

Результаты промышленного выпуска модификаций микрокриогенной системы типа МСМГ-3А-0,6/80 КВО.0730.000.

М.В. Липин, А.В.Смирнов, Н.Н. Левшакова

ООО «НТК «Криогенная техника», Омск, Россия

В рамках Федеральной комплексно – целевой программы развития систем тепловидения и приборов ночного видения нашим предприятием разработана базовая конструкция микрокриогенной системы Сплит-Стирлинг с линейным приводом МСМГ-3А-0,6/80 КВО.0730.000, предназначенная 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 состоит из газовой криогенной машины (ГКМ), являющейся источником холода, и блока управления (БУ), управляющего работой линейного электропривода машины.

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 разработанной МКС и ее наиболее распространенных модификаций приведены в таблице 1.

Характеристики разработанной МКС полностью соответствуют требованиям 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.

Таблица 1

Технические характеристики	Модули МКС		
	КВО.0730.000 «Оператор-Ф»	КВО.0730.000-02 «Томск»	КВО.0730.000-04 «Казанка»
Диаметр / длина колодца ФП, мм	6/71	6/71	6/71
Максимальная тепловая нагрузка от ФП при температуре (80±2)К, Вт	0,6	0,6	0,6
Приведенная к температуре криостатирования суммарная охлаждаемая масса ФП, г, не более	5	5	5
Время выхода на рабочий режим, мин, не более	5	5	5
Потребляемая мощность, Вт, не более			
- в пусковом режиме	85	85	85
- в рабочем режиме	45	45	45
Питание от сети постоянного тока, В	27,5 ⁺²	27,5 ⁺²	27,5 ⁺²
Температура окружающей среды, °С	от -50 до +50		от -20 до +50
Средняя наработка на отказ, час	10000	10000	10000
Масса, кг, не более	3	3	3

МКС позволяют криостатировать фоточувствительные элементы (ФЧЭ) фотоприемных устройств различного типа на температурном уровне (80 ± 2) К при тепловой нагрузке на МКС от 0,4 до 0,9 Вт. МКС предназначена для охлаждения МФПУ с колодцем фотоприемника (ФП) диаметром 6 и глубиной 71 мм.

Соответствие МКС заданным требованиям подтверждено результатами предварительных и государственных испытаний.

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

Разработанная в ОКР «Оператор-Ф» базовая конструкция позволила в короткий срок создать несколько модификаций МКС, учитывающих особенности применения в конкретных образцах военной техники, и присвоить РКД на них

литеры «О» и «О₁». Наибольшим спросом пользуются исполнения МКС МСМГ-3А-0,6/80 КВО.0730.000-02 для изделия «Томск» (рис. 1) и МСМГ-3А-0,6/80 КВО.0730.000-04 для изделия «Казанка» (рис. 2).

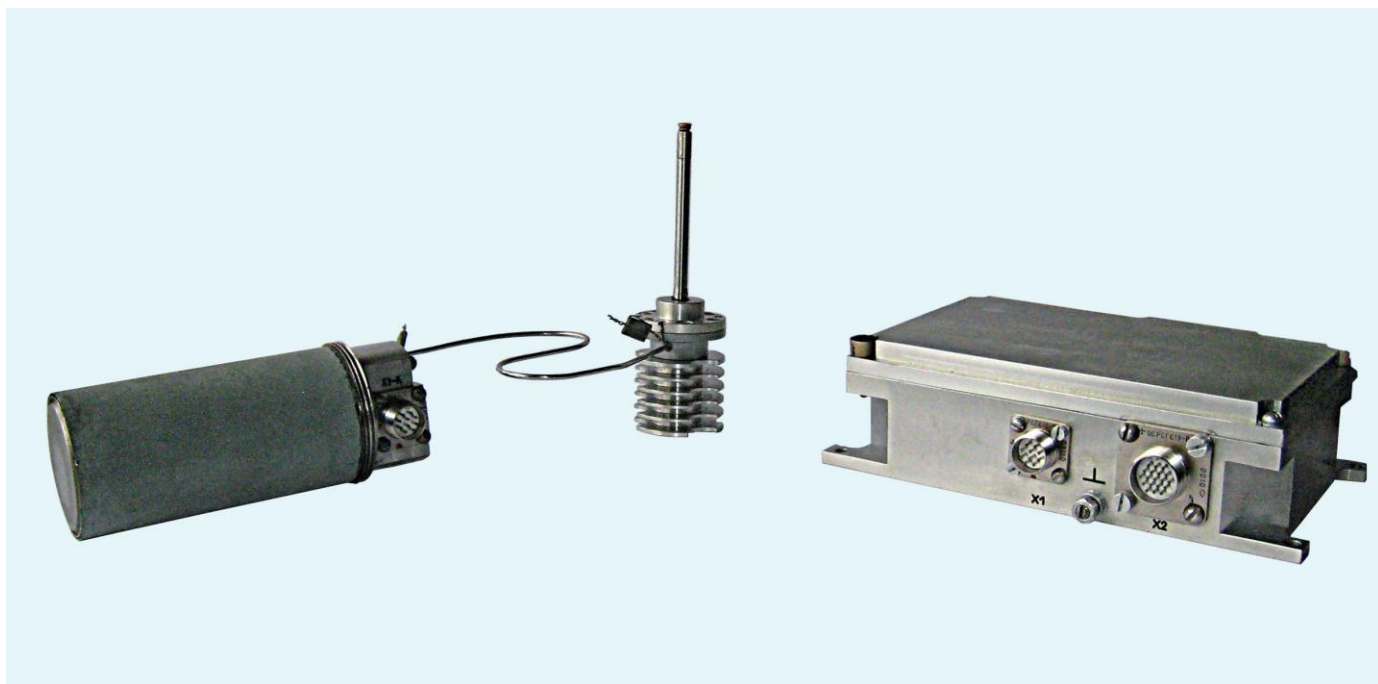


Рис. 1. МКС МСМГ-3А-0,6/80 КВО.0730.000-02 для изделия «Томск»

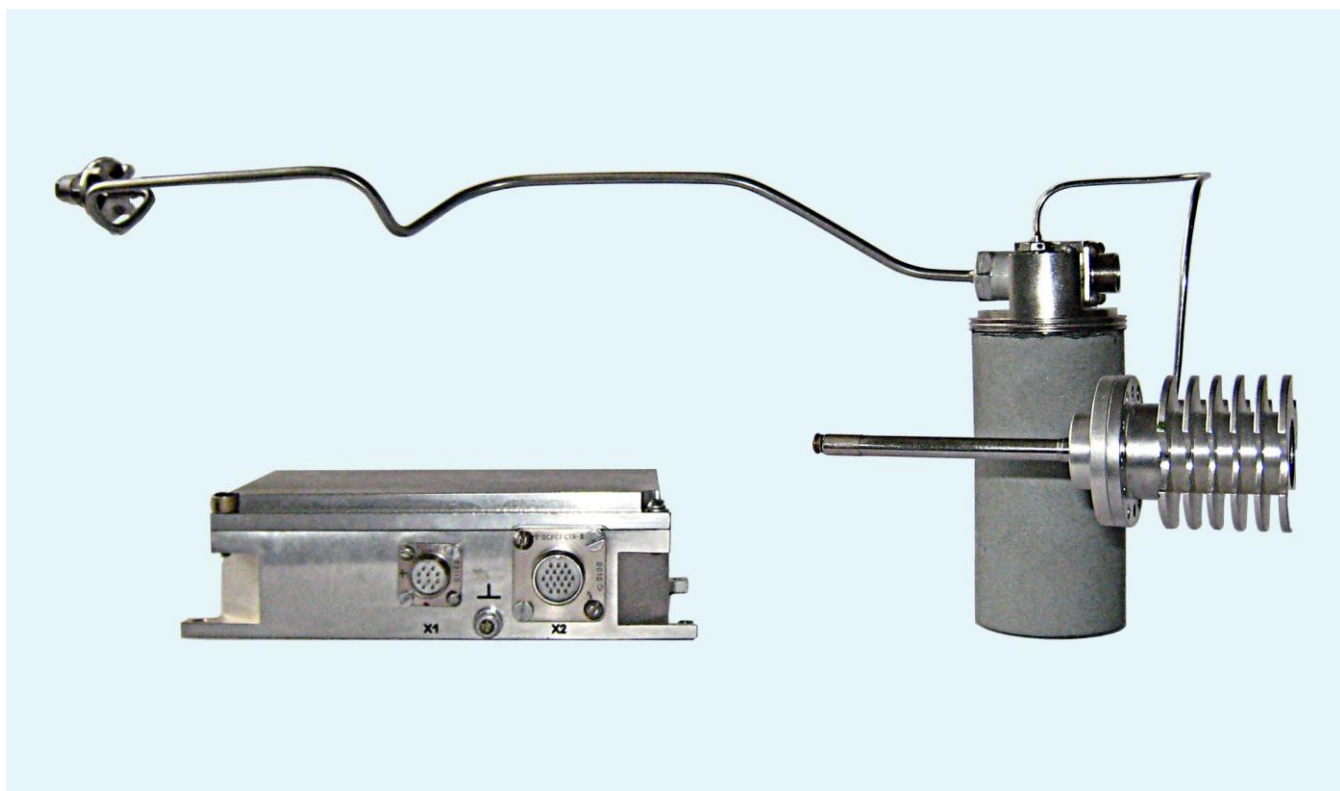


Рис. 2. МКС МСМГ-3А-0,6/80 КВО.0730.000-04 для изделия «Казанка»

В 2005 – 2010 г.г. предприятием ООО «НТК «Криогенная техника» было изготовлено несколько партий МКС этих модификаций. В таблицах 2, 3 приведены средние значения характеристик МКС, полученные в процессе приемосдаточных испытаний изготовленных партий по годам выпуска, в табл. 2 - результаты испытаний МКС МСМГ-3А-0,6/80 КВО.0730.000-02 («Томск»), в табл. 3 - результаты испытаний МКС МСМГ-3А-0,6/80 КВО.0730.000-04 («Казанка»)

Таблица 2

Зав. № МКС	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.	Требование ТУ
Температура окружающей среды	+50 °С				
Время достижения температуры, мин:					
100К	4'08"	3'37"	3'43"	3'51"	не более 5
80К	5'07"	4'24"	4'42"	4'46"	
Потребляемая мощность МКС, Вт:					
в пусковом режиме	73,27	74,14	74,42	66,08	не более 85
в рабочем режиме	29,66	25,97	26,57	26,7	не более 45
Температура окружающей среды	+23 °С				
Время достижения температуры, мин:					
100К	3'44"	3'13"	3'16"	3'21"	
80К	4'28"	3'49"	4'04"	4'16"	
Потребляемая мощность МКС, Вт:					
в пусковом режиме	65,32	67,40	64,64	59,32	
в рабочем режиме	24,29	21,86	21,78	22,14	
Температура окружающей среды	-50 °С				
Время достижения температуры, мин:					
100К	3'26"	2'46"	2'34"	3'08"	
80К	4'12"	3'26"	3'19"	4'02"	
Потребляемая мощность МКС, Вт:					
в пусковом режиме	37,96	38,55	41,28	31,66	
в рабочем режиме	14,39	13,57	11,77	12,06	

Таблица 3

Зав. № МКС	2004 г.	2005 г.	2006 г.	2007 г.	2008 г.	Требование ТУ
Температура окружающей среды	+50 °С					
Время достижения температуры, мин:						
100К	3'19"	3'56"	3'42"	4'26"	3'57"	не более 5
80К	3'56"	4'43"	4'37"	5'01"	4'38"	
Потребляемая мощность МКС, Вт:						
в пусковом режиме	74,65	63,0	56,78	49,68	71,30	не более 85
в рабочем режиме	23,95	25,67	22,18	23,17	26,63	не более 45
Температура окружающей среды	+23 °С					
Время достижения температуры, мин:						
100К	2'59"	3'23"	3'30"	3'47"	3'36"	
80К	3'30"	4'00"	4'10"	4'30"	4'18"	
Потребляемая мощность МКС, Вт:						
в пусковом режиме	68,7	55,72	49,78	46,87	63,33	
в рабочем режиме	20,1	19,58	17,39	18,90	20,88	
Температура окружающей среды	-40 °С					
Время достижения температуры, мин:						
100К	2'38"	2'54"	3'22"	3'41"	2'46"	
80К	3'13"	3'29"	4'03"	4'25"	3'26"	
Потребляемая мощность МКС, Вт:						
в пусковом режиме	38,38	32,61	30,66	39,12	45,29	
в рабочем режиме	12,11	9,66	9,76	14,91	15,00	

Типовые диаграммы, показывающие изменение потребляемой мощности и температуры криостатирования в начальный период работы МКС приведены на рисунках 3 и 4.

Зависимости холодопроизводительности от потребляемой мощности изготовленных за этот период МКС КВО.0730.000-02 и КВО.0730.000-04 при температуре окружающей среды +50°С приведены на рисунках 5, 6, 7, 8, 9.

Приведенные характеристики МКС подтверждают, что получен достаточно стабильный результат, удовлетворяющий условиям применения этих модификаций.

Изменение потребляемой мощности и температуры криостатирования от времени работы для МКС МСМГ-3А-0.6/80 КВО.0730.000-02 ("Томск") № 094081

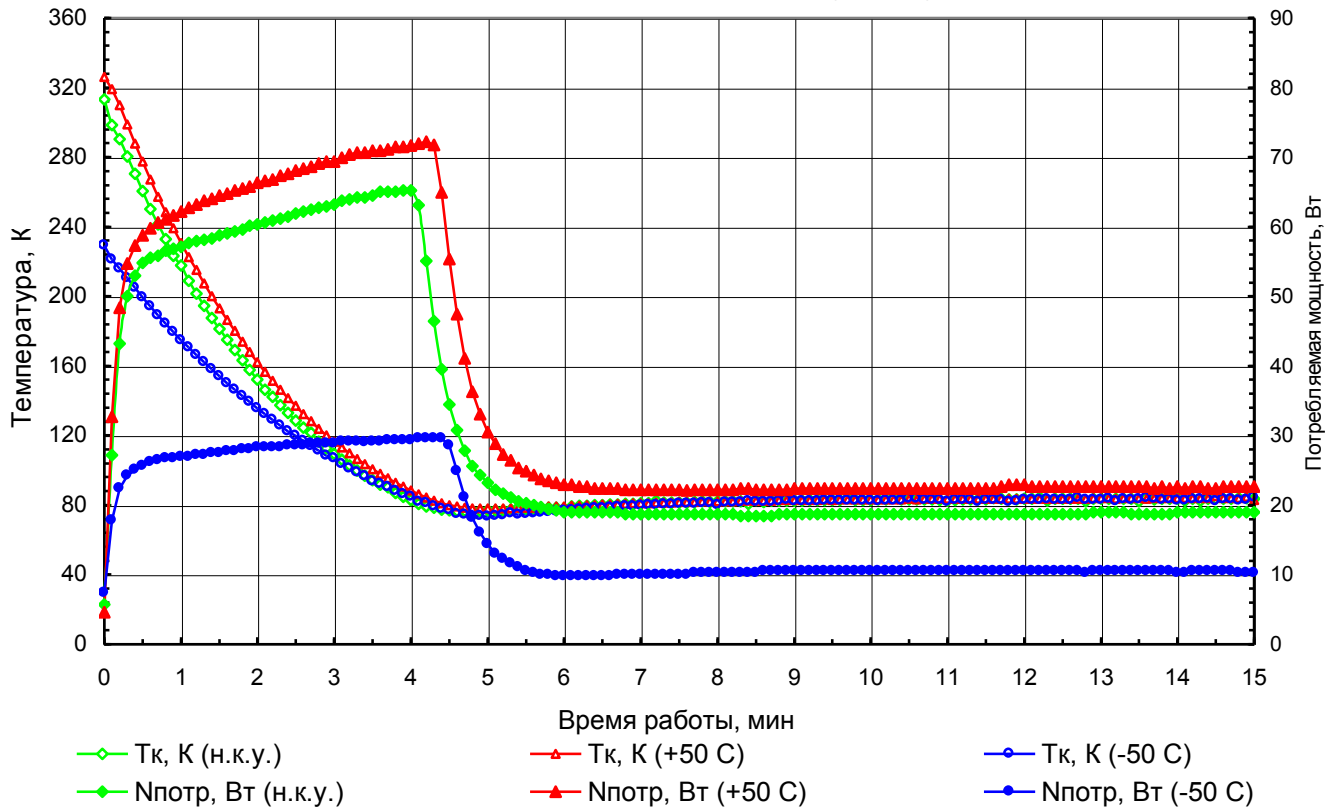


Рис. 3

Изменение потребляемой мощности и температуры криостатирования от времени работы для МКС МСМГ-3А-0.6/80 КВО.0730.000-04 ("Казанка") № 084340

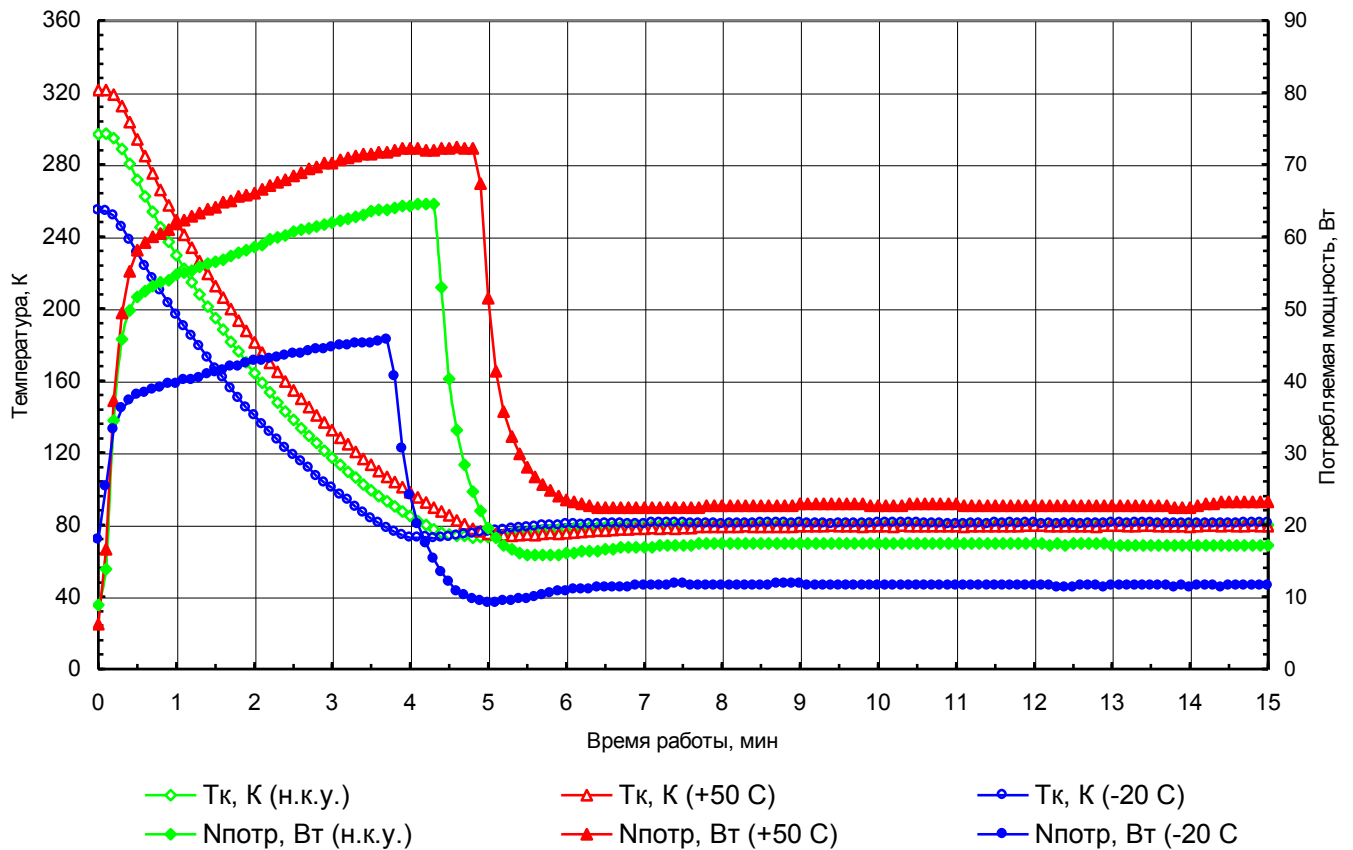
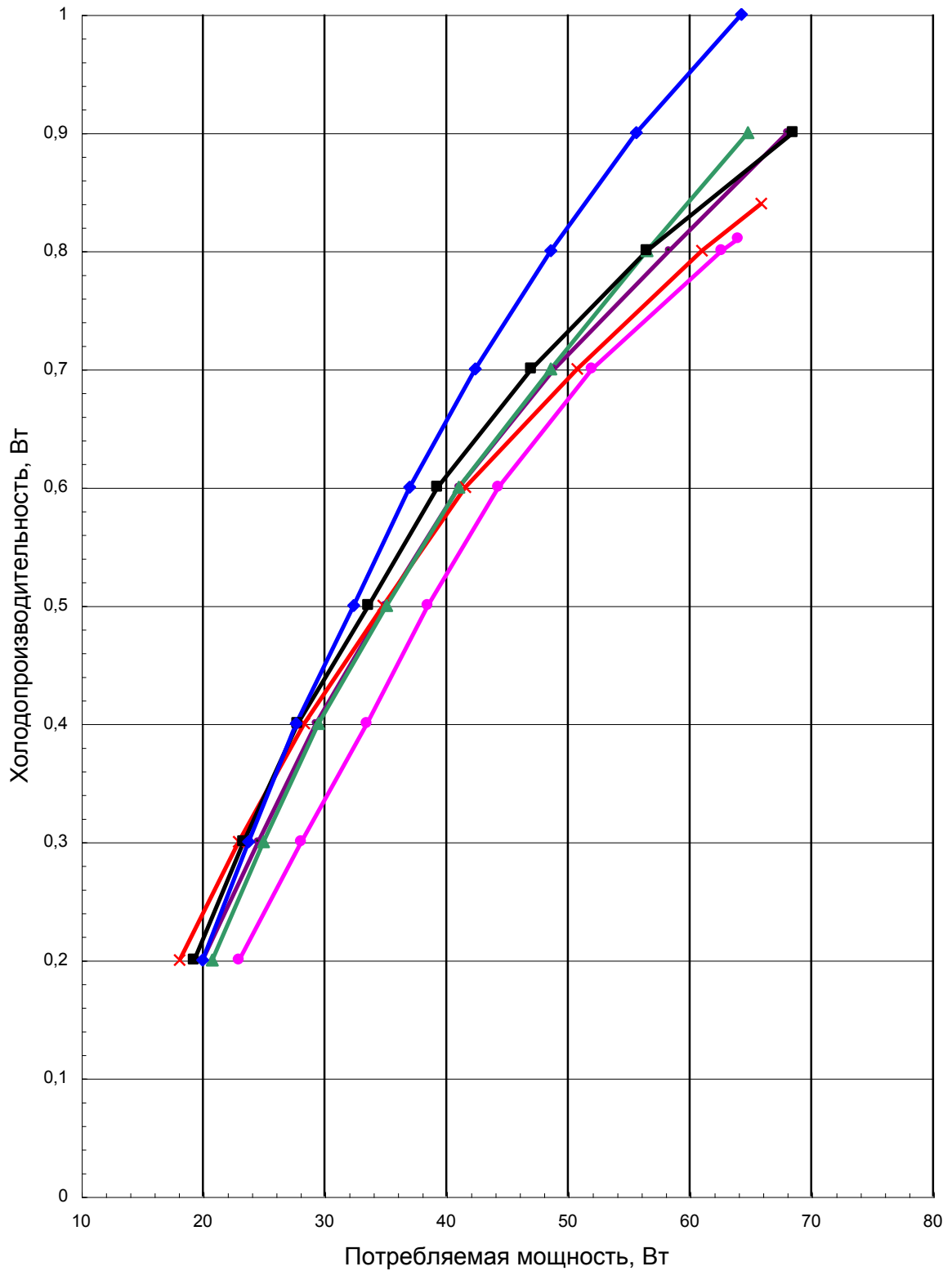


Рис. 4

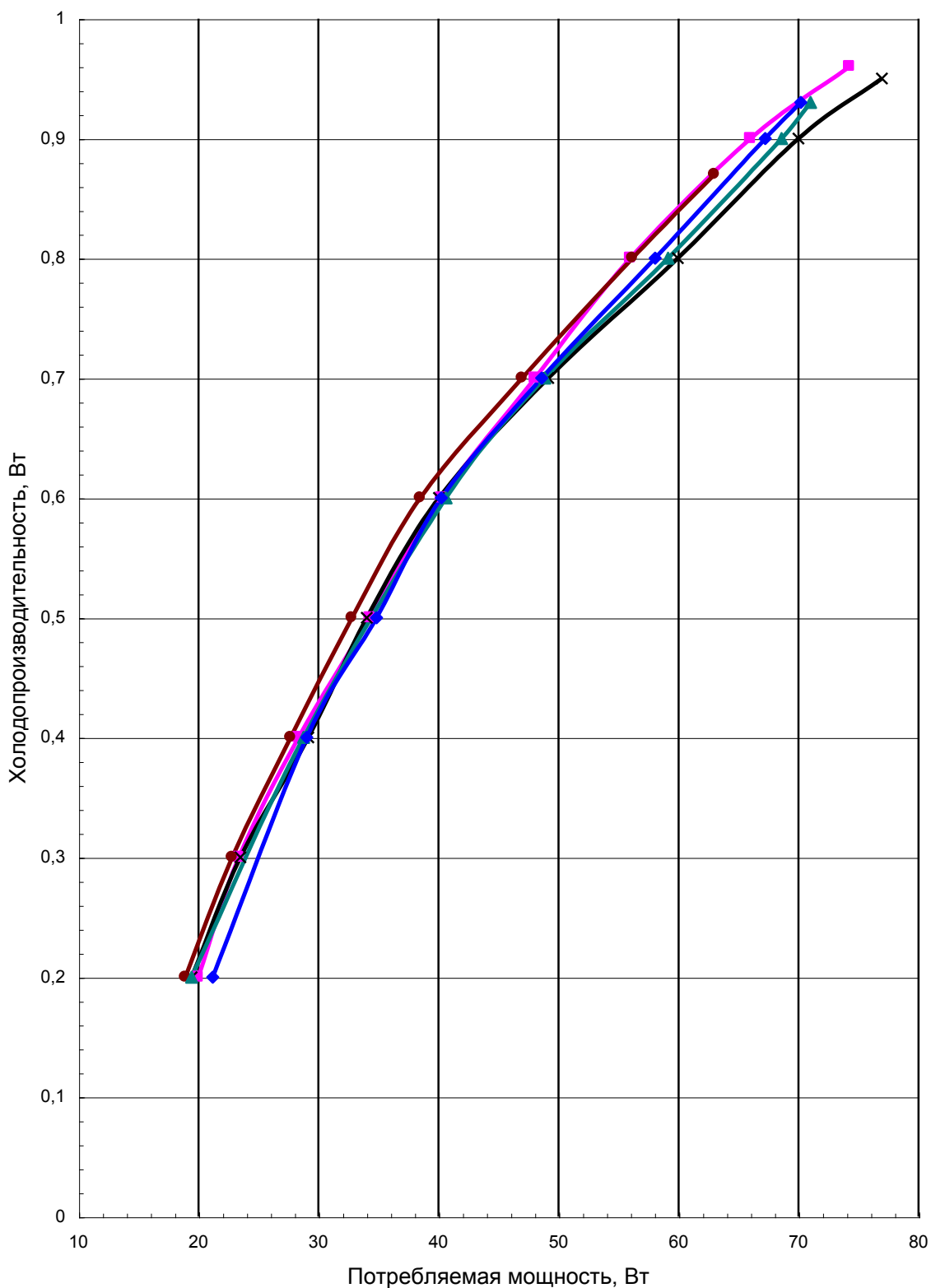
Зависимость холодопроизводительности от потребляемой мощности для
МКС КВО.0730.000-02 ("Томск-1Ф") партии 2007 - 2008г.г. при +50°С



- МКС зав. № 074142 (13.03.07)
- МКС зав. № 074193 (15.08.07)
- МКС зав. № 084073 (31.07.08)
- ×— МКС зав. № 074143 (16.03.07)
- ▲— МКС зав. № 084010 (29.02.08)
- ◆— МКС зав. № 084274 (05.08.08)

Рис. 5

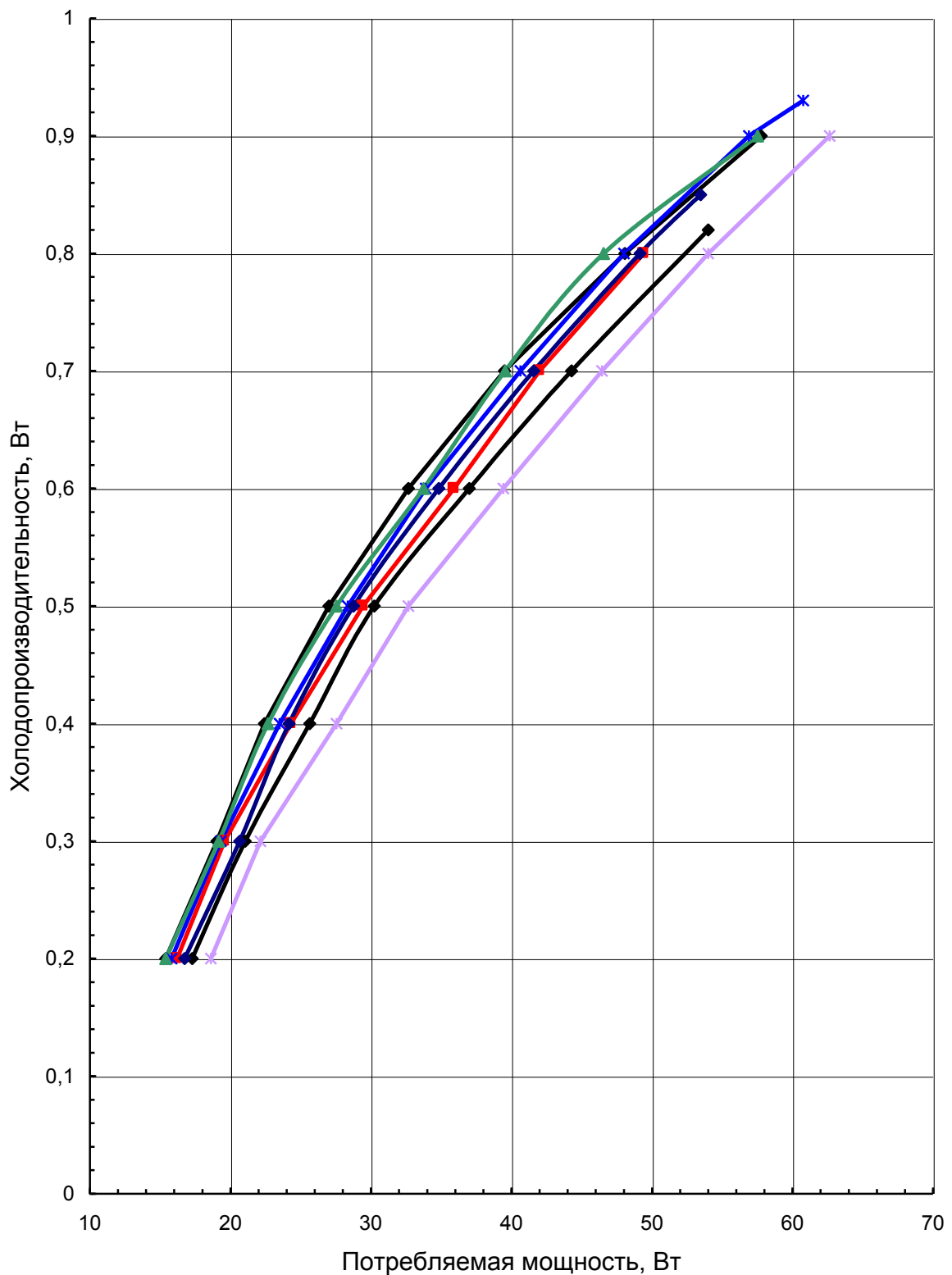
Зависимость холодопроизводительности от потребляемой мощности для
МКС КВО.0730.000-02("Томск-1Ф") партии 2009г. при +50°С



- МКС зав. № 094078 (13.05.09)
- МКС зав. № 094080 (15.04.09)
- ◆ МКС зав. № 094108 (16.07.09)
- × МКС зав. № 094079 (15.07.09)
- ▲ МКС зав. № 094081 (08.06.09)

Рис. 6

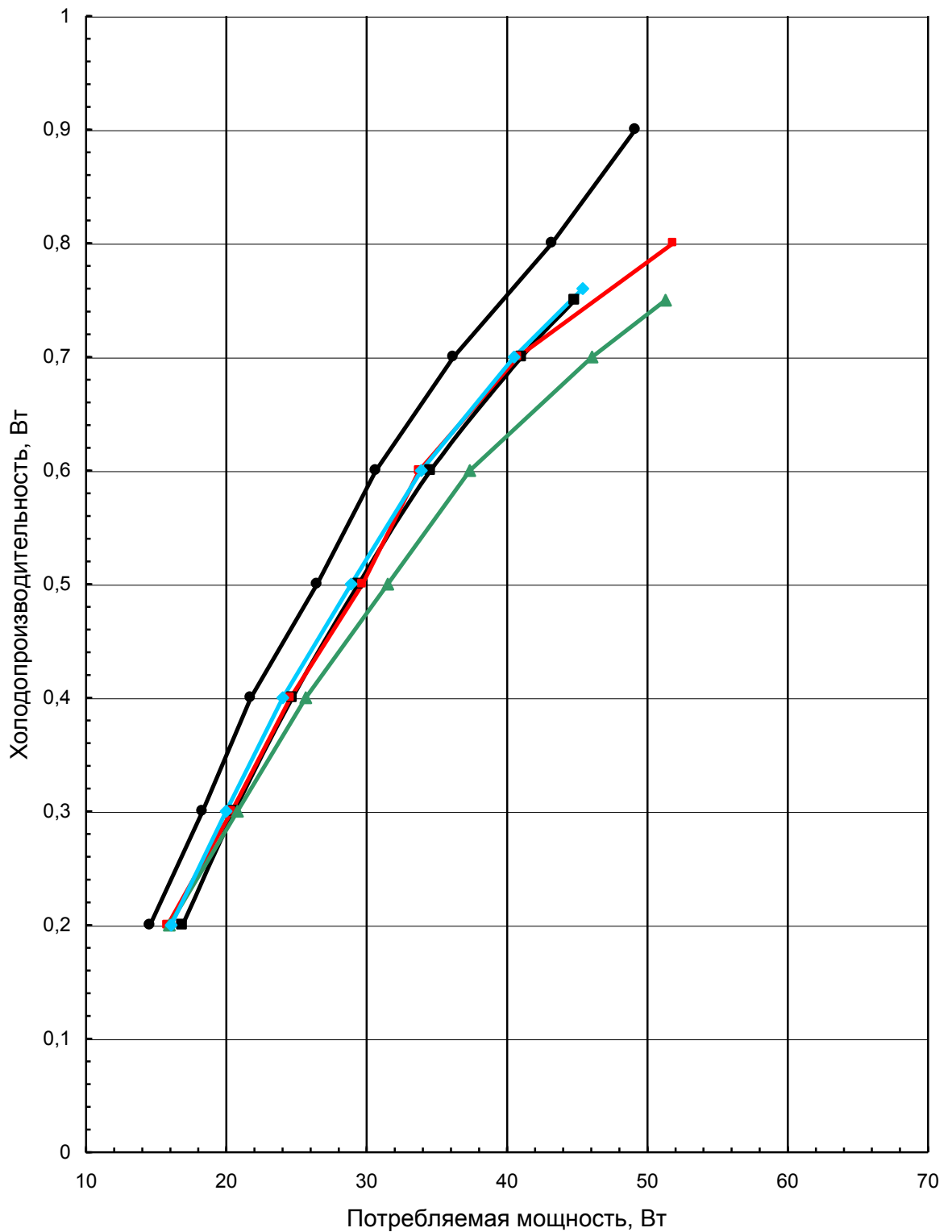
Зависимость холодопроизводительности от потребляемой мощности для
МКС КВО.0730.000-01 ("Казанка") партии 2006г. при +50 °С



- ◆— МКС зав. № 054456 (15.12.05)
- МКС зав. № 054322 (08.06.06)
- ×— МКС зав. № 064062 (29.03.06)
- ◆— МКС зав. № 064013 (14.06.06)
- ×— МКС зав. № 064053 (04.09.06)
- ◆— МКС зав. № 064391 (13.11.06)
- ▲— МКС зав. № 064392 (14.11.06)

Рис. 7

Зависимость холодопроизводительности от потребляемой мощности для
 МКС КВО.0730.000-04 ("Казанка") партии 2007г. при +50 °С



- МКС зав. № 074146 (04.05.07)
- МКС зав. № 074147 (07.05.07)
- ▲ МКС зав. № 074148 (17.05.07)
- ◆ МКС зав. № 074149 (23.05.07)
- МКС зав. № 0741150 (06.06.07)

Рис. 8

Зависимость холодопроизводительности от потребляемой мощности для
 МКС КВО.0730.000-04 ("Казанка") партии 2008г. при +50 °С

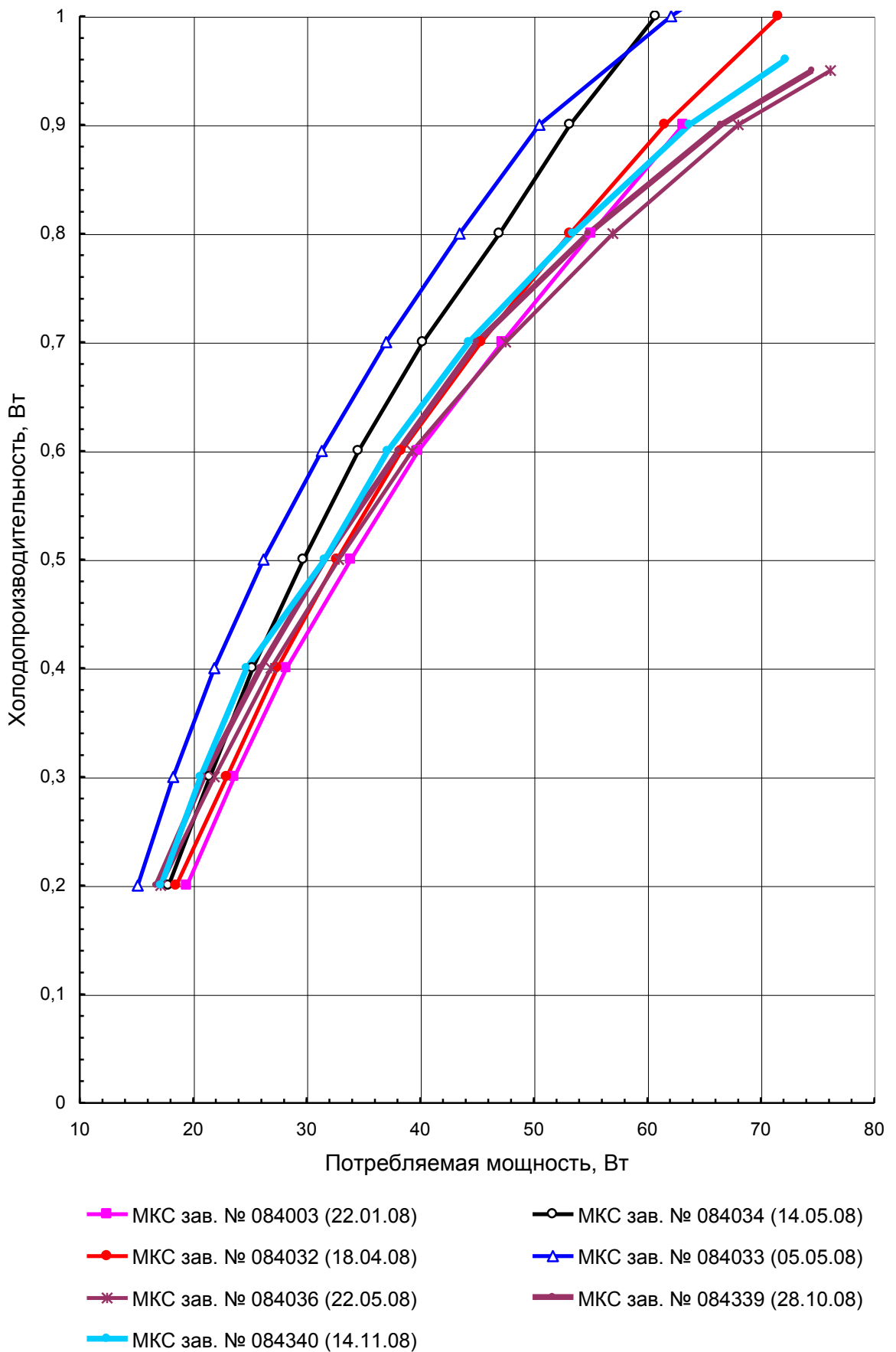


Рис. 9

Для исследования диапазона разброса характеристик охладителей КВО.0664.03.000-05, входящих в состав МКС КВО.0730.000-02, были проведены сравнительные испытания пяти охладителей из партии изготовленных в 2009 г. Испытания проводились на одном и том же компрессоре КВО.0664.02.000 зав. №299, блоке управления КВО.8039.000 и имитаторе КВО.4540.010-01 зав. № 204.

Результаты испытаний (табл.4, рисунки 8-10) показали, что разброс составил не более 17%.

Таблица 4

Зав. № МКС	№ охладителя					Среднее значение	Разброс результатов	% от среднего значения
	46	48	50	53	54			
Температура окружающей среды	+50 °С							
Время достижения температуры, мин:								
100К	3'59"	3'54"	3'43"	4'02"	4'17"	3'59"	34"	14 %
80К	4'56"	4'55"	4'39"	5'05"	5'28"	5'01"	49"	16 %
Потребляемая мощность МКС, Вт:								
в пусковом режиме	63,26	63,99	62,73	63,48	62,4	62,99	1,59	2,5 %
в рабочем режиме	22,74	24,17	22,13	23,79	23,31	23,23	2,04	8,8 %
Температура окружающей среды	+23 °С							
Время достижения температуры, мин:								
100К	3'14"	3'22"	3'16"	3'19"	3'35"	3'21"	21"	10,5 %
80К	4'01"	4'14"	4'04"	4'00"	4'31"	4'10"	31"	12,4 %
Потребляемая мощность МКС, Вт:								
в пусковом режиме	59,13	59,27	60,09	59,94	59,31	59,55	0,56	0,94 %
в рабочем режиме	16,80	19,78	19,52	17,55	20,10	18,75	3,3	17,6 %
Температура окружающей среды	-50 °С							
Время достижения температуры, мин:								
100К	2'44"	2'56"	2'44"	2'48"	3'08"	2'52"	24"	13,9 %
80К	3'29"	3'45"	3'30"	3'31"	4'05"	3'40"	36"	16,36 %
Потребляемая мощность МКС, Вт:								
в пусковом режиме	31,16	29,54	32,4	31,86	30,10	31,01	2,46	7,9 %
в рабочем режиме	8,98	8,16	8,91	9,18	8,5	8,75	1,02	11,65 %
Максимальная холодопроизводительность, $Q_{+50}^{\circ\text{C}}$, Вт (без учета отходящих паров)	0,996	0,898	0,913	0,913	0,857	0,915		

Зависимость холодопроизводительности от потребляемой мощности для МКС КВО.0730.000-02 ("Томск-1Ф") при +50°С

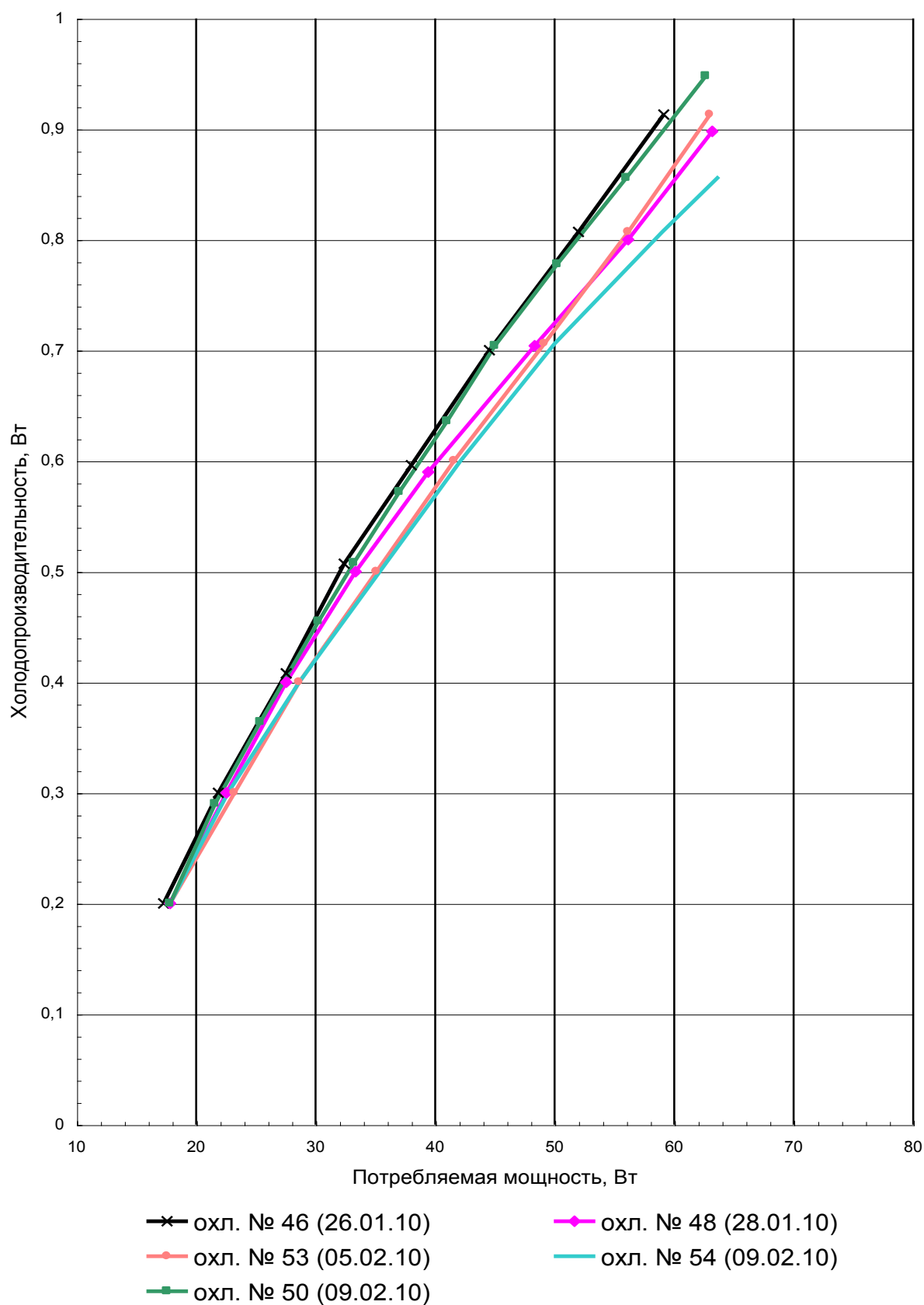


Рис. 10

Изменение потребляемой мощности и температуры криостатирования от времени работы для разных охладителей с компрессором № 299 в н.к.у.
 БУ КВО.8044.000 $P_k=2.3$ МПа

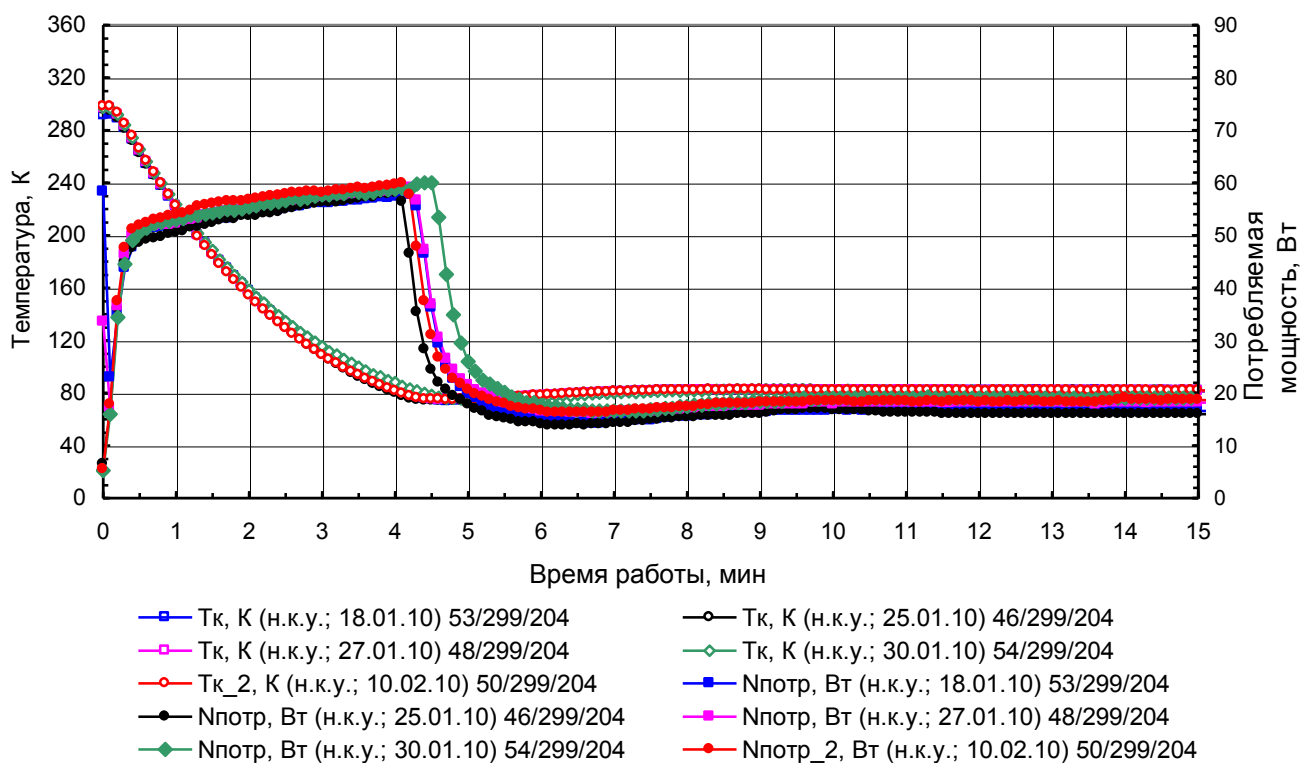


Рис. 11

Изменение потребляемой мощности и температуры криостатирования от времени работы для разных охладителей с компрессором № 299 при +50°C
 БУ КВО.8044.000 $P_k=2.3$ МПа

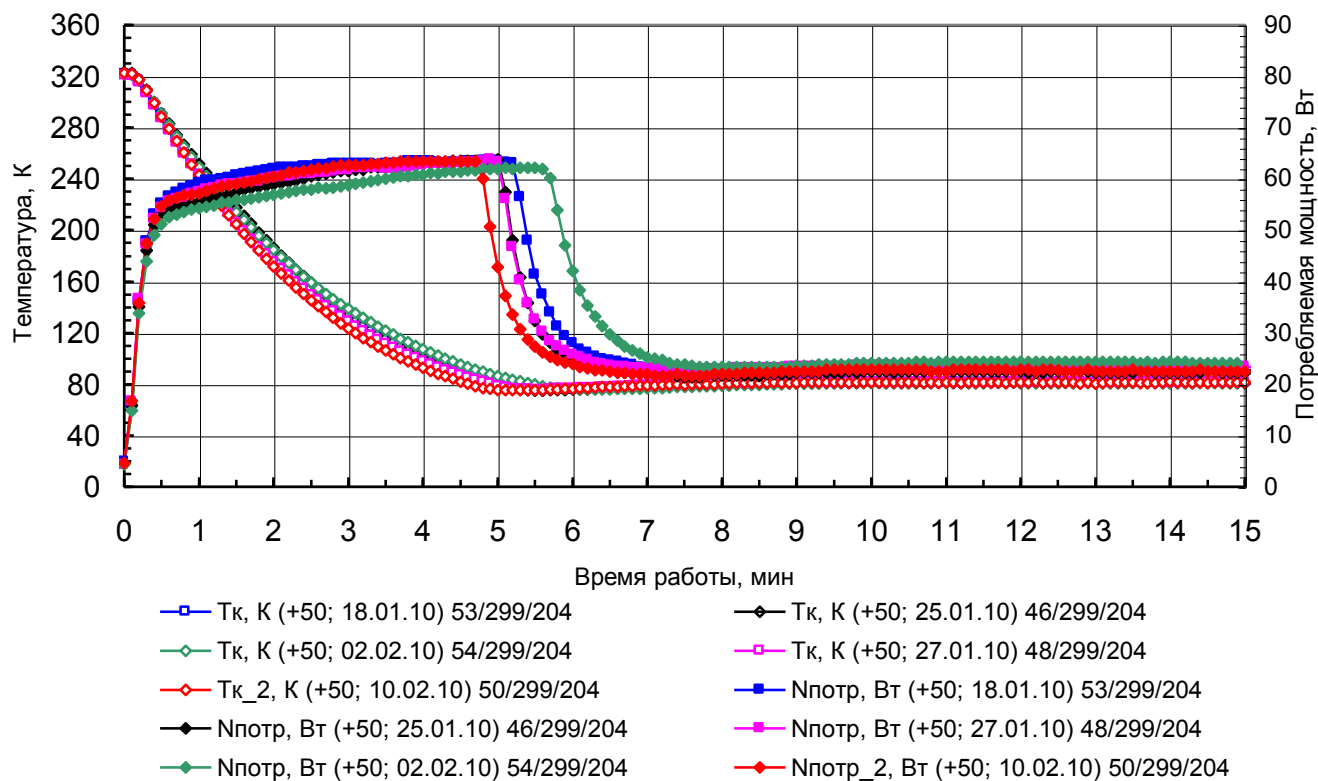


Рис.12