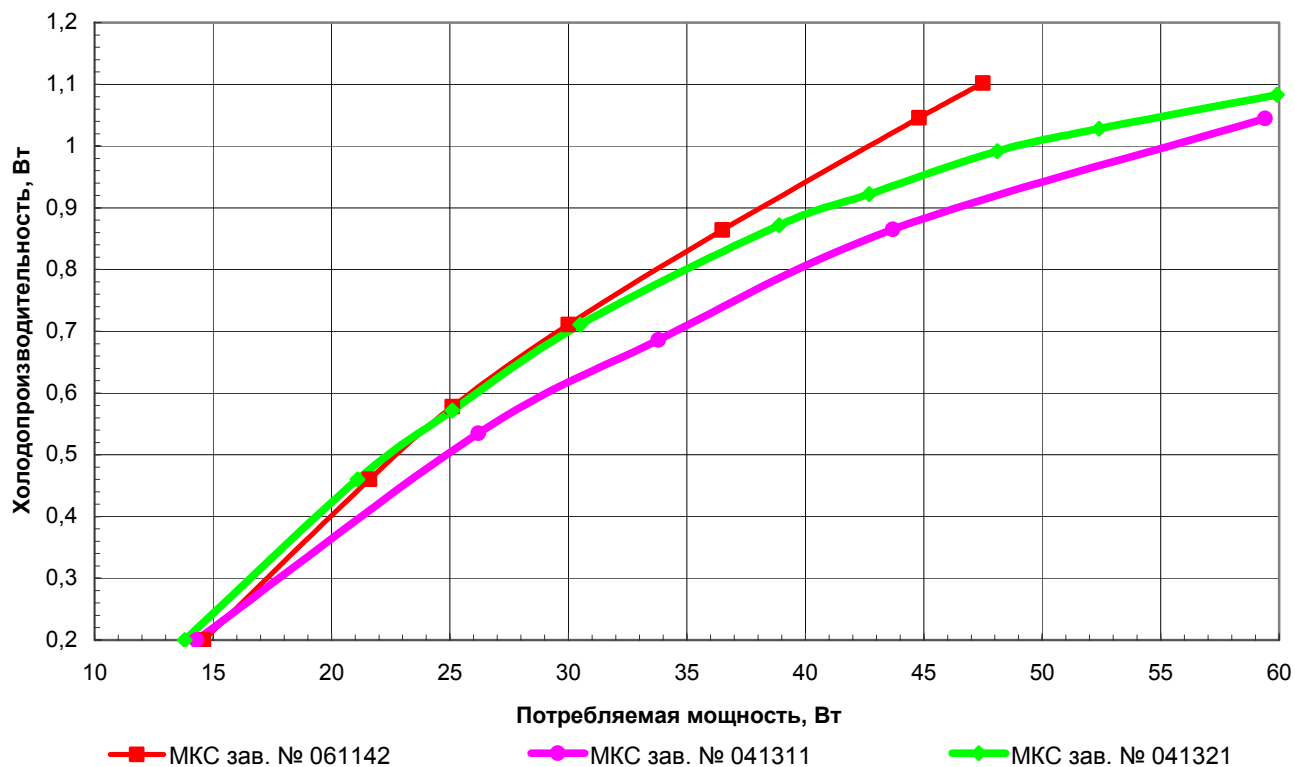


Рис. 8. Зависимость холодопроизводительности от потребляемой мощности для МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000-03 при $T_{oc} = +65$ °С.

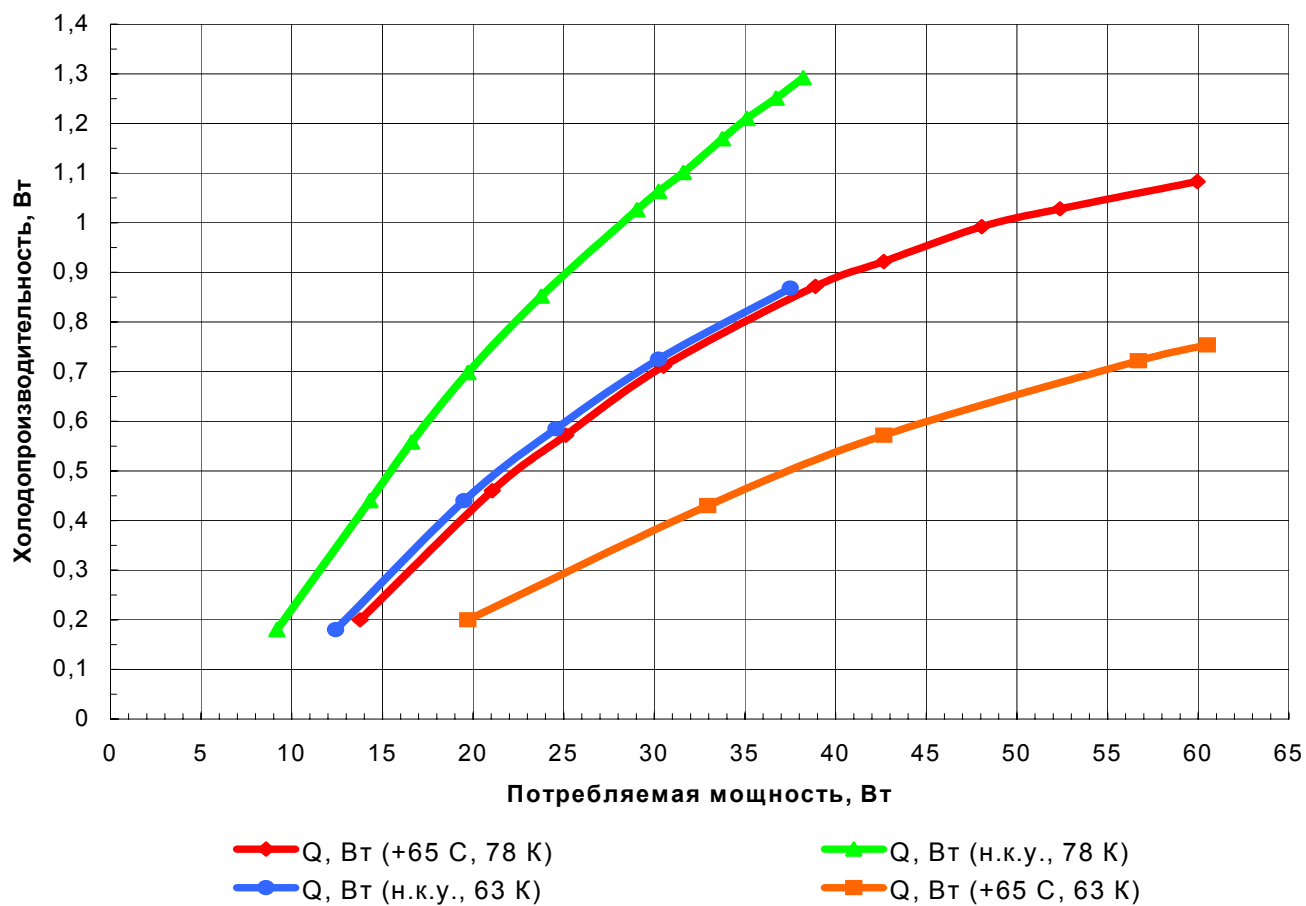


Рис. 9. Зависимости холодопроизводительности от потребляемой мощности для МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000-03 зав. № 041321

В 2004 – 2006 годах 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 ГКМ линейных двигателей.

Разработанная МКС состоит из ГКМ и БУ, ее внешний вид показан на рис.10.



Рис. 10 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.

Объем БУ удалось уменьшить до 300 см³ (120x100x25 мм) за счет применения в блоке управления современной элементной базы иностранного производства, в том числе цифровых процессоров.

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

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. 11.

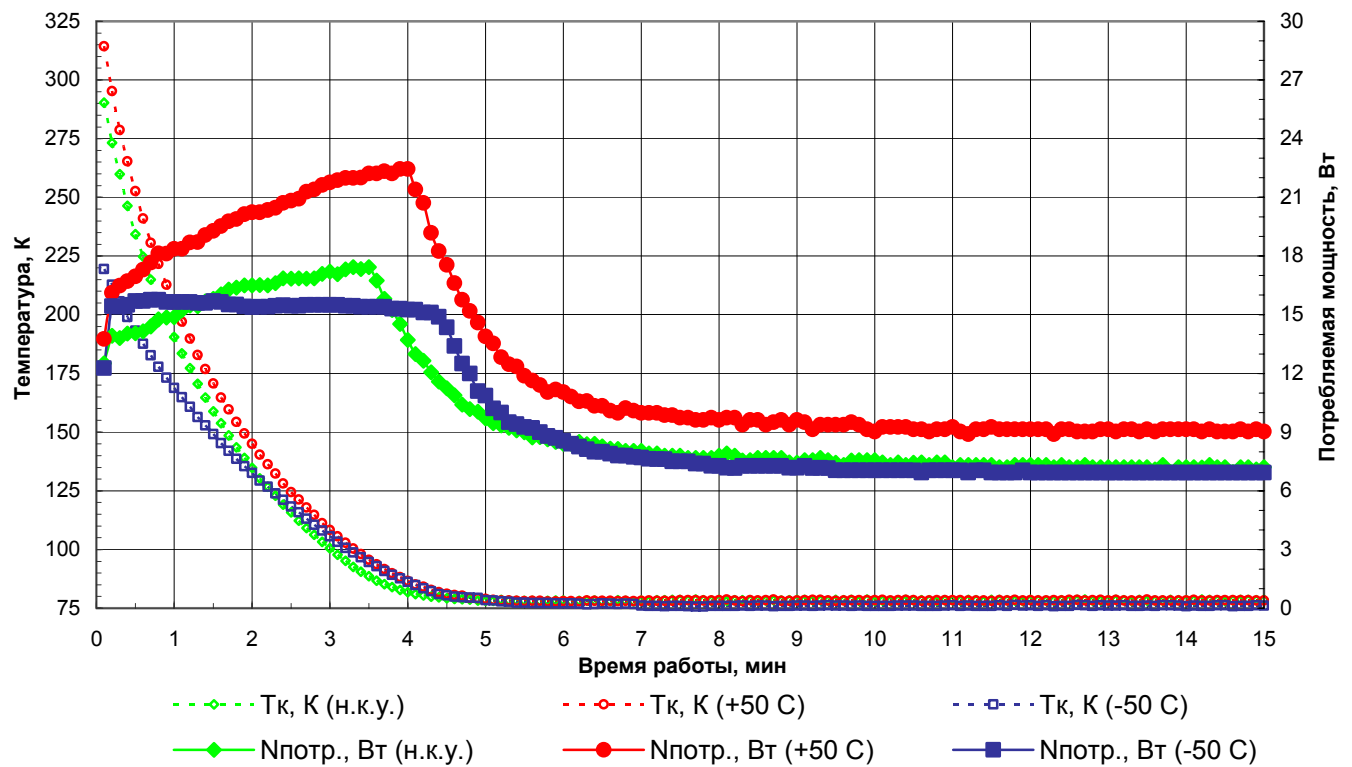


Рис.11 Изменение потребляемой мощности и температуры криостатирования от времени работы для МКС МСМГ-1А-0.3/80 КВО.0736.000 зав. № 054381.

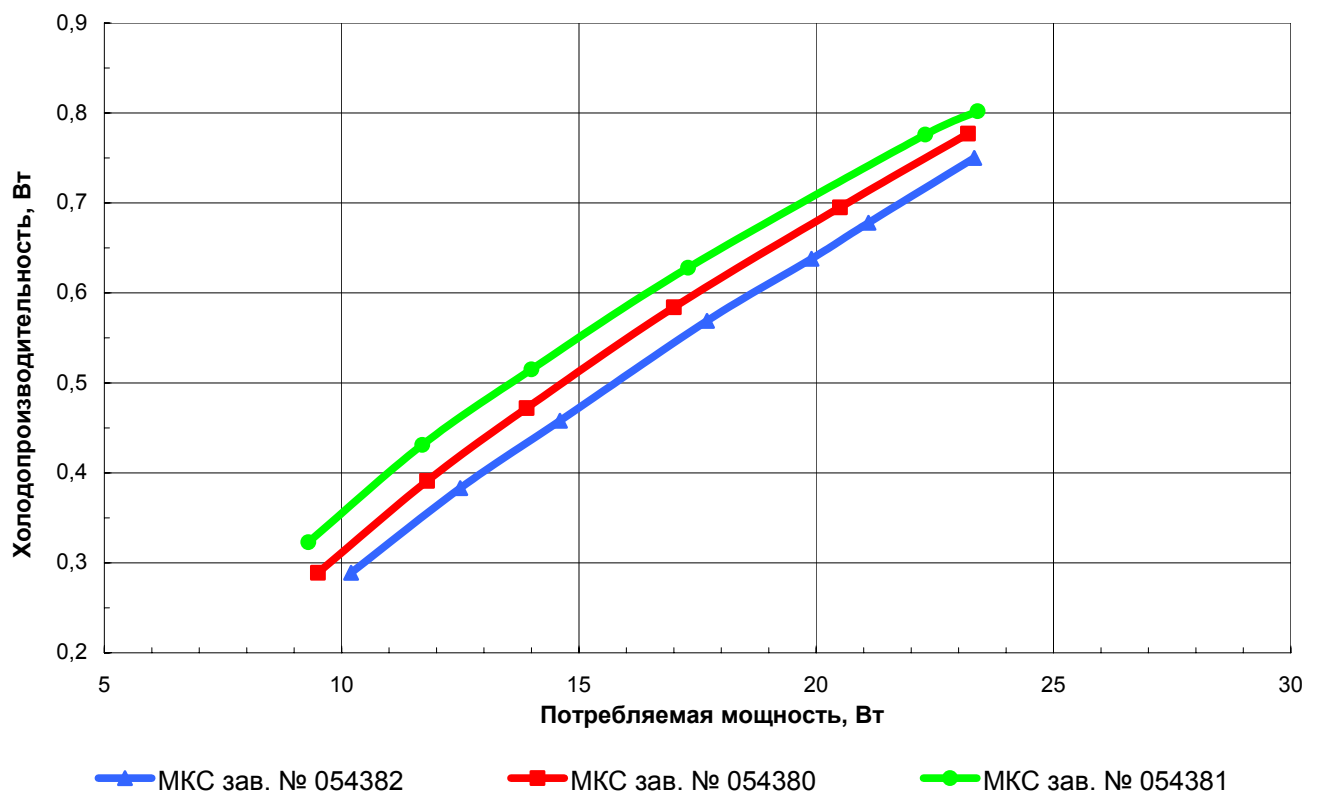


Рис. 12. Зависимость холодопроизводительности от потребляемой мощности для МКС МСМГ-1А-0,3/80 КВО.0736.000 при $T_{oc} = +50\text{ }^{\circ}\text{C}$

Зависимости холодопроизводительности от потребляемой мощности, экспериментально полученные для МКС МСМГ-1А-0,3/80 КВО.0736.000 при температуре окружающей среды $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ приведены на рис. 12. 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 – 2008 годов ООО «НТК «Криогенная техника» изготовлено и поставлено для использования в НИОКР, выполняемых по заказам Минобороны России, более 180 образцов модульных МКС Сплит – Стирлинга с линейным приводом. 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.

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. приступило к разработке миниатюрной ГКМ с линейным приводом с номинальной холодопроизводительностью 0,2 Вт при температуре криостатирования (80,5) К.

МКС МСМГ-0,6А-0,2/80 КВО.0738.000 состоит из платы управления и газовой криогенной машины, имеющей компрессор с двумя оппозитными линейными двигателями и встроенный охладитель (рис. 13). ГКМ имеет массу около 500 г и объем 90 см³. Входящая в комплект поставки гильза – держатель ФП унифицирована с МКС МСМГ-1А-0,3/80 КВО.0736.000, и предназначена для интегральной стыковки с ФП.

Расчетная зависимость холодопроизводительности от потребляемой мощности для МКС МСМГ-0,6А-0,2/80 КВО.0738.000 при $T_{oc} = +55^{\circ}C$ приведена на рис. 14. В пусковом режиме МКС будет обеспечивать холодопроизводительность 0,6 Вт при потреблении 20 Вт от источника постоянного тока напряжением 12,2 В. В настоящее время предприятие, с целью определения объема запуска в производство опытной партии МКС, прорабатывает возможные варианты применения такой МКС с разработчиками оптико – электронной аппаратуры.



Рис. 13 Макетный образец ГКМ с номинальной холодопроизводительностью 0,2 Вт.

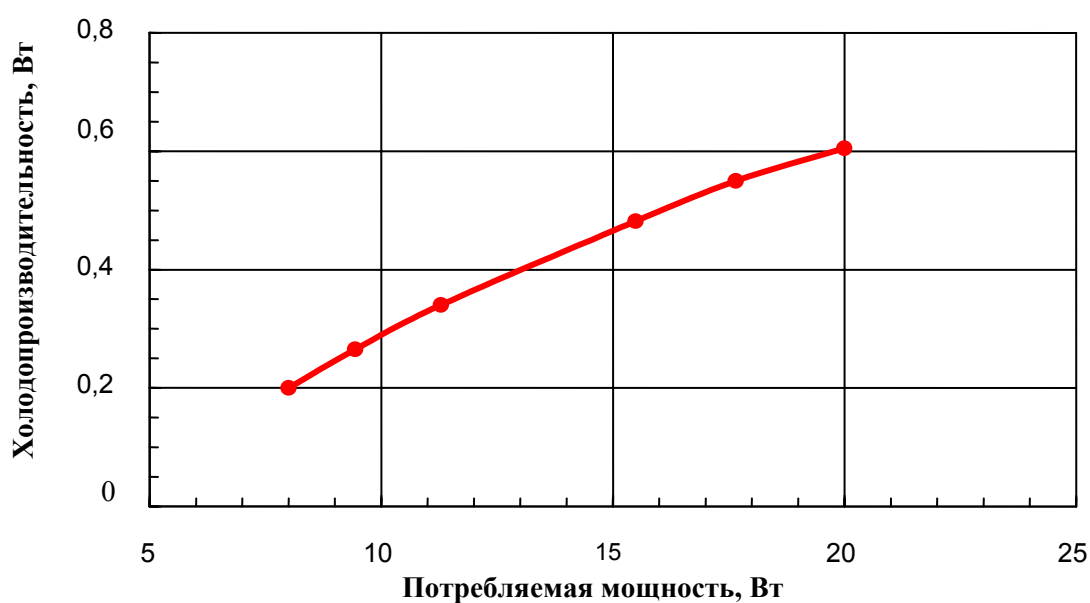


Рис. 14 Расчетная зависимость холодопроизводительности от потребляемой мощности для МКС MSMG-0,6A-0,2/80 KBO.0738.000 при $T_{oc} = +55^{\circ}C$

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 на базе компрессора МКС «Модуль – Авиа» изготовлен макетный образец МКС с пульсационной трубой (рис. 15), на котором отрабатываются закономерности, присущие этому типу МКС, в соответствии с чем уточняется методика термодинамического расчета.

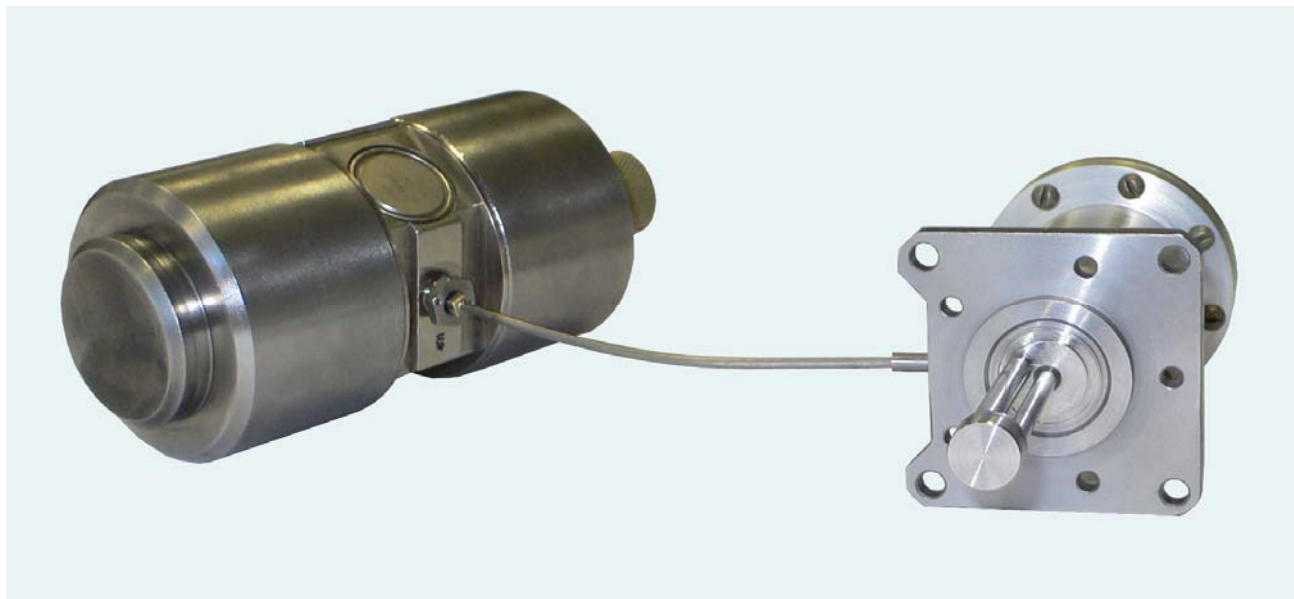


Рис. 15 Макетный образец ГKM с пульсационной трубой

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.