

BITZER

Полугерметичные поршневые и винтовые компрессоры «БИТЦЕР» для каскадных холодильных установок на CO₂

ГЕРМАН РЕНЦ,

руководитель научно-исследовательского отделения компании
Bitzer Kuelmaschinenbau GmbH (Германия)

Предлагая читателям статью немецкого производителя компрессорного оборудования компании «Битцер», мы надеемся, что она будет полезна специалистам российских холодильных компаний, особенно тем, кто видит в диоксиде углерода перспективный хладагент для новых холодильных установок.

Мы будем признательны всем, кто проявит интерес к статье и выскажет свои предложения по освещению наиболее важных вопросов использования оборудования «Битцер» в холодильной технике.

После многолетнего забвения диоксида углерода интерес к нему с недавнего времени со стороны разработчиков холодильной техники заметно возрос, что вызвано прежде всего обострившимися экологическими проблемами. В последние годы были успешно введены в эксплуата-

цию многие каскадные установки для коммерческого и промышленного низкотемпературного охлаждения ($t_0 = -50^\circ\text{C}$). Следует иметь в виду, что по сравнению с другими хладагентами CO₂ обладает в данном режиме лучшими теплофизическими свойствами. Это химически инертное, по-

жаро- и взрывобезопасное вещество. Оно вредно для здоровья человека только в больших концентрациях. Все эти свойства определяют во многих случаях явное преимущество CO₂ над аммиаком.

До сих пор в холодильных системах с CO₂ использовались поршневые и винтовые компрессоры открытого типа. Однако высокий уровень рабочих давлений налагает особые требования, что удорожает конструкцию такого компрессора. В связи с этим в последнее время возрос интерес к полугерметичным компрессорам, применение которых позволило бы значительно удешевить перспективные установки. На сегодняшний день уже реализовано много проектов с опытными полугерметичными компрессорами.

В следующих разделах статьи рассматривается опыт создания надежных компрессоров для CO₂, а также систем их защиты.

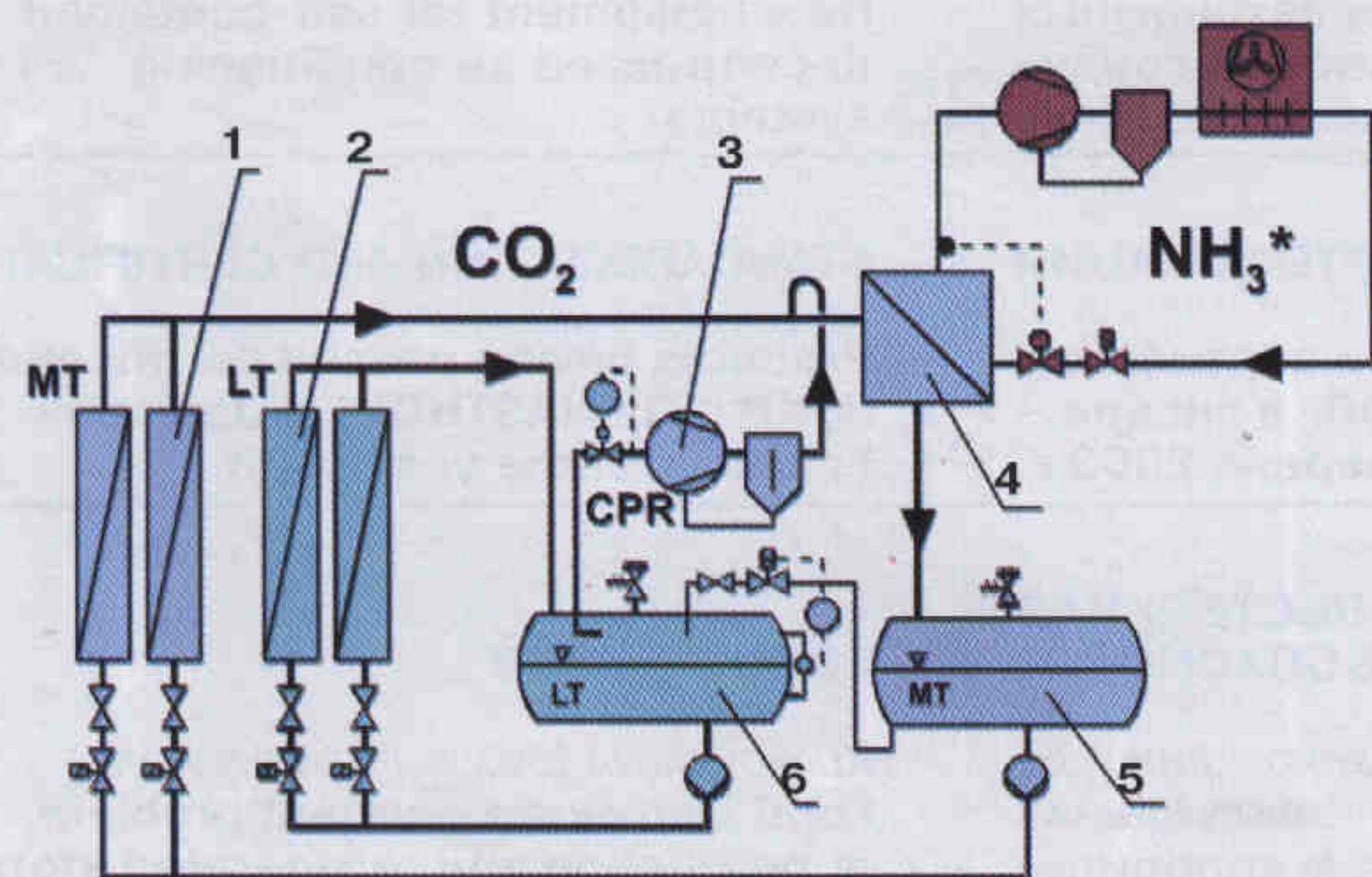


Рис. 1. Упрощенная схема каскадной холодильной установки:

1 — среднетемпературные испарители;
2 — низкотемпературные испарители; 3 — компрессор CO₂;
4 — межкаскадный теплообменник: испаритель для NH₃ и конденсатор для CO₂; 5 — среднетемпературный ресивер;
6 — низкотемпературный ресивер

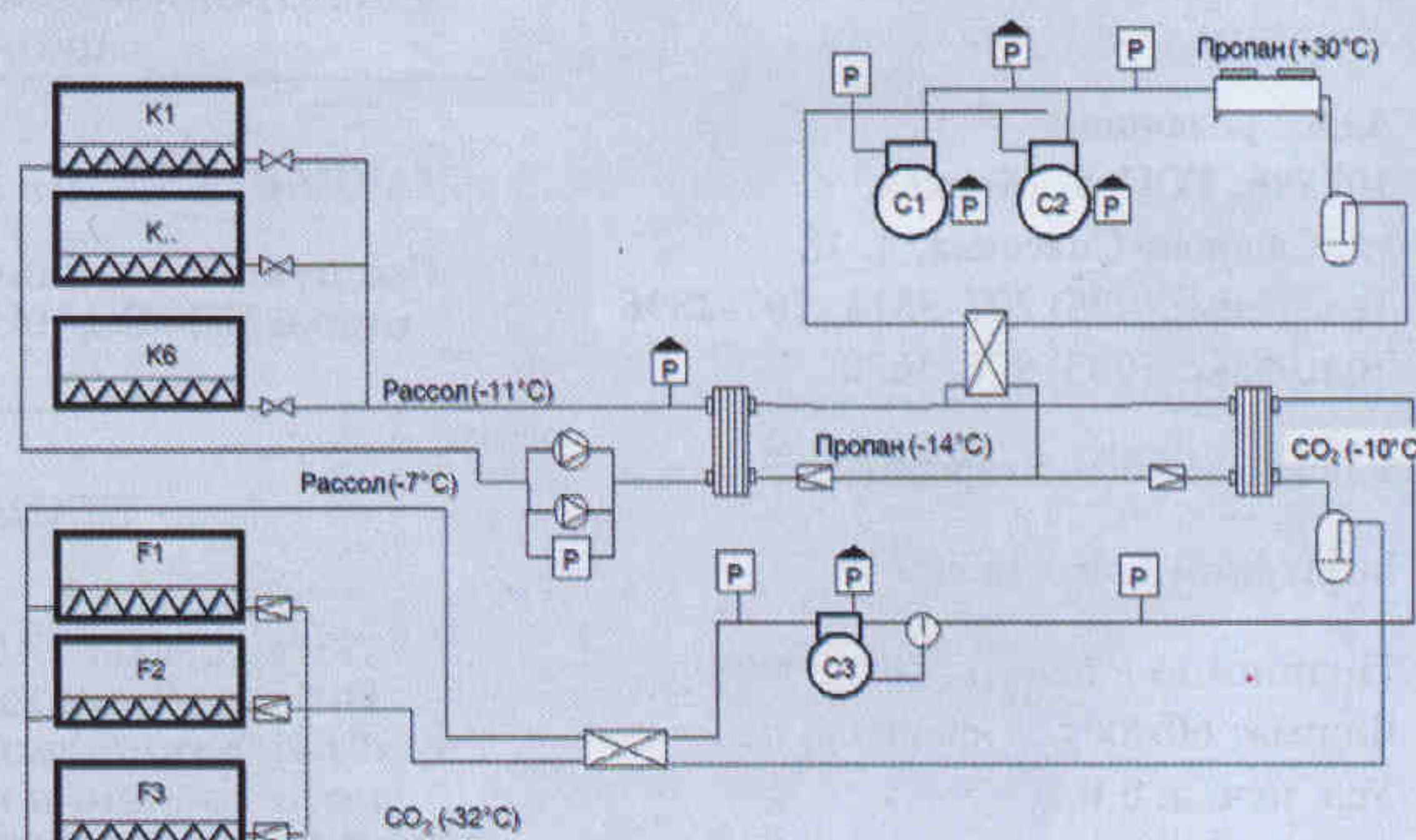


Рис. 2. Упрощенная схема каскадной системы с нижней ветвью на CO₂:

K1–K6 — среднетемпературные испарители;
F1–F3 — низкотемпературные испарители CO₂

КАСКАДНЫЕ СИСТЕМЫ С CO_2

На рис. 1 приведена упрощенная схема холодильной установки, в которой диоксид углерода сжижается в испарителе первичного холодильного контура, работающего на NH_3 , углеводородах (пропан, пропилен), или HCFC/HFC, и подается циркуляционным насосом непосредственно в испарители ветви среднетемпературного охлаждения.

В современных каскадных установках в ветви на CO_2 предусмотрен дополнительный ресивер 6 низкого давления, которое поддерживается на уровне давления кипения CO_2 . Компрессор 3 нагнетает пары CO_2 в каскадный конденсатор 4 вместе с газом из среднетемпературного испарителя 1. Здесь суммарный газовый поток конденсируется и затем поступает в соответствующий ресивер среднего давления 5. Из него жидкость перепускают в ресивер низкого давления 6 с помощью поплавкового клапана.

Для подачи CO_2 к месту его охлаждения в аммиачной (фреоновой) ветви используются циркуляционные насосы или системы гравитационной циркуляции. Холодильная установка с одним или несколькими испарителями может быть скомпонована как система, описанная в статье Ф. Персона [1]. Для получения только низкотемпературного холода компоненты среднетемпературного контура исключают из установки.

На рис. 2 показана упрощенная схема каскадной системы, в которой CO_2 используется в качестве хладагента нижней ветви каскада. Установки с такой схемой очень распространены в странах Скандинавии и считаются весьма перспективными для коммерческого применения. В холодильных системах для типовых супермаркетов CO_2 в низкотемпературной ветви нагнетается в конденсатор-теплообменник поршневыми компрессорами «Битцер» серии «Октагон», модифицированными для CO_2 (C-1K, C-2K).

ТРЕБОВАНИЯ К КОМПРЕССОРУ ПРИ РАБОТЕ В НИЖНЕЙ ВЕТВИ КАСКАДА НА CO_2

CO_2 в каскадной холодильной установке переходит в жидкое состояние при сравнительно высоком уровне давлений и довольно низких температурах кипения и конденсации. Эти давления в некоторых случаях значительно превышают допустимые рабочие для типовых стандартных ком-

прессоров (рис. 3). Несмотря на более низкую плотность паров CO_2 по сравнению с галогенсодержащими хладагентами (рис. 4), теплофизические свойства CO_2 приводят к более высокой механической нагрузке на привод компрессора, а следовательно, к росту требуемого приводного момента. Кроме того, при проектировании оборудования следует рассматривать даже еще более экстремальные условия нагружения.

Другой негативный фактор связан со смазкой компрессора. При довольно высоком давлении всасывания некоторые холодильные масла растворяют в себе значительное количество CO_2 , в результате чего кинематическая вязкость образовавшейся смеси значительно понижается.

При применении полугерметичных компрессоров следует также учитывать совместимость материала изоляции обмоток и смеси масла с CO_2 .

Охлаждение электродвигателя — это на сегодня особенно спорный и вызывающий много сомнений вопрос, так как от двигателя с небольшими размерами требуется высокий приводной момент.

Из вышесказанного становится ясно, что стандартные полугерметичные компрессоры могут использоваться с CO_2 только в очень ограниченной области.

Последние достижения фирмы «Битцер» в этом направлении показывают, что при комбинировании различных компонентов одного семейства компрессоров, а также при соответствующей модификации конструкции и применении подходящего масла все требования могут быть выполнены.

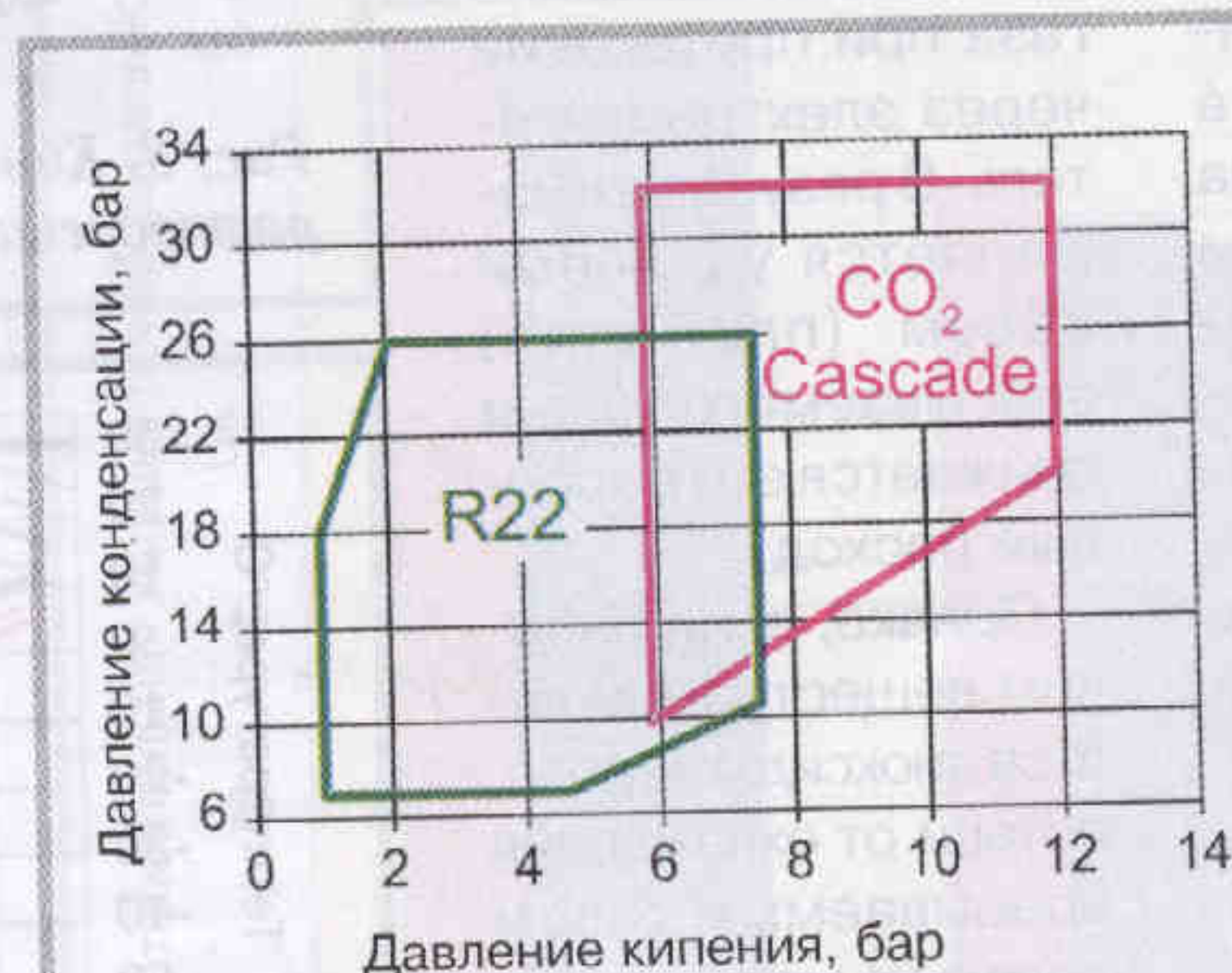


Рис. 3. Сравнение значений давлений кипения и конденсации в пределах стандартной области функционирования для CO_2 и R22

НАПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТОК И ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ

Нагрузки и давления

Современные полугерметичные компрессоры проектируются с пятикратным запасом прочности по внутреннему давлению, и это должно подтверждаться при проведении регулярных проверок. При наличии внутреннего предохранительного клапана давления и внешних предохранительных клапанов, а также с учетом индивидуальных испытаний согласно соответствующим предписаниям ЕС обычные границы применения компрессоров (высокое давление — 28 бар, низкое давление — 19 бар) могут быть сдвинуты еще выше. При необходимости рекомендуется применять прокладки с металлическим усилением или поддерживающие элементы в уплотнениях.

Применение чугуна со сферической графитной структурой вместо серого чугуна для литых корпусных деталей позволяет повысить их механическую прочность при той же толщине стенок.

Механическая нагрузка и необходимый приводной момент

Максимальные давления кипения и конденсации CO_2 превышают примерно на 60 и 20 % соответственно максимальные значения рабочих давлений R22 (см. рис. 3).

Самый простой путь модификации компрессора для работы на CO_2 — комбинирование в одном типовом корпусе определенной серии компрессоров наименьшей объемной производительности с электродвигателями наибольшей мощности.

При использовании поршневых



Рис. 4. Сравнение значений плотности паров в пределах стандартных диапазонов давлений всасывания для CO_2 и R22

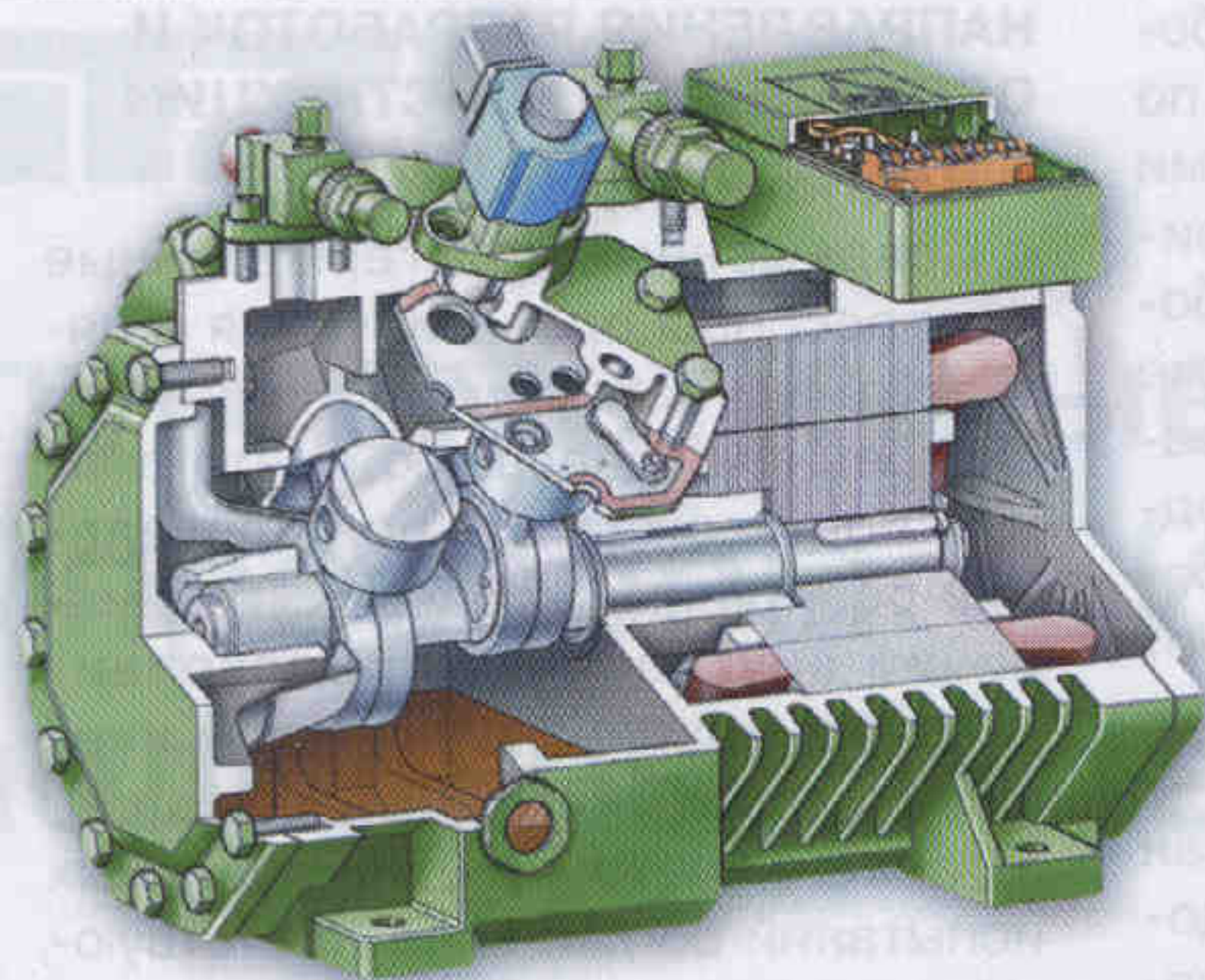


Рис. 5. Разрез полугерметичного поршневого компрессора

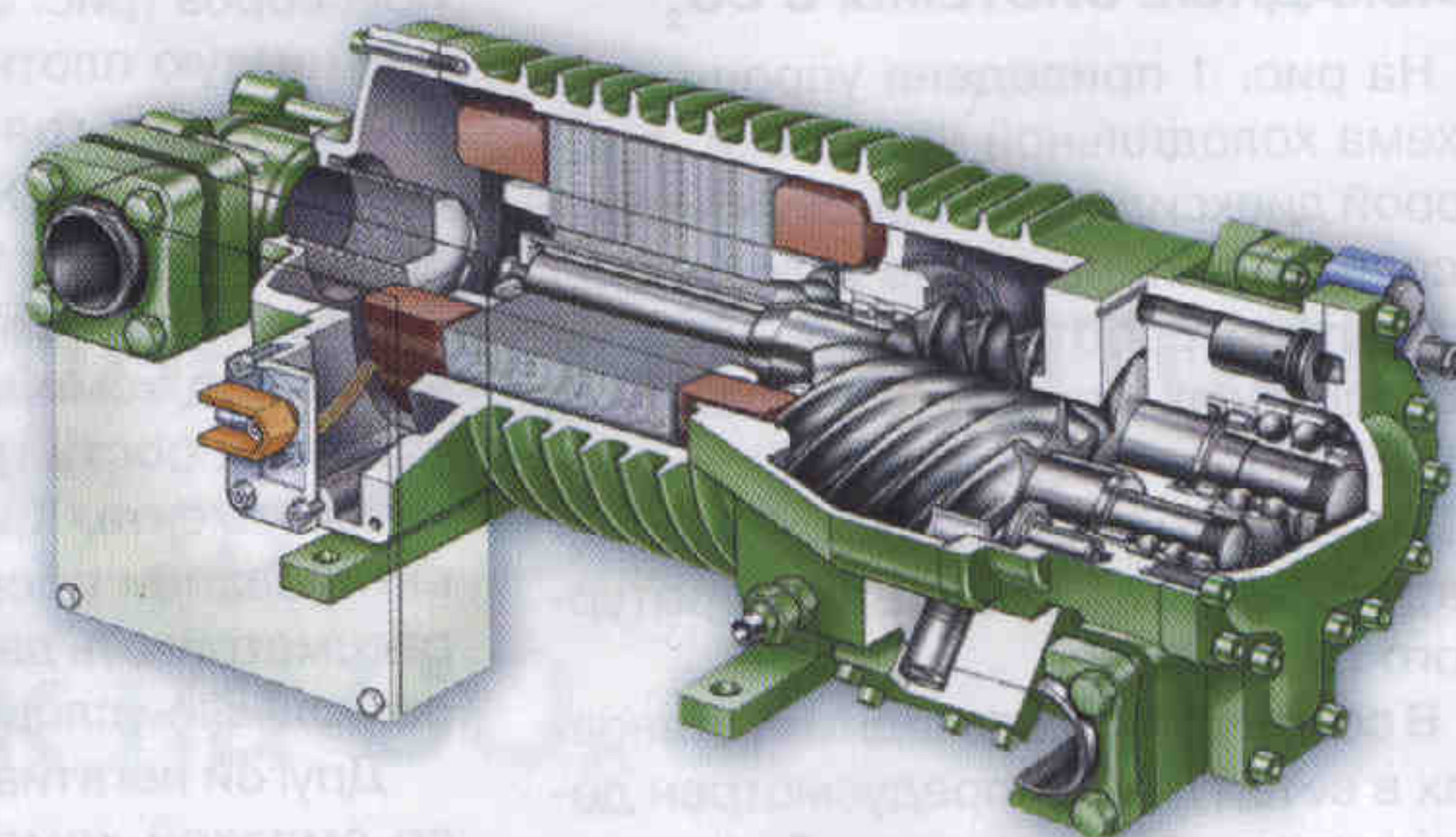


Рис. 6. Разрез полугерметичного винтового компрессора (без маслоотделителя)

компрессоров выбирают типоразмер с минимальным диаметром поршня, чтобы снизить нагрузки на подшипники и уменьшить изгибающие усилия на коленвал. Это относится и к подшипникам поршневых пальцев, которые также воспринимают значительные нагрузки. В малых поршневых компрессорах пальцы, как правило, скользят непосредственно в соединяемых деталях (поршне и шатуне), но с учетом специфических нагрузок при работе на CO_2 необходимо на пальцы устанавливать дополнительные подшипники скольжения.

В связи с более высоким массовым расходом газа конструкция клапанов компрессора также должна быть модифицирована.

В случае применения винтовых компрессоров можно использовать короткие роторы, а также в зависимости от объемной производительности – большие подшипники. При обычных условиях эксплуатации в каскадных системах с низкими соотношениями рабочих давлений такое изменение конструкции не приводит к снижению КПД.

Для защиты компрессора от чрезмерных механических нагрузок, а электродвигателя от перегрузок на самых тяжелых режимах на линии всасывания непосредственно на входе в компрессор устанавливают регулятор давления в картере. Его настраивают таким образом, чтобы после пуска компрессора давление всасывания установилось ниже допустимого максимума.

Охлаждение электродвигателя

При высокой удельной нагрузке на электродвигатель и его малых габаритах воздушное охлаждение во многих случаях оказывается неудовлетворительным из-за недостаточной площади наружной поверхности той час-

ти корпуса компрессора, где находится электродвигатель. Такой способ охлаждения потребовал бы разработки специальной конструкции компрессора для CO_2 и тем самым существенно снизил бы преимущество от использования стандартных узлов, производимых серийно.

Широко используемое в полугерметичных компрессорах охлаждение всасываемым газом эффективнее. Но при низкотемпературных режимах, а также при применении хладагентов, имеющих низкую удельную энтальпию паров, такой способ охлаждения невыгоден из-за дополнительного перегрева газа при протекании через электродвигатель. В результате изменяется удельный объем (плотность) всасываемого газа и снижается его массовый расход.

Однако, если рабочим веществом является диоксид углерода, потери от охлаждения всасываемым газом довольно малы в допустимой области применения компрессора. Причинами тому являются высокий массовый расход CO_2

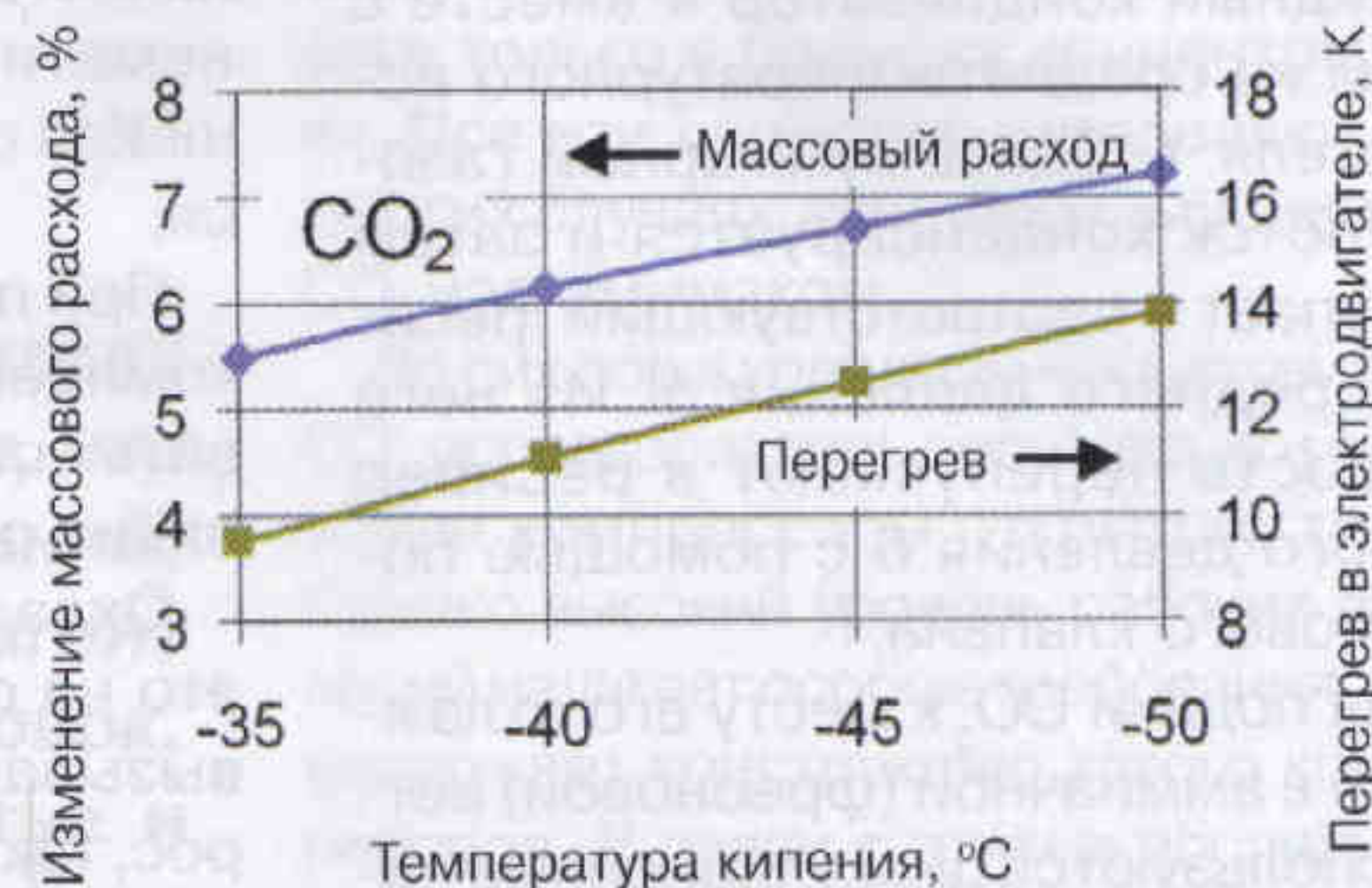


Рис. 7. Диаграмма изменения массового расхода CO_2 в зависимости от перегрева всасываемого газа в электродвигателе при различных температурах кипения (температура конденсации -10°C , перегрев 10°C)

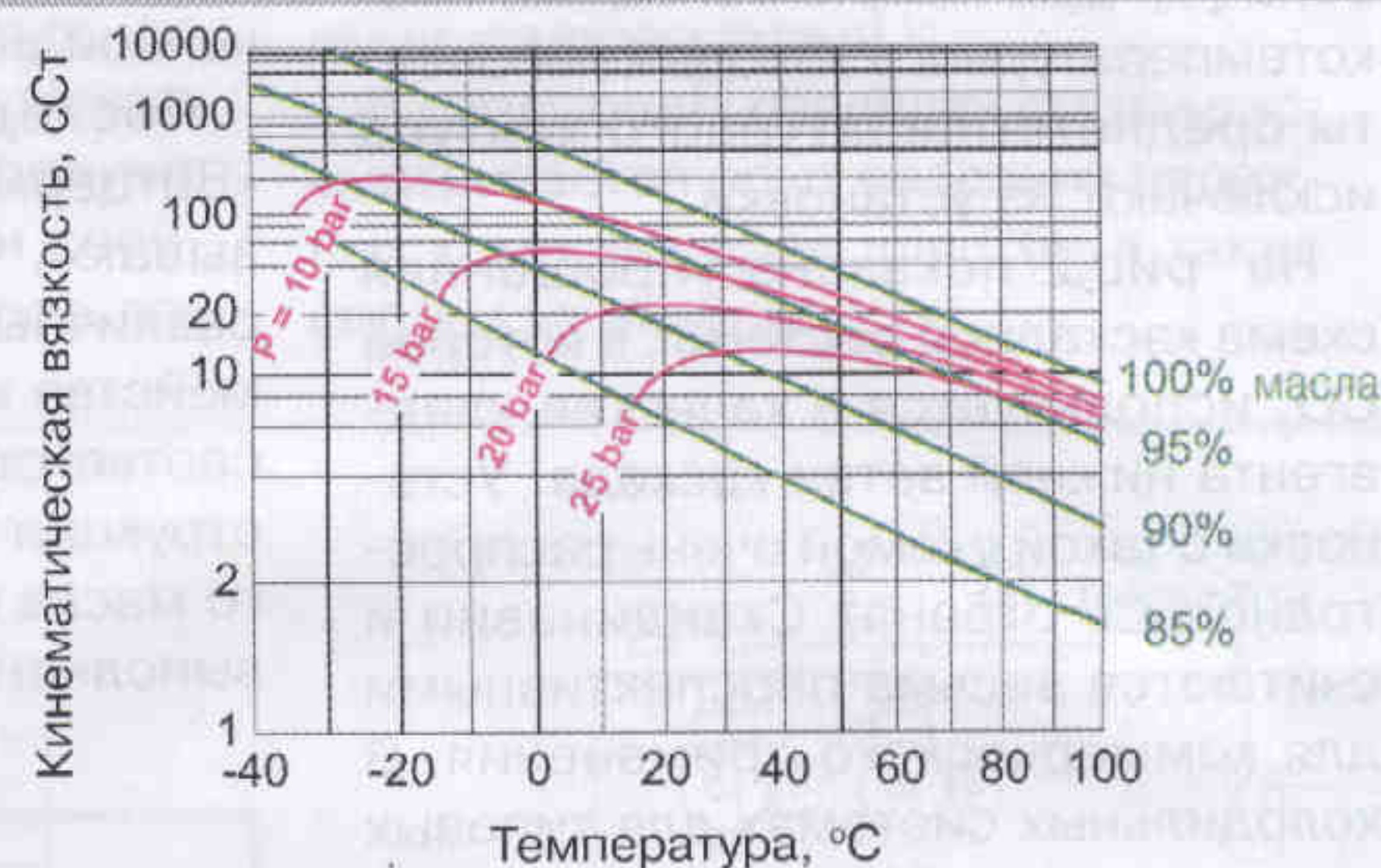


Рис. 8. Кинематическая вязкость смеси при растворении CO_2 в РОЕ-маслах



Рис. 9. Границы смешиваемости CO_2 с РОЕ-маслами и PAG-маслом при докритических температурах

и небольшой перегрев газа на всасывании при использовании затопленных испарителей. Это обеспечивает особенно интенсивное охлаждение электродвигателя и гарантирует низкую температуру обмоток, а следовательно, минимальные тепловые потери и высокую эффективность электродвигателя (рис. 7).

Каждая из обмоток электродвигателя оснащается соединенными с электронным защитным устройством датчиками температуры, обеспечивающими надежную защиту от перегрузок. При наличии достаточного охлаждения электродвигатель может работать при очень высоких нагрузках длительное время.

Смазка

Довольно большие механические нагрузки и высокая растворимость диоксида углерода в применяемых холодильных маслах определяют особые требования к их вязкостным и трибологическим свойствам, а также к конструкции компрессора.

Для надежного возврата масла из системы оно должно иметь хорошую смешиваемость с CO_2 даже при температуре -50°C и ниже.

Полиалкиленгликолевые (PAG) масла плохо растворяют CO_2 , обеспечивая при этом необходимую толщину слоя смазки с благоприятными вязкостными характеристиками. Однако вследствие неудовлетворительной смешиваемости с CO_2 наблюдаются трудности с циркуляцией масла в системе. Кроме того, очень высокая гигроскопичность PAG-масел может привести к резкому снижению их диэлектрических свойств, а также к повышению потенциала химической активности. Поэтому применение этих масел в полугерметичных компрессорах на CO_2 не рекомендуется.

Разносторонние научные и практические исследования показали, что модифицированные полиэфирные масла (Polar POE) вполне пригодны для использования в компрессорах с CO_2 , функционирующих в вышеуказанных условиях. Эти масла обладают высоким индексом вязкости (рис. 8), хорошими смазочными характеристиками, в приемлемой степени растворяют CO_2 , а также в отличие от PAG-масел и неполярных минеральных масел хорошо смешиваются с CO_2 [2] (рис. 9). Однако с учетом их гигроскопичности необходимо применять очень большой и мелкоячеистый фильтр-осушитель («молекулярное сито»).

Несмотря на то что полученные результаты исследований в целом пока вполне удовлетворительны, анализ состояния роликовых подшипников качения и подшипников скольжения показывает, что довольно часто происходит забивание поверхностей трения (при удовлетворительной вязкости смеси масла и CO_2). Одна из основных причин этого – образование значительной доли газовой фазы в смеси при испарении диоксида углерода в случае резкого падения давления и тепловыделения.

Из всего сказанного следует, что необходимы дальнейшие шаги как в поисках подходящих масел, так и в

разработках конструкций компрессоров.

Существенным фактором с точки зрения особых требований к конструкции компрессора является высокое давление всасывания. Поэтому в поршневых компрессорах «Битцер», работающих на CO_2 (рис. 5), используют подшипники с улучшенным материалом поверхности трения, рассчитанные на высокую нагрузку. Более того, система смазки проектируется таким образом, чтобы гарантировать быструю подачу масла после пуска компрессора и не допускать высокой концентрации газа в масле, подаваемом в подшипники.

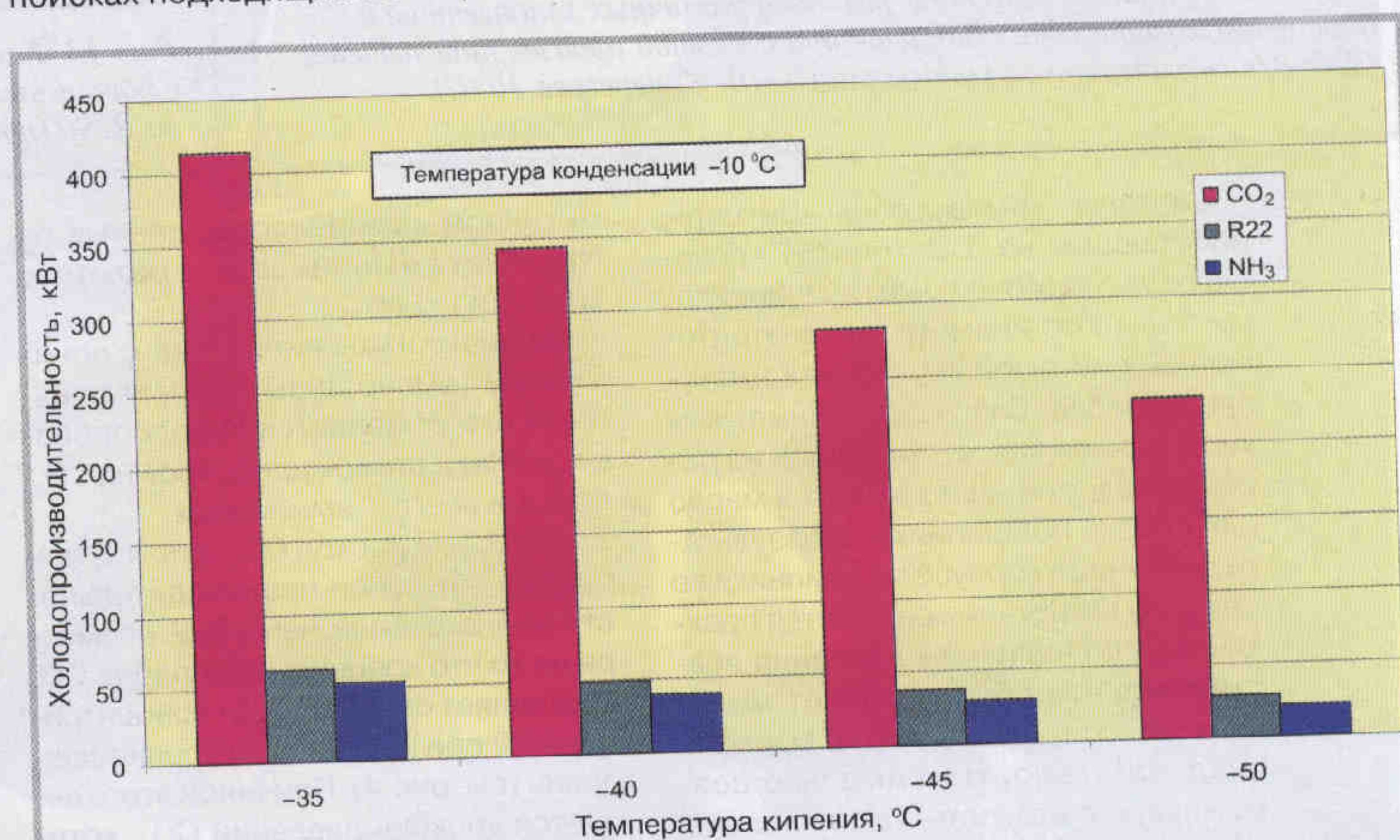


Рис. 10. Холодопроизводительность винтового компрессора «Битцер» при объемной производительности 220 м³/ч

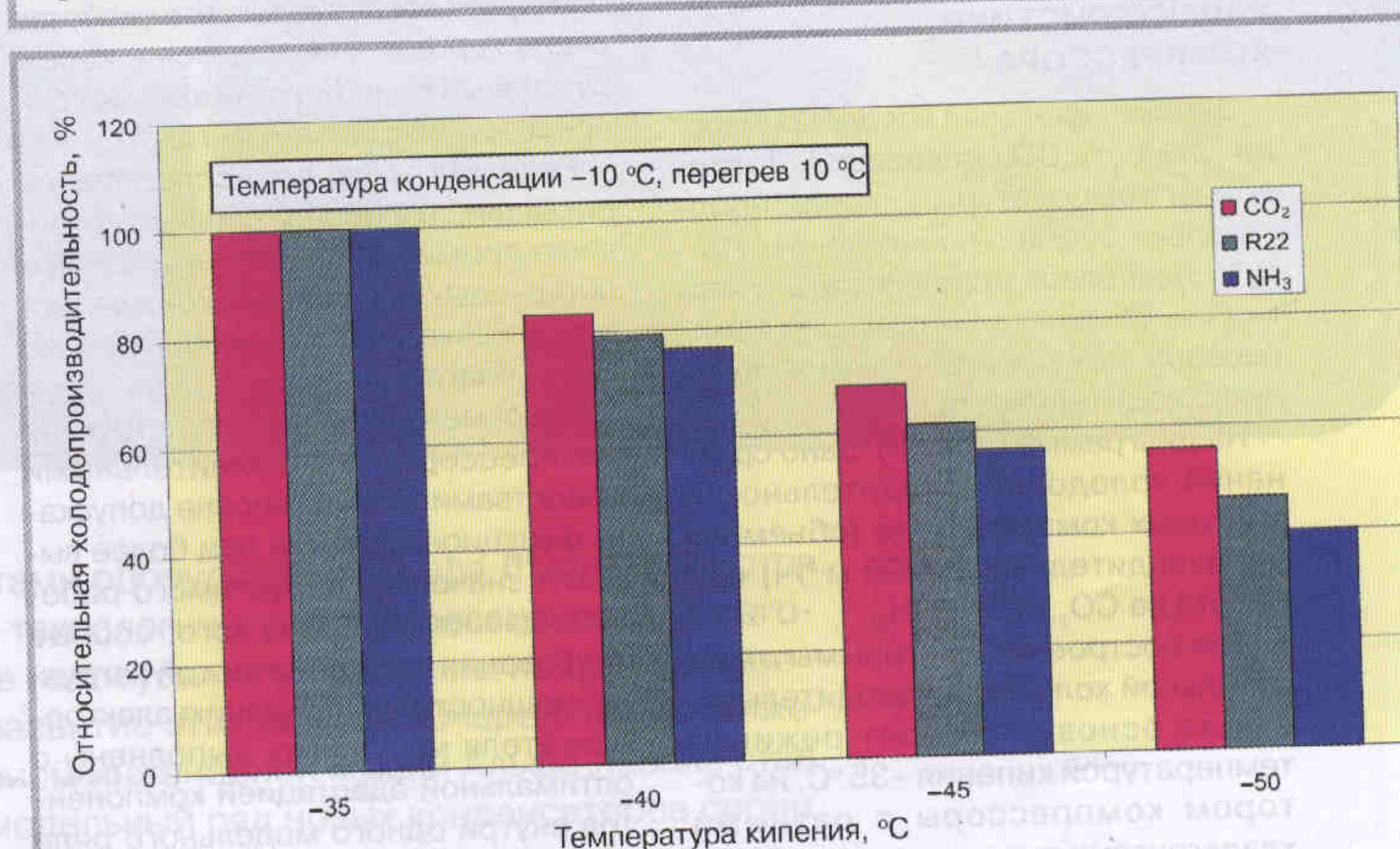


Рис. 11. Относительная холодопроизводительность при различных температурах кипения



Рис. 12. Сравнение массовых расходов различных хладагентов в винтовом компрессоре «Битцер» при объемной производительности 220 м³/ч (температура конденсации – 10 °C, перегрев 10 °C)

Винтовые компрессоры «Битцер», работающие на CO₂ (рис. 6), оснащают уже упомянутыми подшипниками большого диаметра и запатентованной системой внутренней циркуляции масла. Благодаря манжетным уплотнениям газ, вытекающий из рабочей полости, не поступает в масло для смазки подшипника. В результате давление в корпусе подшипника со стороны нагнетания снижается практически до величины давления всасывания, что обуславливает минимальное содержание CO₂ в масле и, следовательно, максимально возможную его вязкость. Такая система обеспечивает также значительное снижение реальной нагрузки на подшипники.

ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПРЕССОРА

Высокая удельная холодопроизводительность CO₂, зависимость которой от температуры кипения представляет собой очень пологую кривую, позволяет использовать в каскадных установках небольшие компрессоры даже при большой холодопроизводительности.

На диаграмме (рис. 10) дано сравнение холодопроизводительности винтовых компрессоров (объемная производительность 220 м³/ч) при работе на CO₂, R22 и NH₃.

Для построения диаграммы относительной холодопроизводительности за основу был взят режим с температурой кипения – 35 °C, на котором компрессоры с разными хладагентами имели равные холодопроизводительности. Данные по CO₂ и R22 были получены на полугер-

метичном компрессоре, данные по NH₃ – на компрессоре открытого типа (рис. 11).

Из диаграммы видно, что с понижением температуры кипения меньше всего изменяется холодопроизводительность компрессоров на CO₂, больше всего – аммиачных.

Массовый расход CO₂ (рис. 12) при равной объемной производительности намного выше, чем у R22, несмотря на то что концентрация паров CO₂ составляет около 60 % от концентрации R22 при идентичном уровне давлений (см. рис. 4). Причиной этого является уровень давлений CO₂, который в принятом диапазоне температур кипения примерно в 7–10 раз выше, чем у других хладагентов. Как было уже сказано выше, это свойство очень хорошо вписывается в конструктивный принцип охлаждения компрессора всасываемым газом.

Результаты наших исследований показали, что перспективы дальнейшего применения полугерметичных поршневых и винтовых компрессоров в каскадных установках с CO₂ очень благоприятны.

Современная базовая конструкция компрессоров с дополнительными средствами защиты вполне допускает функционирование при более высоких значениях допустимого рабочего давления. Более того, особые требования по механической нагрузке, мощности и охлаждению электродвигателя могут быть выполнены с оптимальной адаптацией компонентов внутри одного модельного ряда компрессоров.

Специально модифицированные полиэфирные (POE) масла уже до-



Рис. 13. Каскадная холодильно-морозильная установка с поршневыми компрессорами «Битцер» [верхняя ветвь на R290 (пропан), нижняя – на R744 (CO₂)]

статочно испытаны и вполне пригодны для смазки компрессоров. Однако требуются дополнительные исследования, чтобы обеспечить более надежную работу этих масел с CO₂.

Высокая объемная холодопроизводительность, а также довольно ровная характеристика холодопроизводительности – температура кипения CO₂ позволяют реализовать очень компактные и малозатратные схемные и конструктивные решения холодильных установок, которые определяют перспективы будущего широкого и экономичного применения CO₂ в низкотемпературных каскадных системах (рис. 13).

Экспериментальные исследования таких систем проводятся при уровне давлений, который находится в допустимом диапазоне, в связи с чем риск аварий остается сравнительно низким. Однако необходимо провести долговременные испытания образцов каскадных установок на CO₂, чтобы накопить достаточный опыт по эксплуатации компрессоров и других системных компонентов еще до того, как они начнут широко использоваться потребителями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pearson F., Refrigeration Systems Using Low Pressure Receivers, IoR Paper (UK), 1983.
2. Fahl J., Lubricants for CO₂ – DKV Conference (Germany), 1997.

Обращайтесь в компанию «Битцер СНГ» по адресу: Россия, 192007, г. Санкт-Петербург, ул. Тамбовская, д. 12 по телефонам: (812) 118 84 24(25), факсу (812) 118 84 26 или по e-mail: center@bitzer.ru