

Выбор хладагента и схемы холодильной установки

Канд. техн. наук **Е.А. РОТГОЛЬЦ**,
д-р техн. наук, проф. **В.В. ОНОСОВСКИЙ**,
канд. техн. наук **В.С. КАЛЮНОВ**,
И.К. АКЧУРИН
ЗАО «ОК», С.-Петербург

In the article are compared the characteristics of natural refrigerants: air, water, hydrocarbons, carbon dioxide and ammonia that are used in refrigeration technique. The assessment of energy efficiency of different circuits of refrigeration installation with CO_2 in the lower and NH_3 in the upper branch and of a two-stage ammonia installation is presented. Ammonia installations with boiling CO_2 as a pseudo coolant are also considered. For the version of installations with two evaporating temperatures a comparison of the cascade (CO_2/NH_3) circuit with a cascade-compound circuit proposed by the authors is given.

В последнее время в холодильной технике наблюдается тенденция к более широкому использованию так называемых природных хладагентов. К ним обычно относят воздух, воду, углеводороды ($C_n H_{2n+2}$), диоксид углерода и аммиак.

К сожалению, свойства этих веществ допускают только ограниченное их применение в технике умеренного холода.

Так, низкая критическая температура воздуха ($t_{кр} = -140,61\text{ }^{\circ}\text{C}$) не позволяет использовать парожидкостный цикл с изменением агрегатного состояния в области умеренно низких температур. Использование в этих условиях цикла газовой (воздушной) холодильной машины связано с большим расходом рабочего вещества (воздуха) и сопровождается существенными необратимыми потерями. В результате при температурах охлаждаемого объекта выше $t_{об} \geq -70\text{ }^{\circ}\text{C}$ воздушная холодильная машина по энергетической эффективности заметно уступает парокомпрессионной, поэтому воздушные холодильные машины находят применение в области умеренно низких температур в основном

в специальных холодильных установках для различных испытательных устройств либо в аппаратах для термической обработки технологических продуктов.

Вода имеет высокую температуру затвердевания и поэтому может использоваться в качестве хладагента только в абсорбционных и паро-струйных холодильных установках систем кондиционирования воздуха.

Углеводороды (например, пропан C_3H_8 и бутан C_4H_{10}) горючи и взрывоопасны, что делает их применение возможным только при принятии определенных мер безопасности. В настоящее время намечаются два основных направления использования углеводородов в качестве хладагентов:

✓ в холодильных установках малой производительности (например, бытовые холодильники), в которых масса заполняемого хладагента не превышает нескольких десятков граммов. Это исключает возможность достижения его взрывоопасной концентрации при разгерметизации холодильной установки в помещении, в котором она размещена;

✓ в холодильных установках предприятий химической и нефтеперерабатывающей промышленности, где технологическим продуктом также являются углеводороды. В данном случае использование углеводородных хладагентов не приводит к заметному повышению пожароопасности или взрывоопасности основного производства. При этом на предприятии в целом должно обеспечиваться строгое соблюдение требований противопожарной безопасности.

Диоксид углерода (R744) не получил широкого применения в качестве хладагента в парожидкостном холодильном цикле из-за низкого значения критической температуры ($t_{кр} = 31,03\text{ }^{\circ}\text{C}$), не позволяющего в ряде географических районов страны осуществить в теплое время года процесс конденсации сжатого компрес-

соров пара. В таких условиях возможно использование закритического цикла, где процесс конденсации заменен охлаждением перегретого пара, находящегося при давлении выше критического ($p_n \geq 7,4$ МПа). При этом плотность теплового потока в охладителе пара заметно меньше, чем при конденсации, что приводит к увеличению металлоемкости холодильной установки.

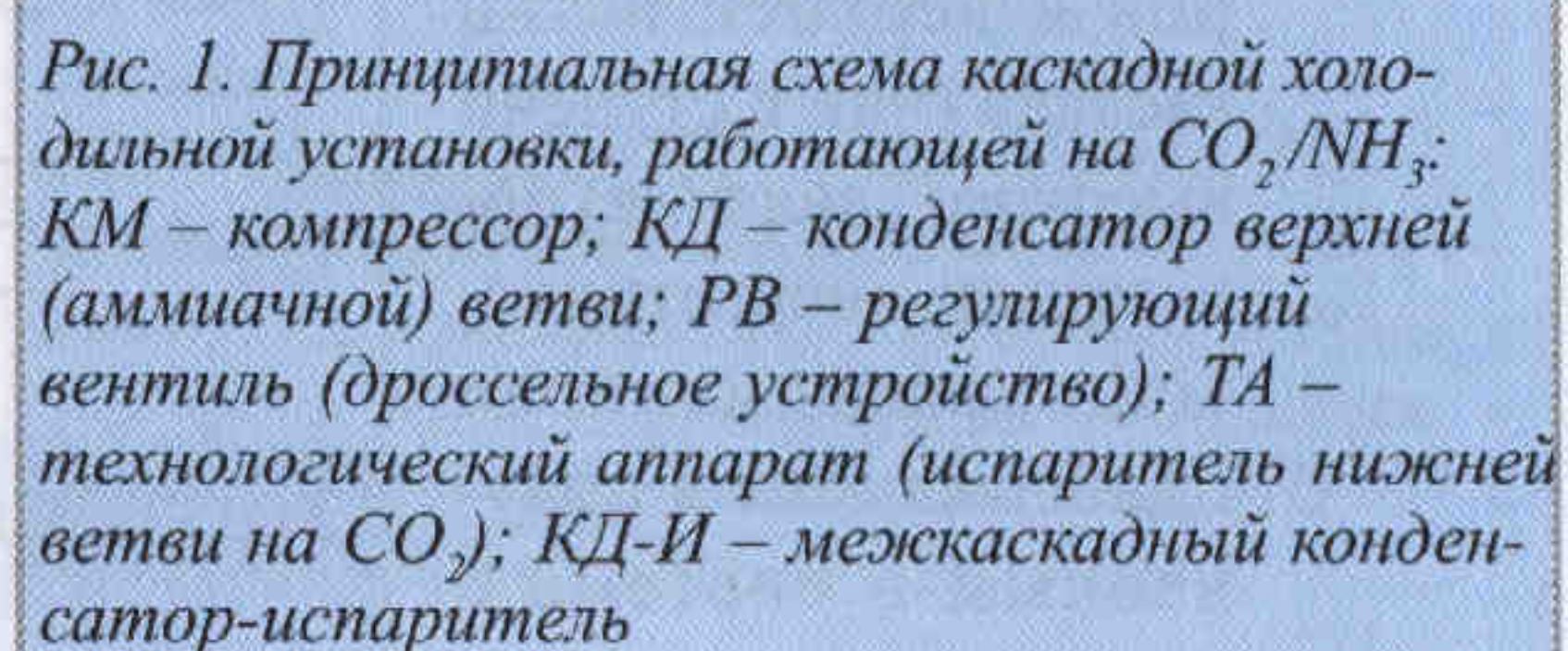
В связи с изложенным диоксид углерода в основном применяют при производстве сухого льда и жидкой углекислоты, а также в качестве хладагента нижней ветви каскадной холодильной установки.

Аммиак (R717) последний из перечисленных выше природных хладагентов, применимый в весьма широком и наиболее востребуемом интервале температур охлаждаемого объекта $t_{об} = \pm 0 \dots -50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и в диапазоне холодопроизводительностей от десятков киловатт до мегаватт. В зависимости от требуемой температуры охлаждаемого объекта схема используемой аммиачной холодильной установки может быть одно- или двухступенчатой. Аммиак обладает высоким термодинамическим совершенством и благоприятными для его использования в качестве хладагента теплофизическими свойствами, не разрушает озонового слоя земли и имеет нулевое значение потенциала глобального потепления. Это делает его применение желательным и безопасным с экологической точки зрения. Резкий, раздражающий запах, присущий аммиаку и проявляющийся на уровне предельно допустимой концентрации в рабочей зоне (ПДК), предупреждает персонал об опасности. Однако аммиаку присущ и ряд отрицательных свойств (ГОСТ 6221–90 Е): он горюч при объемной концентрации в воздухе свыше 11%, взрывоопасен при концентрации в пределах от 15 до 28 % и ток-

Другой вариант получения низких температур – аммиачные двухступенчатые холодильные установки.

$$t_{\kappa}^{R717} = 35^{\circ}\text{C}.$$

Результаты расчетов, проведенных по реальным характеристикам компрессоров фирмы York, представлены



на рис. 2, а и б, где показано, что при температуре кипения $t_0 \geq -40^\circ\text{C}$ двухступенчатая холодильная установка энергетически более совершенна, чем каскадная. При этом холодильный коэффициент в каскадной установке достигает максимума при промежуточной температуре конденсации диоксида углерода $t_k^{R744} \approx -12^\circ\text{C}$, а в двухступенчатой – при промежуточной температуре кипения аммиака $t_m^{R717} \geq -5^\circ\text{C}$.

При температуре кипения $t_0 = -50^\circ\text{C}$ (см. рис. 2, в) большая энергетическая эффективность обеспечивается каскадной схемой холодильной установки. Максимальное значение холодильного коэффициента в каскадной схеме достигается при температуре конденсации диоксида углерода $t_k^{R744} \approx -13^\circ\text{C}$ и промежуточной температуре кипения аммиака $t_m^{R717} \approx -12^\circ\text{C}$ в двухступенчатой схеме холодильной установки.

Расчеты показывают, что наиболее высокая энергетическая эффективность цикла достигается при использовании винтовых компрессоров в обеих ветвях каскадной установки (или в обеих ступенях двухступенчатой схемы), а самая низкая – при применении в обеих схемах только поршневых компрессоров.

При использовании винтовых компрессоров в нижней ветви каскада (или в ступени низкого давления) и поршневых компрессоров в верхней ветви каскада (или в ступени высокого давления) показатели энергетической эффективности приближаются к полученным в системе с винтовыми компрессорами.

рами, работающими в обеих ветвях каскадной или обеих ступенях двухступенчатой установки.

Винтовые компрессоры, серийно выпускаемые фирмами в настоящее время и пригодные для работы на диоксиде углерода, обеспечивают холодопроизводительность нижней ветви каскадной холодильной установки $Q_0 \approx 400...5000$ кВт, что в ряде случаев превышает потребности пищевых производств в низкотемпературном холоде.

Стремление снизить холодопроизводительность нижней ветви каскада обусловило выбор варианта с поршневым компрессором в нижней ветви каскада и винтовым в верхней. Полученные при этом значения холодильного коэффициента оказались ниже, чем для варианта с винтовыми компрессорами, работающими в обеих ветвях каскада, но выше, чем в традиционном варианте с винтовыми компрессорами в нижней и поршневыми в верхней ветвях каскада.

В двухступенчатой аммиачной хо-

лодильной установке с поршневым компрессором в ступени низкого давления и винтовым в ступени высокого давления холодильный коэффициент незначительно превышает эту величину для установки с поршневыми компрессорами в обеих ступенях, но заметно ниже, чем в традиционном варианте с винтовым компрессором в ступени низкого давления.

Следует учитывать, что конденсация пара R744, образовавшегося в технологических аппаратах, происходит в конденсаторной части межкаскадного конденсатора-испарителя при температуре $t_k^{R744} \leq -5^\circ\text{C}$, соответствующей давлению конденсации $p_k^{R744} \leq 3,03$ МПа. Таким образом, эта часть каскадной системы работает при давлениях конденсации, близких к 3,0 МПа. При остановке всей системы давление в этой ее части может повыситься до 7,0...7,5 МПа из-за теплопритока от окружающей среды. Чтобы избежать этого, следует дополнить схе-

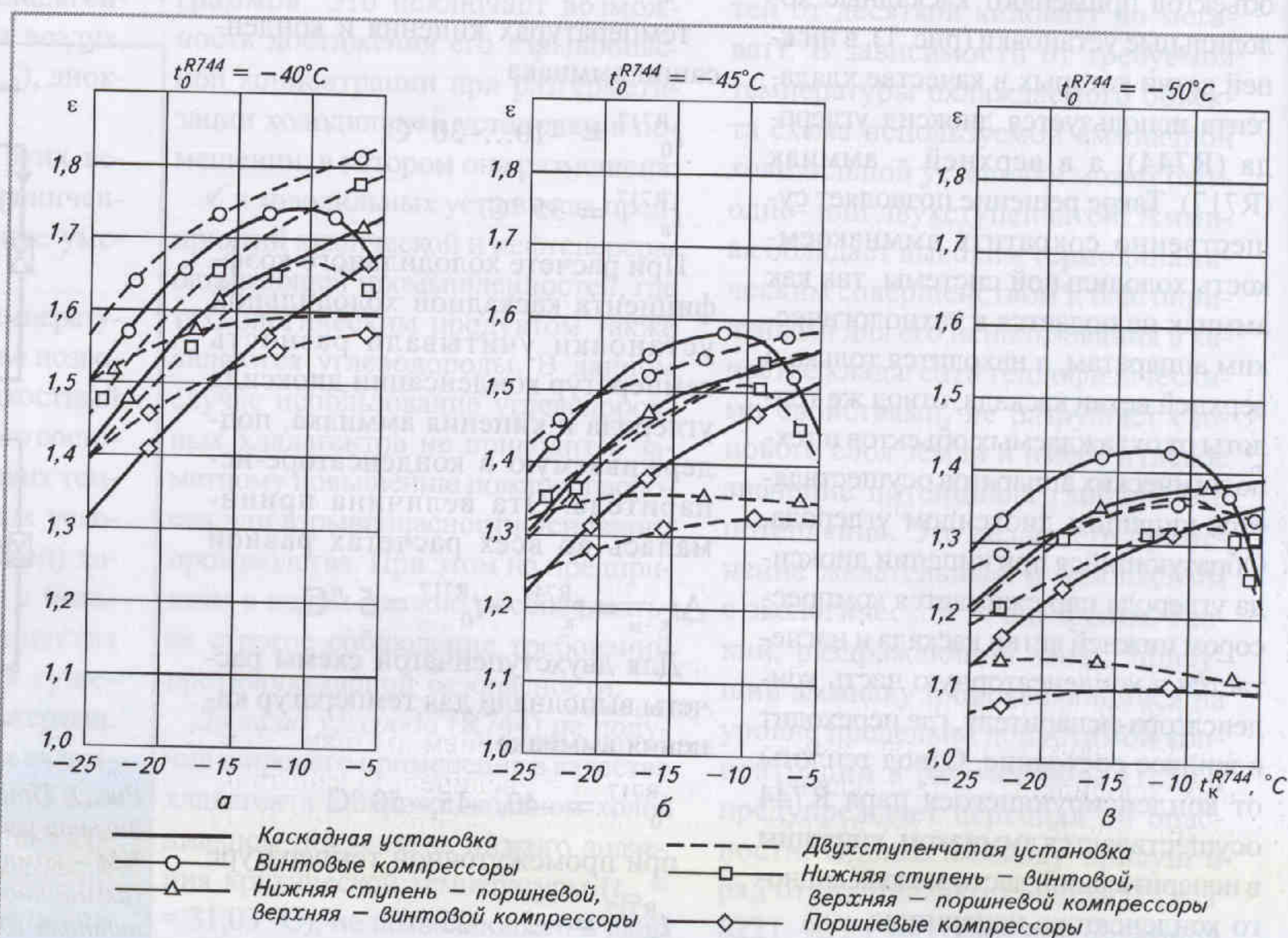
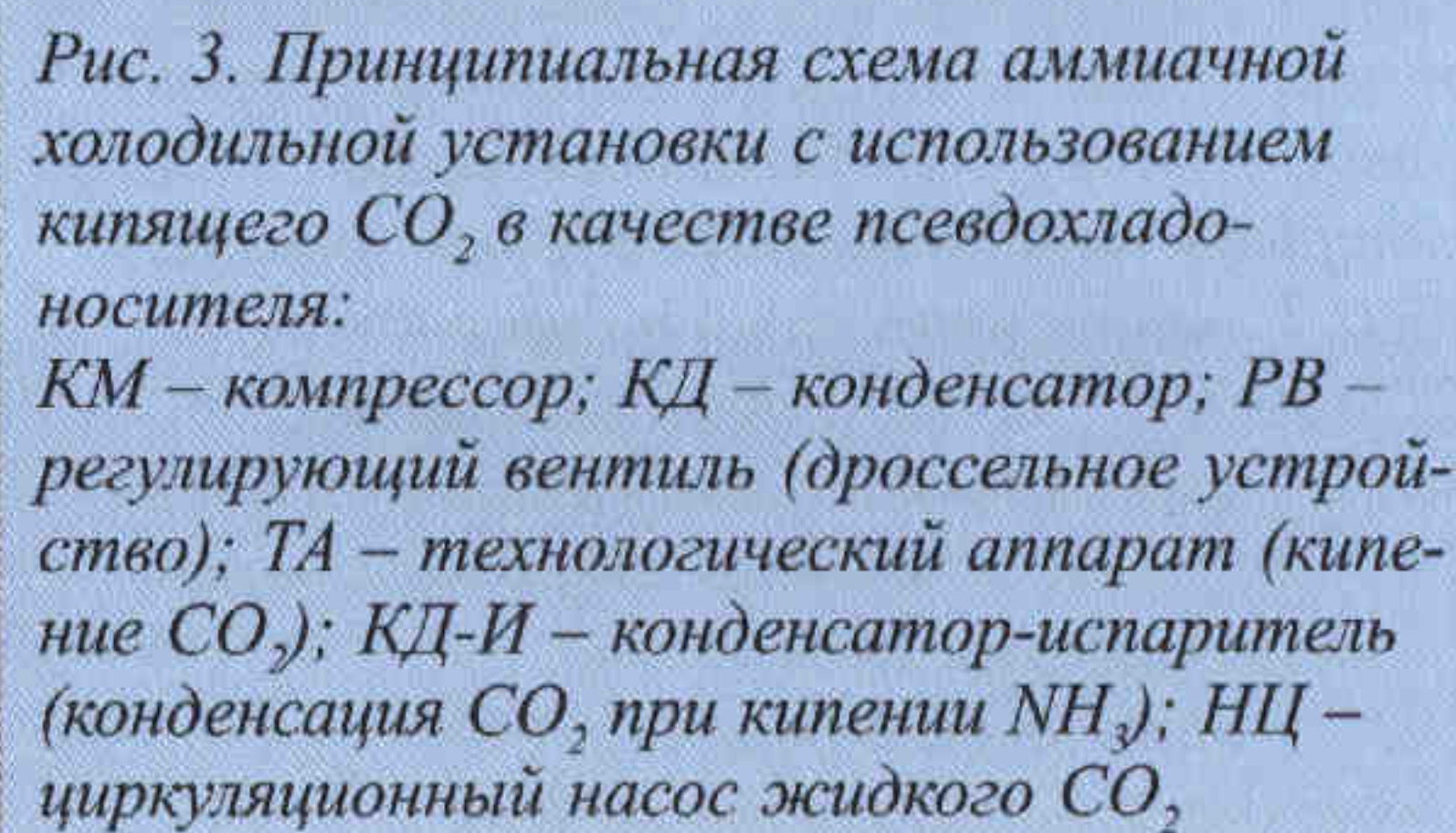


Рис. 2. Холодильный коэффициент каскадных и двухступенчатых холодильных установок

Применение диоксида углерода в качестве псевдохладоносителя в одно- или двухступенчатых аммиачных холодильных установках позволяет осуществлять косвенное охлаждение объектов с помощью кипящего жидкого промежуточного хладоносителя (рис. 3). Температура кипения аммиака в таких установках должна быть ниже темпе-

Наряду с холодильными установками с одной температурой кипения $t_0 = -50 \dots -40 \text{ }^\circ\text{C}$ в реальных условиях широко используются схемы, предназначенные для отвода теплоты от охлаждаемых объектов на нескольких температурных уровнях, в частном случае при двух температурах кипения $t_{01} = -50 \dots -40 \text{ }^\circ\text{C}$ и $t_{02} = -10 \dots -5 \text{ }^\circ\text{C}$. В каскадных холодильных установках, использующих аммиак в качестве хладагента верхней ветви каскада и диоксид углерода в качестве хладагента нижней ветви каскада, температуры кипения $t_{02} = -10 \dots -5 \text{ }^\circ\text{C}$ могут быть получены при промежуточном давлении аммиачной двухступенчатой холодильной установки, обслуживающей верхнюю ветвь каскадной системы. В этом случае отвод теплоты от технологических аппаратов будет осуществляться за счет непосредственного кипения аммиака. Подача кипящего аммиака в технологические аппараты или другие охлаждаемые объекты неизбежно приведет к увеличению аммиакоемкости системы, что, в свою очередь, ухудшит показатели безопасной эксплуатации установки. Отвод теплоты от технологических аппаратов и других охлаждаемых объектов за счет создания системы косвенного охлаждения приведет к увеличению капитальных и эксплуатационных затрат и поэтому тоже не может быть рекомендован, хотя и позволит снизить аммиакоемкость системы по сравнению со схемой с непосредственным кипением аммиака. Точно так же к увеличению капитальных затрат и эксплуатационных расходов приведет создание системы косвенного охлаждения с жидким промежуточным хладоносителем, охлаждаемым кипящим диоксидом углерода.

Нижняя ветвь каскадной установ-



ки представляет собой одноступенчатую холодильную машину, работающую на диоксиде углерода с температурой кипения $t_{01}^{R744} = -50 \dots -40 \text{ }^{\circ}\text{C}$, оснащенную двумя ресиверами, в первом из которых (РКЦ-1) поддерживается давление p_{01} , соответствующее температуре насыщения $t_{01}^{R744} = -50 \dots -40 \text{ }^{\circ}\text{C}$, а во втором (РКЦ-2) – давление p_{02} , соответствующее температуре насыщения $t_{02}^{R744} = -10 \dots -12 \text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом ре-

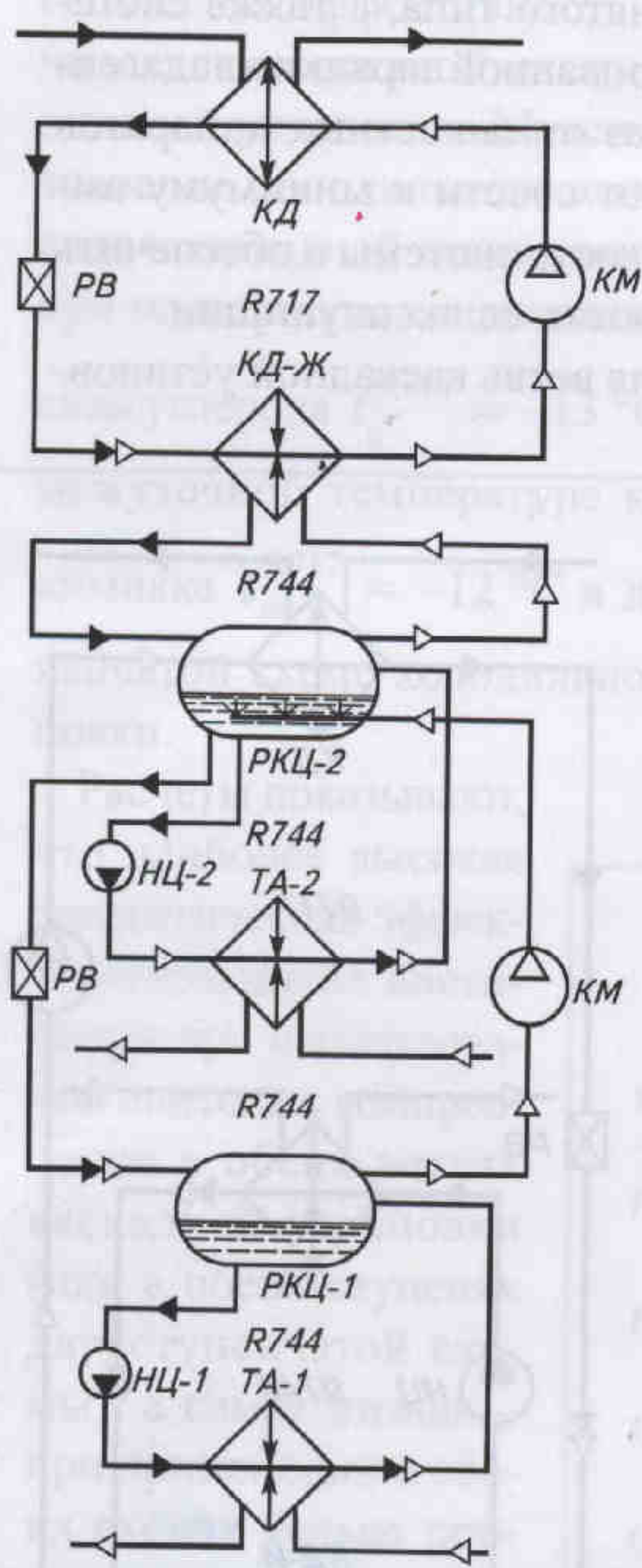


Рис. 4. Принципиальная схема каскадно-компаундной холодильной установки, обеспечивающей охлаждение на нескольких температурных уровнях:

КМ – компрессоры; КД – конденсатор; РВ – регулирующие вентили (дроссельное устройство); ТА-1 и ТА-2 – технологические аппараты на двух температурных уровнях; РКЦ-1 – циркуляционный ресивер ветви на CO_2 ; РКЦ-2 – компаундный ресивер; КД-Ж – испаритель аммиака – конденсатор CO_2 ; НЦ-1 – насос подачи жидкого CO_2 к технологическим аппаратам ТА-1; НЦ-2 – насос подачи жидкого CO_2 к технологическим приборам ТА-2

сивер РКЦ-1 играет роль циркуляционного, а РКЦ-2 является компаундным. Давление, соответствующее требуемой температуре кипения в циркуляционном ресивере РКЦ-1, обеспечивается компрессором, работающим на диоксиде углерода, а давление, соответствующее заданной температуре кипения в компаундном ресивере РКЦ-2, – аммиачным компрессором, обеспечивающим работу термосифона, подводящего пар диоксида углерода к испарителю аммиачного чиллера. Пар диоксида углерода конденсируется в испарителе чиллера за счет отвода теплоты кипящим аммиаком и сливается в компаундный ресивер РКЦ-2, где накапливается.

Часть жидкого диоксида углерода из ресивера РКЦ-2 дросселируется в регулирующем вентиле *PВ* ветви CO_2 и направляется в циркуляционный ресивер РКЦ-1, где влажный пар, образовавшийся после регулирующего вентиля, разделяется на насыщенный пар и насыщенную жидкость. Жидкость насосом *НЦ-1* подается к технологическим аппаратам *ТА1*, которые охлаждаются за счет отвода теплоты кипящим диоксидом углерода. Полученная парожидкостная смесь диоксида углерода возвращается в циркуляционный ресивер РКЦ-1, где жидкость опять отделяется и снова насосом возвращается к охлаждаемым объектам, а от-

Сопоставление каскадных и двухступенчатых холодильных установок

Факторы, влияющие на выбор	Каскадная схема	Двухступенчатая схема
Аммиакоемкость системы	От десятков килограммов до сотен тонн (в зависимости от производительности)	От сотен килограммов до десятков тонн
Энергетическая эффективность	Выгоднее при температуре кипения ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$	Выгоднее при температуре выше $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$
Целесообразность применения системы косвенного охлаждения	Не требуется	Обеспечение безопасности людей от токсического поражения при утечке аммиака через неплотности теплообменных аппаратов в охлаждаемых или производственных помещениях
Необходимость автономного термостатирующего холодильного агрегата для поддержания давления при остановках системы	Требуется, иначе аппараты нижнего каскада должны быть рассчитаны на давление не ниже 7,4 МПа	Не требуется
Оттаивание инея с поверхности охлаждающих приборов	Для оттаивания инея целесообразно использовать электрические нагреватели	Может быть использовано типовое решение по оттаиванию инея парами аммиака высокого давления
Эффективность работы компрессоров	Обе ветви каскада работают при избыточном давлении хладагента. Давление диоксида углерода в конденсаторе-испарителе выше давления аммиака	Аммиачный компрессор низкого давления работает при давлении ниже атмосферного
Возможность подбора оборудования	Выпускается всего несколько марок компрессорных агрегатов, предназначенных для работы на CO_2 . Ограничен выбор технологических аппаратов	Фирмы выпускают широкий ассортимент компрессоров и технологических аппаратов, предназначенных для работы на аммиаке, что облегчает их подбор
Выбор предохранительных клапанов	Требуется разработка новой конструкции так как возможно снегообразование при некоторых условиях истечения пара диоксида углерода при давлении в аппарате выше 3,5 МПа	Используются типовые предохранительные клапаны

делившийся пар смешивается с паром, образовавшимся при дросселировании, всасывается компрессором, сжимается до давления, соответствующего температуре насыщения $t_{02}^{R744} = -10...-12\text{ }^{\circ}\text{C}$, и возвращается в компаундный ресивер РКЦ-2.

Другая часть жидкого диоксида углерода из компаундного ресивера РКЦ-2 забирается циркуляционными насосами НЦ-2 и направляется к охлаждающим приборам ТА2, отвод теплоты от которых также осуществляется диоксидом углерода, кипящим при температуре $t_{02}^{R744} = -10...-12\text{ }^{\circ}\text{C}$. Полученная парожидкостная смесь диоксида углерода после охлаждающих приборов возвращается в компаундный ресивер РКЦ-2.

Оставшаяся в компаундном ресивере часть жидкого диоксида углерода используется для охлаждения перегретого пара CO_2 , поступающего в компаундный ресивер пос-

ле сжатия в компрессоре. Для этого вдоль нижней образующей компаундного ресивера размещается барботер – перфорированная труба, обеспечивающая равномерное распределение потока перегретого пара, охлаждающегося при контакте со слоем жидкого диоксида углерода, поступающего из испарителя чиллера КД-Ж.

Предлагаемое решение обеспечивает работу системы при минимально допустимом количестве заправляемого аммиака, т. е. в условиях максимальной безопасности.

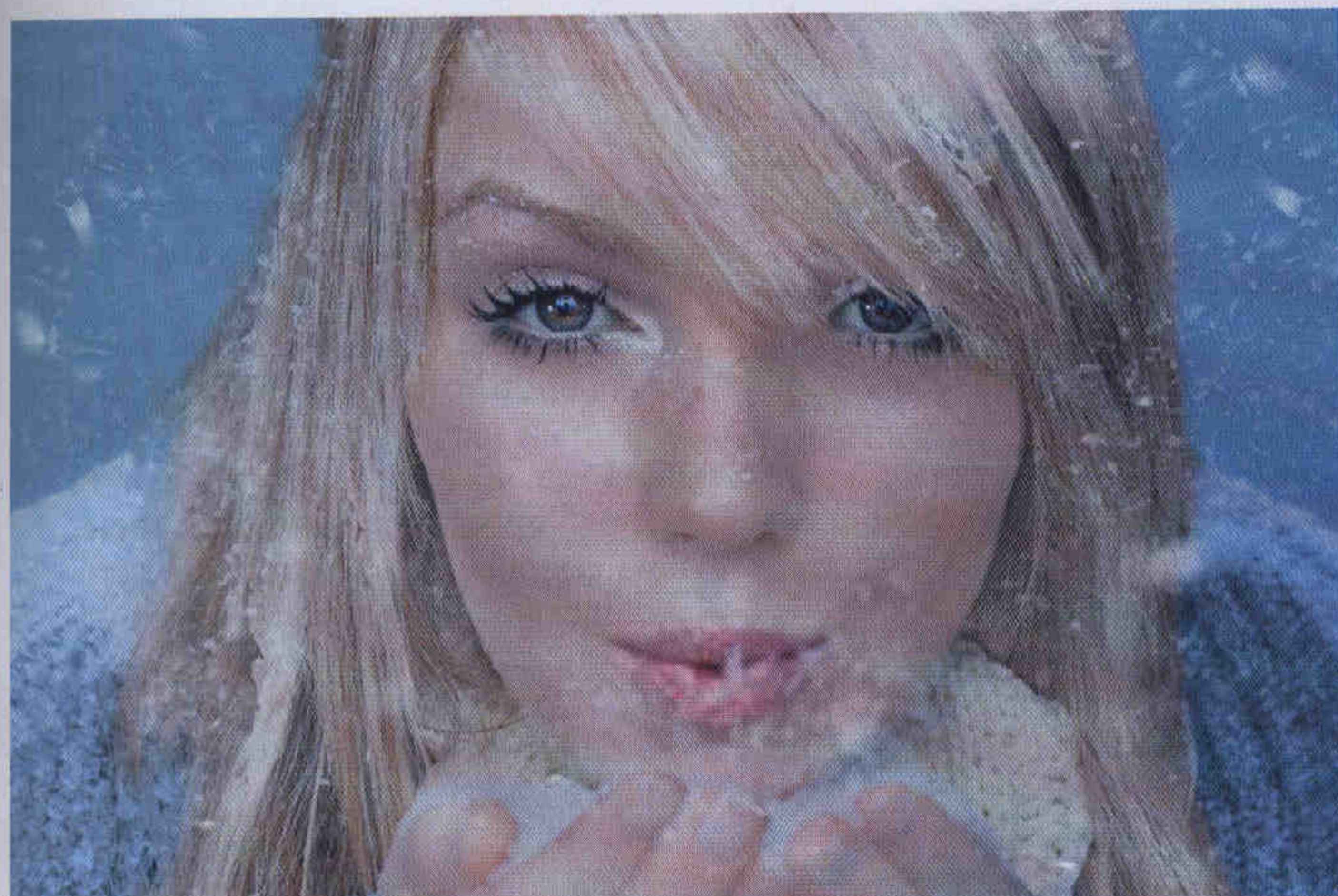
Диоксид углерода подается к охлаждаемым объектам с помощью насосов. Плотность пара диоксида углерода существенно (более чем на порядок) превышает плотность пара аммиака при сравнимых условиях, что приводит к снижению объемных расходов при тех же холодопроизводительностях и позволяет использовать трубопроводы меньших диаметров и компрессоры с меньшими объемными производительностями,

что снижает металлоемкость установки.

В таблице приводятся достоинства и недостатки каскадных и двухступенчатых схем, оказывающие влияние на выбор того или иного схемного решения.

Приведенное сопоставление позволяет оценивать энергетическую эффективность двухступенчатых и каскадных холодильных установок и обоснованно подходить к выбору оборудования.

Однако для проектирования таких систем в Технический регламент, разрабатываемый под началом Госгортехнадзора, должны быть внесены требования безопасной эксплуатации каскадных холодильных установок. Учитывая противоречивость термодинамических и теплофизических свойств различных хладагентов, используемых в каскадных установках, отсутствие таких требований неизбежно будет создавать трудности при проектировании систем и согласовании проектов в контролирующих органах.



25 лет красоте холода

Нюрнберг ждёт Вас на празднование юбилея. И спустя 25 лет «ИКК» остаётся ведущей выставкой, решения которой направлены в будущее. Это - международная специализированная выставка климатического оборудования, техники кондиционирования и вентиляции мирового значения для специалистов из различных отраслей промышленности, производителей и торговцев, архитекторов и проектировщиков. Это - хороший повод для праздника.

Отметим вместе с Вами в Нюрнберге.

Нюрнберг, Германия

13. – 15.10.2004



**IKK 2004
Nürnberg**

25. Международная специализированная выставка по теме «Холодильная техника. Вентиляция и кондиционирование»



www.ikk-online.com

www.ikk-tradefair.com

Проведение
NürnbergMesse

Организаторы
VDKF Wirtschafts- und Informationsdienste GmbH
info@vdkf.com

Подробная информация:
Представительство Немецкой Экономики в РФ
Тел.: +7 0 95. 2 34 49 50
Факс: +7 0 95. 2 34 49 51
sedowa@dlhk.ru

VDKF

NÜRNBERG MESSE