

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1. Теоретические основы работы холодильных установок транспортных рефрижераторных судов.....	6
1.1. Физические принципы получения искусственного холода	6
1.2. Схемы и циклы холодильных установок транспортных рефрижераторных судов	8
2. Рабочие вещества холодильных установок транспортных рефрижераторных судов.....	18
3. Конструкция грузовых трюмов и способы их охлаждения	28
4. Конструкция и принцип действия основного оборудования холодильных установок транспортных рефрижераторных судов.....	31
4.1. Конструкция и принцип действия поршневых компрессоров	31
4.2. Конструкция и принцип действия винтовых компрессоров	34
4.3. Конструкция и принцип действия конденсаторов, линейных ресиверов.....	43
4.4. Конструкция и принцип действия испарительных систем	48
5. Конструкция и принцип действия вспомогательного оборудования холодильных установок транспортных рефрижераторных судов.....	54
5.1. Конструкция и принцип действия вспомогательных теплообменных аппаратов.....	54
5.2. Конструкция и принцип действия маслоотделителей и маслоохладителей	57
6. Система автоматизации холодильных установок транспортных рефрижераторных судов.....	59
6.1. Система аварийной защиты	59
6.2. Система автоматического управления	66
6.3. Система автоматического регулирования	67
7. Основные положения технической эксплуатации холодильных установок транспортных рефрижераторных судов.....	78
7.1. Испытания холодильных установок транспортных рефрижераторных судов	80
7.2. Техническое использование холодильных установок транспортных рефрижераторных судов	82
7.3. Техническое обслуживание холодильных установок транспортных рефрижераторных судов	85

7.4. Типовые неисправности, возникающие во время работы холодильных установок транспортных рефрижераторных судов	93
8. Техника безопасности при эксплуатации холодильных установок транспортных рефрижераторных судов.....	100
9. Экологические аспекты эксплуатации холодильных установок транспортных рефрижераторных судов.....	103
Литература.....	108

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время более 80% всего объёма мировой товарной торговли осуществляется по морю, в том числе и транспортировка с применением рефрижераторных судов.

Холодильные установки современных транспортных рефрижераторных судов имеют высокий уровень автоматизации, что позволяет судовладельцам сокращать количество членов экипажа в целом и, в частности, не трудоустраивать на такие суда рефрижераторных механиков. В таких случаях обязанности по технической эксплуатации судовых холодильных установок возлагаются на старшего механика или другого специалиста судомеханической службы (зависит от судовладельца).

У многих судовых механиков самостоятельная эксплуатация холодильных установок вызывает большие трудности из-за отсутствия достаточной теоретической и практической подготовки.

В данном пособии рассматриваются теоретические основы работы производственных холодильных установок транспортных рефрижераторных судов, способы охлаждения грузовых трюмов, конструкция и принцип действия основного и вспомогательного холодильного оборудования, а также системы их автоматизации и основы технической эксплуатации. Вопросы технического обслуживания и возникающих неисправностей в работе конкретного холодильного оборудования рассматриваются в соответствующих разделах учебного пособия. Также приводится основная терминология по судовым холодильным установкам на русском и английском языках.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК ТРАНСПОРТНЫХ РЕФРИЖЕРАТОРНЫХ СУДОВ

1.1. Физические принципы получения искусственного холода

Теоретические основы работы холодильных установок базируются на обратном цикле Карно (рис. 1) и втором законе термодинамики, который гласит, что теплота не может произвольно передаваться от более холодного тела к более тёплому без затрат энергии.

Давление, МПа (бар)
(Pressure, MPa or bar)

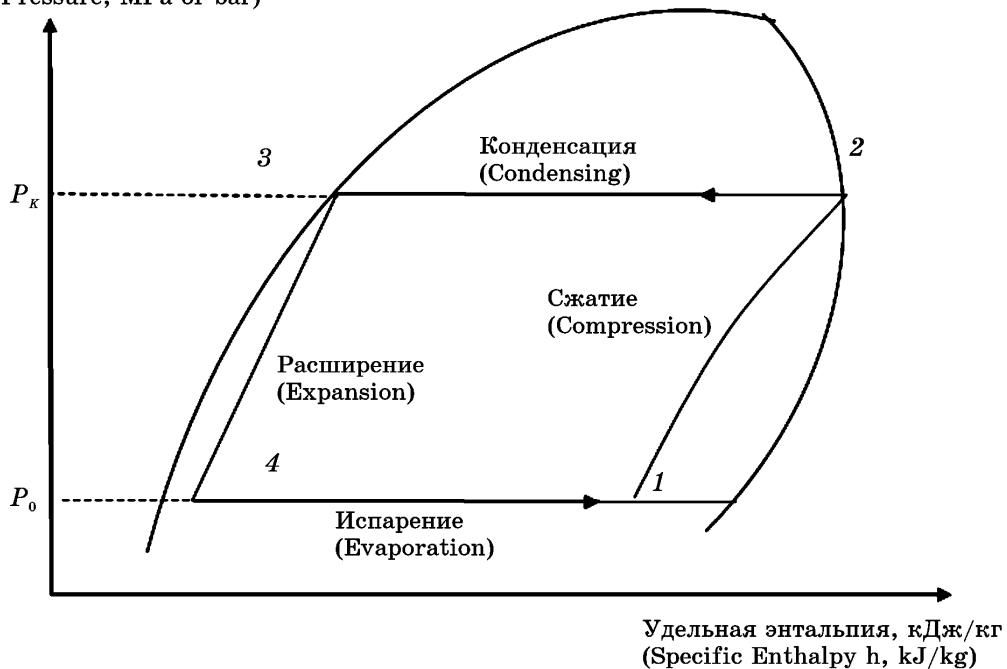


Рис. 1

Обратный цикл Карно

В обратном цикле Карно осуществляются фазовые превращения — испарение (кипение) и конденсация.

Фазовые превращения (плавление, кипение и сублимация) являются процессами, поглощающими относительно большие количества тепла. В природе имеются вещества, например, вода, сернистый ангидрид, аммиак, фреоны, углекислота и др., у которых процессы плавления, кипения, сублимации протекают при низких температурах, поэтому их применяют для получения охлаждающего эффекта.

В судовых холодильных установках используется процесс фазового превращения — кипение, которое позволяет получить охлаждающий эффект. Несмотря на то, что аппарат, в котором кипит хладагент, в общем случае называется испарителем, в нём должен происходить именно процесс пузырькового кипения хладагента. Это обстоятельство связано с безопасной работой в первую очередь холодильного компрессора, так как испарение — это превращение или переход жидкости в газ (пар) со свободной поверхности жидкости при температуре ниже температуры кипения. Дело в том, что если в трубках испарителя будет происходить процесс именно испарения, то сильно вырастает риск залива компрессора жидким хладагентом.

Процесс кипения жидкого хладагента по сути своей не отличается от такого же процесса в случае с водой. Для того чтобы хладагент кипел, необходимо наличие теплопритока, а для получения желаемой температуры кипения должно быть создано соответствующее давление внутри испарительной системы.

В общем случае для получения искусственного холода используются следующие способы:

- 1) расширение с получением полезной работы;
- 2) дросселирование;
- 3) эффект Пельте (термоэлектрическое охлаждение);
- 4) различные методы, используемые в криогенной технике.

В производственных судовых холодильных установках используется метод дросселирования, в связи с чем его подробно и рассмотрим.

Дросселированием называется снижение давления жидкости или газа при прохождении их через суженное отверстие (вентиль, кран, капилляр и т. д.). Поток вещества при этом не производит внешней работы, и давление снижается так быстро, что можно считать этот процесс адиабатическим, совершающимся без теплообмена с внешней средой. В суженном сечении скорость потока возрастает, что одновременно вызывает понижение температуры потока и, следовательно, уменьшение внутренней его энергии. Кинетическая энергия, полученная потоком в процессе дросселирования, расходуется на трение, преобразуется в тепло, которое воспринимается самим потоком. Подвод тепла за счет внутреннего трения приводит к изменению не только внутренней энергии, но и к возрастанию энтропии дросселируемого вещества, которая увеличивается не за счет внешних теплопритоков, а вследствие сообщения потоку тепла, эквивалентного потерянной на трение работы (энергии) самого потока, поэтому процесс дросселирования внутренне необратимый.

Дросселирование реализуется в следующих устройствах:

- 1) капиллярная трубка — бытовые холодильники, сплит-системы кондиционирования воздуха;
- 2) регулирующий вентиль (РВ) — дублирующий вентиль, устанавливаемый в параллель с терморегулирующим вентилем или электронным расширительным вентилем;
- 3) терморегулирующий вентиль (ТРВ) — холодильные установки промышленных кладовых и производственные холодильные установки, работающие в грузовых трюмах, системах кондиционирования воздуха;

4) электронный расширительный вентиль (ЭРВ) — производственные ходильные установки, работающие на грузовых трюмах, системах кондиционирования воздуха.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать следующий вывод: охлаждающий эффект получается в результате фазового превращения (кипения), а необходимое давление в испарительной системе создается в результате процесса дросселирования, которое поддерживается компрессором.

В процессе кипения жидкий хладагент поглощает тепло от охлаждаемой среды (воздух, рассол, вода).

Для реализации холодильного цикла, исходя из определения второго закона термодинамики, необходимо затратить энергию. Данная энергия затрачивается на процесс сжатия в компрессоре.

В конденсаторе происходит охлаждение горячего сжатого пара до состояния насыщения, а затем переход из парообразного состояния в жидкое, т. е. конденсация.

1.2. Схемы и циклы холодильных установок транспортных рефрижераторных судов

Перед изучением схем и циклов холодильных установок транспортных рефрижераторных судов необходимо рассмотреть способы представления свойств хладагентов.

Данные о термодинамических свойствах хладагентов представляются в виде диаграмм, таблиц, уравнений состояния, специализированных линеек. Термодинамические свойства характеризуются следующими параметрами: критическое давление, критическая температура, нормальная температура кипения (при атмосферном давлении), температура замерзания, энтропия, энтальпия, теплоёмкость насыщенной жидкости и сухого насыщенного пара.

При расчётах циклов паровых холодильных машин часто используют диаграммы состояния (тепловые диаграммы) $t-s$, $P-i$, $i-s$ (рис. 2–4). Данные диаграммы составлены на основании экспериментальных исследований и с помощью достаточно точных уравнений. В этих диаграммах изображены основные термодинамические процессы: $P = \text{const}$; $t = \text{const}$; $i = \text{const}$; $s = \text{const}$; $v = \text{const}$.

На диаграммах имеются две пограничные кривые: левая ($x = 0$) и правая ($x = 1$). Левая кривая называется кривой насыщенной жидкости, а правая — сухого насыщенного пара.

Кривые $x = 0$ и $x = 1$ разграничивают диаграмму состояния на три области: переохлаждённой жидкости, влажного пара и перегретого пара. В области влажного пара изотермы ($T = \text{const}$) совпадают с изобарами ($P = \text{const}$).

Точка K , в которой сливаются левая и правая пограничные кривые, называется критической, а параметры, ей соответствующие, критическими. При критической температуре различие между паром и жидкостью исчезает, а удельная теплота парообразования становится равной нулю.

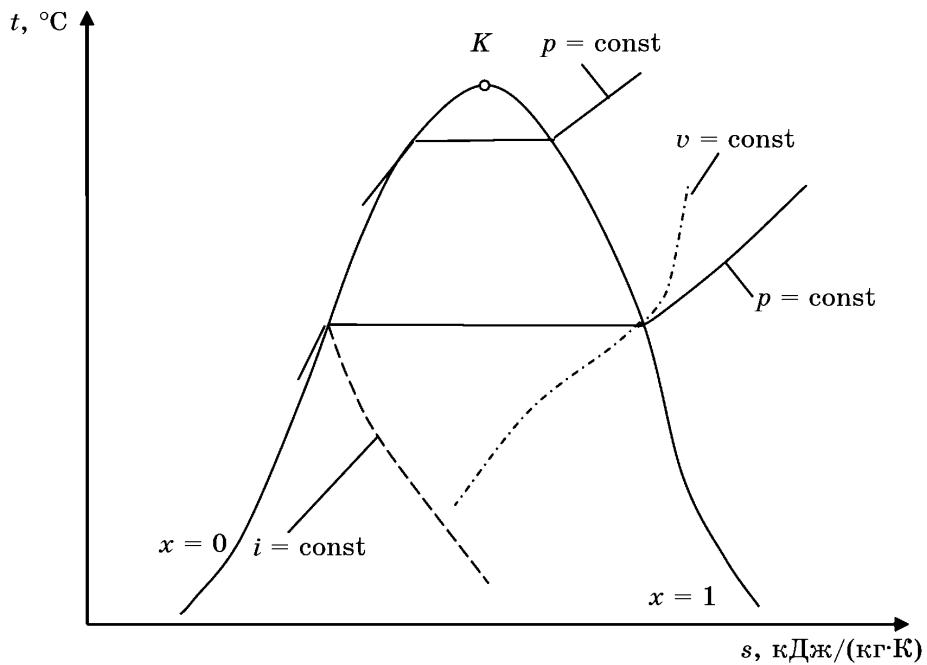


Рис. 2

Диаграмма состояния в координатах «температура — энтропия»

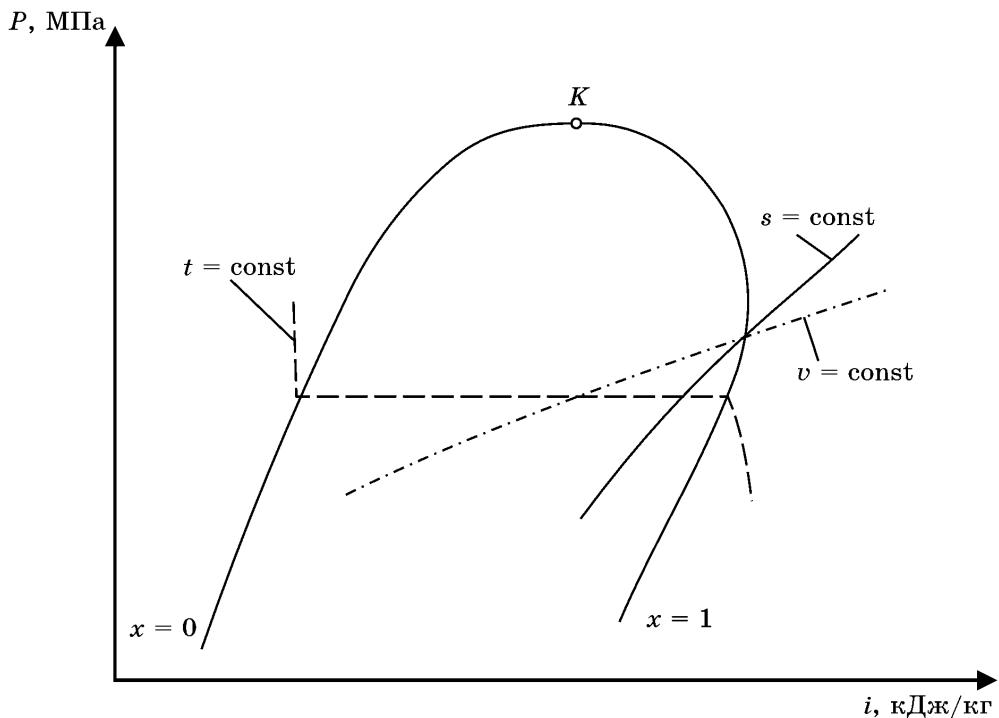


Рис. 3

Диаграмма состояния в координатах «давление — энталпия»

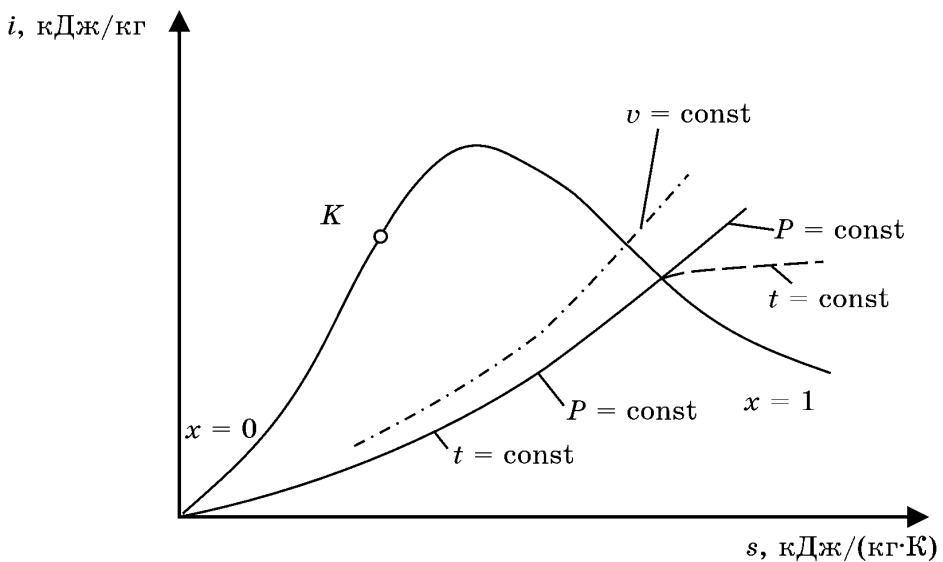


Рис. 4

Диаграмма состояния в координатах «энталпия — энтропия»

Чаще всего пользуются диаграммой $P-i$, именуемой диаграммой Молье (см. цв. вкл., рис. 5). Данная диаграмма образована горизонтальными изобарами и вертикальными изоэнталпами ($i = \text{const}$). Учитывая, что давление при более высоких температурах увеличивается с ростом температуры быстрее, чем при низких температурах, с целью удобства изображения процессов для давлений ввели логарифмическую шкалу.

Задавшись температурой кипения хладагента, можно найти по диаграмме все остальные параметры. Например, аммиак имеет нормальную температуру кипения $-33,35^\circ\text{C}$. На диаграмме, представленной на рисунке 5 (см. цв. вкл.), проводим изотерму $t = -33,35^\circ\text{C}$ в области влажного пара до пересечения с двумя пограничными кривыми.

Так как изотерма совпадает с изобарой в области влажного пара, то по шкале давления получим атмосферное давление. В точках пересечения с пограничными кривыми получим параметры насыщенной жидкости ($i_1'; s_1'; v_1'$) и сухого насыщенного пара ($i_2''; s_2''; v_2''$) при температуре $-33,35^\circ\text{C}$. Аналогичным способом можно определить параметры и по двум другим диаграммам.

Диаграмма Молье имеет большую практическую значимость при эксплуатации судовых холодильных установок (СХУ). С помощью неё можно прогнозировать режимы работы установки при изменении внешних условий с целью недопущения аварийных ситуаций, например, достижения высоких значений температуры нагнетания. Также можно получать предварительную информацию по неисправной работе тех или иных узлов судовой холодильной установки. После вывода на установившийся режим необходимо произвести измерение параметров в узловых точках цикла и построить его на диаграмме Молье. В процессе эксплуатации меняется техническое состояние установки, что будет

отражаться на параметрах работы. Соответственно, при повторном измерении параметров и построении цикла, будут видны изменения, которые характерны для конкретных узлов СХУ.

Как уже отмечалось, термодинамические свойства хладагентов могут представляться и в табличной форме. Такие таблицы приводятся в справочной литературе [4]. В этих справочниках также приводятся данные и о теплофизических свойствах.

Термодинамические свойства в таблицах даются для хладагента в состоянии насыщения (жидкость на линии насыщения, сухой насыщенный пар) и в состоянии перегретого пара.

Далее приводится часть таблицы термодинамических свойств для аммиака на линии насыщения [4] (табл. 1).

Таблица 1
Термодинамические свойства аммиака на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$P \cdot 10^{-5}, \text{ Па}$	$v' \cdot 10^3, \text{ м}^3/\text{кг}$	$v'', \text{ м}^3/\text{кг}$	$i', \text{ кДж}/\text{кг}$	$i'', \text{ кДж}/\text{кг}$	$r, \text{ кДж}/\text{кг}$	$s', \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$s'', \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
-45	0,5448	1,436	2,0072	297,2	1700,2	1403,0	1,1915	7,3411
-44	0,5762	1,439	1,9048	301,6	1701,9	1400,2	1,2108	7,3214
-43	0,6090	1,441	1,8086	306,1	1703,5	1397,4	1,2301	7,3019
-42	0,6434	1,444	1,7182	310,5	1705,1	1394,6	1,2493	7,2826
-41	0,6793	1,446	1,6332	314,9	1706,7	1391,8	1,2684	7,2635
-40	0,7169	1,449	1,5530	319,4	1708,3	1388,9	1,2874	7,2446
-39	0,7561	1,451	1,4775	323,8	1709,8	1386,0	1,3064	7,2259
-38	0,7971	1,454	1,4063	328,2	1711,4	1383,2	1,3253	7,2073

В таблице 1 приняты следующие обозначения: P — давление; v' , i' , s' — удельный объём, энталпия и энтропия насыщенной жидкости; v'' , i'' , s'' — удельный объём, энталпия и энтропия сухого насыщенного пара; r — удельная теплота парообразования (определяется как разность между энталпией сухого насыщенного пара и энталпией насыщенной жидкости).

Чтобы получить давление в единицах измерения МПа, необходимо значение, указанное в таблице, разделить на 10. Например,

$$0,5448 = 0,5448/10 = 0,05448 \text{ МПа.}$$

Значение давления в таблице записывается с учётом его деления на 10^5 , т. е. 0,5448 в действительности составляет 54 480 Па, или 0,05448 МПа.

Также значения удельного объёма v' , указанные в таблице, необходимо делить на 10^3 . Например,

$$1,436/1000 = 0,001436 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

То есть реальное значение v' для температуры -45°C будет $0,001436 \text{ м}^3/\text{кг}$, несмотря на то, что в шапке таблицы стоит умножить на 10^3 . Эта форма записи указывает на то, что реальное значение было записано с учётом умножения на 10^3 .

Во время эксплуатации судовых холодильных установок можно использовать так называемые линейки, на которых представлена зависимость давления от температуры (см. цв. вкл., рис. 6). На представленной линейке указано абсолютное давление, поэтому, сняв показания манометра, необходимо прибавить атмосферное давление. Есть линейки с двумя шкалами давлений — абсолютным и манометрическим (избыточным).

Также существуют различные мобильные приложения и компьютерные программы, которые достаточно просты в использовании.

Далее рассмотрим простейшую схему (см. цв. вкл., рис. 7) и поясним цикл холодильной установки (рис. 8).

Дадим пояснение по узловым точкам цикла:

A — выход из конденсатора (в случае отсутствия переохлаждения жидкого хладагента);

A_1 — выход из конденсатора (в случае наличия переохлаждения жидкого хладагента);

B — вход в испаритель (в случае отсутствия переохлаждения жидкого хладагента);

B_1 — вход в испаритель (в случае наличия переохлаждения жидкого хладагента);

C/S — выход из испарителя/всасывание в компрессор (в случае отсутствия падения давления и переохлаждения);

C_1 — выход из испарителя с учётом перегрева пара;

S_1 — всасывание в компрессор с учётом падения давления;

D — нагнетание компрессора;

D_1 — нагнетание компрессора с учётом падения давления;

E — точка насыщения, т. е. начало конденсации;

F — точка, характеризующая состояние хладагента сразу после дросселирования.

Рассмотрим подробно цикл холодильной установки с учётом максимального количества отклонений от идеального обратного цикла Карно. После дросселирования (throttling or metering) (процесс A_1-B_1) парожидкостная смесь поступает в испарительную систему (воздухоохладитель, рассольный испаритель), где кипит за счёт теплоты охлаждаемой среды (воздух, рассол). Процесс кипения должен заканчиваться в самой испарительной системе, а далее образовавшийся пар должен перегреваться с целью обеспечения безопасной работы установки, а именно недопущения влажного хода компрессора. В частности, в воздухоохладителе происходит организованный перегрев пара ($C-C_1$), для поддержания которого предназначен ТРВ. Также пар будет перегреваться во всасывающем трубопроводе, в регенеративном теплообменнике, а также за счёт контакта с нагретыми деталями компрессора и при обмывании обмоток электродвигателя (для полугерметичных и герметичных компрессоров).

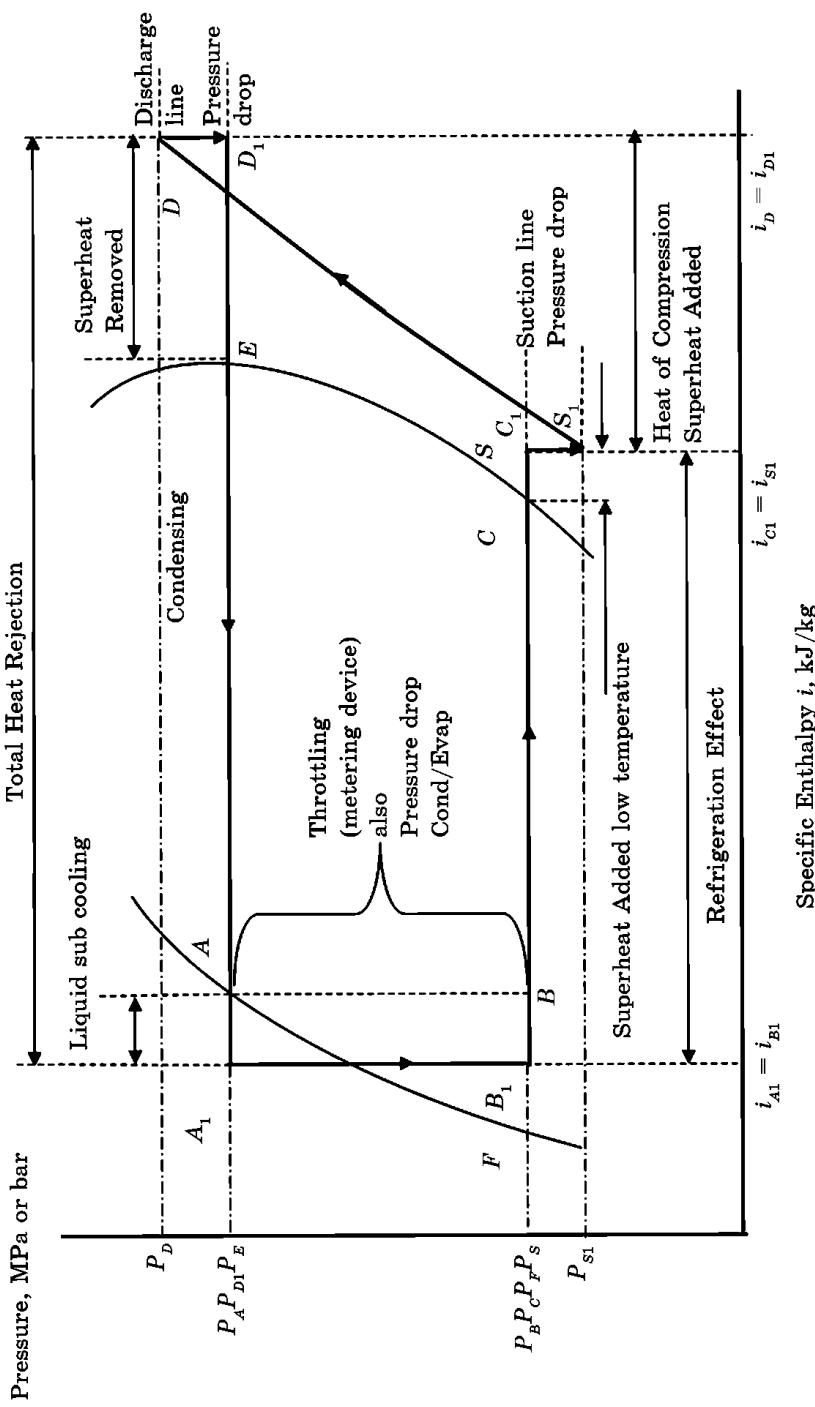


Рис. 8

Цикл одноступенчатой холодильной установки

Давление начала сжатия пара (точка S_1) в компрессоре всегда ниже давления кипения хладагента из-за наличия гидравлических сопротивлений (основное падение дают всасывающие клапан и вентиль, а также регенеративный теплообменник). Этот процесс называется депрессией на всасывании (suction line pressure drop). Аналогичный процесс происходит на нагнетании в первую очередь в нагнетательном клапане и вентиле, поэтому давление конца сжатия (точка D) выше, чем давление конденсации на величину депрессии на нагнетании (discharge line pressure drop).

После сжатия в компрессоре (S_1-D) пар нагнетается в конденсатор и в верхней его части охлаждается до состояния насыщения (D_1-E), начинается процесс конденсации ($E-A$). Жидкий хладагент под действием силы тяжести стекает в нижнюю часть конденсатора, где за счёт того, что не может полностью одновременно вытечь через патрубок определённого диаметра, незначительно накапливается и частично переохлаждается, так как в нижнем пучке труб протекает холодная забортная вода (делает первый ход). Дальнейшее переохлаждение жидкого хладагента может происходить либо в регенеративном теплообменнике и/или в экономайзере.

Далее происходит процесс дросселирования (A_1-B_1 , $A-B$), во время которого происходит частичное вскипание жидкости и на выходе, например, из ТРВ, получается парожидкостная смесь. Образующийся пар имеет название Flash gas (дословно «внезапный газ»). Это нормальное явление для процесса дросселирования. Главной задачей во время эксплуатации является недопущение образования большого количества пара после дросселирования, так как это будет снижать холодопроизводительность охлаждающего устройства. Данный аспект хорошо виден при построении цикла на диаграмме Молье. Количество пара в конце процесса дросселирования будет определяться значением величины x (массового паросодержания). С целью уменьшения количества flash gas предусматривается переохлаждение жидкого хладагента перед дросселирующим устройством (процесс $A-A_1$, см. цв. вкл., рис. 6). Чем больше переохлаждение жидкого хладагента, тем ближе к линии насыщения жидкости точка, характеризующая окончание процесса дросселирования и, соответственно, тем выше холодопроизводительность (refrigeration effect).

В связи с вышеизложенным можно сделать вывод, что наличие в схеме того или иного переохладителя, а также переохлаждение жидкого хладагента в нижней части конденсатора имеет положительный эффект. Также в процессе эксплуатации необходимо уделять внимание техническому состоянию переохладителей (в первую очередь чистоте системы хладагента и замасливанию трубок).

Количество теплоты, отводимое в конденсаторе (total heat rejection), складывается из холодопроизводительности и теплоты, эквивалентной работе, затрачиваемой на сжатие пара в компрессоре (heat of compression).

На транспортных рефрижераторных судах в настоящее время применяются две системы охлаждения грузовых помещений:

- 1) система непосредственного охлаждения с кипением хладагента воздухоохладителя (как правило, фреоновые СХУ);
- 2) система с промежуточным хлононосителем — рассольная (как правило, аммиачные СХУ).

Рассмотрим поочерёдно каждую систему. На рисунке 9 (см. цв. вкл.) представлена упрощённая схема системы с непосредственным кипением хладагента. Система получила свое название из-за того, что хладагент кипит непосредственно в трубках ВО грузового помещения, при этом отсутствует контур какого-либо хладоносителя. В данных системах в роли испарителя выступает батарея или воздухоохладитель (батарея с электродвигателем и вентилятором в сборе). Хладагент кипит за счет теплообмена с воздухом грузового помещения через стенки трубок и оребрения. Воздух охлаждается и поглощает тепло, выделяемое транспортируемым грузом.

Краткое описание работы системы непосредственного охлаждения

Компрессор 1 всасывает из батареи 7 холодный пар 8, после чего сжимает его, при сжатии повышается давление, а следовательно, и температура хладагента. Горячий пар 2 нагнетается в конденсатор 3. Вода подается насосами в конденсатор из-за борта. В межтрубное пространство нагнетается горячий хладагент, где происходит теплообмен с трубками, охлаждаемыми забортной водой, а также три других процесса: сбив перегрева, конденсация, переохлаждение. После того как пар сконденсировался, он самотеком сливается в ресивер (на нашей схеме отсутствует). Далее жидкий хладагент дросселируется в РВ 5. После прохождения дросселирующего устройства хладагент получает параметры стороны низкого давления 6. Сдросселированный хладагент подается в батарею 7, где кипит за счёт теплообмена с воздухом через стенки теплообменного аппарата. Образующийся при кипении холодный пар всасывается компрессором.

На рисунке 10 (см. цв. вкл.) представлена упрощённая схема рассольной системы охлаждения. Процессы в холодильном контуре такие же, как в непосредственной системе охлаждения. В данной схеме испаритель является полноценным двухконтурным теплообменным аппаратом, визуально он похож на конденсатор, но имеет изоляцию. Именно в нем кипит хладагент в межтрубном пространстве (бывает и в трубном, а рассол — в межтрубном), а рассол проходит по трубкам. После теплообмена с хладагентом рассол подается в трюм, где охлаждает воздух. В трюме стоит такая же батарея или воздухоохладитель, как и в непосредственной схеме.

В современных холодильных установках транспортных рефрижераторных судов часто применяется двухступенчатое сжатие в одноступенчатом винтовом компрессоре с дозарядкой. Принципиальная схема и цикл представлены на рисунках 11 и 12.

Перегретый пар в состоянии 1' заполняет рабочую полость винтового компрессора ВКМ. Когда давление в процессе сжатия (процесс 1'-2) достигает значения промежуточного, рабочая полость соединяется с окном дозарядки, через которое поступает пар в состоянии 9 из переохладителя жидкого фреона ПЖФ (экономайзера). В результате смешения получается пар в состоянии 3, который далее сжимается (процесс 3-4) в этой же рабочей полости до давления конденсации. В конденсаторе происходит охлаждения пара до состояния насыщения (процесс 4-5) и его конденсация (процесс 5-6). Жидкий фреон после конденсатора делится на два потока. Вспомогательный дросселируется в РВ2

(процесс 7–8) и поступает в ПЖФ, где кипит (процесс 8–9) в межтрубном пространстве за счёт теплообмена с основным потоком жидкого фреона. В результате основной поток переохлаждается до состояния 10 и затем дросселируется в PB1 (процесс 10–11) и поступает в испаритель, где кипит (процесс 11–1).

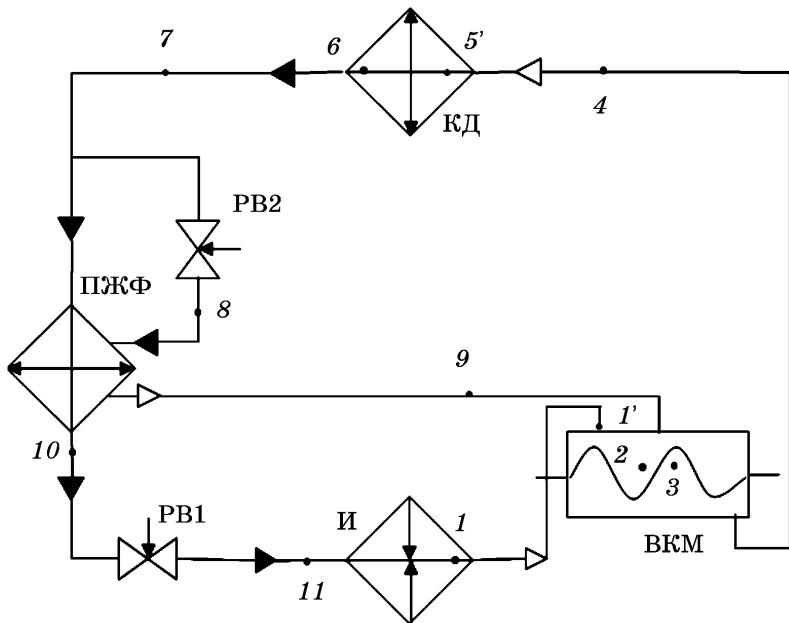


Рис. 11

Принципиальная схема холодильной установки двухступенчатого сжатия с винтовым компрессором с дозарядкой

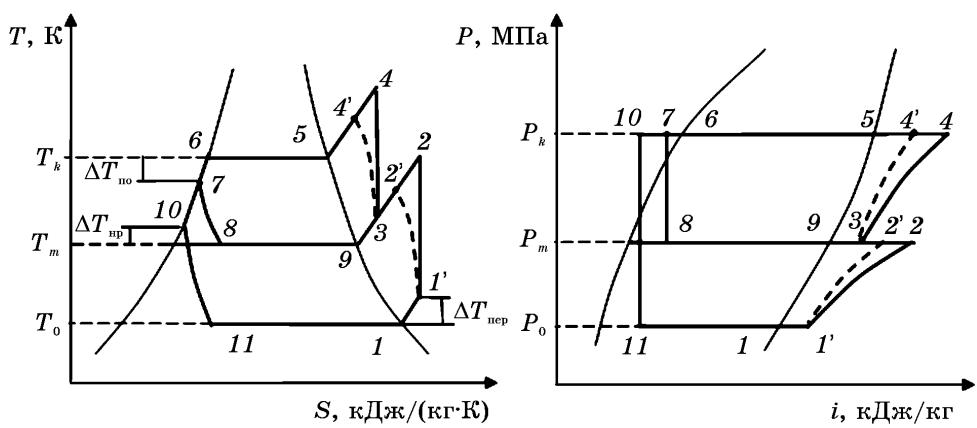


Рис. 12

Цикл холодильной установки двухступенчатого сжатия с винтовым компрессором с дозарядкой

Таким образом основной поток переохлаждается, что позволяет дополнительно увеличить холода производительность установки, а также происходит промежуточное охлаждение во время сжатия, что позволяет снизить значение

Конец ознакомительного фрагмента.
Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru