

**Результаты испытаний микрокриогенной системы
МСМГ-3В-1/80 – унифицированного модуля межвидового применения для
ТПВК II-го поколения.**

М.В. Липин, А.В.Смирнов, Е.В. Забенкова

ООО “НТК “Криогенная техника”, Омск, Россия

ОКР "Разработка и изготовление унифицированной микрокриогенной системы (модуля охлаждения фотоприёмника – МОФ) для охлаждения субматричных фотоприёмных устройств тепловизионного канала II-го поколения для вертолётных обзорно – прицельных круглосуточных станций" выполняется ООО “НТК “Криогенная техника” (г. Омск) по договору с ФГУП «НПО «ГИПО» (г. Казань) в интересах Минобороны России. Разработчиком охлаждаемого модульного фотоприемного устройства (МФПУ) является ФГУП «НПО «Орион» (г. Москва).

Конструкция микрокриогенной системы (МКС) «Модуль – Авиа» МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000 (модуль охлаждения фотоприемника, МОФ) разработана в 2000 г., когда разработка первых отечественных базовых МКС МСМГ-3А-0,6/80 КВО.0730.000 (2-го класса) с линейным приводом по ОКР «Оператор – Ф» была уже практически закончена. Обе МКС предназначены для охлаждения МФПУ с колодцем фотоприемника (ФП) диаметром 6 и глубиной 71мм.

Основные характеристики МКС представлены в табл.1.

Таблица 1

Основные характеристики МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000 и МСМГ-3А-0,6/80
КВО.0730.000 (2-го класса)

Наименование параметра	Значение параметра	
	КВО.0733.000	КВО.0730.000
Температура криостатирования (Тк), К	80 ₋₅	80±2
Максимальная тепловая нагрузка от ФП при заданной температуре криостатирования, Вт	0,3 ^{+0,05}	0,6
Приведенная к температуре криостатирования суммарная охлаждаемая масса ФП, г, не более	6	5
Время выхода на режим (τ), мин, не более	8	5
Потребляемая мощность (N), Вт, не более: – в пусковом режиме, N _{пуск} – в стационарном режиме, N _{реж}	60 35	85 45
Питание от сети постоянного тока, напряжением, В	24,0...29,4	22...29
Масса, кг, не более	3	3
Средняя наработка на отказ, ч	4000	10000
Средний срок сохраняемости, лет	10,5	15,5
Рабочая температура окружающей среды, °С	от –60 до +65	от –50 до +50
Условия эксплуатации МКС – по ГОСТ В 20.39.304-81		группа 1.10
Условия эксплуатации МКС – по ГОСТ РВ 20.39.304-98	группа 3.2.3	

На рис. 1 представлен внешний вид МКС.



Рис. 1. Внешний вид МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000.

В состав МКС входит газовая криогенная машина (ГКМ), которая, в свою очередь состоит из охладителя и компрессора, соединённых между собой трубопроводом, и блок управления (БУ), служащий для управления приводом компрессора и регулирования температуры криостатирования.

ГКМ работает по замкнутому обратному газодинамическому циклу Стирлинга с внутренней регенерацией тепла и с использованием постоянного количества рабочего газа (криоагента) – гелия газообразного высокой чистоты. Охлаждение МКС комбинированное: естественной конвекцией и теплопроводностью с отводом теплоты в количестве 35 Вт на корпусные детали аппаратуры, имеющие температуру не выше +70 °С. При повышенной рабочей температуре выше +55 °С осуществляется внешний обдув зоны радиатора МОФ. Трубопровод позволяет изменять ориентацию охладителя относительно компрессора, облегчает компоновку ГКМ в аппаратуре, и позволяет снизить вибрации холодной головки охладителя за счет её удаления от компрессора.

БУ питается от сети постоянного тока напряжением 27 В и служит для поддержания заданной температуры криостатирования. При отклонении температуры криостатирования, измеряемой датчиком температуры в МФПУ, происходит изменение хода (амплитуды перемещения) компрессорных поршней приводящее к изменению холодопроизводительности ГКМ, что позволяет стабилизировать температуру криостатирования в заданном интервале во всех условиях эксплуатации.

Базовая МКС МСМГ-3А-0,6/80 КВО.0730.000 (2-го класса) предназначена для работы при температуре окружающей среды от -50 до +50 °С. Необходимость изменений и усложнения базовой конструкции была вызвана значительно более широким диапазоном рабочих температур для МКС "Модуль - Авиа" (от -60 до +65°С) и повышенными требованиями к ее холодопроизводительности и эффективности (потребляемой мощности).

Для реализации этих задач была изменена конструкция как охладителя (исключено устройство демпфирующее теплопередающее в холодной зоне, а компенсатор тепловых деформаций перенесен в теплую зону), так и компрессора (разработан оригинальный линейный двигатель с более высоким к.п.д.).

Из рисунка 2 видно, что достигнутые характеристики МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000 при температуре окружающей среды +65 °С лучше, чем у МСМГ-3А-0,6/80 КВО.0730.000 (2-го класса) при температуре окружающей среды +50 °С и с большим запасом удовлетворяют требованиям американского стандарта SADA II.

Характеристики зарубежных и отечественных МКС Сплит-Стирлинга при повышенной Тос

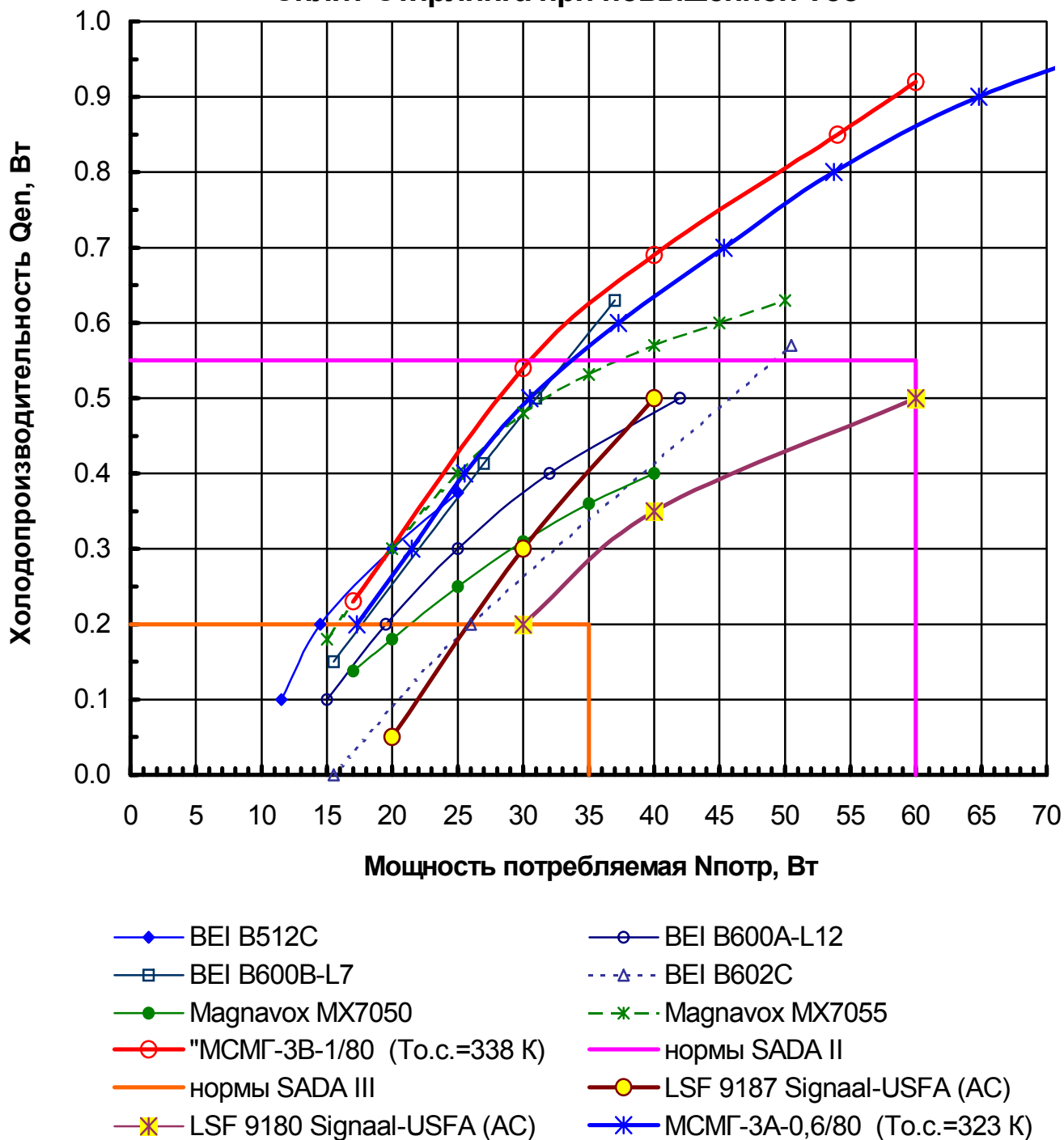


Рис. 2

Особую трудность вызывало требование по обеспечению холодопроизводительности 1 Вт при температуре окружающей среды +65 °С при ограничении потребляемой мощности не более 60 Вт в период выхода на рабочий режим.

На рисунке 3 приведена типовая зависимость холодопроизводительности от потребляемой мощности для МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000 при различных температурах окружающей среды. Как видно, при температуре +65°С технологический запас 10% обеспечивается только с предусмотренным частным техническим заданием (ЧТЗ) на МКС внешним обдувом зоны радиатора МОФ.

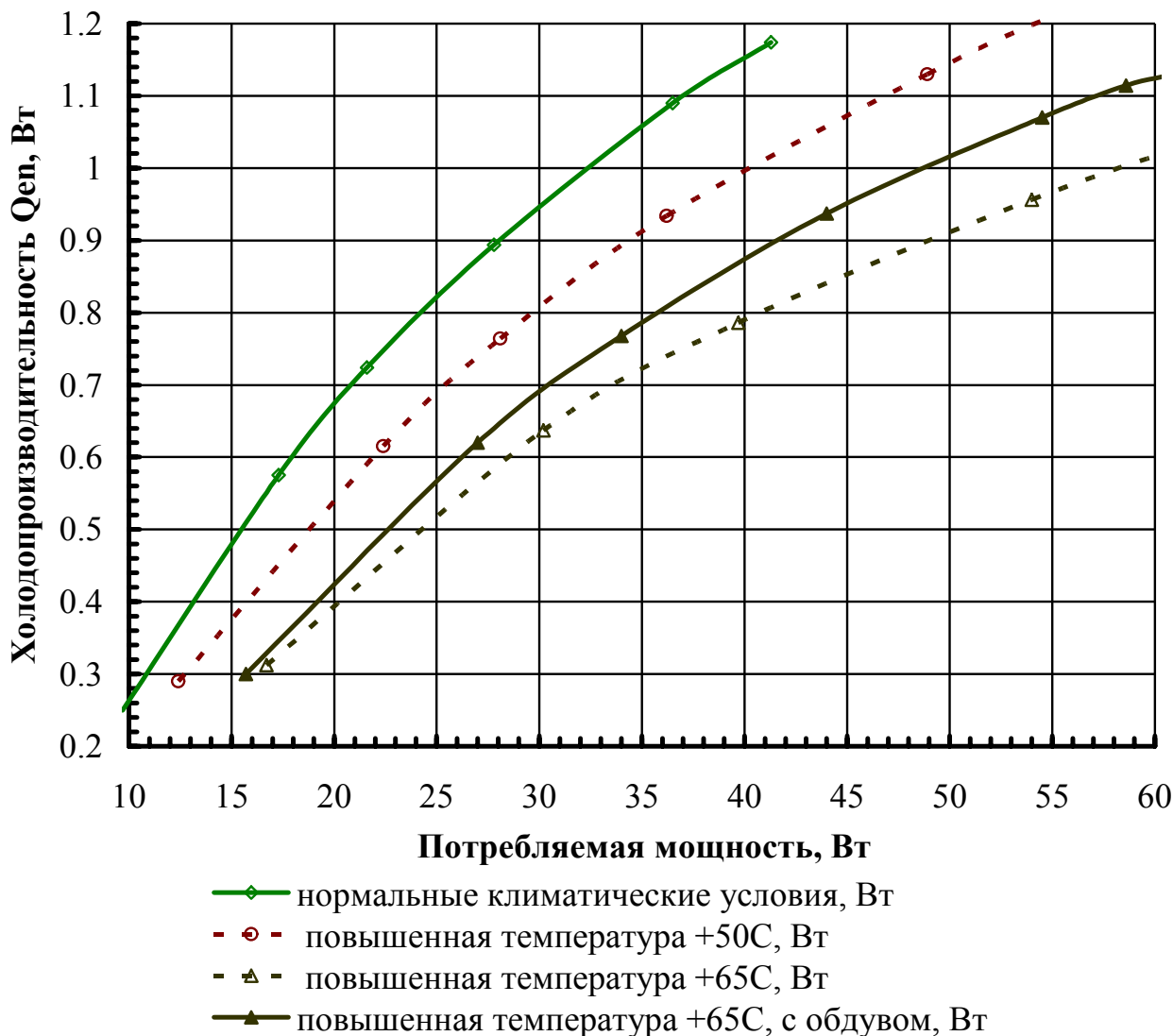


Рис. 3. Зависимость холодопроизводительности от потребляемой мощности для МКС КВО.0733.000 зав. №041322 при различных температурах окружающей среды

При автономных испытаниях МКС время выхода на рабочий режим и ее другие технические характеристики измеряются с технологическим приспособлением КВО.4554.010 с вакуумным криостатом, разработанным ООО «НТК «Криогенная техника».

Холодопроизводительность МКС определяется по формуле

$$Q = Q_1 + Q_2,$$

где Q – холодопроизводительность МКС, Вт;

Q_1 – мощность на нагревателе, эквивалентная избыточной холодопроизводительности МКС, Вт;

Q_2 – теплоприток по приспособлению КВО.4554.010 измеренный по РТМ 3-1033-77.

С целью предварительной оценки соответствия МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000 требованиям технического задания, конструкторской документации и для определения возможности предъявления МКС на государственные испытания проведены предварительные испытания на базе ООО «НТК «Криогенная техника» г. Омск в период с 07.02.2003 г. по 07.12.2004г. на 4-х образцах МКС зав. №№ 211360, 212350, 211370, 313490 по согласованной ФГУП НПО «ГИПО», ФГУП НПО «Орион» и 1969 ВП МО программе и методикам предварительных испытаний КВО.0733.000 ПМ (ПМ), включая испытания на безотказность и долговечность.

Для подтверждения средней наработки на отказ 4000 часов при испытаниях на безотказность общая наработка четырех МКС по двум циклам составила 2772 часов, наработка каждой МКС составила 693 часов, в том числе:

- при механических воздействиях - 9,5 часов;
- при воздействии повышенной влажности - 168 часов,
- при циклическом воздействии температур - 172 часов,
- при нормальных климатических условиях - 343,5 часов.

В каждом цикле осуществлялась наработка при напряжении ($24^{+0,5}$) В и (29_{-1}) В по 25% от общей наработки и 50% наработки – при номинальном напряжении ($27 \pm 0,5$) В.

Отказов МКС при суммарной наработке четырех МКС - 2772 часов не было зафиксировано.

На рисунке 4 приведены зависимости потребляемой мощности и температуры криостатирования от времени работы после включения, полученные для МКС зав. №№ 211360, 212350, 211370, 313490 после завершения испытаний на безотказность.

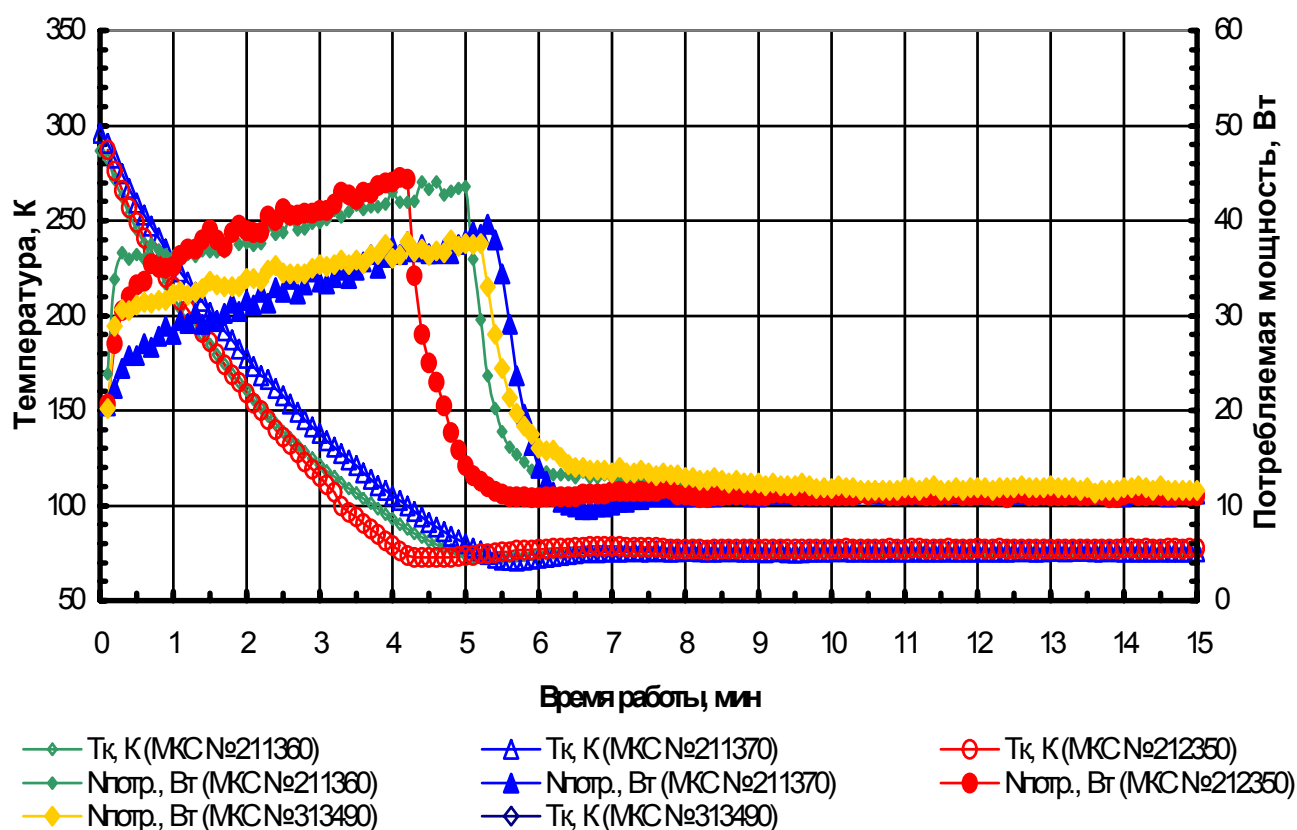


Рис. 4

При испытаниях на долговечность проведена наработка 6000 часов одной МКС в нормальных климатических условиях.

На рисунке 5 показано изменение времени выхода на режим и потребляемой мощности МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000 зав. № 211360 при испытании на долговечность. Из рисунка видно незначительное изменение параметров МКС в процессе наработки 6000 часов.

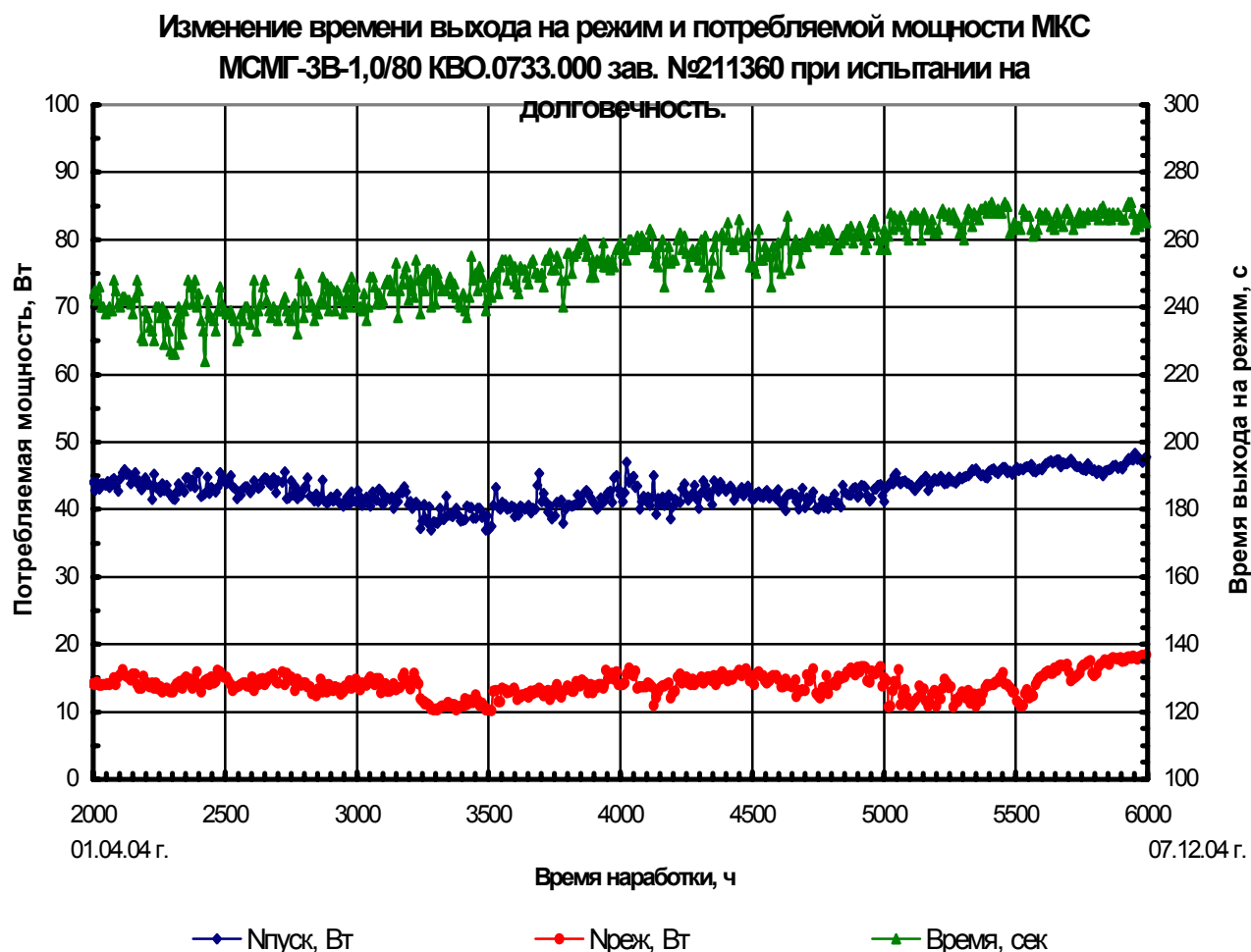
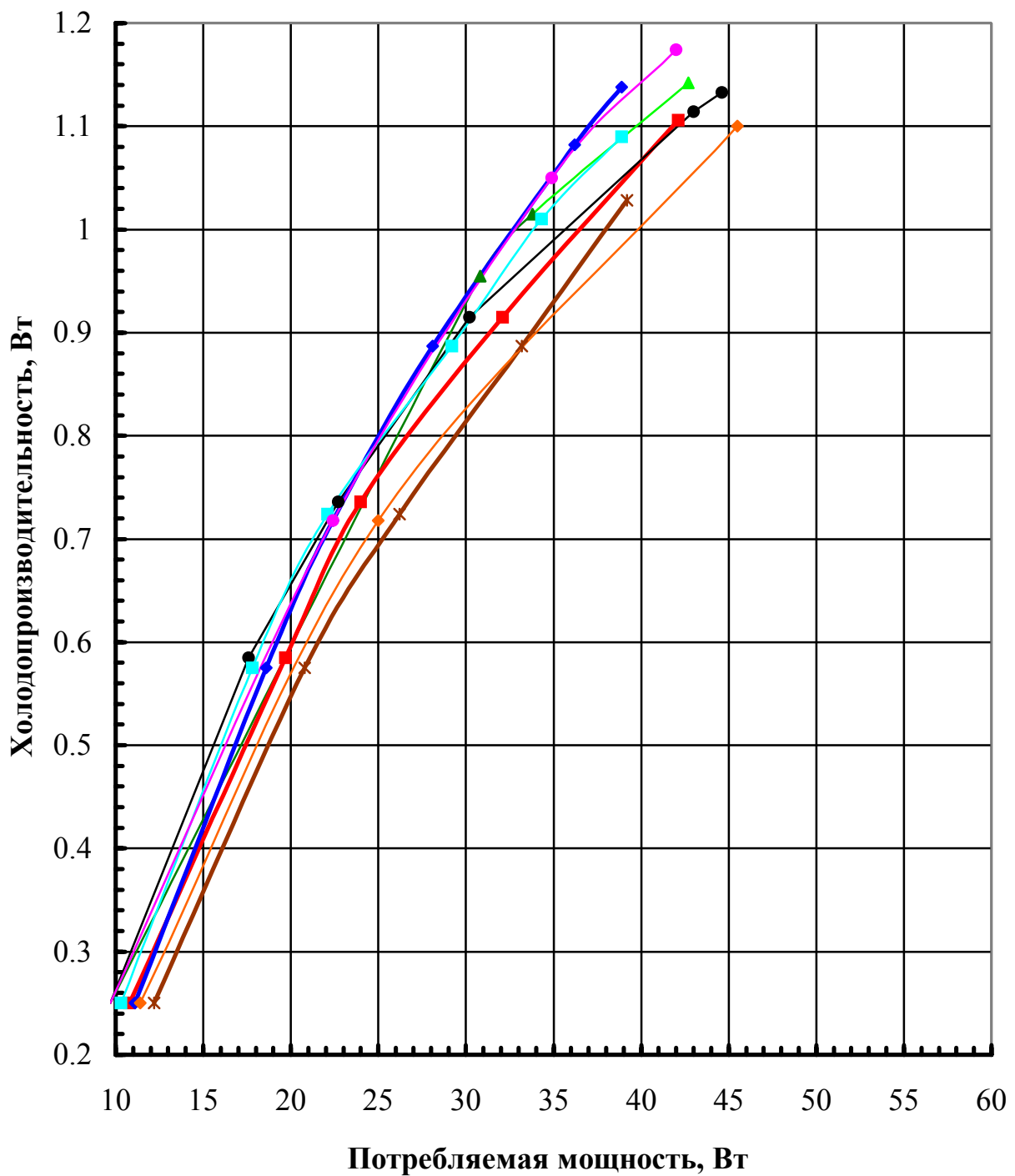


Рис. 5

Полученные в процессе испытаний параметры и технические характеристики МКС соответствуют заданным в ЧТЗ и ПМ. Отказов МКС при испытаниях не зафиксировано.

По результатам испытаний рабочей конструкторской документации МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000 присвоена литера "О", МКС допущены к проведению государственных испытаний в составе ТПВК-24Н.

2003 – 2005 г.г. предприятием ООО «НТК «Криогенная техника» было изготовлено несколько опытных образцов МКС МСМГ – 3В – 1/80 КВО.0733.000. Характеристики МКС, приведенные в таблице 2 и на рисунке 6, подтверждают, что получен достаточно стабильный результат, удовлетворяющий условиям их применения.



- ▲ МКС зав. № 211370 (23.03.05)
 ■ МКС зав. № 211360 (17.03.05)
 ● МКС зав. № 212350 (15.03.05)
- ◆ МКС зав. № 041322 (11.03.05)
 ✱ МКС зав. № 041318 (10.03.06)
 ■ МКС зав. № 041315 (27.02.06)
- МКС зав. № 313490 (20.06.03)
 ◆ МКС зав. № 044038 (15.12.03)

Рис. 6. Зависимость холодопроизводительности от потребляемой мощности для МКС КВО.0733.000 в н.к.у.

Результаты испытаний МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000.

Таблица 2

Зав. № МКС	313490	211370	212350	211360	044038	041322	041315	041318	Среднее значение	Требования ТУ
Температура окружающей среды	+65 °С									
Время достижения температуры, мин:										
100К	4'08"	4'19"	4'33"	4'01"	4'59"	3'58"	4'22"	4'33"	4'23"	не более 8
80К	5'15"	5'10"	5'33"	5'01"	5'59"	4'43"	5'28"	5'49"	5'19"	
Потребляемая мощность МКС, Вт:										
в пусковом режиме	58,6	59,4	55,1	59,4	52,8	58,8	59,4	56,7	59,3	не более 60
в рабочем режиме	17,8	16,0	15,1	15,4	16,1	14,0	16,2	18,4	16,5	не более 35
Температура окружающей среды	+23 °С									
Время достижения температуры, мин:										
100К	4'16"	4'08"	3'40"	3'17"	4'19"	3'45"	3'49"	4'01"	3'41"	не более 8
80К	3'40"	5'00"	4'27"	3'56"	5'08"	4'22"	4'42"	5'12"	4'26"	
Потребляемая мощность МКС, Вт:										
в пусковом режиме	40,1	39,4	41,3	43,2	49,1	35,6	44,8	41,6	42,9	не более 60
в рабочем режиме	10,0	11,3	9,7	9,7	11,1	9,7	10,3	12,2	10,8	не более 35
Температура окружающей среды	-60 °С									
Время достижения температуры, мин:										
100К	3'00"	2'42"	4'09"	2'41"	3'36"	4'14"	2'35"	2'50"	3'38"	не более 8
80К	4'05"	3'25"	5'08"	3'22"	4'34"	5'07"	3'22"	3'38"	4'31"	
Потребляемая мощность МКС, Вт:										
в пусковом режиме	32,4	36,8	27,5	34,8	24,4	20,2	44,0	33,0	28,8	не более 60
в рабочем режиме	6,8	6,2	6,7	6,5	5,9	8,6	7,3	6,2	7,2	не более 35

Литература

1. *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.
2. *C.S.Keung and R.Narayan* "Compact, dual-piston Stirling cryocoolers for IR imaging systems", SPIE vol. 2224, 1994, pp. 180-188.
3. *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.
4. *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