

Нет автора

Журнал Холодильная техника 1962 года №6

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 621.3
ББК 31.352
Н57

Н57 **Нет автора**
Журнал Холодильная техника 1962 года №6 / Нет автора – М.: Книга по Требованию, 2021. – 78 с.

ISBN 978-5-458-64578-2

ISBN 978-5-458-64578-2

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2021
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2021

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

Эта страница оригинала содержит
исключительно социалистическую
пропаганду, которая на сегодняшний
день не представляет никакой
научно-практической ценности

Эта страница оригинала содержит
исключительно социалистическую
пропаганду, которая на сегодняшний
день не представляет никакой
научно-практической ценности

Эта страница оригинала содержит
исключительно социалистическую
пропаганду, которая на сегодняшний
день не представляет никакой
научно-практической ценности

Эта страница оригинала содержит
исключительно социалистическую
пропаганду, которая на сегодняшний
день не представляет никакой
научно-практической ценности

Низкотемпературные каскадные фреоновые холодильные машины

Инж. Е. В. БЕКНЕВА—Центральное конструкторское бюро холодильного машиностроения

В последнее время в ряде отраслей промышленности для получения температур $-70 \div -120^\circ$ все шире применяются каскадные холодильные машины, работающие на нетоксичных невзрывоопасных холодильных агентах — фреонах.

В соответствии с планом научных исследований ЦКБ холодильного машиностроения разрабатывает ряды каскадных низкотемпературных машин на фреонах-22 и -13.

Цель данной статьи — ознакомить читателя с методикой расчета каскадных машин и некоторыми их особенностями.

Холодильные агенты фреоновых каскадных машин¹

Каскадный цикл объединяет две (или более) холодильные машины, работающие на разных холодильных агентах, причем теплота конденсации нижнего каскада отводится в испарителе верхнего.

Конденсатор нижнего каскада и испаритель верхнего обычно объединяются в один аппарат — конденсатор-испаритель.

Выбор холодильных агентов для отдельных каскадов диктуется заданными температурными условиями.

В верхнем каскаде применяются агенты среднего давления — фреоны-12, -22 и -143. При многоступенчатом сжатии указанных холодильных агентов нельзя получить температуру кипения ниже -80° вследствие очень малых давлений (вакуума) в испарителе, что препятствует нормальной работе всасывающих клапанов компрессора.

Верхний каскад служит для получения низких температур конденсации в нижнем каскаде. Это дает возможность применять в нижнем каскаде холодильные агенты высокого давления — фреоны-13, -13В1, -14 и -23, имеющие при температурах кипения ниже -80° допустимые значения давлений всасывания.

В статье приведены результаты теоретических исследований ФКМ с поршневыми компрессорами, работающими на фреонах-22 и -13. Предельная температура кипения фреона в таких каскадных машинах, равная -110° , определяется давлением всасывания 0,164 ата.

Предлагаемая методика расчета и характер полученных зависимостей могут быть применены с некоторыми поправками и для других фреонов.

Расчет цикла

В ФКМ верхний каскад (фреон-22) — обычно одно- или двухступенчатый, нижний (фреон-13) — одноступенчатый.

По сравнению с циклом одноступенчатой машины, заряженной фреоном-22, цикл одноступенчатой машины на фреоне-13 имеет ряд особенностей (рис. 1, а).

В газожидкостном теплообменнике всасываемый пар фреона-13 может перегреться до температуры, которая на $5-10^\circ$ ниже температуры конденсации нижнего каскада. Дальнейший перегрев пара фреона-13 до температуры $-15 \div -5^\circ$ (с целью повышения коэффициентов действительного процесса) происходит в газовом теплообменнике в результате теплообмена с нагнетаемым паром этого же агента¹.

Тепловая нагрузка газового теплообменника нижнего каскада $T\Phi_1$ (рис. 1, б) может быть найдена по уравнению

$$Q_{гн} = G_{ан} (i_{3н} - i_{2н}) = G_{ан} (i_{4н} - i_{5н}) \text{ ккал/час},$$

где $G_{ан}$ — весовая производительность компрессора нижнего каскада, кг/час.

Тепловая нагрузка газожидкостного теплообменника нижнего каскада $T\Phi_2$ определяется по формуле

$$Q_{гжн} = G_{ан} (i_{6н} - i_{7н}) = G_{ан} (i_{2н} - i_{1н}) \text{ ккал/час},$$

¹ В тексте приняты следующие сокращения: ФКМ — фреоновая каскадная машина, ФДС — фреоновая двухступенчатая машина, индексы «н» и «в» относятся, соответственно, к нижнему и верхнему каскадам.

¹ В некоторых схемах ФКМ для этой цели применяется «смешанный» теплообменник, в котором пар фреона-13 перегревается жидким фреоном-22, выходящим из газожидкостного теплообменника верхнего каскада.

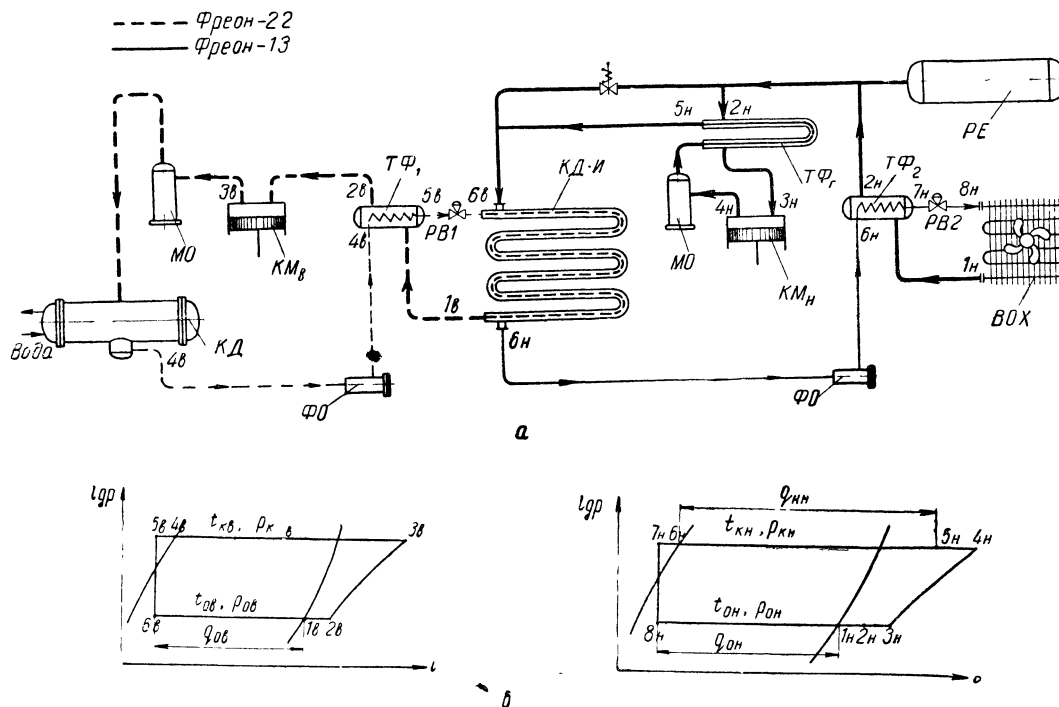


Рис. 1. Схема каскадной холодильной машины, работающей на фреонах-22 и -13, (а) и ее цикл в $i, \lg p$ -диаграмме (б): КМ_в — компрессор верхнего каскада (ф-22), КМ_н — компрессор нижнего каскада (ф-13), КД-И — конденсатор-испаритель, КД — конденсатор, ТФ₁ и ТФ₂ — газожидкостные теплообменники, соответственно, для ф-22 и ф-13, ТФ_г — газовый теплообменник (ф-13), ФД — фильтр-осушитель, РЕ — расширительная емкость, МО — маслоотделитель, ВОХ — воздухоохлаждитель с вентилятором, РВ1 и РВ2 — регулирующие вентили, соответственно, для ф-22 и ф-13.

а холодопроизводительность ФКМ

$$Q_o^{\text{ФКМ}} = Q_{\text{он}} = G_{\text{ан}}(i_{1\text{н}} - i_{8\text{н}}) \text{ ккал/час.}$$

Теплоту конденсации нижнего каскада (тепловую нагрузку конденсатора-испарителя) можно найти по уравнению

$$Q_{\text{кн}} = G_{\text{ан}}(i_{5\text{н}} - i_{6\text{н}}) \text{ ккал/час.}$$

Верхний и нижний каскады связаны между собой уравнением теплового баланса конденсатора-испарителя

$$Q_{\text{кн}} = Q_{\text{ов}} \text{ ккал/час}^*.$$

При изменении температуры кипения нижнего каскада изменяется также $Q_{\text{кн}}$, а $t_{\text{кн}}$ и $t_{\text{ов}}$

* Без учета теплопритока к конденсатору-испарителю из окружающей среды.

устанавливаются так, чтобы тепловой баланс ФКМ сохранялся. Следовательно, в нижнем каскаде температура конденсации переменна и зависит от температуры кипения $t_{\text{он}}$.

Рассмотрим область возможных температур конденсации и кипения нижнего каскада при условии, что тепловой баланс конденсатора-испарителя соблюдается.

Верхний предел температуры конденсации $t_{\text{кн}}^{\text{max}}$ принимается -15° ($p_{\text{кн}}^{\text{max}} = 13,46 \text{ атм}$) и соответствует допускаемому давлению нагнетания для систем с компрессорами нормального ряда по ГОСТу 6492—61 (для работы на фреоне-13 применяются компрессоры с расчетной разностью давлений 12 кг/см^2).

Нижний предел температуры конденсации $t_{\text{кн}}^{\text{min}}$ определяется минимальной температурой кипения в верхнем каскаде $t_{\text{ов}}^{\text{min}}$ и разностью температур в конденсаторе-испарителе $\Delta t_{\text{кд и}} = 5-7^\circ$.

Наивысшая температура кипения $t_{\text{он}}^{\text{max}}$ определяется максимальным давлением конденсации $p_{\text{кн}}^{\text{max}}$ и наименьшим перепадом давлений в регулирующем органе (соответствует примерно 30°); наименьшая температура кипения $t_{\text{он}}^{\text{min}}$ (не ниже -110°) — минимальным давлением конденсации $p_{\text{кн}}^{\text{min}}$ и допустимой степенью сжатия компрессора нижнего каскада σ_{max} .

Таким образом, для ФКМ, состоящих из двух одноступенчатых каскадов с компрессорами, имеющими мертвый объем $c = 4,5\%$ при $\sigma_{\text{max}} = 11,4$ и $\Delta t_{\text{кд и}} = 5^\circ$: $t_{\text{ов}} = -20 \div -40^\circ$, $t_{\text{кн}} = -15 \div -35^\circ$, $t_{\text{он}} = -45 \div -90^\circ$.

Для ФКМ с ФДС в верхнем каскаде: $t_{\text{ов}} = -50 \div -80^\circ$, $t_{\text{кн}} = -45 \div -75^\circ$, $t_{\text{он}} = -75 \div -110^\circ$.

Особый интерес для проектирования низкотемпературных машин представляют малые компрессоры (диаметр цилиндра 67,5 мм) со специальной клапанной доской ($c = 1\%$). Для ФКМ, состоящих из двух одноступенчатых каскадов с такими компрессорами: $t_{\text{ов}} = -20 \div -60^\circ$, $t_{\text{кн}} = -15 \div -55^\circ$, $t_{\text{он}} = -45 \div -110^\circ$.

Задаваясь холодопроизводительностью и температурами $t_{\text{он}}$, $t_{\text{ов}}$, $t_{\text{кн}}$ в указанных пределах, можно найти величину описанного объема компрессоров для отдельных каскадов

$$V_{\text{нн}} = \frac{Q_{\text{он}}}{i_{1\text{н}} - i_{5\text{н}}} \cdot \frac{v_{3\text{н}}}{\lambda_{\text{н}}};$$

$$V_{\text{нв}} = \frac{Q_{\text{он}}}{i_{1\text{н}} - i_{5\text{н}}} \cdot \frac{i_{5\text{н}} - i_{6\text{н}}}{i_{1\text{в}} - i_{6\text{в}}} \cdot \frac{v_{2\text{в}}}{\lambda_{\text{в}}}.$$

Однако выбор температур $t_{\text{кн}}$, $t_{\text{ов}}$ при таком расчете носит произвольный характер, поэтому размеры компрессоров могут получаться различными. При построении ряда ФКМ на базе заданного ряда компрессоров нижнего каскада холодильные машины верхнего каскада следует подбирать с учетом характеристик ФКМ, построенных для всей области указанных возможных температур конденсации и кипения.

Расчет характеристик ФКМ

Характеристики ФКМ строятся в расчете на $1 \text{ м}^3/\text{час}$ описанного объема компрессора нижнего каскада.

Введем величину φ — отношение описан-

ных объемов компрессоров верхнего и нижнего каскадов:

$$\varphi = \frac{V_{\text{нв}}}{V_{\text{нн}}} \text{ — при одноступенчатом верхнем каскаде,}$$

$$\varphi = \frac{V_{\text{нн дв}}}{V_{\text{нн}}} \text{ — при двухступенчатом верхнем каскаде,}$$

где $V_{\text{нн дв}}$ — описанный объем ступени низкого давления ФДС.

Предположим, что характеристика одно- и двухступенчатого верхнего каскада при $t_{\text{кв}} = \text{const}$ и любом φ известна. Для расчета нижнего каскада (см. рис. 1,б) сделаем ряд упрощающих допущений¹:

— давление всасывания в компрессор равно давлению в испарителе;

— температура в точке 2н на 10° ниже температуры конденсации $t_{\text{кн}}$;

— температура в точке 3н на линии всасывания в компрессор равна $-15 \div -5^\circ$;

— теплоприток к конденсатору-испарителю отсутствует.

Коэффициенты подачи приняты в соответствии с отчетами об испытании типового компрессора данного ряда. Следует обязательно задаваться числом оборотов ряда базовых компрессоров нижнего каскада, так как коэффициент подачи в большой мере зависит от числа оборотов.

При построении характеристик верхнего каскада примем, что $\varphi = 1$ обеспечивается установкой одинаковых компрессоров, а $\varphi = 2$ — удвоением числа цилиндров компрессора верхнего каскада при одинаковом числе оборотов.

Наибольшее затруднение вызывает выбор закона изменения разности температур в конденсаторе-испарителе, так как он зависит от многих факторов и подлежит экспериментальной проверке. Однако для расчета можно указать два простейших случая: постоянство разности температур $\Delta t_{\text{кд и}} = \text{const}$ и прямо пропорциональную зависимость $\Delta t_{\text{кд и}}$ от нагрузки конденсатора-испарителя $Q_{\text{кн}}$, так что

$$\Delta t_{\text{кд и}} = \Delta t_{\text{кд и}}^{\text{р}} \frac{Q_{\text{кн}}}{Q_{\text{кн}}^{\text{р}}},$$

где: $\Delta t_{\text{кд и}}$ и $Q_{\text{кн}}$ — текущая разность температур ($^\circ\text{C}$) и нагрузка конденсатора-испарителя (ккал/час),

¹ В данном случае охлаждение фреона-13 в маслоотделителе не учитывалось.

$\Delta t_{\text{кди}}^p$ и $Q_{\text{кн}}^p$ — разность температур и нагрузка конденсатора-испарителя при расчетном рабочем режиме.

Характеристика ФКМ, построенная для данного значения φ и $\Delta t_{\text{кди}} = \text{const}$, представляет собой совокупность рабочих точек каскадного компрессорного агрегата во всем диапазоне возможных температур кипения от $t_{\text{он}}^{\min}$ до $t_{\text{он}}^{\max}$. При этом предполагается, что каждой температуре кипения $t_{\text{он}}$ соответствует такая поверхность $F_{\text{кди}}$ конденсатора-испарителя, при которой

$$\Delta t_{\text{кди}} = \frac{Q_{\text{кн}}}{kF_{\text{кди}}} = \Delta t_{\text{кди}}^p = \text{const}.$$

Построив характеристики для всех значений φ , можно определить холодопроизводительность и энергетические показатели различных компоновок компрессоров заданного ряда при любой заданной температуре кипения, являющейся расчетной рабочей точкой.

Выбрав базовую температуру кипения $t_{\text{он}}$, устанавливаем оптимальное значение φ , т. е. получаем ряд ФКМ.

Характеристика, построенная для данного значения φ и $\Delta t_{\text{кди}} = f(Q_{\text{кди}})$, — есть характеристика каскадного компрессор-аппаратного агрегата, предназначенного для работы в определенном диапазоне температур кипения. При этом подразумевается, что в уравнении

$$Q_{\text{кн}} = kF_{\text{кди}} \Delta t_{\text{кди}}$$

величина $kF_{\text{кди}} = \text{const}$.

Для построения характеристик ФКМ сначала наносим на график (рис. 2) кривые $Q_{\text{ов}} = f(t_{\text{ов}})$ при $t_{\text{кв}} = \text{const}$ и $\varphi = \text{const}$ ($\varphi = 1; 1,25; 1,5; 1,75; 2$).

Затем, задаваясь разными значениями $t_{\text{кн}} = \text{const}$ ($t_{\text{кн}} = -60; -50; -40; -30^\circ$), рассчитываем и наносим на этот же график кривые $Q_{\text{кн}} = f(t_{\text{он}})$ и $Q_{\text{он}} = f(t_{\text{он}})$.

Порядок определения рабочих точек ФКМ с заданным значением φ показан на рис. 2 стрелками. При $\Delta t_{\text{кди}} = \text{const}$ значение $t_{\text{ов}}$, с помощью которого определяют рабочую точку, находят, задаваясь одной из величин $t_{\text{кн}}$, указанной на кривых $Q_{\text{кн}} = f(t_{\text{он}})$, так как $t_{\text{ов}} = t_{\text{кн}} - \Delta t_{\text{кди}}^p$.

При $\Delta t_{\text{кди}} = f(Q_{\text{кн}})$ следует сначала определить рабочую точку, соответствующую минимальной требуемой температуре кипения $t_{\text{он}}^p$. Для этого строим вспомогательную кривую $\Delta t_{\text{кди}} = f(t_{\text{ов}})$ при $t_{\text{он}}^p = \text{const}$, определяя $t_{\text{ов}}$ для заданной величины $t_{\text{кн}}$, как показано на рис. 3, а. Далее, задаваясь $\Delta t_{\text{кди}}^p$ (например, 3°), находим на вспомогательной кривой (рис. 3, б) $t_{\text{ов}}^p$, а

$$t_{\text{кн}}^p = t_{\text{ов}}^p + \Delta t_{\text{кди}}^p.$$

Затем строим еще одну вспомогательную кривую

$$t_{\text{кн}} = f(t_{\text{ов}}),$$

где
$$t_{\text{кн}} = t_{\text{ов}} + \Delta t_{\text{кди}}^p \frac{Q_{\text{ов}}}{Q_{\text{ов}}^p}.$$

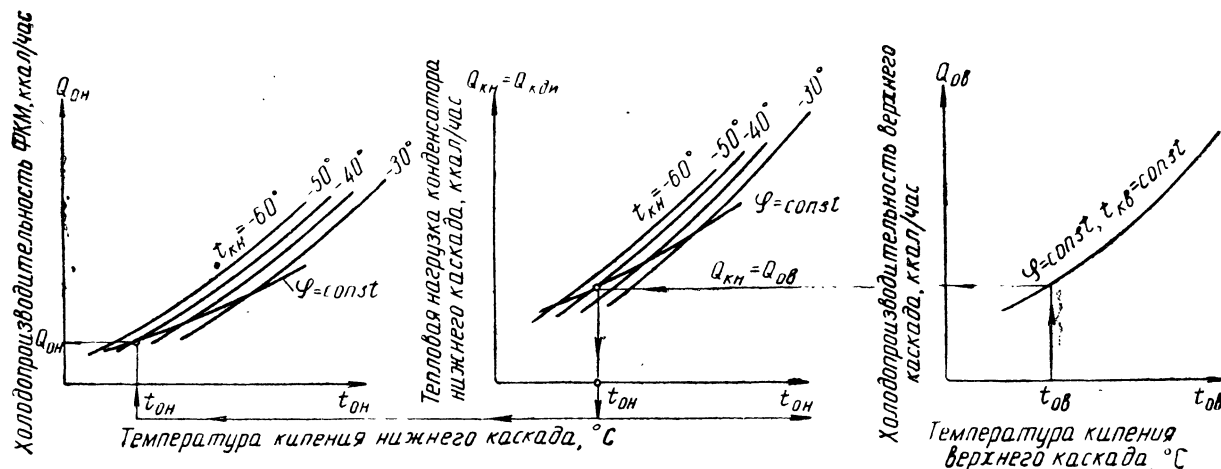


Рис. 2. Графики определения рабочей точки фреоновой каскадной машины при заданном значении φ .

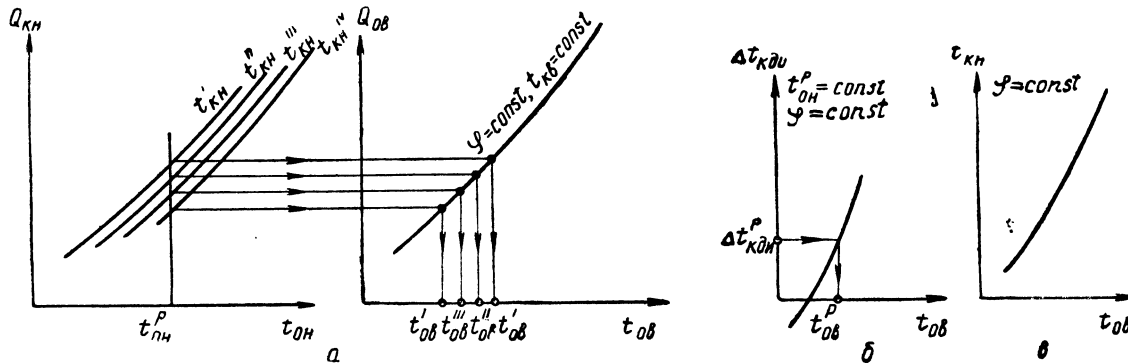


Рис. 3. Вспомогательные кривые для построения характеристики при $\Delta t_{\text{кли}} = f(Q_{\text{кн}})$:
 а — для определения $t_{\text{ов}}$ при заданных значениях $t_{\text{кн}}$ и φ ; б — для определения $t_{\text{ов}}^p$ при $t_{\text{он}}^p$ и заданном $\Delta t_{\text{кли}}^p$; в — для определения $t_{\text{ов}}$ по заданным значениям $t_{\text{кн}}$ и φ .

При этом выбираемые значения $t_{\text{ов}}$ должны быть больше $t_{\text{ов}}^p$.

Далее характеристики строят так же, как и для $\Delta t_{\text{кли}} = \text{const}$, с той разницей, что для каждого значения $t_{\text{кн}}$, указанного на кривых $Q_{\text{кн}} = f(t_{\text{он}})$, температура $t_{\text{ов}}$ определяется по графику (рис. 3, в).

Для примера на рис. 4 и 5 даны характеристики ФКМ.

Удельная эффективная холодопроизводительность ФКМ

$$K_e = \frac{Q_{\text{он}}}{N_{\text{ев}} + N_{\text{ен}}} \text{ ккал/квт-ч.}$$

Для ФКМ $K_{\text{е теор}} = 500-600$ ккал/квт-ч при температуре кипения $t_{\text{он}} = -80^\circ$ и температуре конденсации $t_{\text{кв}} = 30^\circ$ ($\varphi = 1$).

Особенности ФКМ

Характеристики ФКМ показывают, что диапазон рабочих температур данного каскадного компрессор-аппаратного агрегата увеличивается с повышением φ . При этом изменение температуры кипения от минимума до максимума сопровождается чрезмерным возрастанием нагрузок на все аппараты.

Стандартный терморегулирующий вентиль для фреона-13 рассчитан на увеличение нагруз-

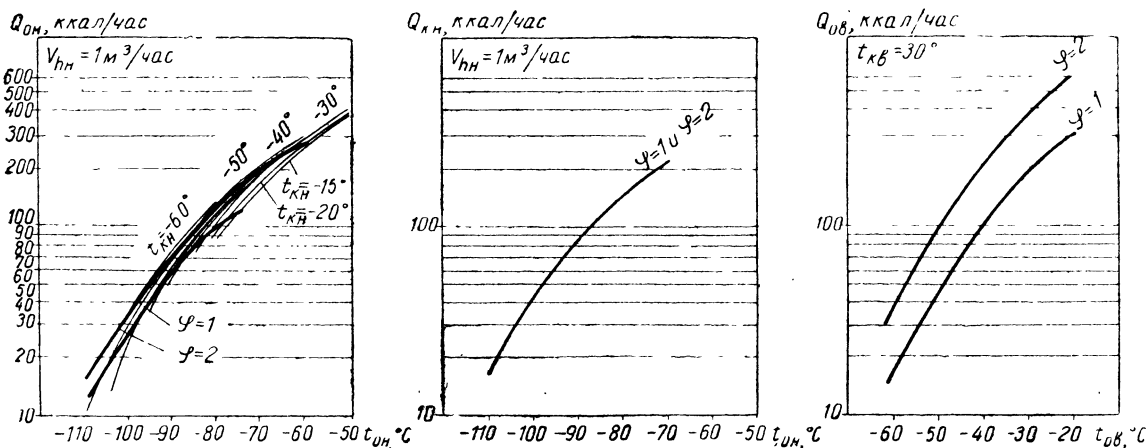


Рис. 4. Характеристики ФКМ, состоящей из двух одноступенчатых каскадов с низкотемпературными компрессорами, $c = 1\%$, $\Delta t_{\text{кли}} = f(Q_{\text{кн}})$.

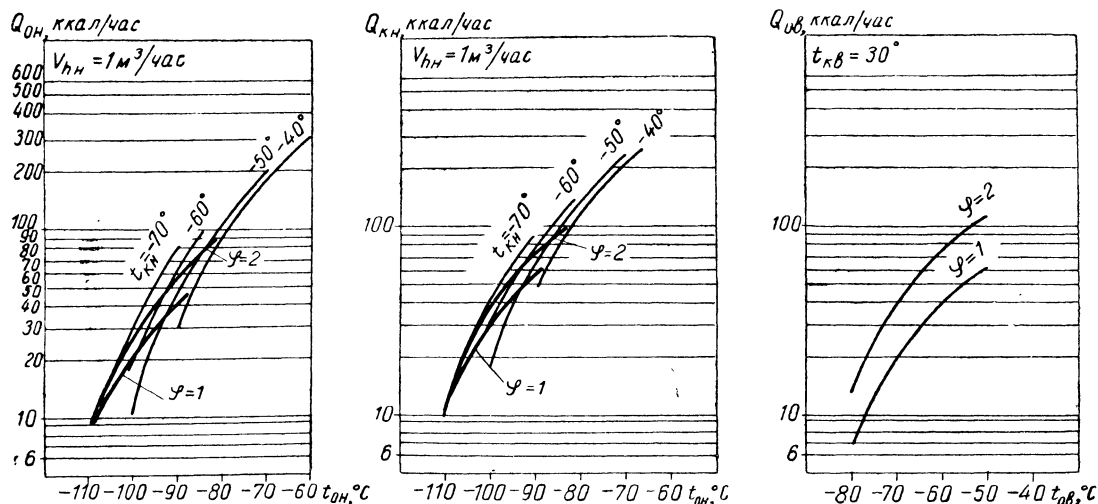


Рис. 5. Характеристики ФКМ с ФДС в верхнем каскаде ($c = 4,5\%$, $\Delta t_{\text{кли}} = \text{const} = 5^\circ$).

ки не более чем в 3—3,5 раза. Следовательно, два параллельно установленных ТРВ могут обеспечить диапазон температур, при котором нагрузка испарителя (и конденсатора-испарителя) возрастает не более чем в 9—12 раз. Поэтому предлагается два ряда ФКМ: с диапазоном температур кипения $-110 \div -90^\circ$ ($\varphi = 1,6-2$) и $-90 \div -70^\circ$ ($\varphi = 1$).

Ряды ФКМ проектируются на базе низкотемпературных компрессоров с малым мертвым объемом (для малых машин $c = 1\%$, для средних и крупных $c = 2\%$). При этом ФКМ с диапазоном температур $-110 \div -90^\circ$ имеют одноступенчатый верхний каскад для малых компрессоров с диаметром цилиндра 67,5 мм ($\varphi = 2$) и двухступенчатый верхний каскад для более крупных компрессоров ($\varphi = 1,6$). ФКМ с диапазоном температур кипения $-90 \div -70^\circ$ имеют два одноступенчатых каскада с одинаковыми компрессорами ($\varphi = 1$). После испытаний первых образцов ряда ФКМ значение φ будет уточнено.

Диапазон рабочих температур данной ФКМ можно расширить путем регулирования холодопроизводительности нижнего каскада дроселированием на линии всасывания или изменением числа оборотов компрессора (установка многоскоростного электродвигателя). В связи с этим особый интерес представляет изучение работы на фреоне-13 бессальниковых компрессоров типа ФБС со встроенными трехскоростными электродвигателями.

Если разгрузочные устройства для пусково-

го режима отсутствуют, то необходимо подбирать электродвигатель компрессора нижнего каскада по пусковому режиму.

Тепловые расчеты аппаратов каскадной машины необходимо проводить для всего диапазона рабочих температур. Согласно правилам Госгортехнадзора, аппараты, работающие при низких температурах, должны изготавливаться из стали с ударной вязкостью не ниже 2 кгс м/см^2 . До температуры -70° можно применять сталь марок 16ГТ, 10Г2Т, ниже -70° — IX18Н9Т, ЭИ-711, а также медь, латунь, алюминий АД.

Пробные давления для фреона-13: сторона нагнетания — 18 ати воздухом, 23 ати водой, 8 ати фреоном-12; сторона всасывания — 15 ати воздухом, 19 ати водой, 8 ати фреоном-12.

При стоянке ФКМ температура в системе повышается и становится равной температуре окружающей среды, в результате чего давление в нижнем каскаде может чрезмерно повыситься. Фреон-13 при температуре 25° имеет давление 36,2 ати. Поэтому в схеме нижнего каскада необходимо предусматривать меры для предотвращения повышения давления сверх допустимого при стоянке машины.

Существуют три способа защиты системы с фреоном-13 от повышения давления при стоянке.

Первый способ состоит в охлаждении нижнего каскада за счет циклической работы верхнего (для малых ФКМ) или циклической работы спе-