



ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ВСЕХ
ВИДОВ ИСПЫТАНИЙ
ООО «САНТЕК 2» (Москва)
Т/ф: (495) 664 2723/24/25
stk@santek2.ru, santek2@yandex.ru
www.santek2.ru

УДК 621.565.8

Каскадная холодильная установка для термобарокамеры ТВВ-8000

Ю.Б. ПРЖЕТИШЕВСКИЙ,
главный инженер ООО «ОРТЭКС»

One of German-built TBV-8000 chambers for low-temperature and vacuum tests manufactured by ILKA company has been upgraded and supplied with a new refrigeration plant employing R404A/R23 refrigerants instead of R12/R22. The unitary cold box is provided with an outdoor air-cooled upper cascade condenser and the lower cascade evaporating air-cooler placed within the chamber.

The main characteristics of the plant able to maintain -70°C are listed; its operation and test results are described and evaluated. Application of scroll compressors instead of the piston machines previously used has been justified. The upgraded plant has shorter cool-down time and lower energy consumption than the previous one, and needs no cooling water.

ООО «САНТЕК2» поставляет различное испытательное оборудование, в том числе климатические камеры разных объемов для широких диапазонов температур, а также выполняет работы по модернизации термобарокамер, т.е. замену морально устаревшего холодильного оборудования, систем нагрева, вакуумных систем и контрольно-измерительных приборов.

Особо остро стоит вопрос о модернизации закупленных в 80-е годы прошлого века термобарокамер марки ТВВ-8000 (рис. 1) немецкой фирмы ILKA (внутренний объем 8 м^3 , обеспечиваемые температуры: $-60\dots +100^{\circ}\text{C}$). Холодильные установки для этих камер, работающие на R12 и R22, укомплектованы девятью сальниковыми поршневыми ком-

прессорами типа K1202 с ременной передачей, которые уже сняты с производства. Запасных частей для них нет.

К тому же установки малоэффективны, энергоемки, с медленным выходом на рабочий режим, большим расходом воды и т.д.

ООО «САНТЕК2» с участием ООО «ОРТЭКС» модернизировали термобарокамеры ТВВ-8000 на предприятии ЗАО «АВИАСТАР-СП» в г. Ульяновске и в НИИ приборостроения имени В.В.Тихомирова в г. Жуковском. Для охлаждения и поддержания температуры воздуха в камере до -70°C была смонтирована каскадная холодильная установка на базе двух одноступенчатых машин: нижней ветви каскада со спиральным компрессором ZF40KE-TWD



Рис. 1. Термобарокамера ТВВ-8000

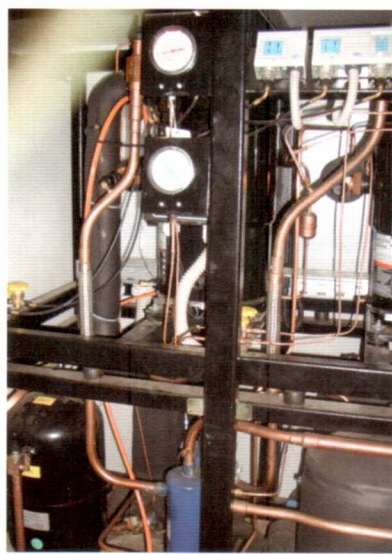


Рис. 2. Основной блок холодильной установки

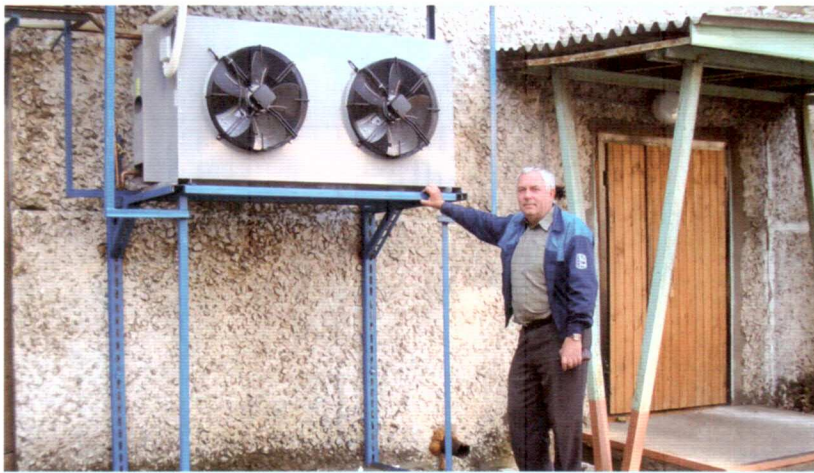


Рис. 3. Выносной воздушный конденсатор (верхняя ветвь каскада)

фирмы Copeland на хладагенте высокого давления R23 и верхней ветви со спиральным компрессором ZF48KE-TWD той же фирмы на хладагенте умеренного давления R404A.

Установка выполнена как единый блок (рис. 2), к которому подсоединены выносной воздушный конденсатор CRH32 фирмы «Саргіа Сагаа» (рис. 3) верхней ветви каскада и воздухоохладитель (рис. 4) нижней ветви. Электрический щит управления (рис. 5) смонтирован на каркасе основного блока. В термобарокамере предусмотрены ТЭНы для проведения тепло-

вых процессов и для создания дополнительной тепловой нагрузки при работе холодильной установки на «холод».

Схема каскадной установки приведена на рис. 6. Воздухоохладитель 7 нижней ветви рассчитан и конструктивно выполнен так (см. рис. 4), чтобы он вписывался в конструкцию термобарокамеры со встроенным вентиляторным узлом (частота вращения вентилятора 720 об/мин, диаметр 800 мм).

Межкаскадный пластинчатый теплообменник 3 фирмы «Альфа Лаваль Поток» рассчитан на холодопроизводительность около



Рис. 4. Воздухоохладитель (нижняя ветвь каскада) внутри камеры



Рис. 5. Электрический щит управления установкой

10 кВт при температуре конденсации хладагента R23 $t_k = -20^\circ\text{C}$ в нижней ветви каскада и температуре кипения хладагента R404A -25°C в верхней ветви. Байпасная линия с регулирующим 12 и соленоидным 11 вентилями (см. рис. 6) используется для регулирования холодопроизводительности. Расширительный вентиль 10 регулирует поток хладагента R23, поступающий на всасывание из расширительной емкости 8, и защищает от понижения давления в момент запуска компрессора нижней ветви. Во время стоянки установки расширительная емкость 8 предотвращает рост давления хладагента R23 выше заданного значения (например, 15...18 бар). В машине верхней ветви каскада байпасная линия с соленоидным вентилем 26 предназначена для впрыска жидкого хладагента R404A в компрессор для его охлаждения, а байпасная линия с регулятором 28 – для регулирования

Техническая характеристика модернизированной холодильной установки

Холодопроизводительность* компрессора нижней ступени ZF40KE-TWD (R23, $t_k = -20^\circ\text{C}$), кВт, при температуре кипения t_0 , $^\circ\text{C}$:	
-80	7,72
-75	10,53
-70	12,94
Потребляемая мощность* электродвигателя компрессора нижней ветви, кВт, при тех же условиях:	
-80	6,56
-75	6,89
-70	7,24
Холодопроизводительность компрессора верхней ветви ZF48K4E-TWD (R404A, $t_0 = -25^\circ\text{C}$; $t_k = +40^\circ\text{C}$), кВт	
	15,56
Потребляемая мощность электродвигателя компрессора верхней ветви ZF48KE-TWD при тех же условиях, кВт	
	9,9
Установленная мощность электродвигателя воздухоохладителя (электродвигатель стационарно закреплен на корпусе термобарокамеры), кВт	
	6
Потребляемая мощность электродвигателей вентиляторов (2 шт.) конденсатора CRH32, кВт	
	1,56
Габаритные размеры, мм:	
холодильного блока	3000×1200×2000
выносного воздушного конденсатора	1400×600×500
воздухоохладителя	1200×1030×380

* Значения холодопроизводительности и потребляемой мощности, взятые из каталога «Компрессоры Copeland для каскадных холодильных машин», по заявлению фирмы являются предварительными.

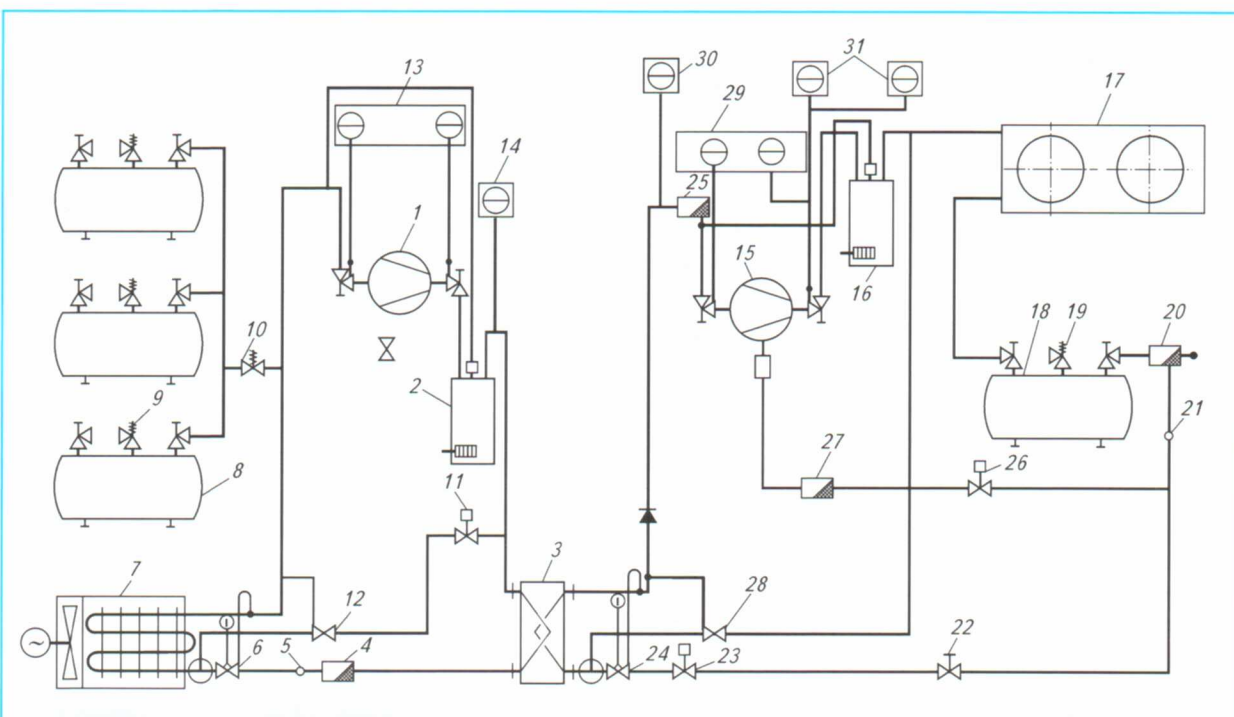


Рис. 6. Схема каскадной установки.

Нижняя ветвь каскада:

1 – спиральный компрессор; 2 – маслоотделитель; 3 – межкаскадный теплообменник (конденсатор-испаритель); 4 – фильтр-осушитель; 5 – индикатор влажности; 6 – терморегулирующий вентиль; 7 – воздухоохладитель; 8 – расширительная емкость; 9 – предохранительный клапан; 10 – расширительный вентиль; 11 – соленоидный вентиль; 12 – регулирующий вентиль; 13 – двойное реле давления; 14 – реле высокого давления для циклического запуска компрессора.

Верхняя ветвь каскада:

15 – спиральный компрессор; 16 – маслоотделитель; 17 – выносной воздушный конденсатор; 18 – ресивер; 19 – предохранительный клапан; 20 – фильтр-осушитель; 21 – индикатор влажности; 22 – запорный вентиль; 23, 26 – соленоидные вентили; 24 – терморегулирующий вентиль; 25 – разборный фильтр-осушитель; 27 – фильтр-осушитель; 28 – регулятор; 29 – двойное реле давления; 30 – реле низкого давления для запуска машины нижней ветви; 31 – реле высокого давления для управления вентиляторами выносного конденсатора

производительности межкаскадного теплообменника.

Оперативное управление каскадной установкой и термобарокамерой с целью поддержания заданной температуры воздуха в термобарокамере обеспечивается одновременно двумя регуляторами температуры: один поддерживает заданную температуру в термобарокамере в режиме ПИД-регулирования путем включения и выключения соленоидного вентиля 11 на байпасной линии и соответственно импульсной подачи перегретых паров R23 в воздухоохладитель; второй управляет включением и выключением ТЭНов.

Машина верхней ветви имеет реле высокого давления 31 для управления электродвигателями вентиляторов выносного конденсатора. Защиту от высокого

и низкого давления в каждой ветви каскада обеспечивают двухблочные реле давления 13 и 29, а защиту от перегрева компрессора и электродвигателя выполняет электронный модуль INT69SCY, к которому подсоединены пять датчиков тепловой защиты. Один датчик, ввернутый в неподвижную спираль компрессора, настроен на отключение цепи управления компрессора при повышении температуры нагнетания хладагента до 140 °С и включение этой цепи при 91 °С. Три термисторных датчика на статоре электродвигателя вблизи всасывающего вентиля настроены на отключение при 80 °С, а еще один встроены в нижнюю часть обмотки статора и настроен на отключение при 140 °С и включение при 91 °С.

Вначале запускается машина верхней ветви каскада для предварительного охлаждения межкаскадного пластинчатого теплообменника до температуры кипения хладагента R404A (–25 °С), после чего в автоматическом режиме по команде реле низкого давления 30 запускается машина нижней ветви. Работа холодильной машины нижней ветви в начальный период характеризуется циклическим пуском под управлением реле высокого давления 14 (отключение согласно настройке происходило при 20 бар, включение при 17 бар с задержкой 2 мин). В среднем компрессор нижней ветви выходит на режим постоянной работы после 1–2 циклов, иногда компрессор может выйти на постоянный режим без предварительного циклического запуска.

* * *

Испытания каскадной установки со спиральными компрессорами ZF40KE-TWD и ZF48KE-TWD были проведены в ЗАО «АВИАСТАР-СП» и в НИИ приборостроения имени В. В. Тихомирова.

На рис. 7 показано изменение температур воздуха в термобарокамере и кипения R23 при работе каскадной установки (испытания в ЗАО «АВИАСТАР-СП»). Охлаждение воздуха в термобарокамере от +22 °С до -40 °С занимало 26 мин, до -50 °С - 45 мин, до -60 °С - 1 ч 20 мин, а до -70 °С - 2 ч 20 мин.

Хорошие результаты показал специально спроектированный для такого класса термобарокамер воздухоохладитель с просечными ребрами разработки ВНИИхолодмаша (рис. 8). Из рис. 7 видно, как меняется температурный напор воздухоохладителя в зависимости от температуры в камере:

Температура в камере, °С	Температурный напор, °С
-40	18...19
-50	10...12
-60	10
-70	~7

При достижении температуры в термобарокамере -70 °С давление кипения R23 падает до ~0,3 бар, но при включении регулятора температуры в режиме ПИД-регулирования оно повышается до 0,5...0,6 бар (ТЭНы отключены). Температурный напор воздухоохладителя снижается до ~2...5 °С, уменьшаются его холодопроизводительность и холодопроизводительность установки в целом. Таким образом, обеспечивается баланс между холодопроизводительностью каскадной установки и тепловой нагрузкой.

Результаты испытания установки в ЗАО «АВИАСТАР-СП» представлены на рис. 9. Температура нагнетания компрессора нижней ветви (кривая 1, рис. 9) не превышала +85 °С при температуре в камере $t_{\text{кам}} = -60$ °С и составляла +110...+112 °С при $t_{\text{кам}} = -70$ °С. С момента включения ПИД-регулирования температура нагнетания понижается до +95 °С. В этом режиме аварийных отключений компрессора не происходило, что свидетельствует об удовлетворительном охлаждении электродвигателя компрессора потоком R23 (нагрев обмоток статора не превышал 80 °С).

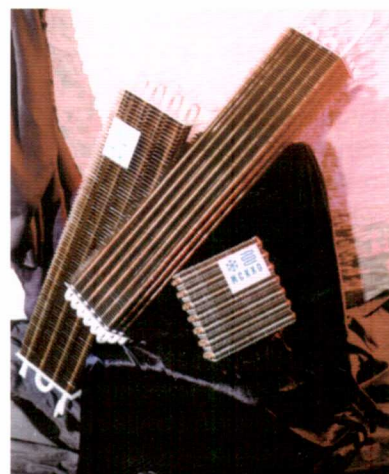


Рис. 8. Секции воздухоохладителя с просечными ребрами разработки ВНИИхолодмаша

На рис. 9 также показаны изменения степени сжатия (отношение абсолютных давлений нагнетания и всасывания) компрессоров. В режиме ПИД-регулирования степень сжатия компрессора нижней ветви снижается на 20 %.

Испытания каскадной установки в НИИ приборостроения имени В.В. Тихомирова проводились при другой уставке терморегулирующего вентиля, в связи с чем давление кипения R23 снизилось на ~0,2 бар. Испытания показали, что возможны аварийные отклю-

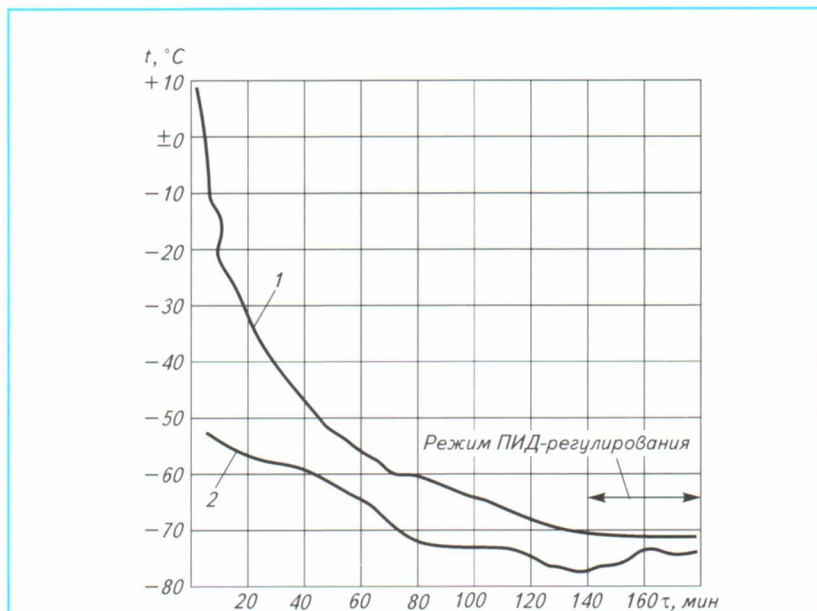


Рис. 7. Изменение температуры воздуха в термобарокамере (1) и температуры кипения R23 (2) в процессе охлаждения термобарокамеры каскадной холодильной установкой

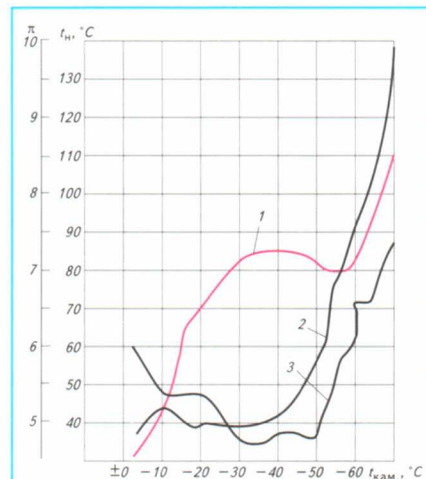


Рис. 9. Параметры каскадной холодильной установки в зависимости от температуры в камере: 1 - температура нагнетания R23 в нижней ветви каскада; 2, 3 - степень сжатия компрессоров соответственно нижней ветви (R23) и верхней ветви (R404A)

Сравнительные характеристики спирального и поршневого компрессоров

Тип компрессора	Температура кипения, t_0 , °C	Объемная производительность V , м ³ /ч	Холодопроизводительность Q^* , кВт	Потребляемая мощность N , кВт	Холодильный коэффициент	Масса G , кг	Габаритные размеры, мм
Спиральный компрессор ZF40K4E-TWD (Copeland)	-80	35,6	7,72	6,56	1,17	110	324×294×593
	-77		9,12	6,75	1,35		
	-70		12,94	7,24	1,787		
	-62		19,23	7,82	2,458		
	-58		23,13	8,13	2,84		
Поршневой компрессор	-80	56	4,37	5,08	0,86	194	680×485×495
	-77		6,73	5,77	1,165		
	-70		13,14	7,42	1,77		
	-62		23,08	9,23	2,5		
	-58		29,12	10,06	2,89		

* Холодопроизводительность указана при температуре конденсации $t_k = -20$ °C и переохлаждении $\Delta t = 0$ °C. При составлении таблицы использован каталог "Компрессоры Copeland для каскадных холодильных установок".

чения при более низкой температуре нагнетания $t_n = 87$ °C из-за недостаточного охлаждения электродвигателя компрессора хлад-агентом R23 и при степени сжатия $\pi = 12...12,5$. После наладки был обеспечен режим, когда при температуре в камере -70 °C температура нагнетания не превышала $+75$ °C, степень сжатия $\pi = 10...10,5$.

В верхней ветви каскадной установки обычно используют воздухоохладитель, параллельно подсоединяемый к испарительной части межкаскадного теплообменника. В этом случае охлаждение до температуры -30 °C обеспечивается только машиной верхней ветви. Однако в термобарокамере ТВВ-8000 нет места для размещения указанного воздухоохладителя.

В НИИ приборостроения имени В.В. Тихомирова каскадная установка была испытана на поддержание в камере температур $-30, -40, -50, -60, -65$ и -70 °C при непрерывной работе установки. Температура в камере в диапазоне $t_{\text{кам}} = -65...-30$ °C поддерживалась с использованием ТЭНов, управляемых регулятором температуры в режиме включения и выключения. Для поддержания температуры -70 °C в основном применяли регулятор холодопроизводительности установки [байпасная линия с соленоидным вентилем *П* (см. рис. 6), управляемый регулятором температуры в режиме ПИД-регулирования].

Для оценки выбранного оборудования в таблице приведены сравнительные технические характеристики спирального и его ближайшего аналога – поршневого компрессора на R23. Несмотря на то, что у поршневого компрессора объемная производительность на 57 % больше, чем у спирального, их холодопроизводительности при температуре кипения $t_0 = -70$ °C приблизительно равны. Что касается удельных энергозатрат на произ-

водство 1 кВт холода, то в диапазоне $t_0 = -58...-70$ °C они примерно одинаковы у обоих компрессоров, а при $t_0 = -77$ и -80 °C они ниже у спирального соответственно на 13,6 и 27 %.

Положительными сторонами спирального компрессора являются:

- устойчивость к влажному ходу из-за радиального смещения оси спирали;
- возможность работать в условиях недостатка смазки подшипников;
- нормальное функционирование без вентилятора обдува компрессора, когда в составе машины используется выносной воздушный конденсатор;
- меньшие в 1,7 раза масса, в 2,9 раза габаритные размеры, чем у поршневого компрессора;
- сравнительно малое число движущихся деталей, что положительно сказывается на надежности компрессора;
- на ~20 % меньшая стоимость, чем у поршневого компрессора-аналога.

Испытания показали:

- ✓ каскадные установки со спиральными компрессорами типа ZF обеспечивают температуру в термобарокамере -70 °C, и имеется резерв для получения более низкой температуры;
- ✓ поддержание заданной тем-

пературы $t_{\text{кам}} = -65...-30$ °C осуществляется в основном с использованием ТЭНов, а от -70 °C и ниже – в основном с использованием регулятора производительности, который повышает давление кипения в нижней ветви каскада и этим предотвращает возможное аварийное отключение машины по низкому давлению.

Замена морально устаревшей холодильной установки выгодна предприятиям, на которых установлены термобарокамеры ТВВ-8000, поскольку значительно снижаются эксплуатационные затраты:

- ✓ полностью исключается использование дорогостоящей воды для охлаждения или системы обратного водоснабжения с градирней;

- ✓ экономится электроэнергия, так как потребляемая мощность установки со спиральными компрессорами приблизительно в 1,25–3 раза меньше, чем у замененной, а также сокращается время выхода установки на заданный температурный режим.

Следует отметить, что изложенные в статье материалы могут быть использованы при внедрении каскадных установок с другими спиральными компрессорами типа ZF для обслуживания соответствующих холодильных камер.