

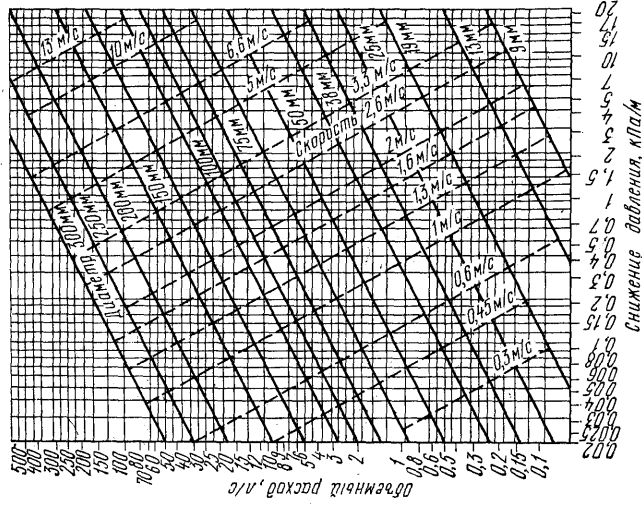


Рис. 15-5. Диаграмма сопротивления потоку воды через трубу с шероховатой поверхностью

вольно высокой степени шероховатости внутренней поверхности. Потери давления в трубе данного диаметра и при определенном объеме расхода пропорциональна длине трубы. Потери давления в прямоугольной трубе определяют по следующему уравнению:

$$\Delta p = l p_r \quad (15-12)$$

где Δp — общая потеря давления, кПа; l — общая длина трубы, м; p_r — потеря давления, кПа/м.

Трубная арматура, например коллено, тройник, вентиль и др., создает большее сопротивление потоку, чем прямоугольная труба. Это необходимо учитывать при определении общих потерь на трение в трубопроводе. Для удобства при расчетах часто допускают, что арматура имеет сопротивление такое же, равное сопротивлению прямоугольной трубы определенной длины,

называемой «эквивалентной длиной»¹. В табл. 15-1 даны величины эквивалентной длины прямоугольной трубы для различной арматуры. Обратите внимание, что величина эквивалентной длины зависит от диаметра трубы.

Когда величину эквивалентной длины арматуры прибавляют к действительной длине прямоугольной трубы, то результат называется «общей эквивалентной длиной». Это значение затем используют в уравнении (15-14) для определения общей потери на трение в трубопроводе.

Пример 15-1. Трубная система подачи воды состоит из 42 м прямоугольного трубопровода диаметром 50 мм; шести стандартных колен и двух полностью открытых задвижек. Трубопровод имеет относительно шероховатую поверхность, объемный расход воды в системе составляет 2,5 л/с. Определить общую эквивалентную длину прямолинейного трубопровода и потерю на трение в трубопроводе.

Решение. В табл. 15-1 находим, что эквивалентная длина стандартных колен диаметром 50 мм и полностью открытых задвижек диаметром 50 мм равна соответственно 1,52 и 0,37 м. По диаграмме на рис. 15-5 определяем, что при объемном расходе 2,5 л/с потери на трение на 1 м длины трубопровода диаметром 50 мм составляют 0,49 кПа. Давление 1 кПа эквивалентно 0,102 м вод. ст. (см. табл. 1-1).

Общая эквивалентная длина прямоугольной трубы 42 м, шести колен диаметром 50 мм (с эквивалентной длиной 1,52 м) 9,12 м, двух задвижек диаметром 500 мм (с эквивалентной длиной 0,37) 0,74 м, всего — 51,86 м.

Применяя уравнение (15-12), находим общие потери на трение в трубопроводе.

$$\Delta p = 51,86 \times 0,49 \text{ кПа/м} = 25,41 \text{ кПа.}$$

Преобразуя величину потерь на трение, выраженных в килопаскалях в метры водяного столба, получим $\Delta p = 25,41 \text{ кПа} \times 0,102 = 2,59 \text{ м вод. ст.}$

В диаграммах на рис. 15-4 и 15-5 указаны величины потерь давления только для воды, однако их можно ис-

¹ Другой способ определения потери давления в арматуре, внесенных расширениях и др., заключается в использовании величины скоростного напора.

Эквивалентная длина (в м) прямолинейного трубопровода для арматуры и фитингов

Арматура и фитинги	Номинальный диаметр трубы, мм												
	15	20	25	32	40	50	65	75	90	100	125	150	175
	Действительный диаметр трубы, мм												
	12,7	19,1	25,4	31,8	38,1	50,8	63,5	76,2	88,9	101,6	127	152,4	177,8

Задвижка (открытая)	0,09	0,15	0,18	0,24	0,27	0,37	0,43	0,52	0,61	0,76	0,91	1,07	1,22
Шаровой вентиль (открытый)	4,88	6,4	7,92	10,67	13,11	16,46	19,81	24,38	28,96	33,53	42,67	48,77	54,87
Угловой вентиль (открытый)	2,44	3,35	4,27	5,49	6,1	7,62	9,45	12,19	13,72	15,54	21,34	24,38	27,74
Колено 45°	0,24	0,3	0,4	0,49	0,61	0,76	0,91	1,16	1,37	1,52	1,83	2,44	2,59
90°	0,46	0,61	0,76	1,07	1,37	1,52	1,98	2,44	3,05	3,35	4,27	4,88	5,49
90° (небольшой радиус)	0,43	0,55	0,7	0,91	1,07	1,37	1,58	2,07	2,44	2,74	3,35	4,27	4,57
90° (большой радиус)	0,3	0,46	0,61	0,76	0,91	1,07	1,22	1,52	1,83	2,31	2,74	3,05	3,66
90° (без радиуса)	0,91	1,37	1,68	2,29	2,74	3,66	4,27	5,18	6,1	6,71	7,92	10,06	11,58
180°	1,07	1,52	1,83	2,44	3,05	3,96	4,57	5,49	6,1	7,32	9,14	10,67	12,8
Тройник-патрубок*	0,91	1,37	1,68	2,29	2,74	3,66	4,27	5,18	6,1	6,71	7,92	10,06	12,8
Тройник на трубе	0,3	0,46	0,61	0,76	0,91	1,07	1,22	1,52	1,83	2,31	2,74	3,05	3,66
Резкое расширение от d до D**	0,46	0,61	0,76	1,07	1,37	1,52	1,98	2,44	3,05	3,35	4,27	4,88	5,49
$d/D = 1/4$	0,3	0,4	0,49	0,67	0,79	1,01	1,16	1,49	1,71	1,95	2,47	3,05	3,35
$d/D = 1/2$	0,09	0,15	0,18	0,24	0,27	0,37	0,43	0,52	0,61	0,76	0,91	1,07	1,22
$d/D = 3/4$													
Резкое сужение от D до d	0,24	0,3	0,4	0,49	0,61	0,76	0,91	1,16	1,37	1,52	1,83	2,44	2,59
$D/d = 1/4$	0,18	0,24	0,3	0,4	0,46	0,55	0,7	0,85	1,04	1,1	1,46	1,71	1,95
$D/d = 1/2$	0,09	0,15	0,18	0,24	0,27	0,4	0,43	0,52	0,61	0,76	0,91	1,07	1,22
$D/d = 3/4$	0,27	0,4	0,46	0,61	0,73	0,91	1,1	1,37	1,55	1,83	2,29	2,74	3,35
Выход из бака в трубу (конец трубы заходит в дно бака)													
Выход из бака в трубу (конец трубы выступает внутрь бака)	0,46	0,61	0,76	1,07	1,22	1,52	1,83	2,38	2,74	3,05	3,96	4,57	5,18

* Снижение давления в выходном боковом патрубке.

** Эквивалентная длина трубы меньшего диаметра.

пользовать и для других сред. Для рассола и воды, охлаждающей конденсатор, обычно применяют центробежные насосы.

Центробежный насос состоит из вращающейся крыльчатки с лопатками, расположенной в неподвижном корпусе. Перекачиваемая жидкость всасывается у основания лопатки и отбрасывается к ее внешнему краю

ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ НАСОСЫ

В холодильной промышленности для циркуляции охлажденной воды, отбрасывается к ее внешнему краю

Поправочные коэффициенты снижения давления

Жидкость	Температура замерзания, °C	Плотность (в кг/л) при температуре, °C	Поправочный коэффициент на трение при температуре, °C									
			-29	-7	-29	-18	-12	-7	-1	4	10	16
Рассол хлористого кальция плотностью												
1,1	-6,5	—	1,11	—	—	—	—	—	1,21	1,19	1,15	1,12
1,2	-21	—	1,21	—	—	1,49	1,44	1,38	1,33	1,28	1,26	1,24
1,25	-32,2	1,27	1,26	1,85	1,75	1,66	1,57	1,5	1,44	1,4	1,37	1,34
Рассол хлористого натрия плотностью												
1,1	-9,5	—	1,11	—	—	—	—	—	1,27	1,21	1,19	1,15
1,18	-21,1	—	1,19	—	—	1,58	1,5	1,44	1,39	1,33	1,28	1,25
Аммиак	-77,1	0,68	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
Этиловый спирт												
100%-ный	-81,4	0,83	0,81	0,97	0,95	0,93	0,92	0,91	0,91	0,9	0,9	0,9
40%-ный	-30	0,93	0,91	1,45	1,39	1,33	1,29	1,23	1,19	1,15	1,12	1,1
Метиловый спирт												
100%-ный	-71,6	0,84	0,82	0,85	0,85	0,85	0,84	0,84	0,84	0,83	0,83	0,83
30%-ный	-21	—	0,96	1,32	1,26	1,22	1,19	1,16	1,12	1,09	1,07	1,05
Этиленгликоль												
60%-ный	-50,5	1,1	1,09	1,87	1,83	1,78	1,72	1,62	1,57	1,46	1,4	1,36
50%-ный	-38,9	1,09	1,08	1,83	1,74	1,64	1,54	1,48	1,42	1,37	1,31	1,26
30%-ный	-16,7	—	1,06	—	—	—	1,34	1,27	1,22	1,17	1,13	1,11
R11	-111,1	1,6	1,55	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42
R12	-157,8	1,49	1,42	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32
Хлористый метил	-97,8	1,02	0,97	1,13	1,13	1,13	1,12	1,12	1,12	1,11	1,11	1,11
Дихлорметан	-96,7	1,4	1,33	1,65	1,63	1,62	1,6	1,59	1,58	1,56	1,54	1,52

Примечание. Для получения величин снижения давления при движении указанных жидкостей через трубы следует умножить значение снижения давления воды (при одинаковом расходе через одну и ту же трубу) на коэффициенты, указанные в данной таблице.

центробежной силой. Жидкость при этом приобретает значительную скорость и ее давление повышается. Жидкость, покидающая край крыльчатки, собирается в корпусе и нагнетается через отверстие (рис. 15-6).

Крыльчатку насоса часто насаживают на вал приводного двигателя, в результате чего насос и двигатель образуют единый агрегат (рис. 15-7). В других случаях насос и двигатель являются раздельными агрегатами и их соединяют вместе посредством упругой муфты.

Производительность центробежного насоса зависит от конструкции и размера насоса, а также от частоты вращения вала электродвигателя. Объем

перекачиваемой насосом жидкости обусловлен напором. Кривая напора и производительности типового центробежного насоса представлена на рис. 15-8. Обратите внимание, что напор максимален, когда вентиль на стопроне нагнетания насоса закрыт, причем производительность насоса в это время равна нулю. При открывании вентиля напор уменьшается, а производительность увеличивается.

Номинальная производительность центробежных насосов выражается в литрах в секунду при различных напорах, т. е. центробежные насосы предназначены для создания определенного расхода при определенном напоре. Значения номинальной производительности

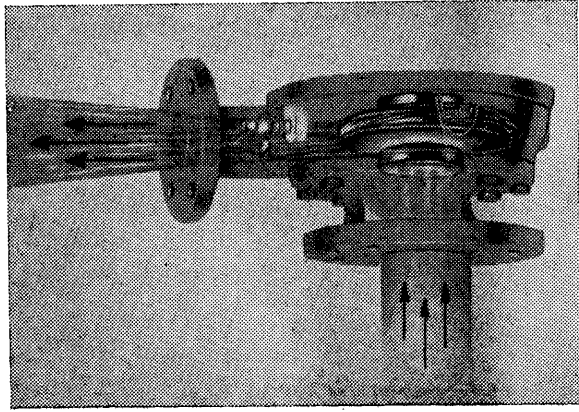


Рис. 15-6. Поток среды через центробежный насос

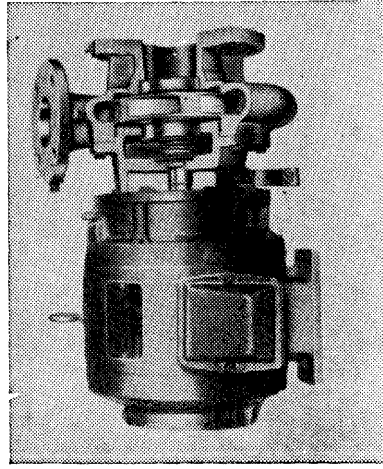


Рис. 15-7. Центробежный насос и электродвигатель в одном агрегате

насосов — приводятся в таблицах, однако чаще всего их определяют по критическому напору и производительности (см. приложение 16). В любом случае, для выбора соответствующего насоса по каталогу завода-изготовителя необходимо знать величину требуемого расхода и общий напор.

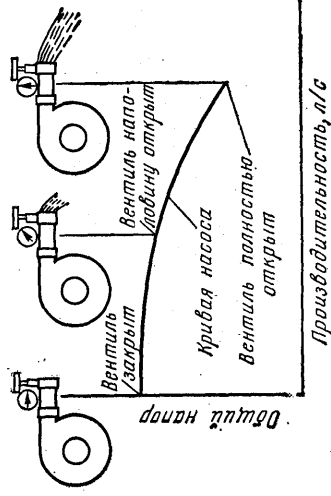


Рис. 15-8. Кривая, характеризующая увеличение производительности центробежного насоса с уменьшением напора

Общий напор насоса

Общий напор насоса — это сумма статического напора и потерь напора на трение. Статический напор определяется высотой между «свободным» уровнем жидкости и самой высокой точкой поднятия жидкости насосом. В системе циркуляции охлаждающей конденсатор воды (рис. 15-9) статический напор (в м вод. ст.) обозначает высоту (в м) между свободным уровнем воды в резервуаре градирни и распылительным коллектором градирни. Вода в нагнетательной трубе удерживается на уровне воды в резервуаре градирни вследствие напора в последней. Поэтому высота, на которую вода в действительности поднимается на-

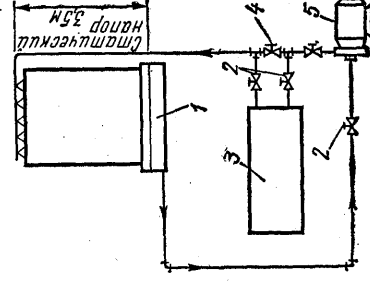
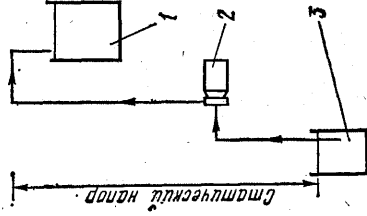


Рис. 15-9. Система циркуляции воды для охлаждения конденсатора (общая длина трубопровода 24 м): 1 — градирня; 2 — задвижка; 3 — конденсатор; 4 — шаровый вентиль; 5 — насос

Рис. 15-10. Насосная система:
1 — верхний бак; 2 — насос;
3 — нижний бак



представляет собой замкнутую схему (рис. 15-11), статический напор насоса сбалансирован, так как расход жидкости на одной стороне системы точно равен расходу жидкости на другой стороне.

Кривая типовой трубной системы, характеризующая расход жидкости в зависимости от общего напора, приведена на рис. 15-12. Обратите внимание, что общий напор увеличивается с повышением расхода в системе. Увеличение расхода является результатом роста потерь напора на трение, причем статический напор остается постоянным.

Ранее указывалось, что потеря давления, или напора, потока среды из-за трения в трубопроводе находится в квадратной зависимости от скорости среды:

$$(v_1/v_2)^2 = H_2/H_1; \quad (15-13)$$

$$H_2 = (v_2/v_1)^2 H_1, \quad (15-14)$$

где v_1 — начальный объемный расход, л/с; v_2 — конечный объемный расход, л/с; H_1 — начальный напор, м; H_2 — конечный напор, м.

Применяя уравнение (15-14), можно вычислить данные для построения кривой, характеризующей трубную систему.

Пример 15-2. Трубная система имеет статический напор 3 м и потерю напора на трение 4 м при объемном расходе 8 л/с. Построить кривую для данной системы.

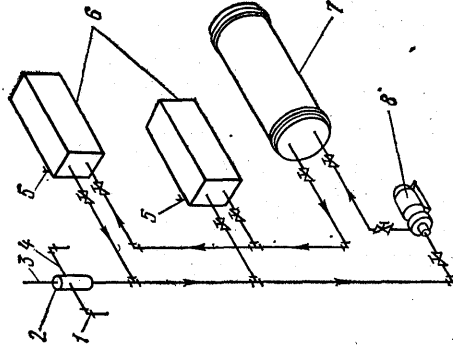
Решение. По уравнению (15-14) определяем напор в системе при объемном расходе 2 л/с

$$H_2 = (2 \text{ л/с} / 8 \text{ л/с})^2 \cdot 4 \text{ м} = 0,25 \text{ м}.$$

Данные, приведенные ниже, получены с помощью подобных расчетов и использованы для построения кривой системы (рис. 15-12).

Рис. 15-11. Замкнутая система циркуляции охлажденной воды (или рассола):

1 — линия подпитки свежей водой; 2 — открытый уравнительный бачок; 3 — патрубок выпуска воздуха; 4 — переливная труба; 5 — вентили для выпуска воздуха; 6 — водоподогреватель; 7 — испаритель; 8 — насос



сосом, — это только высота от уровня воды в резервуаре градирни до распределительного коллектора. Сравните систему циркуляции охлаждающей конденсатор воды (см. рис. 15-9) с насосной системой, показанной на рис. 15-10.

Когда трубопроводная система

Расход, л/с	2	4	6	8	10	12
Напор, м вод. ст.	0,25	1,0	2,25	4,0	6,25	9

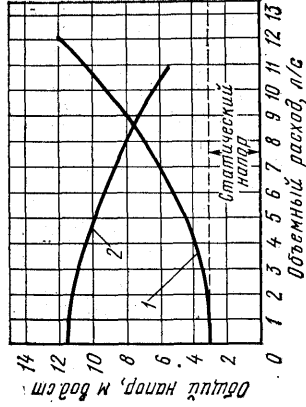


Рис. 15-12. Зависимость напора в трубопроводной системе от объемного расхода:

1 — кривая системы; 2 — кривая насоса

Обратите внимание, что точка пересечения кривой системы с кривой насоса — это точка баланса насосной системы.

Определение общего напора насоса

Потери давления в различных узлах системы, например в конденсаторе, испарителе, градирне, указаны в таблицах заводов-изготовителей.

Если в системе используют более одного конденсатора (испарителя и др.), то их соединяют параллельно и при расчетах напора учитывают только конденсатор, в котором давление снижается максимально. В системе обратного водоснабжения общий напор насоса равен соотношению давления в градирне, включающего статический напор и потери напора на трение. В связи с этим статический напор градирни не учитывают при определении общего напора насоса. Когда статический напор градирни единственный в системе, то им можно пренебречь. Однако если в помещении имеется дополнительный бак для жидкости (см. рис. 14-22), то высота между уровнем воды в баке и нормальным

уровнем воды в резервуаре градирни должна рассматриваться как отдельный статический напор.

Пример 15-3. Система рециркуляции воды (см. рис. 15-9) предназначена для работы холодильной установки производительностью 50 кВт. Расход в градирне равен 4 л/с (0,08 л/с на 1 кВт холодопроизводительности). Расход через конденсатор составляет 3 л/с $[0,06 \text{ л/с}/(\text{с} \cdot \text{кВт})]$, а 1 л/с $[0,02 \text{ л/с} \cdot (\text{с} \cdot \text{кВт})]$ проходит через байпасную линию конденсатора. По таблицам номинальной производительности находим, что гидравлическое сопротивление градирни при расходе 4 л/с равно 8 м вод. ст., а снижение давления в конденсаторе при расходе 3 л/с составляет 52 кПа, или 5,3 м вод. ст. $(52 \text{ кПа} \cdot \frac{1}{10} \times 0,102 \text{ м/кПа})$. Номинальный диаметр трубы 50 мм. Определить общий напор и выбрать насос по приложению 16.

Решение. Трубопроводная система состоит из прямой длиной 50 мм (с эквивалентной длиной 1,52 м) длиной 4,56 м, двух тройников диаметрами 50 мм (с эквивалентной длиной 3,66 м) длиной 7,32 м, четырех задвижек (открытых) диаметром 50 мм (с эквивалентной длиной 0,37 м) длиной 1,48 м. Таким образом, общая эквивалентная длина трубопроводной системы составляет 37,36 м.

По диаграмме (см. рис. 15-5) находим, что снижение давления на 1 м трубы (при расходе 4 л/с и диаметре трубы 50 мм) составляет 1,25 кПа/м.

Применяя уравнение (15-12), рассчитываем общую потерю давления в трубопроводе

$$\Delta p = 37,36 \text{ м} \times 1,25 \text{ кПа/м} = 46,7 \text{ кПа}.$$

Потеря напора составляет

$$\Delta H = 46,7 \text{ кПа} \times 0,102 \text{ м/кПа} = 4,76 \text{ м}.$$

Общий напор равен: в трубопроводе 4,76 м, в конденсаторе 5,3 м, в градирне 8 м, а всего 18,06 м вод. ст.

По приложению 16 выбираем насос модели 1522-8, который имеет производительность 4 л/с при напоре 18,8 м.

Пример 15-4. Система рециркуляции воды имеет напор 21 м вод. ст. при расходе 5 л/с. Выбрать насос по приложению 16.

Решение. В приложении 16 находим, что самым небольшим насосом является модель 1522-16. Однако производительность этого насоса составляет 7,35 л/с при напоре 21 м вод. ст. Для получения требуемого расхода, равного 5 л/с, необходимо увеличить напор до 24,5 м вод. ст. Это можно осуществить, частично закрыв шаровый клапан на стороне нагнетания насоса.

Потребляемая мощность

Мощность, потребляемую насосом, определяют с помощью следующего уравнения:

$$N = m g H / \eta; \quad (15-15)$$

$$N = v \rho g H / \eta, \quad (15-16)$$

где N — мощность, Вт; m — массовый расход, кг/с; g — ускорение свободного падения, м/с²; H — напор, м; η — КПД насоса; v — объемный расход, л/с; ρ — плотность, кг/л.

Пример 15-9. Насос, КПД которого 68%, нагнетает 3 л/с воды при напоре 22 м вод. ст. Вычислить потребляемую насосом мощность.

Решение. Принимая, что плотность воды равна 1 кг/л и применяя уравнение (15-16), находим

$$N = 3 \text{ л/с} \times 1 \text{ кг/л} \times 9,807 \text{ м/с}^2 \times 22 \text{ м} / 0,68 = 951,86 \text{ Вт.}$$

Из уравнения (15-16) следует, что мощность, потребляемая насосом, увеличивается при повышении расхода, общего напора или плотности и понижается при увеличении КПД насоса.

Кривые мощности и КПД насоса показаны на рис. 15-13. Обратите внимание, что потребляемая насосом мощность минимальна при отсутствии расхода и увеличивается с увеличением его. Следовательно, для данного насоса любое уменьшение напора вызывает увеличение подачи и потребляемой насосом мощности.

КПД насоса, который имеет минимальную величину при отсутствии подачи, увеличивается до максимума при повышении расхода, а затем умень-

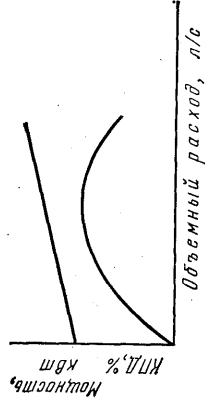


Рис. 15-13. Зависимость мощности и КПД насоса от объемного расхода

шается (при дальнейшем увеличении расхода). Кривая КПД насоса (см. рис. 15-13) показывает, что максимальный КПД создается, когда у выbranного насоса точки требуемых расхода и производительности расположены на соответствующих кривых.

КОНСТРУКЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ для воды

Трубопроводную систему для воды следует проектировать с минимальными потерями на трение, и для этого она должна иметь небольшую длину и минимальное количество арматуры.

Систему подачи охлаждающей воды в конденсатор обычно изготавливают из стальных, пластмассовых или медных труб. Наиболее экономично применять трубы такого диаметра, чтобы при заданном расходе обеспечить скорость потока воды в диапазоне от 1,5 до 2,5 м/с. Например, примем, что необходимо подавать 9,5 л/с воды через трубопровод длиной 30 м. Следующие значения скорости и потери на трение указаны в диаграмме на рис. 15-5 при расходе 9,5 л/с через трубы различного диаметра (табл. 15-3).

Обратите внимание, что результатом увеличения диаметра трубопровода от 50 до 75 мм является значительное уменьшение потерь на трение (от 19,27 до 3,06 м), а увеличение диаметра от 75 до 100 мм уменьшает потери на трение еще на 2,39 м вод. ст. (от 3,06 до 0,67 м), что обычно не оправдывает увеличение стоимости трубопровода. Необходимо использовать трубопровод с диаметром 75 или 90 мм в зависимости от характеристик имеющегося в наличии насоса. Например, допустим, что две отдельные системы имеют напоры соответственно 18 и 20 м вод. ст. (без учета потерь на трение). В приложении 16 находим, что единственным подходящим насосом для той и другой системы является модель 1522-11 производительностью 9,5 л/с

Потери напора в трубе в зависимости от ее диаметра и скорости движения

Номинальный диаметр трубы, мм	Скорость, м/с	Потери скоростного напора, кПа	Потери напора на трение на длину 30 м	
			кПа	м вод. ст.

50	5,1	7	207	21,1
65	3,2	2,2	66	6,73
75	2,3	0,85	25,5	2,6
90	1,7	0,42	12,6	1,28
100	1,3	0,24	7,2	0,73
125	0,8	0,08	2,4	0,24

при напоре 21,6 м. Поэтому в системе с напором 18 м допустимые потери на трение в трубопроводе составят 3,6 м (21,6 — 18), а в системе с напором 20 м — 1,6 м (21,6 — 20). Во второй системе необходимо использовать трубопровод диаметром 90 мм, так как вследствие применения трубопровода диаметром 75 мм общий напор превысит допустимую величину (21,6 м), что потребует уменьшения напаса следующего, большего размера. Однако наиболее практичным диаметром для первой системы является 75 мм. Применение трубопровода диаметром 90 мм создает общий напор, равный только 18,73 м, что потребует дросселирования на стороне нагнетания насоса для повышения напора до 21,6 м и получения требуемого расхода, равного 9,5 л/с.

При проектировании трубных систем следует предусмотреть арматуру для эксплуатации и обслуживания системы циркуляции воды. Целесообразно применять шаровой вентиль на стороне нагнетания насоса для регулирования расхода воды. Если трубопровод длинный или в системе имеется большое количество воды, то запорные вентили на входе и выходе из насоса и конденсатора позволяют ремонтировать это оборудование без спуска воды из градирни. Спускной вентиль устанавливают в самой нижней точке трубо-

провода. Трубопровод прокладывают с уклоном для полного слива воды в зимнее время.

Насос монтируют ниже уровня воды в резервуаре градирни для обеспечения непрерывного заполнения насоса. Если требуется бесшумная его эксплуатация, можно соединить насос с трубопроводом посредством небольших отрезков резинового шланга.

ЗАДАЧИ

15-1. Определить статическое давление столба воды высотой 20 м при ее плотности 1000 кг/м³.

15-2. Чему равен напор воды (в м), эквивалентный давлению 60 кПа.

15-3. Вычислить высоту столба среды (в м) при давлении на основании 75000 Па и плотности 1200 кг/м³.

15-4. Столб среды высотой 10 м оказывает давление на основание 115 кПа. Какова средняя плотность среды?

15-5. Скорость движения воды в трубе равна 2,5 м/с. Вычислить скоростной напор и динамическое давление.

15-6. Какова скорость движения воды через трубу с внутренним сечением 0,002 м², если ее расход составляет 5 л/с (0,005 м³/с).

15-7. Допустим, что потери давления из-за трения пренебрежимо малы. Поэтому общее давление воды в точке В равно давлению в точке А (см. рис. 15-3). Вычислить статическое давление в точке В, если статическое давление в точке А равно 70 кПа, а скорости движения воды в точках А и В соответственно равны 2 и 3 м/с.

15-8. Воляная трубная система изготовлена из медных труб с номинальным диамет-

ром 75 мм и общей длиной 30 м, девяти колен и двух задвижек. Расход воды через трубу равен 6 л/с. Вычислить общую эквивалентную длину системы и общие потери на трение (в м вод. ст.).

15-9. Решить задачу 15-7 с учетом того, что труба имеет шероховатую поверхность.

15-10. Статический напор в трубной системе равен 4 м, а потери напора на трение равны 2 м при расходе 4 л/с. Построить кри-вовую расхода от 0 до 12 л/с с приращением 2 л/с.

15-11. Система циркуляции воды для охлаждения конденсатора изготовлена из трубы диаметром 75 мм с шероховатой поверх-

Глава 16 ХЛАДАГЕНТЫ

ИДЕАЛЬНЫЙ ХЛАДАГЕНТ

Хладагентом может быть любое вещество, поглощающее теплоту из другого вещества или тела. В цикле паровой компрессионной холодильной машины хладагент — это рабочее вещество, которое попеременно выпаривается и конденсируется при поглощении и отдаче теплоты. Хладагент должен обладать определенными химическими, физическими и термодинамическими свойствами для безопасной и экономичной эксплуатации паровой компрессионной холодильной машины.

С самого начала необходимо отметить, что не существует «идеального» хладагента, который можно было бы применять во всех случаях, так как условия и потребности многогранны. Следовательно, хладагент приближается к «идеальному» состоянию только в том смысле, что его свойства соответствуют условиям и потребностям эксплуатации.

В табл. 16-1 дан перечень веществ, обладающих такими свойствами, которые делают их пригодными для использования в качестве хладагентов. Однако ниже показано, что только часть из них применяется как хладагенты. Некоторые из них широко использова-

носью длиной 25 м и с восемью коленами по 90°. При требуемом расходе 11 л/с потери давления в конденсаторе составляют 38 кПа, а снижение давления в градирне — 3 м вод. ст. Дополнительный бак установлен в помещении на 2,5 м ниже резервуара градирни (статическое давление 2,5 м). Определить общую эквивалентную длину трубы и общий напор (в м вод. ст.).

15-12. Выбрать в приложении 16 насос для водяной системы конденсатора, описанной в задаче 15-11.

15-13. Применить уравнение (15-16), вычислить потребляемую насосом мощность (см. условия задачи 15-12), если его КПД 65%.

лись в прошлом в качестве хладагентов, но позднее их место заняли новые химические соединения. Некоторые хладагенты находятся в стадии разработки и, вероятно, будут применяться в будущем.

В табл. 16-2 — 16-6 приведены термодинамические свойства ряда распространенных в настоящее время хладагентов. В одной из предыдущих глав уже рассматривалась методика использования этих таблиц.

БЕЗОПАСНОСТЬ

Безопасность хладагента — важнейший вопрос при его выборе. По этой причине некоторые вещества, которые могли бы быть хорошими хладагентами, используются ограниченно, например аммиак и некоторые углеводороды.

Хладагент должен быть химически инертным, невоспламеняющимся, взрывобезопасным и нетоксичным как в чистом виде, так и в смеси с любым количеством воздуха. Кроме того, хладагент не должен воздействовать отрицательно на смазочное масло или любой материал, используемый в холодильном оборудовании. Хладагент не должен отрицательно реагировать

Хладагенты

Обозначение	Химическое наименование	Химическая формула	Молекулярная масса	Температура кипения при атмосферном давлении, °C
<i>Галогидроуглеродные соединения</i>				
R10	Четыреххлористый углерод	CCl_4	153,8	76,8
R11	Монофтортрихлорметан	CCl_3F	137,4	26
R12	Дифтордихлорметан	CCl_2F_2	120,9	-29,8
R13	Трифтормонохлорметан	CClF_3	104,5	-81,4
R13B1	Трифтормонобромметан	CBrF_3	148,9	-57,8
R14	Тетрафторметан	CF_4	88	-128
R20	Хлороформ	CHCl_3	119,4	61
R21	Монофтордихлорметан	CHCl_2F	102,9	8,9
R22	Дифтормонохлорметан	CHClF_2	86,5	-40,8
R23	Трифторметан	CHF_3	70	-84,4
R30	Дихлорметан	CH_2Cl_2	84,9	40,7
R31	Монофтормонохлорметан	CH_2ClF	68,5	8,9
R32	Дифторметан	CH_3F_2	52	-51,9
R40	Хлористый метил	CH_3Cl	50,5	-23,8
R41	Фтористый метил	CH_3F	34	-78,2
(R50)*	Метан	CH_4	16	-161,7
R110	Гексахлорэтан	CCl_3CCl_3	236,8	185
R111	Монофторпентахлорэтан	$\text{CCl}_3\text{CCl}_2\text{F}$	220,3	137
R112	Дифтортетрахлорэтан	$\text{CCl}_2\text{FCCl}_2\text{F}$	203,8	92,8
R112a	Дифтортетрахлорэтан	$\text{CCl}_3\text{CClF}_2$	203,8	91
R113	Трифтортрихлорэтан	$\text{CCl}_2\text{FCClF}_2$	187,4	47,6
R113a	Трифтортрихлорэтан	CCl_3CF_3	187,4	45,7
R114	Тетрафтордихлорэтан	$\text{CClF}_2\text{CClF}_2$	170,9	3,6
R114a	Тетрафтордихлорэтан	CCl_2FCF_3	170,9	3,6
R114B2	Тетрафтордихлорэтан	$\text{CBrF}_2\text{CBrF}_2$	259,9	47,6
R115	Пентафтормонохлорэтан	CClF_2CF_3	154,5	-38,7
R116	Гексафторэтан	CF_3CF_3	138	-78,2
R120	Пентахлорэтан	$\text{CHCl}_2\text{CCl}_3$	202,3	162,2
R123	Трифтордихлорэтан	CHCl_2CF_3	153	28,7
R124	Тетрафтормонохлорэтан	CHClFCF_3	136,5	-12
R124a	Тетрафтормонохлорэтан	$\text{CHF}_2\text{CClF}_2$	136,5	-10
R125	Пентафторэтан	CHF_2CF_3	120	-48,3
R133a	Трифтормонохлорэтан	CH_2ClCF_3	118,5	6,1
R140a	Трихлорэтан	CH_3CCl_3	133,4	73,9
R142a	Дифтормонохлорэтан	CH_3CClF_2	100,5	-11
R143a	Трифторэтан	CH_3CF_3	84	-47,5
R150a	Дихлорэтан	CH_3CHCl_2	98,9	60
R152a	Дифторэтан	CH_3CHF_2	66	-24,7
R160	Хлористый этил	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{Cl}$	64,5	12,2
(R170)*	Этан	CH_3CH_3	30	-88,6
R218	Октафторпропан	$\text{CF}_3\text{CF}_2\text{CF}_3$	188	-38
(R290)*	Пропан	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_3$	44	-42,3

Циклические органические соединения

RC316	Гексафтордихлорциклобутан	$\text{C}_4\text{Cl}_2\text{F}_6$	233	60
RC317	Гептафтормонохлорциклобутан	C_4ClF_7	216,5	25
RC318	Оксафторциклобутан	C_4F_8	200	-6,1

Азеотропные смеси

R500	R12/R152a	73,8/26,2% мас.	$\text{CCl}_2\text{F}_2/\text{CH}_2\text{CHF}_2$	99,29	-33,3
R501	R22/R12	75/25% мас.	$\text{CHClF}_2/\text{CCl}_2\text{F}_2$	93,1	-41,1
R502	R22/R115	48,8/51,2% мас.	$\text{CHClF}_2/\text{CCl}_2\text{F}_2$	112	-45,6

Обозначение	Химическое наименование	Химическая формула	Молекулярная масса	Температура кипения при атмосферном давлении, °С
<i>Различные органические соединения</i>				
<i>Углеводородные хладагенты</i>				
R50	Метан	CH_4	16	-161,7
R170	Этан	CH_3CH_3	30	-88,6
R290	Пропан	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_3$	44	-42,3
R600	И-бутан	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$	58,1	-0,4
R601	Изобутан	$\text{CH}_3(\text{CH}_3)_2\text{CH}_3$	58,1	-10
(R1150)**	Этилен	$\text{CH}_2=\text{CH}_2$	28	-103,9
(R1270)**	Пропилен	$\text{CH}_3\text{CH}=\text{CH}_2$	42,1	-47,6
<i>Кислородные соединения</i>				
R610	Диэтиловый эфир	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OC}_2\text{H}_5$	74,1	34,6
R611	Метилформат	HCOOCH_3	60	31,8
<i>Азотные соединения</i>				
R630	Метиламин	CH_3NH_2	31,1	-6,5
R631	Этиламин	$\text{C}_2\text{H}_5\text{NH}_2$	45,1	16,6
<i>Неорганические соединения</i>				
R717	Аммиак	NH_3	17	-33,3
R718	Вода	H_2O	18	100
R729	Воздух		29	-194,4
R744	Углекислота	CO_2	44	-78,3 (сублимация)
R744A	Закись азота	N_2O	44	-88,3
R764	Сернистый ангидрид	SO_2	64	-10
<i>Ненасыщенные органические соединения</i>				
R1112a	Дифтордихлорэтилен	$\text{CCl}_2=\text{CF}_2$	133	19,4
R1113	Трифтормонохлорэтилен	$\text{CClF}=\text{CF}_2$	116,5	-26,8
R1114	Тетрафторэтилен	$\text{CF}_2=\text{CF}_2$	100	-76,1
R1120	Трихлорэтилен	$\text{CHCl}=\text{CCl}_2$	131,4	86,1
R1130	Дихлорэтилен	$\text{CHCl}=\text{CHCl}$	96,9	47,8
R1132a	Фтористый винилиден	$\text{CH}_2=\text{CF}_2$	64	-83,9
R1140	Хлористый винил	$\text{CH}_2=\text{CHCl}$	62,5	-13,9
R1141	Фтористый винил	$\text{CH}_2=\text{CHF}$	46	-72,2
R1150	Этилен	$\text{CH}_2=\text{CH}_2$	28	-103,9
R1270	Пропилен	$\text{CH}_3\text{CH}=\text{CH}_2$	42,1	-47,6

* Метан, этан и пропан приведены в разделе гадов углеводородных соединений цифровыми обозначениями но в скобках, так как эти вещества не являются галогенуглеводородными хладагентами.

** Этилен и пропилен — это углеводородные соединения. Поэтому они даны в разделе углеводородов в скобках. Этилен и пропилен подробно описаны в разделе ненасыщенных органических соединений.

Термодинамические свойства R12 в состоянии насыщения

Температура $t, ^\circ\text{C}$	Давление $p \cdot 10^{-6}, \text{Па}$		Удельный объём, $\text{м}^3/\text{кг} \cdot 10^{-3}$		Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3 \cdot 10^{-3}$		Энтальпия жидкости $h', \text{кДж}/\text{кг}$	Энтальпия пара $h'', \text{кДж}/\text{кг}$	Энтальпия образования пара $h'' - h', \text{кДж}/\text{кг}$	Энтропия, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	
	жидко-	пара	жидк.	пара	жидк.	пара				жидкости $s',$	пара s''
-45	0,5044	0,65355	302,683	1,53010	0,00330	159,549	171,674	331,223	0,83901	1,59142	0,83901
-44	0,5298	0,65472	289,157	1,52735	0,00346	160,427	171,260	331,687	0,84285	1,59016	0,84285
-43	0,5562	0,65590	276,362	1,52462	0,00362	161,306	170,845	332,151	0,84667	1,58893	0,84667
-42	0,5836	0,65709	264,249	1,52186	0,00378	162,185	170,429	332,615	0,85047	1,58773	0,85047
-41	0,6121	0,65828	252,779	1,51910	0,00396	163,067	170,011	333,078	0,85427	1,58655	0,85427
-40	0,6417	0,65949	241,910	1,51633	0,00413	163,948	169,593	333,541	0,85809	1,58539	0,85809
-39	0,6724	0,66070	231,607	1,51355	0,00431	164,831	169,173	334,004	0,86181	1,58426	0,86181
-38	0,7043	0,66192	221,835	1,51076	0,00451	165,714	168,752	334,466	0,86557	1,58315	0,86557
-37	0,7373	0,66315	212,562	1,50796	0,00470	166,598	168,329	334,927	0,86931	1,58207	0,86931
-36	0,7716	0,66438	203,759	1,50515	0,00491	167,483	167,905	335,388	0,87304	1,58101	0,87304
-35	0,8071	0,66563	195,398	1,50233	0,00512	168,369	167,480	335,849	0,87676	1,57996	0,87676
-34	0,8438	0,66689	187,453	1,49951	0,00533	169,255	167,054	336,309	0,88046	1,57894	0,88046
-33	0,8819	0,66815	179,900	1,49667	0,00553	170,143	166,626	336,768	0,88415	1,57795	0,88415
-32	0,9213	0,66942	172,716	1,49382	0,00579	171,031	166,195	337,227	0,88783	1,57697	0,88783
-31	0,9620	0,67071	165,881	1,49097	0,00603	171,920	165,765	337,686	0,89150	1,57600	0,89150
-30	1,0041	0,67200	159,375	1,48810	0,00627	172,810	165,333	338,143	0,89516	1,57507	0,89516
-29	1,0477	0,67330	153,178	1,48522	0,00653	173,701	164,899	338,600	0,89880	1,57416	0,89880
-28	1,0927	0,67461	147,215	1,48234	0,00679	174,593	164,463	339,057	0,90244	1,57326	0,90244
-27	1,1397	0,67593	141,649	1,47944	0,00706	175,486	164,026	339,513	0,90606	1,57235	0,90606
-26	1,1872	0,67726	136,284	1,47653	0,00734	176,380	163,587	339,968	0,90967	1,57152	0,90967
-25	1,2358	0,67860	131,165	1,47361	0,00762	177,275	163,147	340,422	0,91328	1,57068	0,91328
-24	1,2880	0,67996	126,292	1,47068	0,00792	178,171	162,705	340,876	0,91686	1,56985	0,91686
-23	1,3408	0,68132	121,620	1,46774	0,00822	179,068	162,261	341,328	0,92043	1,56904	0,92043
-22	1,3953	0,68269	117,167	1,46479	0,00853	179,965	161,815	341,780	0,92400	1,56825	0,92400
-21	1,4515	0,68407	112,913	1,46183	0,00886	180,864	161,367	342,231	0,92756	1,56748	0,92756
-20	1,5093	0,68547	108,847	1,45886	0,00919	181,764	160,918	342,682	0,93110	1,56672	0,93110
-19	1,5690	0,68687	104,960	1,45588	0,00953	182,665	160,465	343,131	0,93464	1,56598	0,93464
-18	1,6304	0,68829	101,242	1,45288	0,00988	183,567	160,013	343,580	0,93816	1,56526	0,93816
-17	1,6937	0,68972	97,6841	1,44987	0,01024	184,470	159,558	344,028	0,94168	1,56451	0,94168
-16	1,7589	0,69115	94,2788	1,44685	0,01061	185,374	159,100	344,474	0,94518	1,56385	0,94518
-15	1,8260	0,69261	91,0182	1,44382	0,01099	186,279	158,641	344,920	0,94868	1,56317	0,94868
-14	1,8950	0,69407	87,8951	1,44078	0,01138	187,185	158,180	345,365	0,95216	1,56250	0,95216
-13	1,9660	0,69554	84,9027	1,43773	0,01178	188,093	157,716	345,809	0,95564	1,56185	0,95564
-12	2,0390	0,69703	82,0344	1,43466	0,01219	189,001	157,250	346,252	0,95910	1,56121	0,95910
-11	2,1142	0,69853	79,2842	1,43158	0,01261	189,911	156,783	346,693	0,96256	1,56059	0,96256
-10	2,1912	0,70004	76,6464	1,42849	0,01305	190,822	156,312	347,134	0,96601	1,55997	0,96601
-9	2,2704	0,70157	74,1155	1,42538	0,01349	191,734	155,840	347,574	0,96945	1,55938	0,96945
-8	2,3519	0,70310	71,6864	1,42227	0,01395	192,647	155,365	348,012	0,97287	1,55879	0,97287
-7	2,4355	0,70465	69,3543	1,41914	0,01442	193,562	154,888	348,450	0,97629	1,55822	0,97629
-6	2,5214	0,70622	67,1146	1,41599	0,01490	194,477	154,408	348,886	0,97971	1,55765	0,97971
-5	2,6096	0,70780	64,9629	1,41284	0,01539	195,395	153,926	349,321	0,98311	1,55710	0,98311
-4	2,7001	0,70939	62,8952	1,40967	0,01590	196,313	153,442	349,755	0,98650	1,55657	0,98650
-3	2,7930	0,71099	60,9075	1,40648	0,01647	197,233	152,955	350,187	0,98989	1,55604	0,98989
-2	2,8882	0,71261	58,9963	1,40328	0,01695	198,154	152,465	350,619	0,99327	1,55552	0,99327
-1	2,9859	0,71425	57,1579	1,40007	0,01750	199,076	151,972	351,049	0,99664	1,55502	0,99664
0	3,0861	0,71590	55,3892	1,39685	0,01805	200,000	151,477	351,477	1,00000	1,55452	1,00000
1	3,1888	0,71756	53,6869	1,39361	0,01863	200,925	150,979	351,905	1,00335	1,55404	1,00335
2	3,2940	0,71924	52,0481	1,39035	0,01921	201,852	150,479	352,331	1,00670	1,55356	1,00670
3	3,4019	0,72094	50,4700	1,38708	0,01981	202,780	149,975	352,755	1,01004	1,55310	1,01004
4	3,5124	0,72265	48,9499	1,38374	0,02043	203,710	149,468	353,179	1,01337	1,55264	1,01337
5	3,6255	0,72438	47,4853	1,38049	0,02106	204,642	148,959	353,600	1,01670	1,55220	1,01670
6	3,7414	0,72612	46,0737	1,37718	0,02170	205,575	148,446	354,020	1,02001	1,55176	1,02001
7	3,8601	0,72788	44,7129	1,37384	0,02236	206,509	147,930	354,439	1,02333	1,55133	1,02333
8	3,9815	0,72966	43,4006	1,37050	0,02304	207,445	147,411	354,856	1,02663	1,55091	1,02663
9	4,1058	0,73143	42,1349	1,36713	0,02373	208,383	146,899	355,272	1,02993	1,55050	1,02993
10	4,2330	0,73327	40,9137	1,36375	0,02444	209,323	146,383	355,686	1,03322	1,55010	1,03322
11	4,3631	0,73510	39,7352	1,36035	0,02517	210,264	145,834	356,098	1,03650	1,54970	1,03650
12	4,4962	0,73695	38,5975	1,35694	0,02591	211,207	145,302	356,509	1,03978	1,54931	1,03978
13	4,6323	0,73882	37,4991	1,35350	0,02667	212,152	144,766	356,918	1,04305	1,54893	1,04305
14	4,7714	0,74071	36,4383	1,35003	0,02744	213,099	144,226	357,325	1,04632	1,54855	1,04632
15	4,9187	0,74262	35,4133	1,34659	0,02824	214,048	143,683	357,730	1,04958	1,54819	1,04958
16	5,0591	0,74455	34,4230	1,34310	0,02905	214,998	143,135	358,134	1,05284	1,54783	1,05284
17	5,2076	0,74649	33,4658	1,33960	0,02988	215,951	142,584	358,535	1,05609	1,54748	1,05609
18	5,3594	0,74846	32,5405	1,33608	0,03073	216,906	142,029	358,935	1,05933	1,54713	1,05933
19	5,5145	0,75046	31,6457	1,33257	0,03160	217,863	141,470	359,333	1,06258	1,54679	1,06258
20	5,6729	0,75246	30,7802	1,32907	0,03249	218,821	140,907	359,729	1,06581	1,54645	1,06581
21	5,8347	0,75449	29,9429	1,32559	0,03340	219,783	140,340	360,122	1,06904	1,54612	1,06904
22	5,9998	0,75655	29,1327	1,32173	0,03433	220,746	139,768	360,514	1,07227	1,54579	1,07227

Температура $t, ^\circ\text{C}$	Давление $p \cdot 10^{-5}, \text{Па}$	Удельный объ- ем, $\text{м}^3/\text{кг} \cdot 10^{-3}$		Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3 \cdot 10^{-3}$		Энтальпия жидкости, $\text{кДж}/\text{кг}$	Температура обращения $t, \text{кДж}/\text{кг}$	Энтальпия пара h'' , $\text{кДж}/\text{кг}$	Энтропия $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	
		жид- кости v'	пара v''	жидко- сти ρ'	пара ρ''				жидкости s'	пара s''
23	6,1684	0,75863	28,3485	1,31817	0,03528	221,712	139,197	360,904	1,07549	1,54547
24	6,3405	0,76073	27,5894	1,31453	0,03625	222,680	138,611	361,291	1,07871	1,54515
25	6,5162	0,76286	26,8542	1,31086	0,03724	223,633	138,026	361,676	1,08193	1,54484
26	6,6954	0,76501	26,1422	1,30718	0,03825	224,623	137,436	362,059	1,08514	1,54453
27	6,8782	0,76718	25,4524	1,30347	0,03929	225,598	136,841	362,439	1,08835	1,54423
28	7,0647	0,76938	24,7840	1,29974	0,04035	226,576	136,241	362,817	1,09155	1,54393
29	7,2550	0,77161	24,1362	1,29599	0,04143	227,557	135,636	363,193	1,09475	1,54363
30	7,4490	0,77386	23,5082	1,29222	0,04254	228,540	135,026	363,566	1,09795	1,54334
31	7,6468	0,77614	22,8993	1,28842	0,04367	229,526	134,411	363,937	1,10115	1,54305
32	7,8485	0,77845	22,3088	1,28460	0,04483	230,515	133,790	364,305	1,10434	1,54276
33	8,0541	0,78079	21,7359	1,28075	0,04601	231,506	133,164	364,670	1,10753	1,54247
34	8,2636	0,78316	21,1802	1,27688	0,04721	232,501	132,542	365,033	1,11072	1,54219
35	8,4772	0,78556	20,6408	1,27298	0,04845	233,498	131,924	365,392	1,11391	1,54191
36	8,6948	0,78799	20,1173	1,26906	0,04971	234,499	131,250	365,749	1,11710	1,54163
37	8,9164	0,79045	19,6091	1,26511	0,05100	235,508	130,600	366,103	1,12028	1,54135
38	9,1473	0,79294	19,1156	1,26113	0,05231	236,510	129,943	366,454	1,12347	1,54107
39	9,3723	0,79546	18,6362	1,25713	0,05366	237,521	129,281	366,802	1,12665	1,54079
40	9,6065	0,79802	18,1706	1,25309	0,05503	238,535	128,611	367,146	1,12984	1,54051
41	9,8451	0,80062	17,7182	1,24903	0,05644	239,552	127,935	367,487	1,13302	1,54024
42	10,088	0,80325	17,2811	1,24494	0,05788	240,574	127,252	367,825	1,13620	1,53996
43	10,335	0,80597	16,8566	1,24082	0,05934	241,598	126,561	368,160	1,13938	1,53968
44	10,587	0,80863	16,4356	1,23667	0,06084	242,627	125,864	368,491	1,14257	1,53941
45	10,843	0,81137	16,0316	1,23248	0,06238	243,659	125,153	368,818	1,14575	1,53913
46	11,104	0,81416	15,6386	1,22826	0,06394	244,696	124,443	369,141	1,14884	1,53885
47	11,369	0,81698	15,2563	1,22401	0,06555	245,736	123,735	369,461	1,15193	1,53858
48	11,639	0,81985	14,8844	1,21973	0,06718	246,781	123,026	369,777	1,15502	1,53830
49	11,914	0,82277	14,5224	1,21541	0,06886	247,830	122,318	370,088	1,15811	1,53802
50	12,193	0,82573	14,1701	1,21105	0,07057	248,884	121,612	370,396	1,16120	1,53774
51	12,477	0,82873	13,8271	1,20666	0,07232	249,942	120,907	370,699	1,16430	1,53746
52	12,766	0,83179	13,4931	1,20223	0,07411	251,004	119,993	370,997	1,16740	1,53718
53	13,060	0,83489	13,1678	1,19776	0,07594	252,072	119,220	371,291	1,17050	1,53690
54	13,359	0,83804	12,8509	1,19326	0,07782	253,144	118,437	371,581	1,17361	1,53662
55	13,663	0,84125	12,5421	1,18871	0,07973	254,222	117,644	371,865	1,17672	1,53634
56	13,972	0,84451	12,2412	1,18412	0,08169	255,304	116,841	372,145	1,17983	1,53606
57	14,286	0,84783	11,9479	1,17948	0,08370	256,392	116,027	372,419	1,18294	1,53578
58	14,605	0,85121	11,6620	1,17480	0,08575	257,486	115,202	372,688	1,18605	1,53550
59	14,929	0,85464	11,3832	1,17008	0,08785	258,585	114,367	372,952	1,18916	1,53522
60	15,259	0,85814	11,1113	1,16531	0,09000	259,690	113,519	373,210	1,19227	1,53494
61	15,594	0,86171	10,8460	1,16049	0,09220	260,801	112,660	373,461	1,19538	1,53467
62	15,935	0,86534	10,5872	1,15562	0,09445	261,918	111,789	373,707	1,19849	1,53439
63	16,280	0,86904	10,3346	1,15069	0,09676	263,042	110,905	373,947	1,20159	1,53411
64	16,632	0,87282	10,0881	1,14572	0,09913	264,172	110,008	374,180	1,20466	1,53383

Примечание ред. В отечественной литературе имеются более точные и надежные таблицы термодинамических свойств, учитывающие новейшие экспериментальные и теоретические исследования. Однако приведенные таблицы вполне пригодны для проведения учебных и приближенных расчетов. Расхождения в значениях энтальпии и энтропии в отечественных и зарубежных таблицах обусловлены выбором произвольной константы в состоянии кипения жидкости при 0°C .

на присутствие влаги, которая, несмотря на самые жесткие меры предосторожности, все же присутствует во всех холодильных системах. Хладагент не должен наносить вред, портить пищевые продукты или любые другие изделия при утечке из системы.

кой концентрации в помещении они вытесняют воздух и вызывают удушье. Токсичность — это относительное свойство, которое проявляется, если создается опасная степень концентрации данного вещества в воздухе. Хладагенты по степени токсичности разделены на 6 групп, причем группы расположены в нисходящей последовательности (колонка 2 табл. 16-7).

ТОКСИЧНОСТЬ

Все хладагенты токсичны в том отношении, что при достаточно высоких концентрациях, которые способны

вызвать смерть или нанести серьезный вред здоровью человека при отнесении небольшой концентрации или при нахождении человека в такой атмосфере сравнительно короткое время. В группу 6 входят хладагенты со слабой токсичностью, которые могут нанести вред здоровью человека только при отнесении высокой концентрации. Хладагенты в группе 6 считаются нетоксичными, так как практически при их использовании вред наносится не самими этими веществами, а из-за недостаточного количества воздуха в помещении. Необходимо подчеркнуть, что токсичны не некоторые хладагенты (в нормальном состоянии) в смеси с воздухом, а продукты их распада, образующиеся под воздействием открытого пламени или электронагревательного прибора. Продукты распада всокоотоксичны, и в течение короткого времени могут нанести серьезный вред, например фторированные хладагенты (см. колонку 6 табл. 16-7).

ВОСПЛАМЕНЯЕМОСТЬ И ВЗРЫВООПАСНОСТЬ

Большинство распространенных хладагентов не воспламеняются и взрывобезопасны, за исключением аммиака и углеводородных соединений. Смесь аммиака и воздуха определенной концентрации обладает некоторой воспламеняемостью и взрывоопасностью. Однако при соответствующих мерах предосторожности опасность применения аммиака пренебрежимо мала.

Углеводородные вещества отличаются высокой воспламеняемостью и взрывоопасностью и применяются в качестве хладагентов только в установках специального назначения под надзором опытного обслуживающего персонала. Углеводородные хладагенты имеют отличные термодинамические свойства, в связи с чем их часто используют в сверхнизкотемпературных установках, в которых опасность

их использования уменьшена до минимума, так как такое оборудование находится под постоянным надзором персонала, имеющего опыт работы с воспламеняющимися и взрывоопасными веществами.

Степень опасности при использовании токсичных хладагентов зависит от ряда факторов, например соотношения между объемом хладагента и объемом помещения, типа помещения, наличия или отсутствия открытого пламени, запаха хладагента и опыта обслуживающего персонала. Так, небольшое количество высокотоксичного хладагента оказывает незначительный вред при использовании в большом помещении, так как его утечка не может привести к опасной концентрации в воздухе. Кроме того, опасность применения токсичных хладагентов несколько уменьшается тем, что такие хладагенты (включая продукты их распада) отличаются характерным запахом, который предупреждает об опасности. В настоящее время единственным токсичным хладагентом, применяемым в большом количестве, является аммиак. Он используется в основном на мясоперерабатывающих предприятиях, фабриках мороженого и на больших холодильниках, где обычно работает опытный обслуживающий персонал.

ЭКОНОМИЧНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ДРУГИЕ ВОПРОСЫ

Естественно, что с точки зрения экономической эксплуатации желательно, чтобы хладагент имел такие физические и термодинамические характеристики, которые бы обеспечивали минимальный расход энергии на единицу холодопроизводительности, т. е. создавали бы высокий холодильный коэффициент. Наиболее важными свойствами хладагента, влияющими на производительность и КПД, являются скрытая теплота парообразования,

Температура t , °C	Удельный объем v , м ³ /кг. 0°	Удельная i , кДж/кг.	Энтальпия i , кДж/(кг. К)	Энтальпия i , кДж/(кг. К)	Энтальпия i , кДж/(кг. К)
40	241,910	333,541	236,059	336,232	1,5937
35	247,723	336,319	241,591	339,037	1,6054
30	253,238	339,119	247,088	341,864	1,6169
25	259,498	341,941	252,554	344,713	1,6282
20	264,948	344,785	257,993	347,684	1,6395
15	270,631	347,652	263,407	350,477	1,6506
10	276,288	350,541	268,798	353,392	1,6615
5	281,993	353,453	274,168	356,289	1,6724
0	287,538	356,330	279,520	359,233	1,6831
-5	293,134	359,234	284,854	362,271	1,6937
-10	298,713	362,323	290,174	365,275	1,7043
-15	304,276	365,348	295,479	368,301	1,7147
-20	309,836	368,348	300,771	371,349	1,7250
-25	315,382	371,349	306,052	374,418	1,7352
-30	320,887	374,461	311,321	377,509	1,7453
-35	326,401	377,550	316,581	380,621	1,7553
-40	331,906	380,650	321,832	383,754	1,7652
-45	337,401	383,743	327,074	386,907	1,7751
-50	342,888	386,829	332,309	390,081	1,7848
-55	348,367	390,915	337,537	393,276	1,7945
-60	353,840	393,908	342,758	396,490	1,8041
-65	359,305	396,924	347,973	399,724	1,8135
-70	364,765	399,977	353,183	402,977	1,8230
-75	370,219	403,006	358,387	406,250	1,8323
-80	375,668	406,077	363,587	409,543	1,8416
-85	381,115	409,182	368,785	412,856	1,8508
-90	386,561	412,262	373,972	416,189	1,8600
-95	392,007	415,323	379,157	419,542	1,8691
-100	397,454	418,366	384,340	422,915	1,8782
-105	402,901	421,391	389,526	426,308	1,8873
-110	408,348	424,407	394,713	429,721	1,8964
-115	413,795	427,413	399,900	433,154	1,9055
-120	419,242	430,419	405,087	436,607	1,9146
-125	424,689	433,425	410,274	440,080	1,9237
-130	430,136	436,431	415,461	443,573	1,9328
-135	435,583	439,437	420,650	447,086	1,9419
-140	441,030	442,443	425,840	450,609	1,9510
-145	446,477	445,449	431,031	454,152	1,9601
-150	451,924	448,455	436,223	457,715	1,9692
-155	457,371	451,461	441,416	461,298	1,9783
-160	462,818	454,467	446,609	464,901	1,9874
-165	468,265	457,473	451,803	468,524	1,9965
-170	473,712	460,479	457,000	472,167	2,0056
-175	479,159	463,485	462,193	475,830	2,0147
-180	484,606	466,491	467,387	479,513	2,0238
-185	490,053	469,497	472,581	483,216	2,0329
-190	495,500	472,503	477,775	486,939	2,0420
-195	500,947	475,509	482,970	490,682	2,0511
-200	506,394	478,515	488,164	494,445	2,0602
-205	511,841	481,521	493,358	498,228	2,0693
-210	517,288	484,527	498,553	502,031	2,0784
-215	522,735	487,533	503,747	505,854	2,0875
-220	528,182	490,539	508,942	509,697	2,0966
-225	533,629	493,545	514,137	513,560	2,1057
-230	539,076	496,551	519,332	517,443	2,1148
-235	544,523	499,557	524,527	521,346	2,1239
-240	549,970	502,563	529,722	525,269	2,1330
-245	555,417	505,569	534,917	529,212	2,1421
-250	560,864	508,575	540,112	533,175	2,1512
-255	566,311	511,581	545,307	537,158	2,1603
-260	571,758	514,587	550,502	541,171	2,1694
-265	577,205	517,593	555,697	545,204	2,1785
-270	582,652	520,600	560,892	549,257	2,1876
-275	588,099	523,606	566,087	553,330	2,1967
-280	593,546	526,612	571,282	557,423	2,2058
-285	598,993	529,618	576,477	561,536	2,2149
-290	604,440	532,624	581,672	565,669	2,2240
-295	609,887	535,630	586,867	569,832	2,2331
-300	615,334	538,636	592,062	574,015	2,2422
-305	620,781	541,642	597,257	578,218	2,2513
-310	626,228	544,648	602,452	582,441	2,2604
-315	631,675	547,654	607,647	586,684	2,2695
-320	637,122	550,660	612,842	590,947	2,2786
-325	642,569	553,666	618,037	595,230	2,2877
-330	648,016	556,672	623,232	599,533	2,2968
-335	653,463	559,678	628,427	603,856	2,3059
-340	658,910	562,684	633,622	608,199	2,3150
-345	664,357	565,690	638,817	612,572	2,3241
-350	669,804	568,696	644,012	616,975	2,3332
-355	675,251	571,702	649,207	621,398	2,3423
-360	680,698	574,708	654,402	625,841	2,3514
-365	686,145	577,714	659,597	630,304	2,3605
-370	691,592	580,720	664,792	634,787	2,3696
-375	697,039	583,726	669,987	639,290	2,3787
-380	702,486	586,732	675,182	643,813	2,3878
-385	707,933	589,738	680,377	648,356	2,3969
-390	713,380	592,744	685,572	652,919	2,4060
-395	718,827	595,750	690,767	657,502	2,4151
-400	724,274	598,756	695,962	662,105	2,4242
-405	729,721	601,762	701,157	666,728	2,4333
-410	735,168	604,768	706,352	671,371	2,4424
-415	740,615	607,774	711,547	676,034	2,4515
-420	746,062	610,780	716,742	680,717	2,4606
-425	751,509	613,786	721,937	685,420	2,4697
-430	756,956	616,792	727,132	690,143	2,4788
-435	762,403	619,798	732,327	694,886	2,4879
-440	767,850	622,804	737,522	699,649	2,4970
-445	773,297	625,810	742,717	704,432	2,5061
-450	778,744	628,816	747,912	709,235	2,5152
-455	784,191	631,822	753,107	714,058	2,5243
-460	789,638	634,828	758,302	718,901	2,5334
-465	795,085	637,834	763,497	723,764	2,5425
-470	800,532	640,840	768,692	728,647	2,5516
-475	805,979	643,846	773,887	733,550	2,5607
-480	811,426	646,852	779,082	738,473	2,5698
-485	816,873	649,858	784,277	743,416	2,5789
-490	822,320	652,864	789,472	748,379	2,5880
-495	827,767	655,870	794,667	753,362	2,5971
-500	833,214	658,876	799,862	758,365	2,6062
-505	838,661	661,882	805,057	763,388	2,6153
-510	844,108	664,888	810,252	768,431	2,6244
-515	849,555	667,894	815,447	773,494	2,6335
-520	854,999	670,900	820,642	778,577	2,6426
-525	860,446	673,906	825,837	783,680	2,6517
-530	865,893	676,912	831,032	788,803	2,6608
-535	871,340	679,918	836,227	793,946	2,6699
-540	876,787	682,924	841,422	799,109	2,6790
-545	882,234	685,930	846,617	804,292	2,6881
-550	887,681	688,936	851,812	809,495	2,6972
-555	893,128	691,942	857,007	814,718	2,7063
-560	898,575	694,948	862,202	819,961	2,7154
-565	904,022	697,954	867,397	825,224	2,7245
-570	909,469	700,960	872,592	830,507	2,7336
-575	914,916	703,966	877,787	835,810	2,7427
-580	920,363	706,972	882,982	841,133	2,7518
-585	925,810	709,978	888,177	846,476	2,7609
-590	931,257	712,984	893,372	851,839	2,7700
-595	936,704	715,990	898,567	857,222	2,7791
-600	942,151	718,996	903,762	862,625	2,7882
-605	947,598	722,002	908,957	868,048	2,7973
-610	953,045	725,008	914,152	873,491	2,8064
-615	958,492	728,014	919,347	878,954	2,8155
-620	963,939	731,020	924,542	884,437	2,8246
-625	969,386	734,026	929,737	889,940	2,8337
-630	974,833	737,032	934,932	895,463	2,8428
-635	980,280	740,038	940,127	900,996	2,8519
-640	985,727	743,044	945,322	906,549	2,8610
-645	991,174	746,050	950,517	912,122	2,8701
-650	996,621	749,056	955,712	917,715	2,8792
-655	1,002,068	752,062	960,907	923,328	2,8883
-660	1,007,515	755,068	966,102	928,961	2,8974
-665	1,012,962	758,074	971,297	934,614	2,9065
-670	1,018,409	761,080	976,492	940,287	2,9156
-675	1,023,856	764,086	981,687	945,980	2,9247
-680	1,029,303	767,092	986,882	951,693	2,9338
-685	1,034,750	770,098	992,077	957,426	2,9429
-690	1,040,197	773,104	997,272	963,179	2,9520
-695	1,045,644	776,110	1,002,467	968,952	2,9611
-700	1,051,091	779,116	1,007,662	974,745	2,9702
-705	1,056,538	782,122	1,012,857	980,558	2,9793
-710	1,061,985	785,128	1,018,052	986,391	2,9884
-715	1,067,432	788,134	1,023,247	992,244	2,9975
-720	1,072,879	791,140	1,028,442	998,117	3,0066
-725	1,078,326	794,146	1,033,637	1,003,990	3,0157
-730	1,083,773	797,152	1,038,832	1,009,883	3,0248
-735	1,089,220	800,158	1,044,027	1,015,796	3,0339
-740	1,094,667	803,164	1,049,222	1,021,729	3,0430
-745	1,100,114	806,170	1,054,417	1,027,682	3,0521
-750	1,105,561	809,176	1,059,612	1,033,655	3,0612
-755	1,111,008	812,182	1,064,807	1,039,648	3,0703
-760	1,116,455	815,188	1,070,002	1,045,661	3,0794
-765	1,121,902	818,194	1,075,207	1,051,694	3,0885
-770	1,127,349	821,200	1,080,412	1,057,747	3,0976
-775	1,132,796	824,206	1,085,617	1,063,820	3,1067
-780	1,138,243	827,212	1,090,822	1,069,913	

85
90
95
100

167,441
169,194
171,943
174,388

181,765
183,946
185,924
187,765

190,993
193,928
196,863
199,798

202,732
205,667
208,602
211,537

214,472
217,407
220,342
223,277

226,212
229,147
232,082
235,017

237,952
240,887
243,822
246,757

249,692
252,627
255,562
258,497

261,432
264,367
267,302
270,237

273,172
276,107
279,042
281,977

284,912
287,847
290,782
293,717

296,652
299,587
302,522
305,457

308,392
311,327
314,262
317,197

320,132
323,067
326,002
328,937

331,872
334,807
337,742
340,677

343,612
346,547
349,482
352,417

355,352
358,287
361,222
364,157

367,092
370,027
372,962
375,897

378,832
381,767
384,702
387,637

390,572
393,507
396,442
399,377

402,312
405,247
408,182
411,117

414,052
416,987
419,922
422,857

425,792
428,727
431,662
434,597

437,532
440,467
443,402
446,337

449,272
452,207
455,142
458,077

461,012
463,947
466,882
469,817

472,752
475,687
478,622
481,557

484,492
487,427
490,362
493,297

496,232
499,167
502,102
505,037

507,972
510,907
513,842
516,777

519,712
522,647
525,582
528,517

531,452
534,387
537,322
540,257

543,192
546,127
549,062
551,997

554,932
557,867
560,802
563,737

566,672
569,607
572,542
575,477

578,412
581,347
584,282
587,217

590,152
593,087
596,022
598,957

601,892
604,827
607,762
610,697

613,632
616,567
619,502
622,437

625,372
628,307
631,242
634,177

637,112
640,047
642,982
645,917

648,852
651,787
654,722
657,657

660,592
663,527
666,462
669,397

672,332
675,267
678,202
681,137

684,072
687,007
690,942
693,877

696,812
699,747
702,682
705,617

708,552
711,487
714,422
717,357

720,292
723,227
726,162
729,097

732,032
734,967
737,902
740,837

743,772
746,707
749,642
752,577

755,512
758,447
761,382
764,317

767,252
770,187
773,122
776,057

778,992
781,927
784,862
787,797

790,732
793,667
796,602
799,537

802,472
805,407
808,342
811,277

814,212
817,147
820,082
822,917

825,852
828,787
831,722
834,657

837,592
840,527
843,462
846,397

849,332
852,267
855,202
858,137

861,072
864,007
866,942
869,877

872,812
875,747
878,682
881,617

884,552
887,487
890,422
893,357

896,292
899,227
902,162
905,097

908,032
910,967
913,902
916,837

919,772
922,707
925,642
928,577

931,512
934,447
937,382
940,317

943,252
946,187
949,122
952,057

955,000
957,935
960,870
963,805

966,740
969,675
972,610
975,545

978,480
981,415
984,350
987,285

990,220
993,155
996,090
999,025

1001,960
1004,895
1007,830
1010,765

1013,700
1016,635
1019,570
1022,505

1025,440
1028,375
1031,310
1034,245

1037,180
1040,115
1043,050
1045,985

1048,920
1051,855
1054,790
1057,725

1060,660
1063,595
1066,530
1069,465

1072,400
1075,335
1078,270
1081,205

1084,140
1087,075
1090,010
1092,945

1095,880
1098,815
1101,750
1104,685

1107,620
1110,555
1113,490
1116,425

1119,360
1122,295
1125,230
1128,165

1131,100
1134,035
1136,970
1139,905

1142,840
1145,775
1148,710
1151,645

1154,580
1157,515
1160,450
1163,385

1166,320
1169,255
1172,190
1175,125

1178,060
1180,995
1183,930
1186,865

1189,800
1192,735
1195,670
1198,605

1201,540
1204,475
1207,410
1210,345

1213,280
1216,215
1219,150
1222,085

1225,020
1227,955
1230,890
1233,825

1236,760
1239,695
1242,630
1245,565

1248,500
1251,435
1254,370
1257,305

1260,240
1263,175
1266,110
1269,045

1271,980
1274,915
1277,850
1280,785

1283,720
1286,655
1289,590
1292,525

1295,460
1298,395
1301,330
1304,265

1307,200
1310,135
1313,070
1316,005

1318,940
1321,875
1324,810
1327,745

1330,680
1333,615
1336,550
1339,485

1342,420
1345,355
1348,290
1351,225

1354,160
1357,095
1360,030
1362,965

1365,900
1368,835
1371,770
1374,705

1377,640
1380,575
1383,510
1386,445

1389,380
1392,315
1395,250
1398,185

1401,120
1404,055
1406,990
1409,925

1412,860
1415,795
1418,730
1421,665

1424,600
1427,535
1430,470
1433,405

1436,340
1439,275
1442,210
1445,145

1448,080
1451,015
1453,950
1456,885

1459,820
1462,755
1465,690
1468,625

1471,560
1474,495
1477,430
1480,365

1483,300
1486,235
1489,170
1492,105

1495,040
1497,975
1500,910
1503,845

1506,780
1509,715
1512,650
1515,585

1518,520
1521,455
1524,390
1527,325

1530,260
1533,195
1536,130
1539,065

1542,000
1544,935
1547,870
1550,805

1553,740
1556,675
1559,610
1562,545

1565,480
1568,415
1571,350
1574,285

1577,220
1580,155
1583,090
1586,025

1588,960
1591,895
1594,830
1597,765

1600,700
1603,635
1606,570
1609,505

1612,440
1615,375
1618,310
1621,245

1624,180
1627,115
1630,050
1632,985

1635,920
1638,855
1641,790
1644,725

1647,660
1650,595
1653,530
1656,465

1659,400
1662,335
1665,270
1668,205

1671,140
1674,075
1677,010
1679,945

1682,880
1685,815
1688,750
1691,685

1694,620
1697,555
1700,490
1703,425

1706,360
1709,295
1712,230
1715,165

1718,100
1721,035
1723,970
1726,905

1729,840
1732,775
1735,710
1738,645

1741,580
1744,515
1747,450
1750,385

1753,320
1756,255
1759,190
1762,125

1765,060
1767,995
1770,930
1773,865

1776,800
1779,735
1782,670
1785,605

1788,540
1791,475
1794,410
1797,345

1800,280
1803,215
1806,150
1809,085

1812,020
1814,955
1817,890
1820,825

1823,760
1826,695
1829,630
1832,565

1835,500
1838,435
1841,370
1844,305

1847,240
1850,175
1853,110
1856,045

1858,980
1861,915
1864,850
1867,785

1870,720
1873,655
1876,590
1879,525

1882,460
1885,395
1888,330
1891,265

1894,200
1897,135
1900,070
1903,005

1905,940
1908,875
1911,810
1914,745

1917,680
1920,615
1923,550
1926,485

1929,420
1932,355
1935,290
1938,225

1941,160
1944,095
1947,030
1950,965

1953,900
1956,835
1959,770
1962,705

1965,640
1968,575
1971,510
1974,445

1977,380
1980,315
1983,250
1986,185

1989,120
1992,055
1994,990
1997,925

2000,860
2003,795
2006,730
2009,665

2012,600
2015,535
2018,470
2021,405

2024,340
2027,275
2030,210
2033,145

2036,080
2039,015
2041,950
2044,885

2047,820
2050,755
2053,690
2056,625

2059,560
2062,495
2065,430
2068,365

2071,300
2074,235
2077,170
2080,105

2083,040
2085,975
2088,910
2091,845

2094,780
2097,715
2100,650
2103,585

2106,520
2109,455
2112,390
2115,325

2118,260
2121,195
2124,130
2127,065

2130,000
2132,935
2

Температура t , °C	Удельный объем v , $\text{м}^3/\text{кг} \cdot 10^3$	Энтальпия i , кДж/кг	Энтропия s , кДж/(кг·К)
75,5780	350,072	1,5688	—9°C(2,2704·10 ⁴ Па)
77,3827	353,200	1,5803	—9°C(2,2704·10 ⁴ Па)
79,1639	356,334	1,5917	
82,6659	362,828	1,6139	—9°C(2,2704·10 ⁴ Па)
84,3907	365,790	1,6248	
86,1003	368,963	1,6355	—9°C(2,2704·10 ⁴ Па)
87,7961	372,438	1,6461	
89,4766	376,894	1,6566	—9°C(2,2704·10 ⁴ Па)
91,1516	378,560	1,6669	
92,8134	381,786	1,6771	—9°C(2,2704·10 ⁴ Па)
94,4659	385,026	1,6873	
96,1097	388,281	1,6972	—9°C(2,2704·10 ⁴ Па)
97,7457	391,551	1,7071	
99,3745	394,835	1,7169	—9°C(2,2704·10 ⁴ Па)
100,997	398,135	1,7266	
102,613	401,450	1,7362	—9°C(2,2704·10 ⁴ Па)
104,223	404,780	1,7457	
105,829	408,125	1,7551	—9°C(2,2704·10 ⁴ Па)
107,429	411,486	1,7644	
109,026	414,862	1,7738	—9°C(2,2704·10 ⁴ Па)
110,618	418,253	1,7828	
112,191	421,659	1,7919	—9°C(2,2704·10 ⁴ Па)
113,791	425,080	1,8009	
115,373	428,516	1,8098	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
64,9629	349,321	1,5571	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
66,5791	352,495	1,5688	
68,1705	355,672	1,5804	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
69,7399	358,852	1,5917	
72,2898	365,233	1,6138	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
74,8220	368,436	1,6247	
77,3407	371,649	1,6354	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
79,8478	374,745	1,6453	
82,3301	377,986	1,6537	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
84,7830	381,240	1,6610	
87,2048	384,505	1,6682	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
89,5921	387,783	1,6742	
91,9272	391,074	1,6802	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
94,2106	394,379	1,6859	
96,4428	397,698	1,6913	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
98,6253	401,030	1,6964	
1,7330	404,377	1,7013	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
1,7424	407,737	1,7058	
1,7518	411,112	1,7101	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
1,7610	414,502	1,7141	
1,7702	417,905	1,7178	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
1,7803	421,324	1,7214	
1,7913	424,756	1,7248	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
1,8029	428,199	1,7281	
1,8151	431,654	1,7313	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
1,8278	435,121	1,7344	
1,8411	438,599	1,7374	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
1,8548	442,087	1,7403	
1,8690	445,585	1,7431	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
1,8836	449,092	1,7458	
1,8986	452,607	1,7484	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
1,9140	456,130	1,7509	
1,9297	459,661	1,7533	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
1,9457	463,199	1,7556	
1,9619	466,753	1,7578	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
1,9784	470,313	1,7599	
1,9952	473,879	1,7619	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
2,0122	477,450	1,7638	
2,0295	481,026	1,7656	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
2,0470	484,607	1,7673	
2,0647	488,192	1,7689	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
2,0826	491,781	1,7704	
2,1007	495,374	1,7718	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
2,1190	498,971	1,7731	
2,1375	502,572	1,7743	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
2,1562	506,177	1,7754	
2,1751	509,786	1,7764	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
2,1942	513,398	1,7773	
2,2135	517,013	1,7781	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
2,2330	520,630	1,7788	
2,2527	524,249	1,7794	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
2,2726	527,870	1,7799	
2,2927	531,492	1,7803	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
2,3130	535,115	1,7806	
2,3334	538,739	1,7808	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
2,3540	542,363	1,7809	
2,3747	545,987	1,7809	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
2,3955	549,611	1,7808	
2,4164	553,235	1,7806	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
2,4374	556,858	1,7803	
2,4585	560,481	1,7800	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
2,4797	564,103	1,7796	
2,5010	567,725	1,7791	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
2,5224	571,346	1,7785	
2,5439	574,967	1,7778	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
2,5654	578,587	1,7770	
2,5870	582,207	1,7761	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
2,6087	585,826	1,7751	
2,6305	589,444	1,7740	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
2,6524	593,061	1,7728	
2,6744	596,677	1,7715	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
2,6965	600,290	1,7701	
2,7187	603,901	1,7686	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
2,7410	607,511	1,7670	
2,7634	611,119	1,7653	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
2,7859	614,725	1,7635	
2,8084	618,329	1,7616	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
2,8310	621,932	1,7596	
2,8536	625,534	1,7575	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
2,8763	629,135	1,7553	
2,8990	632,735	1,7530	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
2,9218	636,333	1,7506	
2,9446	640,929	1,7481	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
2,9675	644,523	1,7455	
2,9904	648,115	1,7428	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
3,0134	651,706	1,7400	
3,0364	655,295	1,7371	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
3,0595	658,882	1,7341	
3,0826	662,466	1,7310	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
3,1058	666,048	1,7278	
3,1290	669,628	1,7245	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
3,1523	673,206	1,7211	
3,1756	676,782	1,7176	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
3,1990	680,356	1,7140	
3,2224	683,928	1,7103	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
3,2458	687,497	1,7065	
3,2692	691,063	1,7026	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
3,2927	694,626	1,6986	
3,3161	698,187	1,6945	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
3,3396	701,745	1,6903	
3,3631	705,299	1,6860	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
3,3866	708,850	1,6816	
3,4101	712,400	1,6771	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
3,4336	715,947	1,6725	
3,4571	719,491	1,6678	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
3,4806	723,032	1,6630	
3,5041	726,570	1,6581	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
3,5276	730,106	1,6531	
3,5511	733,639	1,6480	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
3,5746	737,170	1,6428	
3,5981	740,700	1,6375	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
3,6216	744,228	1,6321	
3,6451	747,754	1,6266	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
3,6686	751,278	1,6210	
3,6921	754,800	1,6153	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
3,7156	758,319	1,6095	
3,7391	761,836	1,6036	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
3,7626	765,350	1,5976	
3,7861	768,862	1,5915	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
3,8096	772,371	1,5853	
3,8331	775,879	1,5790	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
3,8566	779,385	1,5726	
3,8801	782,888	1,5661	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
3,9036	786,389	1,5595	
3,9271	789,887	1,5528	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
3,9506	793,382	1,5460	
3,9741	796,874	1,5391	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
3,9976	800,363	1,5321	
4,0211	803,849	1,5250	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
4,0446	807,332	1,5178	
4,0681	810,812	1,5105	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
4,0916	814,289	1,5031	
4,1151	817,762	1,4956	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
4,1386	821,232	1,4880	
4,1621	824,699	1,4803	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
4,1856	828,162	1,4725	
4,2091	831,622	1,4646	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
4,2326	835,079	1,4566	
4,2561	838,532	1,4485	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
4,2796	841,982	1,4403	
4,3031	845,428	1,4320	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
4,3266	848,871	1,4237	
4,3501	852,311	1,4153	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
4,3736	855,748	1,4068	
4,3971	859,181	1,3982	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
4,4206	862,611	1,3895	
4,4441	866,038	1,3807	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
4,4676	869,461	1,3718	
4,4911	872,881	1,3628	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
4,5146	876,298	1,3537	
4,5381	879,712	1,3445	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
4,5616	883,123	1,3352	
4,5851	886,531	1,3259	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
4,6086	889,936	1,3164	
4,6321	893,338	1,3069	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
4,6556	896,737	1,2973	
4,6791	900,133	1,2876	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
4,7026	903,526	1,2778	
4,7261	906,916	1,2679	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
4,7496	910,303	1,2579	
4,7731	913,687	1,2478	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
4,7966	917,068	1,2375	
4,8201	920,446	1,2271	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
4,8436	923,821	1,2166	
4,8671	927,193	1,2060	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
4,8906	930,562	1,1953	
4,9141	933,928	1,1845	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
4,9376	937,291	1,1736	
4,9611	940,642	1,1626	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
4,9846	943,990	1,1515	
5,0081	947,335	1,1403	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
5,0316	950,677	1,1290	
5,0551	954,019	1,1176	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
5,0786	957,359	1,1061	
5,1021	960,697	1,0945	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
5,1256	964,034	1,0828	
5,1491	967,369	1,0710	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
5,1726	970,702	1,0592	
5,1961	974,034	1,0473	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
5,2196	977,364	1,0353	
5,2431	980,692	1,0232	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
5,2666	984,018	1,0110	
5,2901	987,342	1,0000	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
5,3136	990,664	0,9888	
5,3371	993,984	0,9775	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
5,3606	997,301	0,9661	
5,3841	1000,616	0,9543	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
5,4076	1003,928	0,9424	
5,4311	1007,237	0,9303	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
5,4546	1010,543	0,9181	
5,4781	1013,846	0,9058	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
5,5016	1017,146	0,8933	
5,5251	1020,443	0,8808	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
5,5486	1023,737	0,8681	
5,5721	1027,028	0,8553	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
5,5956	1030,316	0,8424	
5,6191	1033,601	0,8294	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
5,6426	1036,883	0,8163	
5,6661	1040,162	0,8031	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
5,6896	1043,439	0,7898	
5,7131	1046,713	0,7763	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
5,7366	1049,984	0,7627	
5,7601	1053,252	0,7490	—5°C(2,6096·10 ⁴ Па)
5,7836	1056,517	<	

105	97	3,186	421	3,94	428,268	1,7997	1,7818
110	98	702	424,755	1,7883	96,6640	1,7973	1,7793
115	100,092		428,202				
0	57	4,478	351,694	1,5574	55,3892	351,477	1,5545
5	35,491		354,921	1,5663	56,7878	354,717	1,5663
10	60,2918		358,166	1,5806	56,1628	357,956	1,5778
15	61,374		361,374	1,5919	59,5168	361,194	1,5892
20	63,0528		364,605	1,6030	60,8520	364,436	1,6003
25	64,4075		367,868	1,6139	62,1706	367,682	1,6113
30	65,7474		371,086	1,6247	63,4741	370,935	1,6221
35	67,0739		374,339	1,6354	64,7641	374,195	1,6328
40	68,3884		377,600	1,6459	66,0420	377,464	1,6433
45	69,6919		380,872	1,6562	67,3088	380,742	1,6537
50	70,9855		384,154	1,6665	68,5655	384,031	1,6641
55	72,2700		387,448	1,6766	69,8192	387,331	1,6744
60	73,5460		390,703	1,6866	71,0525	390,642	1,6848
65	74,8150		394,007	1,6965	72,2842	393,965	1,6949
70	76,0732		397,400	1,7063	73,5090	397,301	1,7049
75	77,3222		400,749	1,7159	74,7274	400,649	1,7143
80	78,5619		404,106	1,7255	75,9400	404,014	1,7230
85	79,8262		407,477	1,7350	77,1471	407,386	1,7325
90	81,0655		410,862	1,7444	78,3494	410,774	1,7419
95	82,3003		414,260	1,7537	79,5470	414,175	1,7512
100	83,5309		417,673	1,7629	80,7403	417,591	1,7604
105	84,7575		421,098	1,7720	81,9298	421,019	1,7696
110	85,9806		424,538	1,7810	83,1156	424,462	1,7786
115	87,2003		427,992	1,7900	84,2981	427,918	1,7876
120	88,4169		431,459	1,7989	85,4775	431,388	1,7965
5	35,408		354,838	1,5550	49,2026	353,600	1,5522
10	52,2659		357,347	1,5658	50,4510	357,131	1,5668
15	53,5218		360,632	1,5810	51,6771	360,420	1,5783
20	54,7582		363,897	1,5923	52,8833	363,706	1,5896
25	55,9772		367,174	1,6033	54,0719	366,994	1,6007
30	57,1806		370,454	1,6142	55,2447	370,284	1,6116
35	58,3700		373,739	1,6250	56,4033	373,578	1,6224
40	59,5459		377,031	1,6356	57,5493	376,878	1,6335
45	60,7124		380,330	1,6460	58,6838	380,185	1,6435
50	61,8676		383,639	1,6564	59,8079	383,500	1,6538
55	63,0135		386,956	1,6665	60,9225	386,825	1,6641
60	64,1508		390,284	1,6766	62,0286	390,159	1,6741
65	65,2804		393,623	1,6866	63,1268	393,503	1,6841
70	66,4029		396,974	1,6964	64,2179	396,858	1,6940
75	67,5189		400,335	1,7061	65,3024	400,225	1,7037
80	68,6289		403,710	1,7157	66,3810	403,604	1,7133
85	69,7334		407,097	1,7253	67,4540	406,994	1,7229
90	70,8329		410,505	1,7347	68,5297	410,397	1,7323
95	71,9278		413,937	1,7440	69,5983	413,813	1,7416
100	73,0183		417,332	1,7533	70,6442	417,241	1,7509
105	74,1049		420,770	1,7624	71,6992	420,682	1,7600
110	75,1877		424,220	1,7715	72,7504	424,136	1,7691
115	76,2633		427,685	1,7805	73,7983	427,603	1,7781
120	77,3435		431,162	1,7894	74,8429	431,082	1,7870
5	35,408		354,838	1,5550	49,2026	353,600	1,5522
10	52,2659		357,347	1,5658	50,4510	357,131	1,5668
15	53,5218		360,632	1,5810	51,6771	360,420	1,5783
20	54,7582		363,897	1,5923	52,8833	363,706	1,5896
25	55,9772		367,174	1,6033	54,0719	366,994	1,6007
30	57,1806		370,454	1,6142	55,2447	370,284	1,6116
35	58,3700		373,739	1,6250	56,4033	373,578	1,6224
40	59,5459		377,031	1,6356	57,5493	376,878	1,6335
45	60,7124		380,330	1,6460	58,6838	380,185	1,6435
50	61,8676		383,639	1,6564	59,8079	383,500	1,6538
55	63,0135		386,956	1,6665	60,9225	386,825	1,6641
60	64,1508		390,284	1,6766	62,0286	390,159	1,6741
65	65,2804		393,623	1,6866	63,1268	393,503	1,6841
70	66,4029		396,974	1,6964	64,2179	396,858	1,6940
75	67,5189		400,335	1,7061	65,3024	400,225	1,7037
80	68,6289		403,710	1,7157	66,3810	403,604	1,7133
85	69,7334		407,097	1,7253	67,4540	406,994	1,7229
90	70,8329		410,505	1,7347	68,5297	410,397	1,7323
95	71,9278		413,937	1,7440	69,5983	413,813	1,7416
100	73,0183		417,332	1,7533	70,6442	417,241	1,7509
105	74,1049		420,770	1,7624	71,6992	420,682	1,7600
110	75,1877		424,220	1,7715	72,7504	424,136	1,7691
115	76,2633		427,685	1,7805	73,7983	427,603	1,7781
120	77,3435		431,162	1,7894	74,8429	431,082	1,7870
5	35,408		354,838	1,5550	49,2026	353,600	1,5522
10	52,2659		357,347	1,5658	50,4510	357,131	1,5668
15	53,5218		360,632	1,5810	51,6771	360,420	1,5783
20	54,7582		363,897	1,5923	52,8833	363,706	1,5896
25	55,9772		367,174	1,6033	54,0719	366,994	1,6007
30	57,1806		370,454	1,6142	55,2447	370,284	1,6116
35	58,3700		373,739	1,6250	56,4033	373,578	1,6224
40	59,5459		377,031	1,6356	57,5493	376,878	1,6335
45	60,7124		380,330	1,6460	58,6838	380,185	1,6435
50	61,8676		383,639	1,6564	59,8079	383,500	1,6538
55	63,0135		386,956	1,6665	60,9225	386,825	1,6641
60	64,1508		390,284	1,6766	62,0286	390,159	1,6741
65	65,2804		393,623	1,6866	63,1268	393,503	1,6841
70	66,4029		396,974	1,6964	64,2179	396,858	1,6940
75	67,5189		400,335	1,7061	65,3024	400,225	1,7037
80	68,6289		403,710	1,7157	66,3810	403,604	1,7133
85	69,7334		407,097	1,7253	67,4540	406,994	1,7229
90	70,8329		410,505	1,7347	68,5297	410,397	1,7323
95	71,9278		413,937	1,7440	69,5983	413,813	1,7416
100	73,0183		417,332	1,7533	70,6442	417,241	1,7509
105	74,1049		420,770	1,7624	71,6992	420,682	1,7600
110	75,1877		424,220	1,7715	72,7504	424,136	1,7691
115	76,2633		427,685	1,7805	73,7983	427,603	1,7781
120	77,3435		431,162	1,7894	74,8429	431,082	1,7870
5	35,408		354,838	1,5550	49,2026	353,600	1,5522
10	52,2659		357,347	1,5658	50,4510	357,131	1,5668
15	53,5218		360,632	1,5810	51,6771	360,420	1,5783
20	54,7582		363,897	1,5923	52,8833	363,706	1,5896
25	55,9772		367,174	1,6033	54,0719	366,994	1,6007
30	57,1806		370,454	1,6142	55,2447	370,284	1,6116
35	58,3700		373,739	1,6250	56,4033	373,578	1,6224
40	59,5459		377,031	1,6356	57,5493	376,878	1,6335
45	60,7124		380,330	1,6460	58,6838	380,185	1,6435
50	61,8676		383,639	1,6564	59,8079	383,500	1,6538
55	63,0135		386,956	1,6665	60,9225	386,825	1,6641
60	64,1508		390,284	1,6766	62,0286	390,159	1,6741
65	65,2804		393,623	1,6866	63,1268	393,503	1,6841
70	66,4029		396,974	1,6964	64,2179	396,858	1,6940
75	67,5189		400,335	1,7061	65,3024	400,225	1,7037
80	68,6289		403,710	1,7157	66,3810	403,604	1,7133
85	69,7334		407,097	1,7253	67,4540	406,994	1,7229
90	70,8329		410,505	1,7347	68,5297	410,397	1,7323
95	71,9278		413,937	1,7440	69,5983	413,813	1,7416
100	73,0183		417,332	1,7533	70,6442	417,241	1,7509
105	74,1049		420,770	1,7624	71,6992	420,682	1,7600
110	75,1877		424,220	1,7715	72,7504	424,136	1,7691
115	76,2633		427,685	1,7805	73,7983	427,603	1,7781
120	77,3435		431,162	1,7894	74,8429	431,082	1,7870
5	35,408		354,838	1,5550	49,2026	353,600	1,5522
10	52,2659		357,347	1,5658	50,4510	357,131	1,5668
15	53,5218		360,632	1,5810	51,6771	360,420	1,5783
20	54,7582		363,897	1,5923	52,8833	363,706	1,5896
25	55,9772		367,174	1,6033	54,0719	366,994	1,6007
30	57,1806		370,454	1,6142	55,2447	370,284	1,6116
35	58,3700		373,739	1,6250	56,4033	373,578	1,6224
40	59,5459		377,031	1,6356	57,5493	376,878	1,6335
45	60,7124		380,330	1,6460	58,6838	380,185	1,6435
50	61,8676		383,639	1,6564	59,8079	383,500	1,6538
55	63,0135		386,956	1,6665	60,9225	386,825	1,6641
60	64,1508		390,284	1,6766	62,0286	390,159	1,6741
65	65,2804		393,623	1,6866	63,1268	393,503	1,6841
70	66,4029		396,974	1,6964	64,2179	396,858	1,6940
75	67,5189		400,335	1,7061	65,3024	400,225	1,7037
80	68,6289		403,710	1,7157	66,3810	403,604	1,7133
85	69,7334		407,097	1,7253	67,4540	406,994	1,7229
90	70,8329		410,505	1,7347	68,5297	410,397	1,

Температура $t, ^\circ\text{C}$	Удельный объем v , $\text{м}^3/\text{кг} \cdot 10^3$	Углубления l , кДж/кг	Углубления s , кДж/(кг·К)	Удельный объем v , $\text{м}^3/\text{кг} \cdot 10^3$	Углубления l , кДж/кг	Углубления s , кДж/(кг·К)
25, 89,48	364,436	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, 86,28	364,366	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, 83,47	364,291	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, 80,66	364,216	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, 77,85	364,141	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, 75,04	364,066	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, 72,23	363,991	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, 69,42	363,916	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, 66,61	363,841	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, 63,80	363,766	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, 60,99	363,691	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, 58,18	363,616	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, 55,37	363,541	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, 52,56	363,466	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, 49,75	363,391	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, 46,94	363,316	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, 44,13	363,241	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, 41,32	363,166	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, 38,51	363,091	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, 35,70	363,016	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, 32,89	362,941	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, 30,08	362,866	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, 27,27	362,791	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, 24,46	362,716	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, 21,65	362,641	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, 18,84	362,566	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, 16,03	362,491	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, 13,22	362,416	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, 10,41	362,341	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, 7,60	362,266	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, 4,79	362,191	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, 1,98	362,116	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -0,83	362,041	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -3,64	361,966	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -6,45	361,891	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -9,26	361,816	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -12,07	361,741	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -14,88	361,666	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -17,69	361,591	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -20,50	361,516	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -23,31	361,441	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -26,12	361,366	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -28,93	361,291	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -31,74	361,216	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -34,55	361,141	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -37,36	361,066	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -40,17	360,991	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -42,98	360,916	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -45,79	360,841	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -48,60	360,766	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -51,41	360,691	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -54,22	360,616	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -57,03	360,541	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -59,84	360,466	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -62,65	360,391	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -65,46	360,316	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -68,27	360,241	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -71,08	360,166	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -73,89	360,091	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -76,70	359,991	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -79,51	359,916	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -82,32	359,841	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -85,13	359,766	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -87,94	359,691	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -90,75	359,616	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -93,56	359,541	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -96,37	359,466	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -99,18	359,391	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -101,99	359,316	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -104,80	359,241	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -107,61	359,166	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -110,42	359,091	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -113,23	359,016	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -116,04	358,941	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -118,85	358,866	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -121,66	358,791	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -124,47	358,716	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -127,28	358,641	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -130,09	358,566	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -132,90	358,491	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -135,71	358,416	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -138,52	358,341	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -141,33	358,266	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -144,14	358,191	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -146,95	358,116	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -149,76	358,041	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -152,57	357,966	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -155,38	357,891	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -158,19	357,816	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -161,00	357,741	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -163,81	357,666	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -166,62	357,591	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -169,43	357,516	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -172,24	357,441	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -175,05	357,366	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -177,86	357,291	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -180,67	357,216	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -183,48	357,141	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -186,29	357,066	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -189,10	356,991	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -191,91	356,916	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -194,72	356,841	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -197,53	356,766	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -200,34	356,691	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -203,15	356,616	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -205,96	356,541	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -208,77	356,466	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -211,58	356,391	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -214,39	356,316	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -217,20	356,241	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -220,01	356,166	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -222,82	356,091	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -225,63	356,016	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -228,44	355,941	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -231,25	355,866	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -234,06	355,791	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -236,87	355,716	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -239,68	355,641	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -242,49	355,566	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -245,30	355,491	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -248,11	355,416	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -250,92	355,341	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -253,73	355,266	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -256,54	355,191	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -259,35	355,116	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -262,16	355,041	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -264,97	354,966	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -267,78	354,891	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -270,59	354,816	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -273,40	354,741	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -276,21	354,666	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -279,02	354,591	1,5515	1,5433	25, 07,41	364,291	1,5433
25, -281,83	354,516	1,5515</				

145	35,7412	446,064	1,725
155	36,7460	453,336	1,7897
160	36,2447	449,696	1,7811
150	36,2447	449,696	1,7811
155	36,2447	449,696	1,7897
35	20,6408	365,392	1,5419
40	21,2711	369,196	1,5542
50	22,4719	376,673	1,5777
60	23,6102	384,030	1,6001
65	24,1607	387,400	1,6169
70	24,7007	391,310	1,6216
75	25,7534	394,682	1,6298
80	26,2681	398,545	1,6474
85	26,7759	402,152	1,6525
90	27,2775	405,540	1,6603
95	27,7730	409,357	1,6724
100	28,2645	412,958	1,6821
105	28,7508	416,560	1,6917
110	29,2328	420,165	1,7011
120	29,7108	423,384	1,7197
125	30,1852	426,621	1,7289
130	30,6564	429,883	1,7379
140	31,1245	433,162	1,7469
145	31,5897	436,464	1,7557
150	32,0523	439,786	1,7645
155	32,5124	443,124	1,7731
160	32,9702	446,482	1,7817
40	18,7558	367,584	1,5433
45	19,3938	371,458	1,5565
50	19,9303	375,279	1,5675
55	20,4494	379,058	1,5791
60	20,9605	382,804	1,5904
65	21,4685	386,521	1,6015
70	21,9735	390,217	1,6123
75	22,5013	393,896	1,6220
80	23,0278	397,561	1,6314
85	23,5485	401,215	1,6407
90	24,0632	404,862	1,6500
95	24,5719	408,503	1,6588
100	25,0747	412,140	1,6676
105	25,5718	415,776	1,6763
110	26,0636	419,412	1,6850
120	26,5505	423,048	1,6937
125	27,0327	426,686	1,7022
130	27,5100	430,327	1,7116
135	27,9824	433,972	1,7208
140	28,4497	437,622	1,7299
145	28,9121	441,276	1,7391
150	29,3698	444,937	1,7482
155	29,8228	448,603	1,7566
160	30,2812	452,276	1,7653
35	36,5948	445,933	1,7705
40	37,1969	449,569	1,7791
45	37,7927	453,213	1,7877
50	38,3871	456,861	1,7963
55	38,9799	460,511	1,8049
60	39,5711	464,162	1,8135
65	40,1607	467,814	1,8221
70	40,7488	471,467	1,8307
75	41,3354	475,121	1,8393
80	41,9205	478,776	1,8479
85	42,5041	482,431	1,8565
90	43,0862	486,086	1,8651
95	43,6668	489,741	1,8737
100	44,2459	493,396	1,8823
105	44,8235	497,051	1,8909
110	45,4006	500,706	1,8995
115	45,9771	504,361	1,9081
120	46,5531	508,016	1,9167
125	47,1286	511,671	1,9253
130	47,7036	515,326	1,9339
135	48,2781	518,981	1,9425
140	48,8521	522,636	1,9511
145	49,4256	526,291	1,9597
150	50,0000	529,946	1,9683
155	50,5744	533,601	1,9769
160	51,1488	537,256	1,9855
35	37,1969	449,569	1,7791
40	37,7927	453,213	1,7877
45	38,3871	456,861	1,7963
50	38,9799	460,511	1,8049
55	39,5711	464,162	1,8135
60	40,1607	467,814	1,8221
65	40,7488	471,467	1,8307
70	41,3354	475,121	1,8393
75	41,9205	478,776	1,8479
80	42,5041	482,431	1,8565
85	43,0862	486,086	1,8651
90	43,6668	489,741	1,8737
95	44,2459	493,396	1,8823
100	44,8235	497,051	1,8909
105	45,4006	500,706	1,8995
110	45,9771	504,361	1,9081
115	46,5531	508,016	1,9167
120	47,1286	511,671	1,9253
125	47,7036	515,326	1,9339
130	48,2781	518,981	1,9425
135	48,8521	522,636	1,9511
140	49,4256	526,291	1,9597
145	50,0000	529,946	1,9683
150	50,5744	533,601	1,9769
155	51,1488	537,256	1,9855
160	51,7232	540,911	1,9941
35	37,1969	449,569	1,7791
40	37,7927	453,213	1,7877
45	38,3871	456,861	1,7963
50	38,9799	460,511	1,8049
55	39,5711	464,162	1,8135
60	40,1607	467,814	1,8221
65	40,7488	471,467	1,8307
70	41,3354	475,121	1,8393
75	41,9205	478,776	1,8479
80	42,5041	482,431	1,8565
85	43,0862	486,086	1,8651
90	43,6668	489,741	1,8737
95	44,2459	493,396	1,8823
100	44,8235	497,051	1,8909
105	45,4006	500,706	1,8995
110	45,9771	504,361	1,9081
115	46,5531	508,016	1,9167
120	47,1286	511,671	1,9253
125	47,7036	515,326	1,9339
130	48,2781	518,981	1,9425
135	48,8521	522,636	1,9511
140	49,4256	526,291	1,9597
145	50,0000	529,946	1,9683
150	50,5744	533,601	1,9769
155	51,1488	537,256	1,9855
160	51,7232	540,911	1,9941
35	37,1969	449,569	1,7791
40	37,7927	453,213	1,7877
45	38,3871	456,861	1,7963
50	38,9799	460,511	1,8049
55	39,5711	464,162	1,8135
60	40,1607	467,814	1,8221
65	40,7488	471,467	1,8307
70	41,3354	475,121	1,8393
75	41,9205	478,776	1,8479
80	42,5041	482,431	1,8565
85	43,0862	486,086	1,8651
90	43,6668	489,741	1,8737
95	44,2459	493,396	1,8823
100	44,8235	497,051	1,8909
105	45,4006	500,706	1,8995
110	45,9771	504,361	1,9081
115	46,5531	508,016	1,9167
120	47,1286	511,671	1,9253
125	47,7036	515,326	1,9339
130	48,2781	518,981	1,9425
135	48,8521	522,636	1,9511
140	49,4256	526,291	1,9597
145	50,0000	529,946	1,9683
150	50,5744	533,601	1,9769
155	51,1488	537,256	1,9855
160	51,7232	540,911	1,9941
35	37,1969	449,569	1,7791
40	37,7927	453,213	1,7877
45	38,3871	456,861	1,7963
50	38,9799	460,511	1,8049
55	39,5711	464,162	1,8135
60	40,1607	467,814	1,8221
65	40,7488	471,467	1,8307
70	41,3354	475,121	1,8393
75	41,9205	478,776	1,8479
80	42,5041	482,431	1,8565
85	43,0862	486,086	1,8651
90	43,6668	489,741	1,8737
95	44,2459	493,396	1,8823
100	44,8235	497,051	1,8909
105	45,4006	500,706	1,8995
110	45,9771	504,361	1,9081
115	46,5531	508,016	1,9167
120	47,1286	511,671	1,9253
125	47,7036	515,326	1,9339
130	48,2781	518,981	1,9425
135	48,8521	522,636	1,9511
140	49,4256	526,291	1,9597
145	50,0000	529,946	1,9683
150	50,5744	533,601	1,9769
155	51,1488	537,256	1,9855
160	51,7232	540,911	1,9941
35	37,1969	449,569	1,7791
40	37,7927	453,213	1,7877
45	38,3871	456,861	1,7963
50	38,9799	460,511	1,8049
55	39,5711	464,162	1,8135
60	40,1607	467,814	1,8221
65	40,7488	471,467	1,8307
70	41,3354	475,121	1,8393
75	41,9205	478,776	1,8479
80	42,5041	482,431	1,8565
85	43,0862	486,086	1,8651
90	43,6668	489,741	1,8737
95	44,2459	493,396	1,8823
100	44,8235	497,051	1,8909
105	45,4006	500,706	1,8995
110	45,9771	504,361	1,9081
115	46,5531	508,016	1,9167
120	47,1286	511,671	1,9253
125	47,7036	515,326	1,9339
130	48,2781	518,981	1,9425
135	48,8521	522,636	1,9511
140	49,4256	526,291	1,9597
145	50,0000	529,946	1,9683
150	50,5744	533,601	1,9769
155	51,1488	537,256	1,9855
160	51,7232	540,911	1,9941
35	37,1969	449,569	1,7791
40	37,7927	453,213	1,7877
45	38,3871	456,861	1,7963
50	38,9799	460,511	1,8049
55	39,5711	464,162	1,8135
60	40,1607	467,814	1,8221
65	40,7488	471,467	1,8307
70	41,3354	475,121	1,8393
75	41,9205	478,776	1,8479
80	42,5041	482,431	1,8565
85	43,0862	486,086	1,8651
90	43,6668	489,741	1,8737
95	44,2459	493,396	1,8823
100	44,8235	497,051	1,8909
105	45,4006	500,706	1,8995
110	45,9771	504,361	1,9081
115	46,5531	508,016	1,9167
120	47,1286	511,671	1,9253
125	47,7036	515,326	1,9339
130	48,2781	518,981	1,9425
135	48,8521	522,636	1,9511
140	49,4256	526,291	1,9597
145	50,0000	529,946	1,9683
150	50,5744	533,601	1,9769
155	51,1488	537,256	1,9855
160	51,7232	540,911	1,9941
35	37,1969	449,569	1,7791
40	37,7927	453,213	1,7877
45	38,3871	456,861	1,7963
50	38,9799	460,511	1,8049
55	39,5711	464,162	1,8135
60	40,1607	467,814	1,8221
65	40,7488	471,467	1,8307
70	41,3354	475,121	1,8393
75	41,9205	478,776	1,8479
80	42,5041	482,431	1,8565
85	43,0862	486,086	1,8651
90	43,6668	489,741	1,8737
95	44,2459	493,396	1,8823
100	44,8235	497,051	1,8909
105	45,4006	500,706	1,8995
110	45,9771	504,361	1,9081
115	46,5531	508,016	1,9167
120	47,1286	511,671	1,9253
125	47,7036	515,326	1,9339
130	48,2781	518,981	1,9425
135			

Температура $t, ^\circ\text{C}$	Удельный объем v , $\text{м}^3/\text{кг} \cdot 10^3$	Энтальпия h , $\text{кДж}/\text{кг}$	$43^\circ\text{C}(10,3352 \cdot 10^3\text{Па})$										$43^\circ\text{C}(10,3852 \cdot 10^3\text{Па})$										$44^\circ\text{C}(10,5870 \cdot 10^3\text{Па})$										$45^\circ\text{C}(10,8432 \cdot 10^3\text{Па})$										$46^\circ\text{C}(11,1039 \cdot 10^3\text{Па})$										$47^\circ\text{C}(11,3692 \cdot 10^3\text{Па})$										$48^\circ\text{C}(11,6392 \cdot 10^3\text{Па})$										$49^\circ\text{C}(11,9138 \cdot 10^3\text{Па})$										$50^\circ\text{C}(12,1932 \cdot 10^3\text{Па})$									
45	17,0748	369,728	1,5477	1,5470	1,5464	16,5463	369,296	1,5449	1,5441	1,5434	371,425	371,425	15,0926	15,5965	375,486	375,486	15,5922	15,5834	371,425	14,6257	370,992	1,5406	1,5391	368,818	16,0316	372,839	1,5638	1,5631	376,790	380,684	1,5870	1,5862	392,128	399,625	1,6304	1,6300	407,060	1,6509	1,6477	19,7377	403,074	1,6487	406,799	1,6487	410,512	1,6587	414,218	1,6686	417,918	1,6783	21,3550	421,614	1,6879	425,307	1,6974	429,000	1,7067	432,692	1,7159	436,386	1,7250	440,083	1,7340	443,782	1,7429	447,485	1,7517	451,192	1,7604	454,904	1,7691	1,7776	458,672	25,4601																		
46	17,0748	369,728	1,5477	1,5470	1,5464	16,5463	369,296	1,5449	1,5441	1,5434	371,425	371,425	15,0926	15,5965	375,486	375,486	15,5922	15,5834	371,425	14,6257	370,992	1,5406	1,5391	368,818	16,0316	372,839	1,5638	1,5631	376,790	380,684	1,5870	1,5862	392,128	399,625	1,6304	1,6300	407,060	1,6509	1,6477	19,7377	403,074	1,6487	406,799	1,6487	410,512	1,6587	414,218	1,6686	417,918	1,6783	21,3550	421,614	1,6879	425,307	1,6974	429,000	1,7067	432,692	1,7159	436,386	1,7250	440,083	1,7340	443,782	1,7429	447,485	1,7517	451,192	1,7604	454,904	1,7691	1,7776	458,672	25,4601																		
47	17,0748	369,728	1,5477	1,5470	1,5464	16,5463	369,296	1,5449	1,5441	1,5434	371,425	371,425	15,0926	15,5965	375,486	375,486	15,5922	15,5834	371,425	14,6257	370,992	1,5406	1,5391	368,818	16,0316	372,839	1,5638	1,5631	376,790	380,684	1,5870	1,5862	392,128	399,625	1,6304	1,6300	407,060	1,6509	1,6477	19,7377	403,074	1,6487	406,799	1,6487	410,512	1,6587	414,218	1,6686	417,918	1,6783	21,3550	421,614	1,6879	425,307	1,6974	429,000	1,7067	432,692	1,7159	436,386	1,7250	440,083	1,7340	443,782	1,7429	447,485	1,7517	451,192	1,7604	454,904	1,7691	1,7776	458,672	25,4601																		
48	17,0748	369,728	1,5477	1,5470	1,5464	16,5463	369,296	1,5449	1,5441	1,5434	371,425	371,425	15,0926	15,5965	375,486	375,486	15,5922	15,5834	371,425	14,6257	370,992	1,5406	1,5391	368,818	16,0316	372,839	1,5638	1,5631	376,790	380,684	1,5870	1,5862	392,128	399,625	1,6304	1,6300	407,060	1,6509	1,6477	19,7377	403,074	1,6487	406,799	1,6487	410,512	1,6587	414,218	1,6686	417,918	1,6783	21,3550	421,614	1,6879	425,307	1,6974	429,000	1,7067	432,692	1,7159	436,386	1,7250	440,083	1,7340	443,782	1,7429	447,485	1,7517	451,192	1,7604	454,904	1,7691	1,7776	458,672	25,4601																		
49	17,0748	369,728	1,5477	1,5470	1,5464	16,5463	369,296	1,5449	1,5441	1,5434	371,425	371,425	15,0926	15,5965	375,486	375,486	15,5922	15,5834	371,425	14,6257	370,992	1,5406	1,5391	368,818	16,0316	372,839	1,5638	1,5631	376,790	380,684	1,5870	1,5862	392,128	399,625	1,6304	1,6300	407,060	1,6509	1,6477	19,7377	403,074	1,6487	406,799	1,6487	410,512	1,6587	414,218	1,6686	417,918	1,6783	21,3550	421,614	1,6879	425,307	1,6974	429,000	1,7067	432,692	1,7159	436,386	1,7250	440,083	1,7340	443,782	1,7429	447,485	1,7517	451,192	1,7604	454,904	1,7691	1,7776	458,672	25,4601																		
50	15,5715	371,913	1,5462	1,5456	1,5450	15,0926	375,486	1,5434	1,5425	371,425	371,425	15,0926	15,5965	375,486	375,486	15,5922	15,5834	371,425	14,6257	370,992	1,5406	1,5391	368,818	16,0316	372,839	1,5638	1,5631	376,790	380,684	1,5870	1,5862	392,128	399,625	1,6304	1,6300	407,060	1,6509	1,6477	19,7377	403,074	1,6487	406,799	1,6487	410,512	1,6587	414,218	1,6686	417,918	1,6783	21,3550	421,614	1,6879	425,307	1,6974	429,000	1,7067	432,692	1,7159	436,386	1,7250	440,083	1,7340	443,782	1,7429	447,485	1,7517	451,192	1,7604	454,904	1,7691	1,7776	458,672	25,4601																			
51	15,5715	371,913	1,5462	1,5456	1,5450	15,0926	375,486	1,5434	1,5425	371,425	371,425	15,0926	15,5965	375,486	375,486	15,5922	15,5834	371,425	14,6257	370,992	1,5406	1,5391	368,818	16,0316	372,839	1,5638	1,5631	376,790	380,684	1,5870	1,5862	392,128	399,625	1,6304	1,6300	407,060	1,6509	1,6477	19,7377	403,074	1,6487	406,799	1,6487	410,512	1,6587	414,218	1,6686	417,918	1,6783	21,3550	421,614	1,6879	425,307	1,6974	429,000	1,7067	432,692	1,7159	436,386	1,7250	440,083	1,7340	443,782	1,7429	447,485	1,7517	451,192	1,7604	454,904	1,7691	1,7776	458,672	25,4601																			
52	15,5715	371,913	1,5462	1,5456	1,5450	15,0926	375,486	1,5434	1,5425	371,425	371,425	15,0926	15,5965	375,486	375,486	15,5922	15,5834	371,425	14,6257	370,992	1,5406	1,5391	368,818	16,0316	372,839	1,5638	1,5631	376,790	380,684	1,5870	1,5862	392,128	399,625	1,6304	1,6300	407,060	1,6509	1,6477	19,7377	403,074	1,6487	406,799	1,6487	410,512	1,6587	414,218	1,6686	417,918	1,6783	21,3550	421,614	1,6879	425,307	1,6974	429,000	1,7067	432,692	1,7159	436,386	1,7250	440,083	1,7340	443,782	1,7429	447,485	1,7517	451,192	1,7604	454,904	1,7691	1,7776	458,672	25,4601																			
53	15,5715	371,913	1,5462	1,5456	1,5450	15,0926	375,486	1,5434	1,5425	371,425	371,425	15,0926	15,5965	375,486	375,486	15,5922	15,5834	371,425	14,6257	370,992	1,5406	1,5391	368,818	16,0316	372,839	1,5638	1,5631	376,790	380,684	1,5870	1,5862	392,128	399,625	1,6304	1,6300	407,060	1,6509	1,6477	19,7377	403,074	1,6487	406,799	1,6487	410,512	1,6587	414,218	1,6686	417,918	1,6783	21,3550	421,614	1,6879	425,307	1,6974	429,000	1,7067	432,692	1,7159	436,386	1,7250	440,083	1,7340	443,782	1,7429	447,485	1,7517	451,192	1,7604	454,904	1,7691	1,7776	458,672	25,4601																			
54	15,5715	371,913	1,5462	1,5456	1,5450	15,0926	375,486	1,5434	1,5425	371,425	371,425	15,0926	15,5965	375,486	375,486	15,5922	15,5834	371,425	14,6257	370,992	1,5406	1,5391	368,818	16,0316	372,839	1,5638	1,5631	376,790	380,684	1,5870	1,5862	392,128	399,625	1,6304	1,6300	407,060	1,6509	1,6477	19,7377	403,074	1,6487	406,799	1,6487	410,512	1,6587	414,218	1,6686	417,918	1,6783	21,3550	421,614	1,6879	425,307	1,6974	429,000	1,7067	432,692	1,7159	436,386	1,7250	440,083	1,7340	443,782	1,7429	447,485	1,7517	451,192	1,7604	454,904	1,7691	1,7776	458,672	25,4601																			
55	16,0782	375,935	1,5585	1,5575	1,5568	15,5965	375,486	1,5532	1,5522	375,022	375,022	15,5965	15,5965	375,486	375,486	15,5922	15,5834	371,425	14,6257	370,992	1,5406	1,5391	368,818	16,0316	372,839	1,5638	1,5631	376,790	380,684	1,5870	1,5862	392,128	399,625	1,6304	1,6300	407,060	1,6509	1,6477	19,7377	403,074	1,6487	406,799	1,6487	410,512	1,6587	414,218	1,6686	417,918	1,6783	21,3550	421,614	1,6879	425,307	1,6974	429,000	1,7067	432,692	1,7159	436,386	1,7250	440,083	1,7340	443,782	1,7429	447,485	1,7517	451,192	1,7604	454,904	1,7691	1,7776	458,672	25,4601																			
56	16,0782	375,935	1,5585	1,5575	1,5568	15,5965	375,486	1,5532	1,5522	375,022	375,022	15,5965	15,5965	375,486	375,486	15,5922	15,5834	371,425	14,6257	370,992	1,5406	1,5391	368,818	16,0316	372,839	1,5638	1,5631	376,790	380,684	1,5870	1,5862	392,128	399,625	1,6304	1,6300	407,060	1,6509	1,6477	19,7377	403,074	1,6487	406,799	1,6487	410,512	1,6587	414,218	1,6686	417,918	1,6783	21,3550	421,614	1,6879	425,307	1,6974	429,000	1,7067	432,692	1,7159	436,386	1,7250	440,083	1,7340	443,782	1,7429	447,485	1,7517	451,192	1,7604	454,904	1,7691	1,7776	458,672	25,4601																			
57	16,0782	375,935	1,5585	1,5575	1,5568	15,5965	375,486	1,5532	1,5522	375,022	375,022	15,5965	15,5965	375,486	375,486	15,5922	15,5834	371,425	14,6257	370,992	1,5406	1,5391	368,818	16,0316	372,839	1,5638	1,5631	376,790	380,684	1,5870	1,5862	392,128	399,625	1,6304	1,6300	407,060	1,6509	1,6477	19,7377	403,074	1,6487	406,799	1,6487	410,512	1,6587	414,218	1,6686	417,918	1,6783	21,3550	421,614	1,6879	425,307	1,6974	429,000	1,7067	432,692	1,7159	436,386	1,7250	440,083	1,7340	443,782	1,7429	447,485	1,7517	451,192	1,7604	454,904	1,7691	1,7776	458,672	25,4601																			
58	16,0782	375,935	1,5585	1,5575	1,5568	15,5965	375,486	1,5532	1,5522	375,022	375,022	15,5965	15,5965	375,486	375,486	15,5922	15,5834	371,425	14,6257	370,992	1,5406	1,5391	368,818	16,0316	372,839	1,5638	1,5631	376,790	380,684	1,5870	1,5862	392,128	399,625	1,6304	1,6300	407,060	1,6509	1,6477	19,7377	403,074	1,6487	406,799	1,6487	410,512	1,6587	414,218	1,6686	417,918	1,6783	21,3550	421,614	1,6879	425,307	1,6974	429,000	1,7067	432,692	1,7159	436,386	1,7250	440,083	1,7340																														

150 23.7619 447.312
148 24.1188 451.024
147 24.4733 454.742
146 458.464 462.192
145 25.1760 462.192

51°C(12.4773·10⁻¹¹h)

150 374.045 1.6477
149 362.171 1.5721
148 386.136 1.5837
147 393.931 1.6061
146 399.053 1.6360
145 386.136 1.5837
144 374.045 1.6477
143 412.941 1.6680
142 416.696 1.6880
141 424.184 1.6873
140 427.920 1.6947
139 431.653 1.7060
138 439.385 1.7152
137 439.385 1.7243
136 442.848 1.7333
135 446.582 1.7422
134 450.318 1.7509
133 453.057 1.7596
132 457.800 1.7682
131 461.378 1.7747
130 466.299 1.7851
129 466.299 1.7851
128 466.299 1.7851
127 466.299 1.7851
126 466.299 1.7851
125 466.299 1.7851
124 466.299 1.7851
123 466.299 1.7851
122 466.299 1.7851
121 466.299 1.7851
120 466.299 1.7851
119 466.299 1.7851
118 466.299 1.7851
117 466.299 1.7851
116 466.299 1.7851
115 466.299 1.7851
114 466.299 1.7851
113 466.299 1.7851
112 466.299 1.7851
111 466.299 1.7851
110 466.299 1.7851
109 466.299 1.7851
108 466.299 1.7851
107 466.299 1.7851
106 466.299 1.7851
105 466.299 1.7851
104 466.299 1.7851
103 466.299 1.7851
102 466.299 1.7851
101 466.299 1.7851
100 466.299 1.7851
99 466.299 1.7851
98 466.299 1.7851
97 466.299 1.7851
96 466.299 1.7851
95 466.299 1.7851
94 466.299 1.7851
93 466.299 1.7851
92 466.299 1.7851
91 466.299 1.7851
90 466.299 1.7851
89 466.299 1.7851
88 466.299 1.7851
87 466.299 1.7851
86 466.299 1.7851
85 466.299 1.7851
84 466.299 1.7851
83 466.299 1.7851
82 466.299 1.7851
81 466.299 1.7851
80 466.299 1.7851
79 466.299 1.7851
78 466.299 1.7851
77 466.299 1.7851
76 466.299 1.7851
75 466.299 1.7851
74 466.299 1.7851
73 466.299 1.7851
72 466.299 1.7851
71 466.299 1.7851
70 466.299 1.7851
69 466.299 1.7851
68 466.299 1.7851
67 466.299 1.7851
66 466.299 1.7851
65 466.299 1.7851
64 466.299 1.7851
63 466.299 1.7851
62 466.299 1.7851
61 466.299 1.7851
60 466.299 1.7851
59 466.299 1.7851
58 466.299 1.7851
57 466.299 1.7851
56 466.299 1.7851
55 466.299 1.7851

52°C(12.7664·10⁻¹¹h)

150 373.530 1.5449
149 381.733 1.5695
148 385.729 1.5812
147 389.673 1.5925
146 393.574 1.6038
145 397.440 1.6146
144 401.277 1.6253
143 405.092 1.6357
142 408.887 1.6459
141 412.667 1.6560
140 416.435 1.6659
139 420.193 1.6756
138 423.944 1.6852
137 427.690 1.6947
136 431.432 1.7041
135 435.172 1.7133
134 438.910 1.7224
133 442.650 1.7314
132 446.390 1.7403
131 450.132 1.7491
130 453.877 1.7578
129 457.625 1.7664
128 461.378 1.7749
127 465.134 1.7833
126 465.134 1.7833
125 465.134 1.7833
124 465.134 1.7833
123 465.134 1.7833
122 465.134 1.7833
121 465.134 1.7833
120 465.134 1.7833
119 465.134 1.7833
118 465.134 1.7833
117 465.134 1.7833
116 465.134 1.7833
115 465.134 1.7833
114 465.134 1.7833
113 465.134 1.7833
112 465.134 1.7833
111 465.134 1.7833
110 465.134 1.7833
109 465.134 1.7833
108 465.134 1.7833
107 465.134 1.7833
106 465.134 1.7833
105 465.134 1.7833
104 465.134 1.7833
103 465.134 1.7833
102 465.134 1.7833
101 465.134 1.7833
100 465.134 1.7833
99 465.134 1.7833
98 465.134 1.7833
97 465.134 1.7833
96 465.134 1.7833
95 465.134 1.7833
94 465.134 1.7833
93 465.134 1.7833
92 465.134 1.7833
91 465.134 1.7833
90 465.134 1.7833
89 465.134 1.7833
88 465.134 1.7833
87 465.134 1.7833
86 465.134 1.7833
85 465.134 1.7833
84 465.134 1.7833
83 465.134 1.7833
82 465.134 1.7833
81 465.134 1.7833
80 465.134 1.7833
79 465.134 1.7833
78 465.134 1.7833
77 465.134 1.7833
76 465.134 1.7833
75 465.134 1.7833
74 465.134 1.7833
73 465.134 1.7833
72 465.134 1.7833
71 465.134 1.7833
70 465.134 1.7833
69 465.134 1.7833
68 465.134 1.7833
67 465.134 1.7833
66 465.134 1.7833
65 465.134 1.7833
64 465.134 1.7833
63 465.134 1.7833
62 465.134 1.7833
61 465.134 1.7833
60 465.134 1.7833
59 465.134 1.7833
58 465.134 1.7833
57 465.134 1.7833
56 465.134 1.7833
55 465.134 1.7833

53°C(13.0603·10⁻¹¹h)

150 372.996 1.5420
149 381.183 1.5647
148 385.282 1.5869
147 389.310 1.6082
146 393.281 1.6295
145 397.206 1.6508
144 401.094 1.6723
143 404.938 1.6936
142 408.782 1.7149
141 412.617 1.7362
140 416.447 1.7575
139 420.276 1.7788
138 424.105 1.7999
137 427.924 1.8212
136 431.732 1.8425
135 435.539 1.8638
134 439.346 1.8851
133 443.153 1.9064
132 446.960 1.9277
131 450.767 1.9489
130 454.574 1.9702
129 458.381 1.9915
128 462.188 2.0128
127 465.995 2.0341
126 469.802 2.0554
125 473.609 2.0767
124 477.416 2.0980
123 481.223 2.1193
122 485.030 2.1406
121 488.837 2.1619
120 492.644 2.1832
119 496.451 2.2045
118 500.258 2.2258
117 504.065 2.2471
116 507.872 2.2684
115 511.679 2.2897
114 515.486 2.3110
113 519.293 2.3323
112 523.100 2.3536
111 526.907 2.3749
110 530.714 2.3962
109 534.521 2.4175
108 538.328 2.4388
107 542.135 2.4601
106 545.942 2.4814
105 549.749 2.5027
104 553.556 2.5240
103 557.363 2.5453
102 561.170 2.5666
101 564.977 2.5879
100 568.784 2.6092
99 572.591 2.6305
98 576.398 2.6518
97 580.205 2.6731
96 584.012 2.6944
95 587.819 2.7157
94 591.626 2.7370
93 595.433 2.7583
92 599.240 2.7796
91 603.047 2.8009
90 606.854 2.8222
89 610.661 2.8435
88 614.468 2.8648
87 618.275 2.8861
86 622.082 2.9074
85 625.889 2.9287
84 629.696 2.9500
83 633.503 2.9713
82 637.310 2.9926
81 641.117 3.0139
80 644.924 3.0352
79 648.731 3.0565
78 652.538 3.0778
77 656.345 3.0991
76 660.152 3.1204
75 663.959 3.1417
74 667.766 3.1630
73 671.573 3.1843
72 675.380 3.2056
71 679.187 3.2269
70 682.994 3.2482
69 686.801 3.2695
68 690.608 3.2908
67 694.415 3.3121
66 698.222 3.3334
65 702.029 3.3547
64 705.836 3.3760
63 709.643 3.3973
62 713.450 3.4186
61 717.257 3.4399
60 721.064 3.4612
59 724.871 3.4825
58 728.678 3.5038
57 732.485 3.5251
56 736.292 3.5464
55 740.099 3.5677

54°C(13.3591·10⁻¹¹h)

150 372.442 1.5391
149 380.816 1.5519
148 389.187 1.5647
147 397.558 1.5775
146 405.929 1.5903
145 414.300 1.6030
144 422.671 1.6157
143 431.042 1.6285
142 439.413 1.6412
141 447.784 1.6539
140 456.155 1.6666
139 464.526 1.6793
138 472.897 1.6920
137 481.268 1.7047
136 489.639 1.7174
135 498.010 1.7301
134 506.381 1.7428
133 514.752 1.7555
132 523.123 1.7682
131 531.494 1.7809
130 539.865 1.7936
129 548.236 1.8063
128 556.607 1.8190
127 564.978 1.8317
126 573.349 1.8444
125 581.720 1.8571
124 590.091 1.8698
123 598.462 1.8825
122 606.833 1.8952
121 615.204 1.9079
120 623.575 1.9206
119 631.946 1.9333
118 640.317 1.9460
117 648.688 1.9587
116 657.059 1.9714
115 665.430 1.9841
114 673.801 1.9968
113 682.172 2.0095
112 690.543 2.0222
111 698.914 2.0349
110 707.285 2.0476
109 715.656 2.0603
108 724.027 2.0730
107 732.398 2.0857
106 740.769 2.0984
105 749.140 2.1111
104 757.511 2.1238
103 765.882 2.1365
102 774.253 2.1492
101 782.624 2.1619
100 790.995 2.1746
99 799.366 2.1873
98 807.737 2.2000
97 816.108 2.2127
96 824.479 2.2254
95 832.850 2.2381
94 841.221 2.2508
93 849.592 2.2635
92 857.963 2.2762
91 866.334 2.2889
90 874.705 2.3016
89 883.076 2.3143
88 891.447 2.3270
87 899.818 2.3397
86 908.189 2.3524
85 916.560 2.3651
84 924.931 2.3778
83 933.302 2.3905
82 941.673 2.4032
81 950.044 2.4159
80 958.415 2.4286
79 966.786 2.4413
78 975.157 2.4540
77 983.528 2.4667
76 991.899 2.4794
75 1000.270 2.4921
74 1008.641 2.5048
73 1017.012 2.5175
72 1025.383 2.5302
71 1033.754 2.5429
70 1042.125 2.5556
69 1050.496 2.5683
68 1058.867 2.5810
67 1067.238 2.5937
66 1075.609 2.6064
65 1083.980 2.6191
64 1092.351 2.6318
63 1100.722 2.6445
62 1109.093 2.6572
61 1117.464 2.6699
60 1125.835 2.6826
59 1134.206 2.6953
58 1142.577 2.7080
57 1150.948 2.7207
56 1159.319 2.7334
55 1167.690 2.7461

55°C(14.6051·10⁻¹¹h)

150 374.457 1.5406
149 383.006 1.5535
148 391.555 1.5662
147 400.104 1.5789
146 408.653 1.5916
145 417.202 1.6043
144 425.751 1.6170
143 434.300 1.6297
142 442.849 1.6424
141 451.398 1.6551
140 460.000 1.6678
139 468.602 1.6805
138 477.204 1.6932
137 485.806 1.7059
136 494.408 1.7186
135 503.010 1.7313
134 511.612 1.7440
133 520.214 1.7567
132 528.816 1.7694
131 537.418 1.7821
130 546.020 1.7948
129 554.622 1.8075
128 563.224 1.8202
127 571.826 1.8329
126 580.428 1.8456
125 589.030 1.8583
124 597.632 1.8710
123 606.234 1.8837
122 614.836 1.8964
121 623.438 1.9091
120 632.040 1.9218
119 640.642 1.9345
118 649.244 1.9472
117 657.846 1.9599
116 666.448 1.9726
115 675.050 1.9853
114 683.652 1.9980
113 692.254 2.0107
112 700.856 2.0234
111 709.458 2.0361
110 718.060 2.0488
109 726.662 2.0615
108 735.264 2.0742
107 743.866 2.0869
106 752.468 2.0996
105 761.070 2.1123
104 769.672 2.1250
103 778.274 2.1377
102 786.876 2.1504
101 795.478 2.1631
100 804.080 2.1758
99 812.682 2.1885
98 821.284 2.2012
97 829.886 2.2139
96 838.488 2.2266
95 847.090 2.2393
94 855.692 2.2520
93 864.294 2.2647
92 872.896 2.2774
91 881.498 2.2901
90 890.100 2.3028
89 898.702 2.3155
88 907.304 2.3282
87 915.906 2.3409
86 924.508 2.3536
85 933.110 2.3663
84 941.712 2.3790
83 950.314 2.3917
82 958.916 2.4044
81 967.518 2.4171
80 976.120 2.4298
79 984.722 2.4425
78 993.324 2.4552
77 1001.926 2.4679
76 1010.528 2.4806
75 1019.130 2.4933
74 1027.732 2.5060
73 1036.334 2.5187
72 1044.936 2.5314
71 1053.538 2.5441
70 1062.140 2.5568
69 1070.742 2.5695
68 1079.344 2.5822
67 1087.946 2.5949
66 1096.548 2.6076
65 1105.150 2.6203
64 1113.752 2.6330
63 1122.354 2.6457
62 1130.956 2.6584
61 1139.558 2.6711
60 1148.160 2.6838
59 1156.762 2.6965
58 1165.364 2.7092
57 1173.966 2.7219
56 1182.568 2.7346
55 1191.170 2.7473

Примечание ред. Над значениями Удельного объема, энтропии указаны температура и давление насыщенного

Температура $t, ^\circ\text{C}$	Удельный объем v , $\text{м}^3/\text{кг} \cdot 10^3$	Энтальпия i , $\text{кДж}/\text{кг}$	Энтропия s , $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$
60	11,4755	373,846	1,5376
65	11,9198	378,232	1,5507
70	12,3399	382,499	1,5632
75	12,7406	386,672	1,5753
80	13,1250	390,772	1,5870
85	13,4959	394,811	1,5983
90	13,8561	398,801	1,6094
95	14,2042	402,751	1,6202
100	14,5472	406,668	1,6307
105	14,8772	410,558	1,6411
110	15,2030	414,425	1,6513
115	15,5226	418,274	1,6612
120	15,8368	422,108	1,6711
125	16,1460	425,929	1,6807
130	16,4508	429,741	1,6902
135	16,7515	433,546	1,6996
140	17,0485	437,345	1,7089
145	17,3421	441,139	1,7180
150	17,6327	444,931	1,7270
155	17,9203	448,722	1,7359
160	18,2054	452,512	1,7447
165	18,4881	456,303	1,7534
170	18,7684	460,096	1,7620
175	19,0467	463,890	1,7705
180	19,3231	467,687	1,7790
11,112	373,209	377,657	1,5346
11,5667	381,974	381,974	1,5608
11,9704	386,188	386,188	1,5727
12,3756	390,323	390,323	1,5845
12,7679	394,392	394,392	1,5959
13,1261	398,408	398,408	1,6071
13,4822	402,381	402,381	1,6179
13,8279	406,318	406,318	1,6285
14,1645	410,226	410,226	1,6391
14,4933	414,110	414,110	1,6491
14,8150	417,974	417,974	1,6592
15,1305	421,821	421,821	1,6690
15,4404	425,655	425,655	1,6787
15,7452	429,478	429,478	1,6882
16,0455	433,293	433,293	1,6977
16,3417	437,102	437,102	1,7069
16,6342	440,905	440,905	1,7161
16,9232	444,706	444,706	1,7251
17,2091	448,504	448,504	1,7340
17,4921	452,302	452,302	1,7429
17,7725	456,099	456,099	1,7516
18,0504	459,898	459,898	1,7602
18,3260	463,698	463,698	1,7687
18,5995	467,501	467,501	1,7772
11,2012	381,060	381,060	1,5449
11,6211	386,869	386,869	1,5578
12,0193	389,860	389,860	1,5695
12,3997	393,960	393,960	1,5820
12,7654	398,004	398,004	1,5946
13,1186	402,001	402,001	1,6071
13,4611	406,960	406,960	1,6196
13,7943	411,933	411,933	1,6323
14,1193	416,887	416,887	1,6449
14,4372	421,828	421,828	1,6571
14,7486	426,744	426,744	1,6690
15,0544	431,644	431,644	1,6807
15,3550	436,528	436,528	1,6922
15,6511	441,405	441,405	1,7035
15,9429	446,276	446,276	1,7147
16,2310	451,142	451,142	1,7258
16,5155	456,004	456,004	1,7367
16,7969	460,861	460,861	1,7475
17,0754	465,704	465,704	1,7582
17,3511	470,534	470,534	1,7688
17,6244	475,351	475,351	1,7793
17,8954	480,155	480,155	1,7897
18,1643	484,946	484,946	1,8000
18,4312	489,724	489,724	1,8102
18,6987	494,498	494,498	1,8203
18,9643	499,259	499,259	1,8303
19,2284	504,007	504,007	1,8402
19,4912	508,743	508,743	1,8500
19,7528	513,466	513,466	1,8597
20,0132	518,177	518,177	1,8693
20,2724	522,875	522,875	1,8788
20,5304	527,560	527,560	1,8882
20,7872	532,232	532,232	1,8975
21,0428	536,891	536,891	1,9067
21,2972	541,537	541,537	1,9158
21,5504	546,170	546,170	1,9248
21,8024	550,791	550,791	1,9337
22,0532	555,399	555,399	1,9425
22,3028	560,004	560,004	1,9512
22,5512	564,606	564,606	1,9598
22,7984	569,204	569,204	1,9683
23,0444	573,798	573,798	1,9767
23,2892	578,388	578,388	1,9850
23,5328	582,974	582,974	1,9932
23,7752	587,556	587,556	2,0013
24,0164	592,134	592,134	2,0093
24,2564	596,708	596,708	2,0172
24,4952	601,278	601,278	2,0250
24,7328	605,844	605,844	2,0327
24,9692	610,406	610,406	2,0403
25,2044	614,964	614,964	2,0478
25,4384	619,518	619,518	2,0552
25,6712	624,068	624,068	2,0625
25,9028	628,614	628,614	2,0697
26,1332	633,156	633,156	2,0768
26,3624	637,694	637,694	2,0838
26,5904	642,228	642,228	2,0907
26,8172	646,758	646,758	2,0975
27,0428	651,284	651,284	2,1042
27,2672	655,806	655,806	2,1108
27,4904	660,324	660,324	2,1173
27,7124	664,838	664,838	2,1237
27,9332	669,348	669,348	2,1300
28,1528	673,854	673,854	2,1362
28,3712	678,356	678,356	2,1423
28,5884	682,854	682,854	2,1483
28,8044	687,348	687,348	2,1542
29,0192	691,838	691,838	2,1600
29,2328	696,324	696,324	2,1657
29,4452	700,806	700,806	2,1713
29,6564	705,284	705,284	2,1768
29,8664	709,758	709,758	2,1822
30,0752	714,228	714,228	2,1875
30,2828	718,694	718,694	2,1927
30,4892	723,156	723,156	2,1978
30,6944	727,614	727,614	2,2028
30,8984	732,068	732,068	2,2077
31,1012	736,518	736,518	2,2125
31,3028	740,964	740,964	2,2172
31,5032	745,406	745,406	2,2218
31,7024	749,844	749,844	2,2263
31,9004	754,278	754,278	2,2307
32,0972	758,708	758,708	2,2350
32,2928	763,134	763,134	2,2392
32,4872	767,556	767,556	2,2433
32,6804	771,974	771,974	2,2473
32,8724	776,388	776,388	2,2512
33,0632	780,798	780,798	2,2550
33,2528	785,204	785,204	2,2587
33,4412	789,606	789,606	2,2623
33,6284	794,004	794,004	2,2658
33,8144	798,400	798,400	2,2692
34,0004	802,794	802,794	2,2725
34,1852	807,184	807,184	2,2757
34,3688	811,570	811,570	2,2788
34,5512	815,952	815,952	2,2818
34,7324	820,330	820,330	2,2847
34,9124	824,704	824,704	2,2875
35,0912	829,074	829,074	2,2902
35,2688	833,440	833,440	2,2928
35,4452	837,802	837,802	2,2953
35,6204	842,160	842,160	2,2977
35,7944	846,514	846,514	2,2999
35,9672	850,864	850,864	2,3020
36,1388	855,210	855,210	2,3040
36,3092	859,552	859,552	2,3059
36,4784	863,890	863,890	2,3077
36,6464	868,224	868,224	2,3094
36,8132	872,554	872,554	2,3110
36,9788	876,880	876,880	2,3125
37,1432	881,202	881,202	2,3139
37,3064	885,520	885,520	2,3152
37,4684	889,834	889,834	2,3164
37,6292	894,144	894,144	2,3175
37,7888	898,450	898,450	2,3185
37,9472	902,752	902,752	2,3194
38,1044	907,050	907,050	2,3202
38,2604	911,344	911,344	2,3209
38,4152	915,634	915,634	2,3215
38,5688	919,920	919,920	2,3220
38,7212	924,202	924,202	2,3224
38,8724	928,480	928,480	2,3227
39,0224	932,754	932,754	2,3229
39,1712	937,024	937,024	2,3230
39,3188	941,290	941,290	2,3230
39,4652	945,552	945,552	2,3229
39,6104	949,810	949,810	2,3227
39,7544	954,064	954,064	2,3224
39,8972	958,314	958,314	2,3220
40,0388	962,560	962,560	2,3215
40,1792	966,802	966,802	2,3209
40,3184	971,040	971,040	2,3202
40,4564	975,274	975,274	2,3194
40,5932	979,504	979,504	2,3185
40,7288	983,730	983,730	2,3175
40,8632	987,952	987,952	2,3164
40,9964	992,170	992,170	2,3152
41,1284	996,384	996,384	2,3139
41,2592	1000,594	1000,594	2,3125
41,3888	1004,800	1004,800	2,3110
41,5172	1009,002	1009,002	2,3094
41,6444	1013,200	1013,200	2,3077
41,7704	1017,394	1017,394	2,3059
41,8952	1021,584	1021,584	2,3040
42,0188	1025,770	1025,770	2,3020
42,1412	1029,952	1029,952	2,3000
42,2624	1034,130	1034,130	2,2978
42,3824	1038,304	1038,304	2,2953
42,4992	1042,474	1042,474	2,2928
42,6144	1046,640	1046,640	2,2902
42,7288	1050,802	1050,802	2,2875
42,8412	1054,960	1054,960	2,2847
42,9524	1059,114	1059,114	2,2818
43,0624	1063,264	1063,264	2,2788
43,1712	1067,410	1067,410	2,2757
43,2788	1071,552	1071,552	2,2725
43,3852	1075,690	1075,690	2,2692
43,4904	1079,824	1079,824	2,2658
43,5944	1083,954	1083,954	2,2623
43,6972	1088,080	1088,080	2,2587
43,7988	1092,202	1092,202	2,2550
43,8992	1096,320	1096,320	2,2512
43,9984	1100,434	1100,434	2,2473
44,0964	1104,544	1104,544	2,2433
44,1932	1108,650	1108,650	2,2392
44,2888	1112,752	1112,752	2,2350
44,3832	1116,850	1116,850	2,2307
44,4764	1120,944	1120,944	2,2263
44,5684	1125,034	1125,034	2,2218
44,6592	1129,120	1129,120	2,2172
44,7488	1133,202	1133,202	2,2125
44,8372	1137,280	1137,280	2,2077
44,9244	1141,354	1141,354	2,2028
45,0104	1145,424	1145,424	2,1978
45,0952	1149,490	1149,490	2,1927
45,1788	1153,552	1153,552	2,1875
45,2612	1157,610	1157,610	2,1822
45,3424	1161,664	1161,664	2,1768
45,4224	1165,714	1165,714	2,1713
45,5012	1169,760	1169,760	2,1657
4			

удельный объем пара, степень сжатия, удельная теплоемкость в жидкой и паровой фазах.

Хладагент, применяемый в установках любой производительности, кроме очень малой, должен иметь высокое значение скрытой теплоты парообразования для меньшего массового расхода (на единицу производительности). Производительность и КПД компрессора значительно увеличиваются в том случае, когда высокое значение скрытой теплоты сочетается с низким удельным объемом пара, в результате чего уменьшается расход энергии, а также требуемая объемная производительность компрессора, что позволяет применять более компактное оборудование. Однако если в установках малой производительности используется хладагент, скрытая теплота парообразования которого слишком велика, то количество циркулирующего хладагента будет недостаточным для точного регулирования подачи жидкости в испаритель.

Низкая удельная теплоемкость жидкости и высокая удельная теплоемкость пара хладагента желательны, они повышают холодопроизводительность на единицу массы, причем в первом случае увеличивается переохлаждение жидкости, а во втором — уменьшается перегрев пара. Когда хладагент характеризуется этими двумя свойствами, КПД регенеративного теплообменника значительно увеличивается. Влияние степени сжатия на работу сжатия и, следовательно, на холодильный коэффициент рассматривалось в предыдущей главе. Естественно, что при прочих равных условиях оптимальным является хладагент с минимальной степенью сжатия. При низкой степени сжатия расход энергии невелик, а коэффициент подачи большой, причем последний особенно важен в установках с малым компрессором.

Крайне желательна низкая адиа-

батная температура нагнетания, которая совместно с достаточно низкой степенью сжатия уменьшает возможность перегрева компрессора и способствует длительному сроку работы оборудования без ремонта. Низкая адиабатная температура нагнетания особенно важна при использовании герметичных компрессоров со встроенным электродвигателем, так как интенсивность химических реакций прямо пропорциональна квадрату температуры. Поэтому важно иметь в виду, что температура нагнетания одного хладагента при любой данной степени сжатия может быть значительно выше, чем температура другого хладагента, работающего при той же степени сжатия.

Высокий коэффициент теплоотдачи часто улучшает интенсивность передачи теплоты, в результате чего уменьшаются размеры и стоимость теплообменного оборудования. Желательно также, чтобы давление хладагента в испарителе всегда было выше атмосферного. Если давление на стороне всасывания ниже атмосферного, то значительное количество воздуха и влаги попадают в систему при наличии неплотности в системе, но эта возможность становится минимальной, если давление кипения выше атмосферного.

Относительно низкие давления конденсации при нормальных атмосферных условиях позволяют использовать материалы с тонкой стенкой в конструкциях конденсаторов, в результате чего уменьшается масса, размеры и стоимость оборудования.

Естественно, что критические температура и давление хладагента должны быть выше максимальной температуры и давления в системе. Температура замерзания хладагента долж-

Термодинамические свойства R22 в состоянии насыщения

Температура, t , °C	Давление p , 10^{-3} , Па	V удельный объем, $m^3/kg \cdot 10^{-3}$		Плотность, $kg/m^3 \cdot 10^{-3}$		Энтальпия, kJ/kg		Теплота парообразования t , kJ/kg		Энтропия, $kJ/(kg \cdot K)$
		насыщенный v'	сухого v''	насыщенный ρ'	сухого ρ''	насыщенный t'	сухого насы- щения t''	насыщенный t'	сухого насы- щения t''	
—50	0,6436	0,69526	324,557	1,43831	1,43549	145,992	238,403	384,395	0,78380	1,85000
—49	0,6776	0,69800	309,466	1,43666	1,43666	147,029	237,840	384,869	0,78841	1,84472
—48	0,7128	0,69800	295,217	1,43666	1,43666	147,029	237,840	384,869	0,79300	1,84214
—47	0,7494	0,69939	281,753	1,42982	1,42982	148,067	237,274	385,341	0,79300	1,83969
—46	0,7875	0,70078	269,027	1,42698	1,42698	149,109	236,704	385,813	0,79758	1,83708
—45	0,8271	0,70219	256,990	1,42412	1,42412	150,153	236,129	386,282	0,80216	1,83460
—44	0,8682	0,70360	245,600	1,42126	1,42126	151,200	235,561	386,751	0,80672	1,83216
—43	0,9110	0,70502	234,817	1,41839	1,41839	152,249	234,968	387,217	0,81128	1,82976
—42	0,9555	0,70646	224,603	1,41551	1,41551	153,301	234,381	387,683	0,81582	1,82738
—41	1,0016	0,70790	214,923	1,41262	1,41262	154,356	233,790	388,147	0,82036	1,82504
—40	1,0495	0,70936	205,745	1,40972	1,40972	155,414	233,195	388,609	0,82490	1,82273
—39	1,0992	0,71082	197,040	1,40682	1,40682	156,474	232,596	389,070	0,82942	1,82045
—38	1,1507	0,71230	188,778	1,40390	1,40390	157,537	231,992	389,529	0,83383	1,81821
—37	1,2041	0,71379	180,933	1,40097	1,40097	158,603	231,383	389,986	0,83844	1,81599
—36	1,2594	0,71529	173,482	1,39804	1,39804	159,671	230,771	390,442	0,84294	1,81380
—35	1,3168	0,71680	166,400	1,39510	1,39510	160,742	230,153	390,896	0,84743	1,81164
—34	1,3761	0,71832	159,668	1,39214	1,39214	161,816	229,532	391,348	0,85191	1,80951
—33	1,4375	0,71985	153,264	1,38918	1,38918	162,893	228,905	391,798	0,85638	1,80741
—32	1,5011	0,72139	147,170	1,38620	1,38620	163,972	228,274	392,247	0,86085	1,80534
—31	1,5668	0,72295	141,369	1,38322	1,38322	165,055	227,639	392,693	0,86531	1,80329
—30	1,6348	0,72452	135,844	1,38022	1,38022	166,140	227,007	393,138	0,86976	1,80126
—29	1,7050	0,72610	130,580	1,37722	1,37722	167,227	226,353	393,580	0,87420	1,79927
—28	1,7776	0,72769	125,563	1,37420	1,37420	168,318	225,703	394,021	0,87864	1,79730
—27	1,8525	0,72930	120,778	1,37118	1,37118	169,411	225,048	394,459	0,88306	1,79535
—26	1,9299	0,73092	116,214	1,36814	1,36814	170,507	224,388	394,896	0,88748	1,79342
—25	2,0098	0,73255	111,859	1,36509	1,36509	171,606	223,724	395,330	0,89190	1,79152
—24	2,0928	0,73420	107,701	1,36202	1,36202	172,708	223,054	395,762	0,89630	1,78966
—23	2,1772	0,73585	103,730	1,35896	1,35896	173,812	222,379	396,191	0,90070	1,78779
—22	2,2648	0,73753	99,9362	1,35588	1,35588	174,919	221,700	396,619	0,90509	1,78596
—21	2,3552	0,73921	96,3101	1,35279	1,35279	176,029	221,015	397,044	0,90948	1,78415
—20	2,4483	0,74091	92,8432	1,34968	1,34968	177,142	220,325	397,467	0,91386	1,78236
—19	2,5442	0,74263	89,5273	1,34657	1,34657	178,258	219,629	397,887	0,91823	1,78059
—18	2,6429	0,74436	86,3455	1,34344	1,34344	179,376	218,929	398,305	0,92259	1,77884
—17	2,7446	0,74610	83,3179	1,34030	1,34030	180,498	218,223	398,720	0,92695	1,77711
—16	2,8493	0,74786	80,4103	1,33714	1,33714	181,622	217,512	399,133	0,93129	

15	2,9570	0.74964	77.6254	1.33397	1.33079	1.32760	1.32439	1.32117	0.01288	182.749	216.795	213.129	401.555	0.95725	1.76713	1.76553	1.76394	1.76237	1.76082	1.75875	1.75740	1.75564	0.93564	0.93997	1.77371	1.77204	1.77039	1.76875
14	3,0678	0.75143	74.9572	1.33079	1.32760	1.32439	1.32117	0.01381	0.01344	183.878	216.073	213.129	401.555	0.95725	1.76713	1.76553	1.76394	1.76237	1.76082	1.75875	1.75740	1.75564	0.93564	0.93997	1.77371	1.77204	1.77039	1.76875
13	3,2889	0.75506	69.9978	1.32760	1.32439	1.32117	0.01381	0.01430	0.01479	186.147	214.612	213.129	401.555	0.95725	1.76713	1.76553	1.76394	1.76237	1.76082	1.75875	1.75740	1.75564	0.93564	0.93997	1.77371	1.77204	1.77039	1.76875
12	3,4193	0.75690	67.5961	1.32117	1.31794	1.31469	1.31143	0.01637	0.01692	190.118	211.823	210.094	403.114	0.97442	1.77371	1.77204	1.77039	1.76875	1.76713	1.76553	1.76394	1.76237	1.76082	1.75875	1.75740	1.75564	0.93564	0.93997
11	3,5430	0.75876	65.3399	1.31794	1.31469	1.31143	0.01637	0.01692	0.01749	193.021	210.094	403.114	403.114	0.97442	1.77371	1.77204	1.77039	1.76875	1.76713	1.76553	1.76394	1.76237	1.76082	1.75875	1.75740	1.75564	0.93564	0.93997
10	3,6701	0.76063	63.1746	1.31469	1.31143	1.30815	1.30486	0.01749	0.01807	196.497	207.755	206.963	404.625	0.99150	1.75475	1.75326	1.75179	1.75034	1.74889	1.74746	1.74604	1.74463	1.74324	1.74185	1.74047	1.73911	1.73775	1.73640
9	3,8006	0.76253	61.1938	1.31143	1.30815	1.30486	1.30155	0.01807	0.01867	199.335	204.550	203.733	405.084	1.00848	1.74889	1.74746	1.74604	1.74463	1.74324	1.74185	1.74047	1.73911	1.73775	1.73640	1.73506	1.73373	1.73241	1.73109
8	3,9347	0.76444	59.0996	1.30815	1.30486	1.30155	1.29827	0.01867	0.01927	202.821	200.400	199.550	407.831	1.02537	1.74463	1.74324	1.74185	1.74047	1.73911	1.73775	1.73640	1.73506	1.73373	1.73241	1.73109	1.72976	1.72843	1.72710
7	4,0723	0.76637	57.1820	1.30486	1.30155	1.29827	1.29493	0.01927	0.01987	205.699	203.243	201.443	407.831	1.02537	1.74463	1.74324	1.74185	1.74047	1.73911	1.73775	1.73640	1.73506	1.73373	1.73241	1.73109	1.72976	1.72843	1.72710
6	4,2135	0.76831	55.3394	1.30155	1.29827	1.29493	1.29158	0.01987	0.02047	208.829	206.165	204.361	408.361	1.03799	1.73911	1.73775	1.73640	1.73506	1.73373	1.73241	1.73109	1.72976	1.72843	1.72710	1.72577	1.72444	1.72311	1.72178
5	4,3584	0.77028	53.5683	1.29827	1.29493	1.29158	1.28827	0.02047	0.02107	212.080	209.417	207.629	408.361	1.03799	1.73911	1.73775	1.73640	1.73506	1.73373	1.73241	1.73109	1.72976	1.72843	1.72710	1.72577	1.72444	1.72311	1.72178
4	4,5070	0.77226	51.8653	1.29493	1.29158	1.28827	1.28497	0.02107	0.02167	215.503	212.791	210.983	408.361	1.03799	1.73911	1.73775	1.73640	1.73506	1.73373	1.73241	1.73109	1.72976	1.72843	1.72710	1.72577	1.72444	1.72311	1.72178
3	4,7460	0.77637	49.1660	1.27456	1.27108	1.26760	1.26412	0.02555	0.02714	219.675	209.477	208.281	407.831	1.03879	1.74047	1.73911	1.73775	1.73640	1.73506	1.73373	1.73241	1.73109	1.72976	1.72843	1.72710	1.72577	1.72444	1.72311
2	5,0381	0.78041	45.6757	1.28139	1.27797	1.27456	1.27108	0.02555	0.02714	219.675	209.477	208.281	407.831	1.03879	1.74047	1.73911	1.73775	1.73640	1.73506	1.73373	1.73241	1.73109	1.72976	1.72843	1.72710	1.72577	1.72444	1.72311
1	5,3403	0.78586	42.9122	1.27108	1.26760	1.26412	1.26061	0.02633	0.02796	220.675	210.477	209.281	407.831	1.03879	1.74047	1.73911	1.73775	1.73640	1.73506	1.73373	1.73241	1.73109	1.72976	1.72843	1.72710	1.72577	1.72444	1.72311
0	5,6759	0.78834	40.1354	1.26412	1.26061	1.25710	1.25359	0.02633	0.02796	220.675	210.477	209.281	407.831	1.03879	1.74047	1.73911	1.73775	1.73640	1.73506	1.73373	1.73241	1.73109	1.72976	1.72843	1.72710	1.72577	1.72444	1.72311
-1	6,0228	0.79107	39.1441	1.25710	1.25359	1.25008	1.24657	0.02633	0.02796	220.675	210.477	209.281	407.831	1.03879	1.74047	1.73911	1.73775	1.73640	1.73506	1.73373	1.73241	1.73109	1.72976	1.72843	1.72710	1.72577	1.72444	1.72311
-2	6,3737	0.79327	37.2759	1.25008	1.24657	1.24306	1.23955	0.02633	0.02796	220.675	210.477	209.281	407.831	1.03879	1.74047	1.73911	1.73775	1.73640	1.73506	1.73373	1.73241	1.73109	1.72976	1.72843	1.72710	1.72577	1.72444	1.72311
-3	6,7288	0.79549	36.8493	1.24306	1.23955	1.23604	1.23253	0.02633	0.02796	220.675	210.477	209.281	407.831	1.03879	1.74047	1.73911	1.73775	1.73640	1.73506	1.73373	1.73241	1.73109	1.72976	1.72843	1.72710	1.72577	1.72444	1.72311
-4	7,0867	0.79775	35.7624	1.23604	1.23253	1.22902	1.22551	0.02633	0.02796	220.675	210.477	209.281	407.831	1.03879	1.74047	1.73911	1.73775	1.73640	1.73506	1.73373	1.73241	1.73109	1.72976	1.72843	1.72710	1.72577	1.72444	1.72311
-5	7,4483	0.80002	34.7136	1.22902	1.22551	1.22200	1.21849	0.02633	0.02796	220.675	210.477	209.281	407.831	1.03879	1.74047	1.73911	1.73775	1.73640	1.73506	1.73373	1.73241	1.73109	1.72976	1.72843	1.72710	1.72577	1.72444	1.72311
-6	7,8155	0.80232	33.7013	1.22200	1.21849	1.21498	1.21147	0.02633	0.02796	220.675	210.477	209.281	407.831	1.03879	1.74047	1.73911	1.73775	1.73640	1.73506	1.73373	1.73241	1.73109	1.72976	1.72843	1.72710	1.72577	1.72444	1.72311
-7	8,1922	0.80465	32.7339	1.21498	1.21147	1.20796	1.20445	0.02633	0.02796	220.675	210.477	209.281	407.831	1.03879	1.74047	1.73911	1.73775	1.73640	1.73506	1.73373	1.73241	1.73109	1.72976	1.72843	1.72710	1.72577	1.72444	1.72311
-8	8,5795	0.80698	31.7801	1.20796	1.20445	1.20094	1.19743	0.02633	0.02796	220.675	210.477	209.281	407.831	1.03879	1.74047	1.73911	1.73775	1.73640	1.73506	1.73373	1.73241	1.73109	1.72976	1.72843	1.72710	1.72577	1.72444	1.72311
-9	8,9668	0.80939	30.8683	1.20094	1.19743	1.19392	1.19041	0.02633	0.02796	220.675	210.477	209.281	407.831	1.03879	1.74047	1.73911	1.73775	1.73640	1.73506	1.73373	1.73241	1.73109	1.72976	1.72843	1.72710	1.72577	1.72444	1.72311
-10	9,3541	0.81180	29.9874	1.19392	1.19041	1.18690	1.18339	0.02633	0.02796	220.675	210.477	209.281	407.831	1.03879	1.74047	1.73911	1.73775	1.73640	1.73506	1.73373	1.73241	1.73109	1.72976	1.72843	1.72710	1.72577	1.72444	1.72311
-11	9,7414	0.81424	29.1961	1.18690	1.18339	1.17988	1.17637	0.02633	0.02796	220.675	210.477	209.281	407.831	1.03879	1.74047	1.73911	1.73775	1.73640	1.73506	1.73373	1.73241	1.73109	1.72976	1.72843	1.72710	1.72577	1.72444	1.72311
-12	10,1287	0.81671	28.3131	1.17988	1.17637	1.17286	1.16935	0.02633	0.02796	220.675	210.477	209.281	407.831	1.03879	1.74047	1.73911	1.73775	1.73640	1.73506	1.73373	1.73241	1.73109	1.72976	1.72843	1.72710	1.72577	1.72444	1.72311
-13	10,5160	0.81922	27.5173	1.17286	1.16935	1.16584	1.16233	0.02633	0.02796	220.675	210.477	209.281	407.831	1.03879	1.74047	1.73911	1.73775	1.73640	1.73506	1.73373	1.73241	1.73109	1.72976	1.72843	1.72710	1.72577	1.72444	1.72311
-14	10,9033	0.82175	26.7477	1.16584	1.16233	1.15882	1.15531	0.02633	0.02796	220.675	210.477	209.281	407.831	1.03879	1.74047	1.73911	1.73775	1.73640	1.73506	1.73373	1.73241	1.73109	1.72976	1.72843	1.72710	1.72577	1.72444	1.72311
-15	11,2906	0.82431	26.0032	1.15882	1.15531	1.15180	1.14829	0.02633	0.02796	220.675	210.477	209.281	407.831	1.03879	1.74047	1.73911	1.73775	1.73640	1.73506	1.73373	1.73241	1.73109	1.72976	1.72843	1.72710	1.72577	1.72444	1.72311
-16	11,6779	0.82691	25.2692	1.15180	1.14829	1.14478	1.14127	0.02633	0.02796	220.675	210.477	209.281	407.831	1.03879	1.74047	1.73911	1.73775	1.73640	1.73506	1.73373	1.73241	1.73109	1.72976	1.72843	1.72710	1.72577	1.72444	1.72311
-17	12,0652	0.82944	24.5347	1.14478	1.14127	1.13776	1.13425	0.02633	0.02796	220.675	210.477	209.281	407.831	1.03879	1.74047	1.73911	1.73775	1.73640	1.73506	1.73373	1.73241	1.73109	1.72976	1.72843	1.72710	1.72577	1.72444	1.72311
-18	12,4525	0.83201	23.8002	1.13776	1.13425	1.13074	1.12723	0.02633	0.02796	220.675	210.477	209.281	407.831	1.03879	1.74047	1.73911	1.73775	1.73640	1.73506	1.73373	1.73241	1.73109	1.72976	1.72843	1.72710	1.72577	1.72444	1.72311
-19	12,8398	0.83458	23.0657	1.13074	1.12723	1.12372	1.12021	0.02633	0.02796	220.675	210.477	209.281	407.831	1.03879	1.74047	1.73911	1.73775	1.73640	1.73506	1.73373	1.73241	1.73109	1.72976	1.72843	1.72710	1.72577	1.72444	1.72311
-20	13,2271	0.83715	22.3312	1.12372	1.12021	1.11670	1.11319	0.02633	0.02796	220.675	210.477	209.281	407.831	1.03879	1.74047	1.73911	1.73775	1.73640	1.73506	1.73373	1.73241	1.73109	1.72976</					

Температура, t, °C	Давление p, 10 ⁻³ , Па		Удельный объем, м ³ /кг, 10 ⁻³		Плотность, кг/м ³ , 10 ⁻³		Энтальпия, кДж/кг		Температура парообразования т, °C		Энтальпия, кДж/(кг·K)		сухого насыщенного пара s"	насыщенной s'
25	10,439	0,83765	22,6242	1,19382	0,04420	230,324	182,965	413,289	1,10462	1,1827	1,71827	1,7101	1,71576	1,71450
26	10,723	0,84043	22,0111	1,18987	0,04543	231,583	181,965	413,548	1,10876	1,71701	1,71701	1,71576	1,71450	1,71325
27	11,014	0,84324	20,4169	1,18590	0,04669	232,847	180,955	413,802	1,11290	1,71576	1,71576	1,71450	1,71325	1,71173
28	11,309	0,84610	20,8411	1,18190	0,04798	234,115	179,935	414,060	1,11703	1,71450	1,71450	1,71325	1,71173	1,70930
29	11,611	0,84899	20,2629	1,17787	0,04930	235,387	178,906	414,293	1,12116	1,71325	1,71325	1,71173	1,70930	1,70701
30	11,919	0,85193	19,7417	1,17381	0,05065	236,664	177,867	414,530	1,12530	1,71200	1,71200	1,71075	1,70930	1,70686
31	12,232	0,85491	19,2168	1,16971	0,05204	237,944	176,817	414,762	1,12943	1,71075	1,71075	1,70930	1,70686	1,70450
32	12,552	0,85793	18,7076	1,16559	0,05345	239,230	175,758	414,987	1,13355	1,70930	1,70930	1,70701	1,70450	1,70216
33	12,878	0,86101	18,2135	1,16143	0,05490	240,520	174,687	415,207	1,13768	1,70826	1,70826	1,70686	1,70450	1,70000
34	13,210	0,86412	17,7341	1,15724	0,05639	241,814	173,606	415,420	1,14181	1,70701	1,70701	1,70559	1,70316	1,69943
35	13,548	0,86729	17,2686	1,15301	0,05791	243,114	172,514	415,627	1,14594	1,70576	1,70576	1,70431	1,70186	1,69700
36	13,892	0,87051	16,8168	1,14875	0,05946	244,418	171,410	415,828	1,15007	1,70450	1,70450	1,70305	1,70060	1,69516
37	14,243	0,87378	16,3779	1,14445	0,06106	245,727	170,294	416,021	1,15420	1,70325	1,70325	1,70180	1,70035	1,69371
38	14,601	0,87710	15,9517	1,14012	0,06269	247,041	169,167	416,208	1,15833	1,70199	1,70199	1,70054	1,69909	1,69125
39	14,965	0,88048	15,5375	1,13574	0,06436	248,361	168,027	416,388	1,16246	1,70073	1,70073	1,69928	1,69783	1,68999
40	15,335	0,88392	15,1351	1,13133	0,06607	249,686	166,875	416,561	1,16659	1,69946	1,69946	1,69801	1,69656	1,68872
41	15,712	0,88741	14,7439	1,12687	0,06782	251,016	165,710	416,726	1,17073	1,69819	1,69819	1,69674	1,69529	1,68745
42	16,096	0,89097	14,3636	1,12237	0,06962	252,352	164,531	416,883	1,17486	1,69692	1,69692	1,69547	1,69402	1,68618
43	16,487	0,89459	13,9938	1,11783	0,07146	253,692	163,339	417,033	1,17900	1,69564	1,69564	1,69419	1,69274	1,68490
44	16,885	0,89828	13,6341	1,11324	0,07335	255,042	162,133	417,174	1,18315	1,69435	1,69435	1,69290	1,69145	1,68361
45	17,290	0,90203	13,2841	1,10861	0,07528	256,396	160,912	417,308	1,18730	1,69305	1,69305	1,69160	1,69015	1,68131
46	17,702	0,90586	12,9436	1,10392	0,07726	257,756	159,676	417,432	1,19145	1,69175	1,69175	1,69030	1,68885	1,67901
47	18,121	0,90976	12,6122	1,09919	0,07929	259,123	158,425	417,548	1,19560	1,69043	1,69043	1,68898	1,68753	1,67869
48	18,548	0,91374	12,2895	1,09441	0,08137	260,497	157,158	417,655	1,19977	1,68911	1,68911	1,68766	1,68621	1,67737
49	18,982	0,91779	11,9753	1,08957	0,08351	261,877	155,875	417,752	1,20393	1,68777	1,68777	1,68632	1,68487	1,67603

на быть значительно ниже минимальной температуры в рабочем цикле. Эти факторы особенно важны при выборе хладагента для низкотемпературной системы.

Потребляемая мощность на единицу холодопроизводительности почти одинакова для всех распространенных хладагентов, и потому КПД и экономичность работы обычно не являются решающими факторами при выборе хладагента. Более важными являются свойства, которые позволяют уменьшить массу, размеры и начальную стоимость холодильного оборудования, а также автоматизировать его и снизить до минимума обслуживание. Важными факторами выбора хладагента являются также стоимость и наличие того или иного хладагента.

Значения теоретической производительности при стандартных условиях (температура кипения -15°C и температура конденсации 30°C) распространенных хладагентов приведены в табл. 16-8. В табл. 16-9 показано влияние замены хладагента в одной модели салыникового поршневого компрессора на холодопроизводительность и потребляемую мощность при работе на R12, R22 и R502.

УСТАРЕВШИЕ ХЛАДАГЕНТЫ

На ранней стадии развития, когда машинное холодильное оборудование ограничивалось только несколькими большими установками, почти единственными хладагентами были аммиак и углекислота. Позднее, с развитием малых автоматических агрегатов для бытового и торгового холодильного оборудования стали применяться такие хладагенты, как сернистый ангидрид и хлористый метил, а также дихлорметан, который был разработан для центробежных компрессоров. Дихлорметан и углекислота широко использовались в больших установках кон-

диционирования воздуха из-за их опасности.

За исключением аммиака, все эти хладагенты в настоящее время не используются и применяются только в некоторых очень старых установках. В настоящее время получили распространение фторированные хладагенты. Аммиак находит широкое применение в оборудовании льдозаводов и искусственных ледяных катков из-за своих термодинамических свойств. Некоторые другие хладагенты применяются только в установках специального назначения.

ФТОРИРОВАННЫЕ ХЛАДАГЕНТЫ

Поиск полностью безопасных рабочих веществ с хорошими термодинамическими свойствами привел в конце 20-х годов к созданию фторированных хладагентов. Фторированные (фторированные углеводородные) хладагенты — это группа соединений, называемых галогенизированными углеводородами. Галоидуглеводородные соединения синтезируются замещением одного или большего числа атомов водорода в молекулах метана CH_4 или этана C_2H_6 атомами хлора, фтора и брома. Галоидзамещенные углеводородные агенты с молекулой метана называются хладагентами метановой группы, а с молекулой этана — хладагентами этановой группы.

Структура хладагентов метановой группы показана на рис. 16-1. Обратите внимание, что основная молекула метана состоит из одного атома углерода C и четырех атомов водорода H. Если атомы водорода замещаются постепенно атомами хлора Cl, то получаемыми соединениями являются хлористый метил CH_3Cl , дихлорметан CH_2Cl_2 , хлороформ CHCl_3 и четыреххлористый углерод CCl_4 , причем последние два — это основные молекулы наиболее распространенных хладагентов метановой группы.

Термодинамические свойства Р502 в состоянии насыщения

Температура $t, ^\circ\text{C}$	Давление $p, 10^{-5}, \text{Па}$	Удельный объем, $\text{м}^3/\text{кг} \cdot 10^{-3}$		Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3 \cdot 10^{-3}$		Энтальпия, $\text{кДж}/\text{кг}$		Теплота парообразования $\text{кДж}/\text{кг}$	Энтропия, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	
		насыщенный жид. костя	насыщенный паро костя	насыщенный жид. костя	насыщенный паро костя	насыщенный жид. костя	насыщенный паро костя		насыщенный жид. костя	насыщенный паро костя

—50	0,8142	0,66842	197,265	1,49606	0,00507	148,768	174,394	323,162	0,79501	1,57652
—48	0,8548	0,66984	188,521	1,49290	0,00530	149,677	173,986	323,664	0,79907	1,57527
—46	0,9861	0,67415	164,964	1,48335	0,00606	152,436	172,730	325,166	0,81125	1,57167
—44	1,0821	0,67708	151,227	1,47694	0,00661	155,239	171,422	326,164	0,81939	1,56940
—42	1,1855	0,68005	138,853	1,47048	0,00751	157,131	170,522	327,653	0,83162	1,56615
—40	1,2964	0,68307	127,687	1,46398	0,00783	158,085	170,063	328,147	0,83570	1,56512
—38	1,4153	0,68613	117,592	1,45744	0,00850	160,006	169,127	329,133	0,84387	1,56310
—36	1,5426	0,68925	108,451	1,45086	0,00922	161,947	168,167	330,114	0,85205	1,56117
—35	1,6095	0,69082	104,204	1,44755	0,00960	162,924	167,679	330,603	0,85615	1,56024
—34	1,6787	0,69241	100,159	1,44422	0,00998	163,906	167,184	331,090	0,86024	1,55932
—33	1,7501	0,69402	96,3023	1,44089	0,01030	164,883	166,683	331,577	0,86434	1,55842
—32	1,8239	0,69563	92,6251	1,43754	0,01060	165,885	166,176	332,061	0,86844	1,55754
—31	1,9000	0,69726	89,1174	1,43418	0,01122	166,882	165,663	332,545	0,87254	1,55668
—30	1,9786	0,69890	85,7699	1,43081	0,01161	167,883	165,144	333,027	0,87665	1,55583
—28	2,1433	0,70223	70,5221	1,42403	0,01258	169,899	164,088	333,987	0,88486	1,55420
—27	2,2296	0,70362	76,6063	1,42062	0,01305	170,914	163,550	334,465	0,88897	1,55340
—26	2,3184	0,70562	73,8196	1,41720	0,01355	171,934	163,007	334,941	0,89308	1,55262
—25	2,4100	0,70733	71,1552	1,41376	0,01406	172,959	162,457	335,415	0,89719	1,55186
—24	2,5043	0,70906	68,6070	1,41031	0,01458	173,988	161,900	335,888	0,90130	1,55111
—23	2,6014	0,71081	66,1689	1,40685	0,01511	175,021	161,338	336,359	0,90541	1,55038
—22	2,7014	0,71257	63,8354	1,40337	0,01567	176,060	160,769	336,829	0,90952	1,54966
—21	2,8043	0,71435	61,6012	1,39987	0,01623	177,102	160,194	337,296	0,91364	1,54895
—20	2,9101	0,71615	59,4614	1,39636	0,01682	178,149	159,613	337,762	0,91775	1,54826
—19	3,0189	0,71796	57,4113	1,39284	0,01742	179,201	159,025	338,226	0,92187	1,54758
—18	3,1309	0,71979	55,4465	1,38930	0,01804	180,257	158,431	338,689	0,92599	1,54692
—17	3,2459	0,72164	53,5627	1,38574	0,01867	181,319	157,831	339,149	0,93010	1,54627
—16	3,3641	0,72350	51,7261	1,38217	0,01932	182,383	157,224	339,607	0,93422	1,54563
—15	3,4855	0,72538	50,0230	1,37858	0,01999	183,452	156,611	340,063	0,93833	1,54500
—14	3,6102	0,72729	48,3598	1,37497	0,02068	184,526	155,991	340,517	0,94245	1,54439
—13	3,7383	0,72921	46,7632	1,37135	0,02138	185,604	155,365	340,970	0,94657	1,54378
—12	3,8697	0,73115	45,2300	1,36771	0,02211	186,686	154,733	341,419	0,95068	1,54319
—11	4,0046	0,73311	43,7578	1,36405	0,02285	187,773	154,094	341,867	0,95480	1,54261

10	4.1430	0.73509	42.3423	1.36038	0.02362	188.864	153.449	342.313	0.95891	1.54203
9	4.2849	0.73709	40.9823	1.35688	0.02520	189.959	152.797	342.196	0.96303	1.54147
8	4.4304	0.73911	39.6747	1.35297	0.02603	191.058	152.138	343.157	0.96714	1.54092
7	4.5797	0.74116	38.4171	1.34924	0.02663	192.162	151.474	343.635	0.97125	1.54038
6	4.7326	0.74323	37.2074	1.34549	0.02688	193.269	150.802	344.071	0.97536	1.53985
5	4.8893	0.74532	36.0433	1.34171	0.02774	194.381	150.124	344.505	0.97947	1.53932
4	5.0498	0.74743	34.9228	1.33792	0.02863	196.497	149.439	344.936	0.98368	1.53881
3	5.2142	0.74956	33.8341	1.33411	0.02955	198.617	148.748	345.365	0.98769	1.53830
2	5.3826	0.75172	32.8049	1.33027	0.03048	197.740	148.050	345.791	0.99179	1.53780
1	5.5549	0.75391	31.8039	1.32642	0.03144	198.868	147.345	346.214	0.99590	1.53731
0	5.7313	0.75612	30.8393	1.32264	0.03243	200.000	146.634	346.634	0.99999	1.53683
1	5.9118	0.75836	29.9095	1.31884	0.03343	201.136	145.916	347.052	1.00410	1.53635
2	6.0965	0.76062	29.0131	1.31471	0.03447	202.275	145.191	347.467	1.00820	1.53582
3	6.2854	0.76291	28.1485	1.31076	0.03553	203.419	144.460	347.879	1.01229	1.53540
4	6.4786	0.76523	27.3145	1.30679	0.03661	204.566	143.721	348.288	1.01639	1.53496
5	6.6761	0.76758	26.5097	1.30279	0.03772	205.717	142.976	348.693	1.02048	1.53451
6	6.8780	0.76996	25.7330	1.29877	0.03886	206.868	142.224	349.096	1.02457	1.53406
7	7.0843	0.77237	24.9831	1.29472	0.04003	208.031	141.465	349.496	1.02866	1.53362
8	7.2951	0.77481	24.2589	1.29065	0.04122	209.193	140.699	349.892	1.03274	1.53318
9	7.5105	0.77728	23.5593	1.28654	0.04245	210.359	139.926	350.285	1.03682	1.53275
10	7.7305	0.77978	22.8835	1.28241	0.04370	211.529	139.146	350.675	1.04090	1.53232
11	7.9652	0.78232	22.2303	1.27825	0.04498	212.703	138.359	351.062	1.04497	1.53190
12	8.1846	0.78489	21.5989	1.27406	0.04630	213.880	137.564	351.444	1.04905	1.53147
13	8.4187	0.78750	20.9883	1.26985	0.04765	215.061	136.763	351.824	1.05311	1.53106
14	8.6578	0.79014	20.3979	1.26559	0.04902	216.245	135.954	352.199	1.05718	1.53064
15	8.9017	0.79282	19.8266	1.26131	0.05044	217.432	135.138	352.571	1.06124	1.53023
16	9.1506	0.79555	19.2739	1.25700	0.05188	218.624	134.314	352.939	1.06530	1.52982
17	9.4045	0.79831	18.7389	1.25265	0.05336	219.820	133.483	353.303	1.06936	1.52941
18	9.6635	0.80111	18.2210	1.24827	0.05488	221.018	132.644	353.663	1.07341	1.52900
19	9.9276	0.80395	17.7194	1.24385	0.05644	222.220	131.798	354.019	1.07746	1.52859
20	10.197	0.80684	17.2336	1.23940	0.05803	223.426	130.944	354.370	1.08151	1.52819
21	10.471	0.80978	16.7630	1.23491	0.05966	224.635	130.082	354.717	1.08555	1.52778
22	10.751	0.81276	16.3069	1.23038	0.06132	225.848	129.212	355.060	1.08959	1.52737
23	11.037	0.81579	15.8649	1.22581	0.06303	227.064	128.334	355.398	1.09362	1.52697
24	11.327	0.81887	15.4363	1.22120	0.06478	228.284	127.448	355.732	1.09766	1.52656
25	11.623	0.82200	15.0207	1.21655	0.06658	229.507	126.553	356.061	1.10168	1.52615
26	11.925	0.82518	14.6175	1.21186	0.06841	230.734	125.651	356.385	1.10571	1.52573
27	12.232	0.82842	14.2263	1.20712	0.07029	231.964	124.739	356.703	1.10973	1.52532
28	12.546	0.83171	13.8468	1.20234	0.07222	233.198	123.819	357.017	1.11375	1.52490
29	12.864	0.83507	13.4783	1.19750	0.07419	234.436	122.889	357.325	1.11776	1.52448
30	13.189	0.83849	13.1205	1.19263	0.07622	235.677	121.951	357.628	1.12177	1.52405
31	13.519	0.84197	12.7731	1.18770	0.07829	236.921	121.004	357.925	1.12578	1.52362
32	13.856	0.84551	12.4356	1.18271	0.08041	238.170	120.046	358.216	1.12978	1.52318
33	14.198	0.84913	12.1076	1.17768	0.08259	239.422	119.079	358.501	1.13378	1.52274
34	14.547	0.85282	11.7889	1.17259	0.08483	240.677	118.102	358.780	1.13778	1.52229
35	14.901	0.85658	11.4790	1.16744	0.08712	241.937	117.115	359.052	1.14178	1.52184
36	15.262	0.86042	11.1778	1.16223	0.08946	243.200	116.117	359.318	1.14577	1.52137
37	15.630	0.86434	10.8847	1.15696	0.09187	244.468	115.109	359.576	1.14976	1.52090
38	16.003	0.86834	10.5996	1.15162	0.09434	245.739	114.089	359.828	1.15375	1.52043
39	16.383	0.87243	10.3222	1.14622	0.09688	247.015	113.056	360.072	1.15774	1.51993

Энтальпия, кДж/(кг·К)	Теплота		Энтальпия, кДж/кг	Удельный объем, м³/кг·10³		Плотность, кг/м³·10³	Энтальпия, кДж/кг	Теплота		Энтальпия, кДж/кг	Удельный объем, м³/кг·10³		Плотность, кг/м³·10³	Энтальпия, кДж/кг	Температура, t, °C		Давление, p·10⁻³, Па
	сухого насыщенный	насыщенный жид.		сухого насыщенный	насыщенный жид.		сухого насыщенный	сухого насыщенный	насыщенный жид.		сухого насыщенный	насыщенный жид.		сухого насыщенный			
1.51943	1.51891	1.51838	1.5172	360.538	360.758	1.16571	1.16770	1.16969	1.17367	360.970	1.17766	1.51729	1.51672	1.51652	40	49	16,770
1.51490	1.51437	1.51384	1.1766	361.580	361.800	1.18164	18,383	1.18961	1.19369	362.100	1.19766	1.51625	1.51562	1.51490	41	48	20,107
1.51425	1.51372	1.51319	1.19759	362.605	362.825	1.18164	17,969	1.18961	1.19369	363.125	1.19766	1.51597	1.51534	1.51461	42	47	24,922
				102.010	102.230	0.12639	0.12839	0.13039	0.13239	102.450	0.13439	0.13639	0.13839	0.14039	43	46	29,747
				254.762	254.982	0.11359	18,383	0.11559	0.11759	255.002	0.11959	0.12159	0.12359	0.12559	44	45	34,572
				255.101	255.321	0.11559	17,969	0.11759	0.11959	255.341	0.12159	0.12359	0.12559	0.12759	45	44	39,397
				255.341	255.561	0.11759	17,545	0.11959	0.12159	255.581	0.12359	0.12559	0.12759	0.12959	46	43	44,222
				255.581	255.801	0.11959	17,121	0.12159	0.12359	255.821	0.12559	0.12759	0.12959	0.13159	47	42	49,047
				255.821	256.041	0.12159	16,697	0.12359	0.12559	256.061	0.12759	0.12959	0.13159	0.13359	48	41	53,872
				256.061	256.281	0.12359	16,273	0.12559	0.12759	256.301	0.12959	0.13159	0.13359	0.13559	49	40	58,697

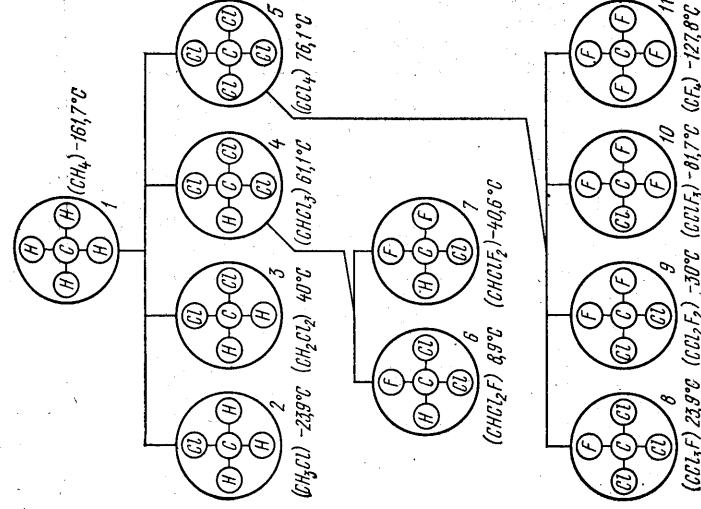


Рис. 16-1. Хладагенты метановой группы:
1 — R50 (метан); 2 — R40 (хлористый метил);
3 — R30 (дихлорметан); 4 — R20 (хлорформ); 5 — R10
(тетрахлористый углерод); 6 — R21 (монофторди-
хлорметан); 7 — R22 (дифтормонохлорметан); 8 —
R11 (монофтортрихлорметан); 9 — R12 (дифторди-
хлорметан); 10 — R13 (трифтормонохлорметан); 11 — R14
(тетрафторметан)

Если атомы хлора в молекуле че-
тыреххлористого углерода постепенно
замещать атомами фтора, то получае-
мыми соединениями являются моно-
фтортрихлорметан CFCl_3 , дифторди-
хлорметан CF_2Cl_2 , трифтормонохлор-
метан CF_3Cl и тетрафторметан CF_4 . Этим
соединениям присвоены следующие
цифровые обозначения: R11, R12, R13
и R14, причем последняя цифра в но-
мере хладагента обозначает количество
атомов фтора в молекуле.

На рис. 16-1 представлена молеку-
лярная структура хладагентов R21 и
R22, которые также являются фтори-
рованными хладагентами метановой
группы. Обратите внимание на присут-

Таблица 16-6

Термодинамические свойства аммиака в состоянии насыщения

Температура, t , °C	Давление P , кПа	Энтальпия, кДж/кг		Энтропия, кДж/(кг·К)		Удельный объем, 10^{-3} м ³ /кг	
		жидкости t'	пара t''	жидкости s'	пара s''	жидкости v'	пара v''
-60	21,99	-69,5330	1373,19	-0,10909	6,6592	1,4010	4685,08
-55	30,29	-47,5062	1382,01	-0,00717	6,5434	1,4126	3474,22
-50	41,03	-25,4342	1390,64	0,009264	6,3869	1,4245	2616,51
-45	54,74	-3,3020	1399,07	0,19049	6,3369	1,4367	1998,91
-40	72,01	18,9024	1407,26	0,28651	6,2410	1,4493	1547,36
-35	93,49	41,1883	1415,20	0,38082	6,1501	1,4623	1212,49
-30	119,90	63,5629	1422,86	0,47351	6,0636	1,4757	960,867
-28	132,02	72,5387	1425,84	0,51015	6,0302	1,4811	878,100
-26	145,11	81,5300	1428,76	0,54655	5,9974	1,4867	803,761
-24	159,22	90,5370	1431,64	0,58272	5,9652	1,4923	736,868
-22	174,41	99,5670	1434,46	0,61865	5,9336	1,4980	676,570
-20	190,74	108,599	1437,23	0,65436	5,9025	1,5037	622,122
-18	208,26	117,656	1439,94	0,68984	5,8720	1,5096	572,875
-16	227,04	126,729	1442,60	0,72511	5,8420	1,5155	528,957
-14	247,14	135,820	1445,20	0,76016	5,8125	1,5215	487,769
-12	268,63	144,929	1447,74	0,79501	5,7835	1,5276	450,971
-10	291,57	154,056	1450,22	0,82965	5,7550	1,5338	417,477
-9	303,60	158,628	1451,44	0,84690	5,7409	1,5369	401,860
-8	316,02	163,204	1452,64	0,86410	5,7269	1,5400	386,944
-7	328,84	167,785	1453,83	0,88125	5,7131	1,5432	372,692
-6	342,07	172,371	1455,00	0,89835	5,6993	1,5464	359,071
-5	355,71	176,962	1456,15	0,91541	5,6856	1,5496	346,046
-4	369,77	181,559	1457,29	0,93242	5,6721	1,5528	333,589
-3	384,26	186,161	1458,42	0,94938	5,6586	1,5561	321,670
-2	399,20	190,768	1459,53	0,96630	5,6453	1,5594	310,263
-1	414,58	195,381	1460,62	0,98317	5,6320	1,5627	299,340
0	430,43	200,000	1461,70	1,00000	5,6189	1,5660	288,880
1	446,74	204,625	1462,76	1,01679	5,6058	1,5694	279,858
2	463,53	209,256	1463,80	1,03354	5,5929	1,5727	269,253
3	480,81	213,892	1464,83	1,05024	5,5800	1,5762	260,046
4	498,39	218,535	1465,84	1,06691	5,5672	1,5796	251,216
5	516,67	223,185	1466,84	1,08355	5,5545	1,5831	242,745
6	535,67	227,841	1467,82	1,10012	5,5419	1,5866	234,618
7	555,00	232,503	1468,78	1,11667	5,5294	1,5901	226,817
8	574,87	237,172	1469,72	1,13317	5,5170	1,5936	219,326
9	595,28	241,848	1470,65	1,14964	5,5046	1,5972	212,132
10	616,25	246,531	1471,57	1,16607	5,4924	1,6008	205,221
11	637,78	251,221	1472,46	1,18246	5,4802	1,6045	198,580
12	659,89	255,918	1473,34	1,19882	5,4681	1,6081	192,196
13	682,59	260,622	1474,20	1,21515	5,4561	1,6118	186,058
14	705,88	265,334	1475,05	1,23144	5,4441	1,6156	180,154
15	729,79	270,053	1475,88	1,24769	5,4322	1,6193	174,475
16	754,31	274,779	1476,69	1,26391	5,4204	1,6231	169,009
17	779,46	279,513	1477,48	1,28010	5,4087	1,6269	163,748
18	805,25	284,255	1478,25	1,29626	5,3971	1,6308	158,683
19	831,69	289,005	1479,01	1,31238	5,3855	1,6347	153,804
20	858,79	293,762	1479,75	1,32847	5,3740	1,6386	149,106
21	886,57	298,527	1480,48	1,34452	5,3626	1,6426	144,578
22	915,03	303,300	1481,18	1,36055	5,3512	1,6466	140,214
23	944,18	308,081	1481,87	1,37654	5,3399	1,6507	136,006
24	974,03	312,870	1482,53	1,39250	5,3286	1,6547	131,950
25	1004,6	317,667	1483,18	1,40843	5,3175	1,6588	128,037
26	1035,9	322,471	1483,81	1,42433	5,3063	1,6630	124,261
27	1068,0	327,284	1484,42	1,44020	5,2953	1,6672	120,619
28	1100,7	332,104	1485,01	1,45604	5,2843	1,6714	117,103
29	1134,3	336,933	1485,59	1,47185	5,2733	1,6757	113,708
30	1168,6	341,769	1486,14	1,48762	5,2624	1,6800	110,430
31	1203,7	346,614	1486,67	1,50337	5,2516	1,6844	107,263
32	1239,6	351,466	1487,18	1,51908	5,2408	1,6888	104,205
33	1276,3	356,325	1487,66	1,53477	5,2300	1,6932	101,248
34	1313,9	361,195	1488,13	1,55042	5,2193	1,6977	98,3913
35	1352,2	366,072	1488,57	1,56605	5,2086	1,7023	95,6290
36	1391,5	370,957	1488,99	1,58165	5,1980	1,7069	92,9679
37	1431,5	375,851	1489,39	1,59722	5,1874	1,7115	90,3743
38	1472,4	380,754	1489,76	1,61276	5,1768	1,7162	87,8748
39	1514,3	385,665	1490,10	1,62828	5,1663	1,7209	85,4561
40	1557,0	390,587	1490,42	1,64377	5,1558	1,7257	83,1160
41	1600,6	395,519	1490,71	1,65924	5,1453	1,7305	80,8484
42	1645,1	400,462	1490,96	1,67469	5,1349	1,7354	78,6536
43	1690,6	405,416	1491,21	1,69013	5,1244	1,7404	76,5276
44	1737,0	410,382	1491,41	1,70554	5,1140	1,7454	74,4678
45	1784,3	415,362	1491,58	1,72095	5,1036	1,7504	72,4718

Температура, t , °C	Давление P , кПа	Энтальпия, кДж/кг		Энтропия, кДж/(кг·К)		Удельный объем, 10^{-3} м ³ /кг	
		жидкости i'	пара i''	жидкости s'	пара s''	жидкости v'	пара v''
46	1832,6	420,358	1491,72	1,73635	5,0832	1,7555	70,5365
47	1861,9	425,369	1491,82	1,75174	5,0827	1,7607	68,6602
48	1932,2	430,399	1491,88	1,76714	5,0723	1,7659	66,8403
49	1983,5	435,450	1491,91	1,78255	5,0618	1,7712	65,0746
50	2035,9	440,523	1491,89	1,79798	5,0514	1,7766	63,3608
51	2089,2	445,623	1491,83	1,81343	5,0409	1,7820	61,6971
52	2143,6	450,751	1491,73	1,82891	5,0303	1,7875	60,0813
53	2199,1	455,913	1491,58	1,84445	5,0198	1,7931	58,5114
54	2256,6	461,112	1491,38	1,86004	5,0092	1,7987	56,9855
55	2313,2	466,353	1491,12	1,87571	4,9985	1,8044	55,5019

Таблица 16-7

Относительная безопасность хладагентов

Хладагент	Классификация групп по правилам безопасности	Токсичная концентрация						Воспламеняемость или взрывоопасная концентрация, % от объема воздуха		
		хладагента в воздухе		продуктов распада хладагента (в результате воздействия открытого пламени)		при длительности воздействия, ч				
		при длительности воздействия, ч	% объема	кг/м³	% объем-масс***					
					при длительности воздействия, ч				% объем-масс***	
1	2	3	4	5	6	7	8			
R50	3*						4,9—15			
R14	1*						Невоспламеняемый			
R1150	3*						3—25			
R744A	1*	8	0,0025				Невоспламеняемый			
R13	3						Невоспламеняемый			
R170	1	2	37,4—51,7				3,3—10,6			
R744	1	1/2—1	29—30	0,53—0,55			Невоспламеняемый			
R13B1	1*	2	37,5—51,7	0,68—0,94			Невоспламеняемый			
R290	3	2			16	1	2,3—7,3			
R22	1	1/2	0,5—0,6	0,0035—0,004			Невоспламеняемый			
R717	2	2	28,5—30,4	1,44—1,53	20	1	16,0—25**			
R12	1	2	2—2,5	0,04—0,05	30	2,4	Невоспламеняемый			
R40	2	2					8,1—17,2			
R601	3	2	0,7	0,019			Невоспламеняемый			
R764	2	2	37,5—51,7		15	1	Невоспламеняемый			
R600	3	2	20,1—21,5	1,45—1,55			1,6—6,5			
R114	1	2	10,2	0,43			Невоспламеняемый			
R21	1	1/2	4	0,107	18	2	3,7—12			
R160	2	1	10	0,572	5	1	Невоспламеняемый			
R11	1	2					4,5—20			
R611	2	1	2—2,5	0,05—0,06			Невоспламеняемый			
R30	1	1/2	5,1—5,3	0,18—0,19	20	1	Невоспламеняемый			
R113	1	1	4,8—5,2	0,37—0,40	16	1,2	Невоспламеняемый			
R1130	2	1	2—2,5	0,08—0,1	5	2,1	5,6—11,4			

* Неофициальные данные.

** Незначительная воспламеняемость, но для практических целей считается невоспламеняемым хладагентом.

*** Начальная концентрация.

Сравнительные характеристики хладагентов при температурах кипения -15°C и конденсации 30°C

Хлад- вент	Абсолютное давлени- е, МПа		Степень сжатия	Холодопро- изводитель- ность нетто, кДж/кг	Массовый расход, кг/(с·кВт)	Удельный объем всасываемого пара, л/кг	Объемный расход, л/(с·кВт)	Потребляе- мая мощ- ность, Вт/кВт	Адиабатная температура нагрева, °С	Холодиль- ный коэффи- циент
	конден- сации	кипения								

Таблица 16-9

R11	0,0203	0,0894	6,19	155,4	0,00644	762,27	4,91	198,87	43,9	5,03
R12	0,1826	0,7447	4,08	116,3	0,0086	91,15	0,78	212,44	38,3	4,71
R22	0,2958	1,1921	4,03	162,8	0,00614	77,41	0,48	214,37	53,3	4,67
R500	0,2144	0,8798	4,11	141	0,00702	93,65	0,66	214,14	40,6	4,67
R502	0,3496	1,3086	3,75	106,3	0,00941	51,19	0,48	228,77	37,2	4,37
R717	0,2365	1,1666	4,93	1103,5	0,00091	508,8	0,46	209,69	98,9	4,77

Влияние замены хладагента в компрессоре на холодопроизводительность и потребляемую мощность при температуре конденсации 38°C

Температура кипения, $^{\circ}\text{C}$	R12			R22			R502	
	производитель- ность, кВт	мощность на валу, кВт	производитель- ность, кВт	мощность на валу, кВт	производитель- ность, кВт	мощность на валу, кВт	производитель- ность, кВт	мощность на валу, кВт

-40	7,03	6,11	Нет данных	Нет данных	12,66	10,51
-30	13,68	8,29	То же	То же	23,63	14,56
-20	23,37	10,32	»	»	38,41	18,08
-10	36,47	11,84	56,83	19,43	58,17	21,67
0	53,95	13,72	87,15	22,21	84,2	25,26
10	78,43	14,99	123,80	31,75	Нет данных	Нет данных

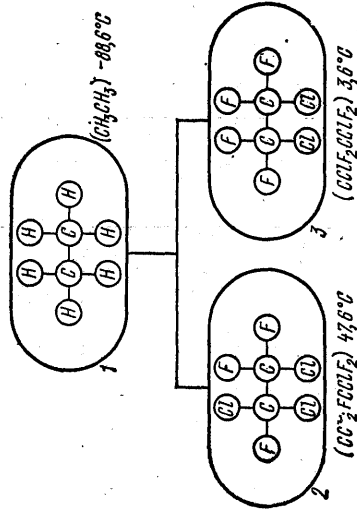


Рис. 16-2. Хладагенты этановой группы:
1 — R170 (этан); 2 — R113 (трифторхлорэтан);
3 — R114 (тетрафтордихлорэтан)

ствие атома водорода в каждом из этих двух соединений. Это указывает на то, что они являются производными молекул хлороформа, а не молекул четыреххлористого углерода.

На рис. 16-2 представлена молекулярная структура хладагентов R113 и R114, которые являются единственными двумя фторированными хладагентами этановой группы, нашедшими широкое распространение. Наличие двух атомов углерода указывает на то, что основная молекула — это этан, а не метан, который содержит только один атом углерода.

Характеристики этих и других хладагентов приведены ниже.

ВЛИЯНИЕ ВЛАГИ НА ХЛАДАГЕНТЫ

Известно, что влага взаимодействует в различной степени с большинством распространенных хладагентов, в результате чего образуются высококорродирующие соединения (обычно кислоты), которые влияют на смазочное масло и другие материалы в системе, включая металлы. В результате химических реакций происходит коррозия и повреждение вентилей, клапанов, уплотнений, опорных шеек клапана, стенок цилиндра и других поли-

рованных поверхностей. Химические реакции могут вызвать распад смазочного масла с образованием металлического и других осадков, которые забивают клапаны и проходы для масла, повреждают поверхности подшипников и сокращают срок службы оборудования. Коррозия под действием влаги также приводит к отказу клапанов компрессора, а в герметичных компрессорах вызывает повреждение изоляции обмотки двигателя.

В системе всегда имеется влага. Однако необходимо, чтобы содержание влаги в системе поддерживалось на низком уровне для предотвращения повреждений. Минимальный уровень влаги, который не вызывает повреждений, не установлен с определенностью и значительно колеблется в зависимости от хладагента, качества смазочного масла и рабочей температуры в системе, в особенности температуры нагнетания.

В холодильной системе влага может быть в свободном состоянии или в смеси с хладагентом. Когда влага находится в системе в свободном состоянии, она замерзает в регуляторе расхода хладагента и в испарителе, если температура в последнем ниже температуры заморозки воды. Естественно, что образование льда в отверстиях регулятора расхода хладагента прекращает движение потока хладагента через регулятор, и установка перестает функционировать до тех пор, пока лед не растает и не восстановится движение потока хладагента через регулятор. Процесс охлаждения в таких случаях становится прерывистым, так как течение жидкого хладагента возобновляется при таянии и прекращается при замерзании льда в отверстиях регулятора расхода.

Свободная вода может находиться в системе только в том случае, когда ее количество превышает максимум того, что хладагент может удерживать в растворе. В результате замерзания влаги почти всегда является признаком того, что ее содержание в системе превышает

минимальный уровень, вызывающий коррозию. Однако если влага не замерзает, то это не означает, что ее содержание в системе обязательно ниже уровня, вызывающего коррозию, так как в установках с некоторыми хладагентами коррозия происходит при значительно меньшем количестве воды. Влага не замерзает в системах кондиционирования воздуха или в любых других установках, в которых температура кипения выше температуры замерзания воды. По этой причине высокотемпературные системы более часто подвергаются действию коррозии, чем установки, работающие при низких температурах кипения, так как в них относительно большое количество воды может не быть обнаружено в течение довольно длительного времени.

Способность хладагента удерживать влагу в растворе уменьшается с повышением температуры, и поэтому содержание влаги в низкотемпературных системах должно быть на очень низком уровне для предотвращения замерзания, в связи с чем величина коррозии в низкотемпературных системах обычно минимальна.

Хладагенты значительно отличаются как по способности удержания влаги, так по взаимодействию с ней. Например, такие углеводороды, как пропан, бутан, этан и др., поглощают очень мало влаги или совсем не поглощают ее. Поэтому влага в установках, работающих на этих хладагентах, находится в свободном виде и обнаруживается при замерзании в регуляторе расхода хладагента. Эту влагу необходимо немедленно удалить, чтобы поддержать рабочее состояние системы.

Аммиак прекрасно взаимодействует с водой и способен поглощать такое большое количество, что свободная вода редко обнаруживается в аммиачных системах. Соединение воды с аммиаком образует водоаммиачный раствор, который вступает в реакцию с цветными металлами, например с медью и ла-

тунью, но не взаимодействует с чугуном, сталью или другими материалами в конструкции системы. По этой причине аммиачные системы хорошо работают даже при относительно большом количестве влаги в системе.

В установках с углеводородными хладагентами присутствие влаги не приводит к образованию большого количества кислоты и других корродирующих соединений. Как правило, в системах на углеводородных хладагентах нет коррозии, если содержание влаги поддерживается ниже уровня, вызывающего ее замерзание, в условиях применения высококачественного смазочного масла и относительно низкой температуры нагнетания.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ХЛАДАГЕНТА И МАСЛА

Смазочное масло в основном содержится в картере компрессора, где оно взаимодействует с хладагентом. Следовательно, как уже указывалось, масло должно быть химически и физически стойким в присутствии хладагента, чтобы их взаимодействие не могло привести к отрицательным последствиям.

Некоторые хладагенты, в частности сернистый ангидрид и углеводороды, взаимодействуют в небольшой степени со смазочным маслом. Однако при нормальных рабочих условиях эта реакция обычно слабая и не вызывает никаких последствий, если смазочное масло высококачественное, а система относительно чистая и сухая. При наличии в системе значительного количества таких примесей, как воздух и влага, часто происходит химическая реакция между примесями, хладагентом и маслом. В результате этого происходит распад масла, образуются корродирующие кислоты и осадки, наблюдается омеднение и значительная коррозия полированных металлических поверхностей. Высокая

РАСТВОРИМОСТЬ ХЛАДАГЕНТА В МАСЛЕ

температура нагнетания значительно ускоряет эти процессы, в частности распад масла, что в свою очередь вызывает отложение нагара на нагнетательных клапанах, поршнях, крышке цилиндров компрессора и в нагнетательном трубопроводе. Это положение усугубляется при использовании плохо очищенного масла с высоким содержанием ненасыщенных углеводородов, так как последние химически нестойки.

Высокая температура нагнетания R22 (см. табл. 16-8) вызывает распад смазочного масла, что сопровождается перегоранием электродвигателя. Это явление характерно для герметичных компрессоров со встроенным электродвигателем, работающих на этом хладагенте, в особенности при наличии воздушного конденсатора и длинных трубопроводов.

Омеднение различных частей компрессора часто происходит в установках, работающих на углеводородных хладагентах. Такими частями являются полированные металлические поверхности, которые выделяют теплоту, например поршни, стенки цилиндров, поверхности подшипников и клапаны. Точная причина омеднения не установлена, но имеется достаточно подтверждений тому, что влага и низкое качество смазочного масла способствуют этому процессу. Медь никогда не используют в установках, работающих на аммиаке. Поэтому в аммиачных системах нет омеднения.

В любом случае независимо от природы или причины нежелательных реакций между хладагентом и смазочным маслом эти недостатки могут быть в значительной степени устранены или полностью исключены при использовании высококачественного смазочного масла с низкой температурой застывания и помутнения (см. с. 391—392), в чистой системе (свободной от загрязнений и примесей, например воздуха и влаги), работающей при низкой температуре нагнетания.

По вопросу о соотношении хладагента и масла необходимо отметить, что смешиваемость масла с различными хладагентами неодинакова.

По своей способности растворяться в масле хладагенты делятся на три группы: полностью растворимые, частично растворимые (при высоком давлении) и нерастворимые.

В любом случае смешиваемость масла или ее отсутствие не является важным фактором при выборе хладагента. Однако степень растворимости хладагента в масле — это важная характеристика и должна быть рассмотрена более подробно, так как значительно влияет на конструкцию компрессора и других узлов системы, включая трубопроводы подачи хладагента.

Хладагент, растворяясь в масле, которое находится в картере компрессора, снижает его вязкость и ухудшает смазочные свойства. Для компенсации разжижения хладагентом смазочное масло, используемое в компрессоре, должно иметь более высокую начальную вязкость.

Вязкость смазочного масла необходимо поддерживать в определенных пределах. Если вязкость масла слишком низка, то оно не будет образовывать защитную пленку между трущимися поверхностями. Масло, имеющее слишком высокую вязкость, не обладает достаточной текучестью, т. е. не будет протекать между трущимися поверхностями, в особенности при небольших давлениях. В любом случае смазка компрессора будет неудовлетворительной.

Масло, циркулирующее через систему вместе с хладагентом, отрицательно влияет на КПД и производительность установки, так как оно прилипает и на поверхности труб конденсатора и испарителя образуется пленка, в результате чего уменьшается коэффициент теплопередачи в этих аппаратах.

Масло становится более вязким и застывает при понижении температуры.

В холодильной системе масло необходимо только для смазки компрессора. Поэтому очевидно, что оно лучше всего выполняет эту функцию, когда находится в компрессоре, а не циркулирует с хладагентом через другие узлы системы. За некоторым исключением, хладагент неизбежно контактирует с маслом в компрессоре, вследствие чего определенное количество масла в виде небольших частиц уносится паром хладагента через нагнетательные клапаны в нагнетательный трубопровод. Если не отделить масло в этой точке от пара, то оно попадает в конденсатор и ресивер, откуда переносится в испаритель жидким хладагентом. Очевидно, что в целях эффективной работы системы, а также поддержания постоянного уровня масла в картере необходимо принять меры для его удаления из системы и возврата в картер, где оно будет выполнять свою прямую функцию смазывания компрессора.

Возврат масла в картер зависит от трех факторов: растворимости хладагента в масле, типа испарителя и температуры кипения хладагента.

Если используют хладагент, способный раствориться в масле, то возврат масла упрощается, так как оно поступает в компрессор в смеси с хладагентом. Масло переносится через систему хладагентом, а затем возвращается в картер через всасывающий трубопровод при условии соответствующей конструкции испарителя и трубопроводов хладагента.

При использовании хладагентов, не растворяющихся в масле, нелегко осуществить возврат его в картер, если масло попало в конденсатор. Основное количество масла и хладагента не растворяется, и только небольшое количество масла (вследствие незначительного механического смешивания) переносится хладагентом. Например, при использовании аммиака, который легче

масла, большое количество масла отделяется от жидкого хладагента и осаждается в самых низких точках системы. Поэтому в днищах всех ресиверов, испарителей, отделителей жидкости и других аппаратов имеются сосуды, из которых масло вручную или автоматически непрерывно или периодически сливается и возвращается в картер.

При использовании затопленных испарителей скорость движения хладагента в системе обычно недостаточна для того, чтобы пар хладагента уносил масло во всасывающий трубопровод и обратно в картер. Следовательно, даже когда в системе холодильной установки с затопленным испарителем циркулируют хладагенты, растворяющиеся в масле, необходимо принимать специальные меры для возврата масла в картер. Способы, применяемые для непрерывного возврата масла из испарителя в картер в таких случаях, описываются в главе 19.

Масло смазывает регулятор расхода хладагента и другие вентили в системе, поэтому циркуляцию небольшого количества масла с хладагентом не следует считать нежелательным явлением. Вместе с тем количество циркулирующего масла должно быть минимальным из-за его отрицательного влияния на холодопроизводительность машины. Избыточное количество циркулирующего масла может привести к такому низкому уровню его в картере, что не будет обеспечиваться нормальная смазка компрессора.

Для достижения минимального количества циркулирующего масла устанавливают маслоотделитель в нагнетательном трубопроводе между компрессором и конденсатором.

В системах, в которых возврат масла происходит не полностью или циркулирует избыточное количество масла, а также если наличие масла в системах вызывает значительное понижение холодопроизводительности и КПД уста-

новки, на нагнетательном трубопроводе монтируют маслоотделитель.

Это же относится к установкам, работающим на растворяющихся в масле хладагентах при температуре в испарителе ниже -18°C . Маслоотделители рекомендуются также для всех установок с затопленными испарителями, так как возврат масла из них может быть недостаточным вследствие незначительной скорости движения хладагента.

Маслоотделители очень эффективно отделяют масло от пара хладагента, но не имеют КПД 100%. Поэтому при использовании маслоотделителя необходимо принять меры к возврату в картер того небольшого количества масла, которое не остается в маслоотделителе и поступает к другим узлам системы. Неправильный монтаж маслоотделителей бывает причиной различных неполадок в системе. В связи с этим их обычно применяют только в тех установках, в которых свойства хладагента и особенности системы обуславливают их присутствие. Маслоотделители рассматриваются более подробно в главе 19.

ОБНАРУЖЕНИЕ УТЕЧКИ ХЛАДАГЕНТА

Неполадки из-за негерметичности в холодильной системе могут быть различными в зависимости от того, какое давление в данной точке негерметичности системы (выше или ниже атмосферного). Когда давление в системе в месте утечки выше атмосферного, хладагент вытекает из системы. Если давление в системе ниже атмосферного, то хладагент оседает, а воздух и влага всасываются в систему. В любом случае в течение очень короткого времени система выходит из строя. Можно утверждать, что утечки хладагента из системы менее вредны. В этом случае необходимо только обнаружить и устранить неплотность и зарядить систему соответствующим количеством хладагента. Если же воздух и влага попали в систему, то

они повышают давление и температуру нагнетания, а также интенсивность коррозии. Блага, имеющаяся в системе, может замерзнуть в регуляторе подачи хладагента. Кроме того, после обнаружения и устранения утечки система должна быть полностью отвакуумирована вакуум-насосом и осушена, для чего необходимо в систему встроить осушитель.

Необходимость предупреждения утечек в системе требует наличия какого-либо удобного средства проверки герметичности новой системы и обнаружения утечки в работающей системе. Новые системы проверяют на герметичность при вакууме и при давлении.

Один из способов обнаружения утечки, широко применяемый при работе со всеми хладагентами, основан на использовании относительно вязкого мыльного раствора, свободного от пузырьков. Мыльный раствор наносят на трубные соединения, которые затем оседают. Образование пузырьков в мыльном растворе указывает на наличие утечки. При использовании мыльного раствора давление в системе должно быть не менее 450 кПа.

Пары серы и аммиака образуют густой белый дым (сульфит аммония) при взаимодействии друг с другом. Это удобное средство обнаружения утечки из аммиачной системы. Для выявления утечки аммиака серную свечу подносят к трубным соединениям и другим предполагаемым участкам утечки. Утечка имеет место в том случае, если от серной свечи исходит белый дым. Бумага, пропитанная фенолфталеином и увлажненная, которая приобретает красный цвет при взаимодействии с паром аммиака, также может быть индикатором для обнаружения утечки.

Для обнаружения утечки в системах, работающих на фторированных хладагентах, часто используют галогидную лампу. В ней имеется медный элемент, который нагревается под действием пламени. Для поддержания процесса го-

рения воздух всасывается через резиновую трубку, один конец которой присоединен к течейскателю. Свободный конец трубки проводят вокруг предполагаемых точек утечки. Присутствие пара фторированного хладагента проявляется в том, что нормальный цвет пламени меняется на ярко-зеленый или фиолетовый. Галоидный течейскатель можно применять только в хорошо вентилируемом помещении. Для обнаружения утечки в системах, работающих на углекислоте или углеводородных хладагентах, можно использовать только мыльный раствор.

АММИАК

Аммиак — это единственный хладагент вне группы фторированных агентов, который более или менее значительно распространен в настоящее время. Аммиак токсичен и в определенных условиях обладает некоторой воспламеняемостью и взрывоопасностью. Отличные термодинамические свойства аммиака делают его идеальным хладагентом для льдозаводов, мясоперерабатывающих предприятий, искусственных ледяных катков, больших холодильников и т. д., где обычно работает опытный обслуживающий персонал и где точность этого хладагента не имеет большого значения.

Аммиак обладает наибольшей удельной холодопроизводительностью из всех хладагентов и несмотря на довольно большой удельный объем в паровом состоянии обеспечивает высокую холодопроизводительность компрессора при относительно небольшом рабочем объеме его цилиндров.

Точка кипения аммиака при стандартном атмосферном давлении $-33,3^{\circ}\text{C}$. Давления в испарителе и конденсаторе при стандартных условиях $t_0 = -15^{\circ}\text{C}$ и $t_k = 30^{\circ}\text{C}$ соответственно равны 0,237 и 1,167 МПа. Умеренные давления позволяют применять легкие материалы в конструкции холодильного оборудования

ния. Однако адиабатная температура нагревания относительно высока и равна $98,89^{\circ}\text{C}$ при стандартных условиях, поэтому желательно водяное охлаждение крышки и цилиндров компрессора. В аммиачных системах необходимо извлекать большого перегрева всасываемого пара.

Чистый безводный аммиак не корродирует металлы, обычно применяемые в холодильных системах, однако в присутствии влаги он воздействует на цветные металлы, например медь и латунь. Очевидно, что эти металлы не следует использовать в аммиачных системах.

Аммиак не растворяется в масле и поэтому не снижает его вязкости. Во всех аммиачных установках монтируют маслоотделитель на нагнетательном трубопроводе во избежание замасливания теплообменных аппаратов.

Аммиак проверяют на утечку с помощью серных свечей или мыльного раствора.

Аммиак выпускается повсеместно в достаточном количестве и является самым дешевым из всех распространенных хладагентов. Эти два обстоятельства, а также химическая стойкость, совместимость с водой, нерастворимость в масле делают аммиак идеальным хладагентом для больших установок, в которых точность не является определяющим фактором. Аммиак — отличный хладагент для охлаждения жидкости, так как коэффициенты теплоотдачи со стороны хладагента в теплообменных аппаратах относительно высоки. Аммиак используется в установках с сальниковыми поршневыми, ротационными и центробежными компрессорами.

ХЛАДАГЕНТ R11

R11 — фторированный хладагент метановой группы с температурой кипения при атмосферном давлении $23,7^{\circ}\text{C}$. Рабочие давления при стандартных условиях равны соответственно 0,02 и 0,125 МПа. R11 используют в установ-

как кондиционирования воздуха с центробежным компрессором (из-за указанных низких рабочих давлений и относительно большой объемной производительности агента) для обслуживания небольших административных зданий, фабрик, универсальных магазинов, театров и др. R11 широко применяется в качестве вторичного хладагента и растворителя.

ХЛАДАГЕНТ R12

R12 (CF_2Cl_2), вероятно, самый распространенный в настоящее время хладагент. Это абсолютно безопасный хладагент, так как он нетоксичен, невоспламеняем и невзрывоопасен. Кроме того, это высокостойкое соединение, которое редко подвергается распаду даже в экстремальных рабочих условиях. Однако при взаимодействии с открытым пламенем или электронагревателями R12 распадается на высокотоксичные продукты (см. с. 312—313).

Безопасность этого хладагента состоит также и в том, что R12 конденсируется при умеренном давлении в нормальных условиях. Температура его кипения равна $-29,8^\circ\text{C}$ при атмосферном давлении, что дает возможность этот хладагент использовать в высоко-, средне- и низкотемпературных установках с каждым из типов компрессоров. Установку с многоступенчатым центробежным компрессором, работающую на R12, применяют для охлаждения рассола до -80°C .

R12 растворяется в масле при всех рабочих параметрах машины, что не только упрощает проблему возврата масла, но также повышает КПД и производительность установки вследствие того, что хладагент растворяет масляную пленку на трубах испарителя и конденсатора и улучшает теплопередачу в этих аппаратах.

Удельная холодопроизводительность R12 (на единицу массы) относительно невелика по сравнению с некоторыми

другими распространенными хладагентами, но это небольшой недостаток. В малых установках большая масса циркулируемого хладагента дает определенное преимущество, так как позволяет более точно контролировать состояние хладагента. В больших системах недостаток R12, выражающийся в малой величине скрытой теплоты парообразования, несколько компенсируется высокой плотностью пара хладагента. Поэтому объемная производительность компрессора на единицу вырабатываемого холода не намного превышает объемную производительность компрессоров, работающих на других распространенных хладагентах. Мощність, потребляемая компрессором (на единицу холодопроизводительности), работающим на R12, также сравнима с потребляемой мощностью компрессоров, работающих на других распространенных хладагентах. Для обнаружения утечки применяют галоидный течеискатель.

ХЛАДАГЕНТ R13

R13 (CF_3Cl) используют в сверхнизкотемпературных системах, обычно в нижней ветви каскадных машин. Температура кипения R13 -98°C при атмосферном давлении. Можно достигнуть температуры кипения -100°C . Критическая температура равна $28,9^\circ\text{C}$. Давление конденсации и объемная производительность компрессора умеренные. R13 используют в установках с каждым из трех типов компрессоров.

R13 — безопасный хладагент, который не смешивается с маслом. Для обнаружения утечки применяют галоидный течеискатель.

ХЛАДАГЕНТ R22

Температура кипения R22 (CHF_2Cl) $-40,8^\circ\text{C}$ при атмосферном давлении.

Это низкотемпературный хладагент (температура кипения до -87°C), который широко используется в домаш-

них низкотемпературных холодильниках, в установках на фермах, в торговом и промышленном низкотемпературном оборудовании. Этот хладагент применяют в основном в агрегированных кондиционерах, в которых относительно небольшая объемная производительность компрессора является определенным преимуществом.

Рабочее давление и адиабатная температура нагнетания R22 выше, чем у R12, а потребляемая мощность почти одинаковая.

Температура перегрева всасываемого пара R22 должна удерживаться на минимальном уровне вследствие высокой температуры нагнетания, в особенности при использовании герметичных компрессоров со встроенным электродвигателем. Рекомендуются водяное охлаждение крышек компрессора и цилиндров в низкотемпературных системах с высокой степенью сжатия пара хладагента. Это необходимо для предотвращения перегрева компрессора. Воздушные конденсаторы, работающие на R22, должны быть большого размера.

R22 растворяется в масле при температурах, имеющих место в конденсаторе, однако он отделяется от масла в испарителе. Точная температура разделения зависит от марки масла и его количества в смеси с хладагентом. Трудности с возвратом масла не возникают, если соответствующим образом сконструированы эжектировый испаритель и всасывающий трубопровод. Низкотемпературные системы и установки с затопленным испарителем всегда должны быть снабжены маслоотделителями.

Основное преимущество R22 по сравнению с R12 заключается в меньшей объемной производительности компрессора. При одинаковой объемной производительности холодопроизводительность компрессора примерно на 60% выше при работе на R22, чем при использовании R12. Кроме того, при работе на R22 используют трубы обычно меньшего размера, чем на R12.

R22 обладает большей способностью поглощать влагу, чем R12, и поэтому случаи замерзания влаги в TPV редки. Некоторые считают это преимуществом, однако присутствие влаги в системе вообще нежелательно.

R22 — это безопасный фторированный хладагент. Для обнаружения утечки применяют галлоидный течеискатель.

ХЛАДАГЕНТ R113

Температура кипения R113 ($C_2F_3Cl_3$) при атмосферном давлении $47,5^\circ\text{C}$. Рабочие давления при стандартных условиях: $p_k = 6,8 \text{ кПа}$ и $p_0 = 2,04 \text{ кПа}$. Объемная производительность компрессора на единицу производительности велика. Однако потребляемая компрессором мощность (на единицу холодопроизводительности) сопоставима с потребляемой мощностью компрессоров, работающих на других распространенных хладагентах. R113 используют в машинах с центробежным компрессором из-за низких рабочих давлений и большой объемной производительности компрессора.

R113 — безопасный хладагент. Для обнаружения утечки применяют галлоидный течеискатель.

ХЛАДАГЕНТ R114

Температура кипения R114 ($C_2F_4Cl_2$) при атмосферном давлении $3,6^\circ\text{C}$. Давления кипения и конденсации при стандартных условиях соответственно равны 0,089 и 0,25 МПа. Объемная производительность компрессора (на единицу холодопроизводительности) относительно низкая при стандартных условиях, а потребляемая мощность сопоставима с потребляемой мощностью компрессоров, работающих на других распространенных хладагентах.

R114 используют в больших промышленных системах с центробежными компрессорами для кондиционирования воздуха и охлаждения воды, а также в

холодильных машинах с ротационными пластинчатыми компрессорами домашних холодильников и небольших холодильителей питьевой воды.

Как и R22, R114 смешивается с маслом в конденсаторе, но отделяется от него в испарителе. Возврат масла в компрессор обеспечивается конструкцией, в которой используется R114.

R114 — безопасный хладагент. Для обнаружения утечки применяют галонный течейскапель.

ХЛАДАГЕНТ R500

R500 — это азеотропная смесь¹ R12 (73,8% по массе) и R152a (26,2%). Температура кипения R500 при атмосферном давлении —33°C. Давления кипения и конденсации при стандартных условиях соответственно равны 0,113 и 0,771 МПа по манометру. Потребляемая компрессором мощность при использовании R500 примерно одинакова с потребляемой мощностью компрессоров, работающих на R12 и R22, однако требуемая объемная производительность компрессора (на единицу холодопроизводительности) больше, чем при использовании R22, и меньше, чем в случае применения R12.

Основное преимущество R500 (по сравнению с R12) заключается в его способности повышать производительность компрессора примерно на 18%. Это дает возможность присоединять герметичный компрессор в электрическую сеть с частотой 50 или 60 Гц.

Объемная производительность компрессора со встроенным электродвигателем снижается примерно на 18% при переходе от частоты 60 на 50 Гц переменного тока. Повышение холодопроизводительности (на единицу объемной

производительности) при переходе с R500 на R12 почти точно соответствует потере объемной производительности при переходе с 60 на 50 Гц. Поэтому тот же компрессор со встроенным электродвигателем можно использовать на обеих частотах посредством замены хладагентов.

ХЛАДАГЕНТ R502

R502 — это азеотропная смесь R22 (48,8% по массе) и R115 (51,2%). R502 создан в качестве низкотемпературного хладагента для замены R22 в некоторых низкотемпературных установках с высокой степенью сжатия пара хладагента. Однако R502 широко используется в установках для низкотемпературного и холодильного хранения, а также в системах комфортного кондиционирования воздуха, в особенности в тепловых насосах. Основным преимуществом R502 по сравнению с R22 является его более низкая адиабатная температура нагнетания, равная 37,2°C по сравнению с 53,3°C у R22 при стандартных условиях. Однако объемная производительность компрессора и мощность на единицу холодопроизводительности несколько выше при использовании R502. Рабочие давления R502 в системе имеют умеренные значения.

При стандартном барометрическом давлении температура кипения R502 —45,4°C, а критическая температура 91,78°C. Это невоспламеняющийся и нетоксичный хладагент (классификация 5a) с относительно незначительной смешиваемостью с маслом. Для обнаружения утечки применяют галонный течейскапель.

ХЛАДАГЕНТ R503

R503 — это азеотропная смесь R23 (40,1% по массе) и R13 (59,9%). Температура кипения R503 —88,7°C при стандартном барометрическом давлении, а критическая температура 19,5°C.

¹ Азеотропная смесь — это смесь двух или большего количества жидкостей, которые при смешении в определенной пропорции образуют соединение с температурой кипения, не зависящей от температуры кипения входящих в него отдельных компонентов.

R503 — это относительно новый хладагент, который широко используют для замены R13 в диапазоне температур от -73°C до -101°C . При температуре кипения $-84,4^{\circ}\text{C}$ и температуре конденсации $6,67^{\circ}\text{C}$ и одинаковой холодопроизводительности объемная производительность компрессора при работе на R503 составляет примерно 64% от объемной производительности компрессора на R13. Однако давление конденсации несколько выше для R503 и составляет 2,275 МПа при $-6,7^{\circ}\text{C}$ по сравнению с 1,657 МПа для R13. R503 используют в нижней ветви каскадных систем с поршневым компрессором, а R12, R22 или R502 — в высокой ветви.

УГЛЕВОДОРОДНЫЕ ХЛАДАГЕНТЫ

Углеводороды — это группа веществ, состоящих из двух элементов: водорода и углерода. Хладагентами являются метан, этан, бутан, пропан, этилен и изобутан. Эти хладагенты отличаются исключительной воспламеняемостью и взрывоопасностью. Они считаются умеренно токсичными, так как являются анастезирующими веществами. Эти соединения не поглощают значительного количества влаги, но характеризуются исключительно высокой степенью сме-

шиваемости с маслом при любых условиях.

Некоторые углеводородные хладагенты (бутан, пропан и изобутан) применялись в небольших количествах в бытовом холодильном оборудовании, однако в основном они используются в системах специального назначения, которые обслуживаются опытным персоналом. Этан, метан и этилен применяют в сверхнизкотемпературных системах, обычно в нижней ветви двух- и трехступенчатых каскадных систем. Однако даже в этих системах они, по всей вероятности, будут заменены в будущем хладагентами R13, R14 и R503.

Утечку хладагента обнаруживают только с помощью мыльного раствора.

ВЕЩЕСТВА ДЛЯ ОСУШКИ ХЛАДАГЕНТА

Осушители часто используют в холодильных системах для удаления влаги из хладагента. Для осушки применяют такие вещества, как силикагель (диоксид кремния), алюмогель (окись алюминия) и безводный сульфат кальция. Первые два вещества являются гранулированными абсорбентами, а третье — абсорбентом в виде гранул или литых палочек.

Глава 17 РЕГУЛЯТОРЫ ПОТОКА ХЛАДАГЕНТА ДЛЯ ПИТАНИЯ ИСПАРИТЕЛЕЙ

ТИПЫ РЕГУЛЯТОРОВ И ИХ НАЗНАЧЕНИЕ

Регуляторы потока хладагента делятся на шесть основных типов: ручной регулирующий вентиль, автоматический регулирующий вентиль, терморегулирующий вентиль, капиллярная трубка, поплавковый регулятор низкого давле-

ния, поплавковый регулятор высокого давления.

Независимо от типа регулятор потока хладагента предназначен для выполнения следующих функций: изменение потока жидкого хладагента, подаваемого из жидкостного трубопровода в испаритель, в количестве, соизмеримом с количеством образуемого па-

ра в испарителе; поддержание разности давлений между сторонами высокого и низкого давлений систем, чтобы хладагент кипел при заданном низком давлении в испарителе и одновременно конденсировался при заданном высоком давлении в конденсаторе.

Ручной регулирующий вентиль

Ручной регулирующий вентиль — это иглочатый вентиль с ручным приводом (рис. 17-1). Подача жидкости через вентиль зависит от разности давлений в отверстиях вентиля и степени его открытия, причем последняя регулируется вручную. При постоянной разности давлений в вентиле расход через него постоянный, независимо от давления и тепловой нагрузки испарителя.

Основной недостаток ручного регулирующего вентиля заключается в том, что он не реагирует на изменение теп-

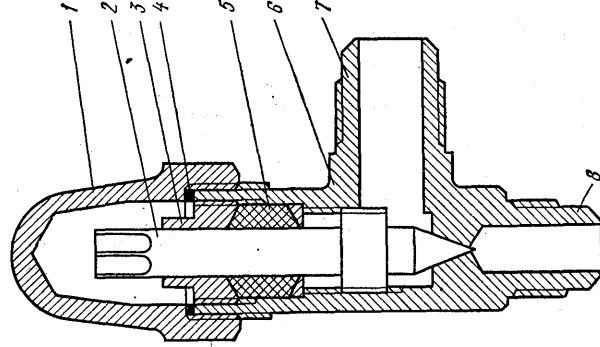


Рис. 17-1. Ручной регулирующий вентиль небольшой производительности:
1 — колпачковая гайка; 2 — шпindel; 3 — грунт-букса; 4 — прокладка; 5 — сальниковая набивка; 6 — корпус; 7 — входной штуцер; 8 — выходной штуцер

ловой нагрузки системы. В связи с этим для предотвращения недостаточного или избыточного питания испарителя необходимо регулировать настройку вентиля при каждом ее изменении. Кроме того, следует вручную открывать и закрывать вентиль при каждом включении или выключении компрессора.

Очевидно, что ручной регулирующий вентиль предназначен только для больших систем, находящихся под постоянным наблюдением оператора, в которых тепловая нагрузка относительно постоянна. Если нагрузка часто изменяется, что вызывает необходимость в автоматическом регулировании, применяют другой тип регулятора расхода.

Ручной регулирующий вентиль предназначен в основном в качестве вспомогательного регулятора потока хладагента в байпасной линии (см. рис. 17-29). Его часто используют для регулирования расхода в линии перепуска масла (см. рис. 19-12).

Автоматические регулирующие вентили «После себя»

Схема автоматического регулирующего вентиля «После себя» приведена на рис. 17-2. Вентиль состоит из иглы и седла, сильфона (или мембраны) и пружины, натяжение которой устанавливается регулировочным винтом. На

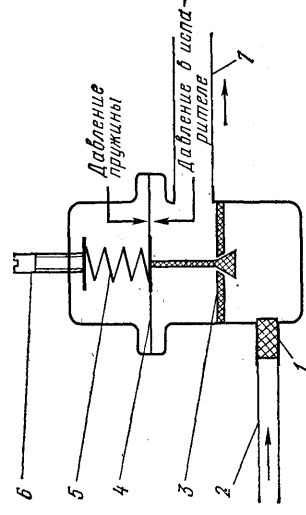


Рис. 17-2. Схема автоматического регулирующего вентиля:
1 — фильтр; 2 — входной штуцер; 3 — игла и седло; 4 — сильфон или мембрана; 5 — пружина; 6 — регулировочный винт; 7 — выходной штуцер

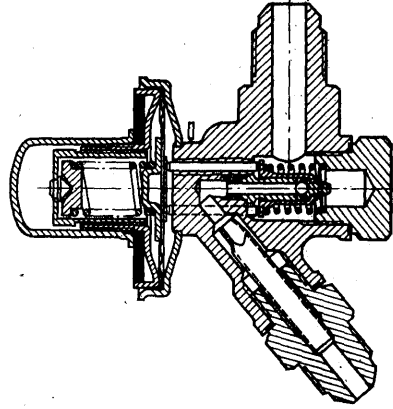


Рис. 17-3. Типичный автоматический регулирующий вентиль

входе жидкости в вентиль обычно размещают фильтр для предотвращения попадания различных загрязнений, которые могут закупорить вентиль. Конструкция типичного автоматического вентиля показана на рис. 17-3.

Автоматический регулирующий вентиль поддерживает постоянное давление в испарителе, увеличивая или уменьшая (в зависимости от нагрузки) подачу в него хладагента. Постоянное давление, создаваемое в испарителе с помощью вентиля, является результатом противодействия давления в испарителе и давления пружины. Давление в испарителе, действующее на одну сторону сифона или мембраны, вызывает закрывание вентиля, а давление пружины, действующее на противоположную сторону сифона или мембраны, стремится открыть вентиль. При работе компрессора вентиль поддерживает давление в испарителе, равное давлению пружины.

Когда натяжение пружины отрегулировано на определенное давление в испарителе, вентиль автоматически регулирует поток жидкого хладагента, т. е. в испарителе поддерживается заданное давление независимо от нагрузки. Допустим, что натяжение пружины отрегулировано для поддержания постоянного давления в испарителе, равного

50 кПа. Когда давление в испарителе станет ниже на 50 кПа, давление пружины превысит давление в нем, в результате чего вентиль откроется, поток жидкого хладагента в испарителе увеличится, и заполнится большая часть его объема.

Интенсивность парообразования и давление в испарителе будут повышаться, пока не наступит равновесие между давлением в испарителе и давлением пружины. Если давление в испарителе станет выше заданной величины (50 кПа), т. е. превысит давление пружины, вентиль начнет закрываться, снижая тем самым подачу жидкости и уменьшая эффективную площадь поверхности испарителя. Естественно, что при этом количество образуемого пара хладагента уменьшается и давление в испарителе уравнивается с давлением пружины.

Необходимо отметить, что вентиль плотно закрывается во время нерабочей части цикла компрессора и остается в этом положении до включения компрессора. Ранее указывалось, что процесс парообразования в испарителе продолжается некоторое время после остановки компрессора и давление в испарителе повышается, так как пар не отсасывается компрессором. Следовательно, давление в испарителе немедленно опускается ниже давления пружины, в результате чего вентиль открывается для подачи достаточного количества жидкого хладагента в испаритель и установления рабочего равновесия между давлением в испарителе и давлением пружины.

Основной недостаток автоматического регулирующего вентиля заключается в его относительно небольшой эффективности по сравнению с другими регуляторами расхода хладагента. Учитывая зависимость работы испарителя

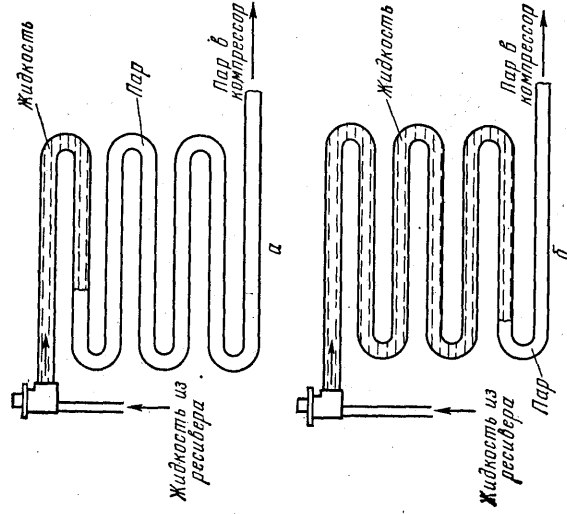


Рис. 17-4. Подача хладагента в испаритель автоматическим регулирующим вентилем:
 а — при большой нагрузке; б — при минимальной нагрузке

от компрессора, очевидно, что для поддержания постоянного давления в испарителе необходимо, чтобы количество образуемого пара было равным объемной производности компрессора. Для обеспечения этого равновесия требуется подавать такое количество жидкого хладагента, чтобы уменьшить эффективную площадь поверхности испарителя при значительной нагрузке и относительно высоком коэффициенте теплопередачи (рис. 17-4, а). Для понижения нагрузки на испаритель, а также коэффициента теплопередачи большая часть испарителя должна быть затоплена жидким хладагентом для поддержания постоянной интенсивности парообразования (рис. 17-4, б). Если нагрузка на испаритель становится ниже определенного уровня, то автоматический регулирующий вентиль для поддержания заданного давления в испарителе подает избыточное количество жидкого хладагента в испаритель. В ре-

зультате хладагент поступает во всасывающий трубопровод, а затем в компрессор, где может вызвать значительные повреждения. Однако поступление слишком большого количества хладагента в испаритель обычно не происходит в хорошо спроектированной системе, так как термореле включает компрессор до того момента, когда температура в охлаждаемом пространстве или температура продукта опустится до такого уровня, что нагрузка на испаритель будет ниже допустимой.

При высокой нагрузке на систему только небольшая часть испарителя заполняется жидким хладагентом, так как автоматический регулирующий вентиль поддерживает постоянное давление, что ограничивает производительность и КПД холодильной установки именно в то время, когда нужны их высокие значения. Давление в испарителе остается постоянным в течение всего рабочего цикла компрессора, так как вентиль настраивают на давление, соответствующее минимальной температуре кипения хладагента в испарителе (рис. 17-5). В результате имеет место некоторое снижение производительности и КПД компрессора.

Другой недостаток автоматического регулирующего вентиля, который также является следствием поддержания им постоянного давления в испарителе, заключается в том, что для управления компрессором нельзя использовать реле низкого давления, так как работа по-

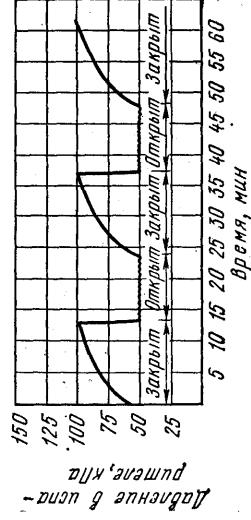


Рис. 17-5. Рабочие характеристики автоматического регулирующего вентиля

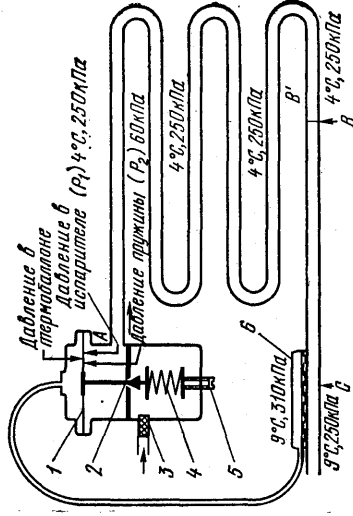
следнего зависит от давления в испарителе во время рабочего цикла.

В связи с плохой эффективностью при большой тепловой нагрузке автоматический регулирующий вентиль изменяют в основном только на малом оборудовании с относительно постоянными нагрузками, например в домашних холодильниках и морозильниках, а также в холодильных шкафах для хранения мороженого. Однако автоматический регулирующий вентиль в настоящее время редко используется даже в этом оборудовании. Он уступил свое место другим типам регуляторов расхода, которые более эффективны, а иногда более дешёвы.

Терморегулирующие вентили (ТРВ)

Терморегулирующий вентиль, вероятно, самый распространенный в настоящее время регулятор расхода хладагента вследствие высокой эффективности и пригодности для работы почти в любом типе холодильного оборудования. Автоматический регулирующий вентиль создает постоянное давление в испарителе, а ТРВ поддерживает постоянный перегрев всасываемого пара на выходе из испарителя, что позволяет обеспечивать оптимальное заполнение испарителя хладагентом при всех нагрузках без его перелива во всасывающий трубопровод. ТРВ применяют в качестве регулятора расхода хладагента в системах, в которых часто и в широких пределах изменяется нагрузка. Это обусловлено тем, что ТРВ обеспечивает полное и эффективное использование всей поверхности испарителя.

На рис. 17-6 приведена схема ТРВ, на которой показаны основные части вентиля, в том числе игла и седло, сильфон (или мембрана), дистанционный термомобаллон, соединенный с одной стороной с сильфоном (или мембраной) с помощью капиллярной трубки, пружина, натяжение которой настраивается регуля-



лоне соответствует температуре пара во всасывающем трубопроводе (в точке контакта с термобаллоном).

Обратите внимание, что давление в дистанционном термобаллоне действует на одну сторону сиффона или мембраны через капиллярную трубку и стремится открыть вентиль, а давление в испарителе и натяжение пружины совместно действуют на другую сторону сиффона или мембраны и закрывают вентиль. Принцип работы ТРВ наилучшим образом иллюстрируется на примере.

Рассматривая рисунок 17-6, допустим, что жидкий R12 кипит в испарителе при температуре 4°C , а давление насыщения R12 в испарителе $p_1 = 250 \text{ кПа}$ (351 кПа абс.). Натяжение пружины настроено на давление $p_2 = 60 \text{ кПа}$, в результате чего общее давление, закрывающее вентиль, равно $p_1 + p_2 = 250 + 60 = 310 \text{ кПа}$. Если пренебречь снижением давления в испарителе, можно допустить, что давление и температура хладагента одинаковы во всех частях испарителя, где имеется его парожидкостная смесь. Однако в некоторой точке B вблизи выхода из испарителя вся жидкость выкипает, и хладагент в этой точке будет в виде насыщенного пара (т. е. при температуре и давлении паробразовании). При прохождении от точки B через оставшуюся часть испарителя пар продолжает поглощать теплоту из окружающей среды и перегревается, вследствие чего его температура повышается, а давление останется постоянным. Предположим, что пар при движении его от точки B до точки C , где расположен дистанционный терморегулон, перегревается на 5°C (от 4 до 9°C). Температура насыщенной парожидкостной смеси R12 в дистанционном термобаллоне равна температуре перегретого пара в трубопроводе (9°C), а соответствующее давление $p_3 = 310 \text{ кПа}$ (410 кПа абс.) действует на мембрану через капиллярную трубку и стремится открыть вентиль.

При описанных выше условиях давление, стремящееся открыть вентиль, равно давлению, стремящемуся закрыть вентиль, т. е. $p_1 + p_2 = p_3$. Следовательно, вентиль будет находиться в состоянии равновесия до тех пор, пока перегрев всасываемого пара не изменится, нарушив баланс этих давлений, и не заставит вентиль открыться или закрыться.

Анализ этого примера показывает, что в описанных условиях вентиль будет находиться в состоянии равновесия только в том случае, когда перегрев всасываемого пара составляет 5°C . При любом изменении перегрева всасываемого пара игла вентили перемещается в том направлении, в котором приводит к восстановлению заданной величины перегрева и равновесия. Например, если перегрев всасываемого пара меньше 5°C , то давление в дистанционном термобаллоне будет меньше суммы давлений в испарителе и пружины. Поэтому вентиль закрывается, подача хладагента в испаритель уменьшается до тех пор, пока перегрев не повысится до заданной величины (5°C). Если перегрев больше, чем 5°C , то давление в дистанционном термобаллоне превысит сумму давлений в испарителе и пружины, вентиль откроется, увеличивая тем самым подачу хладагента в испаритель до момента снижения перегрева до заданной величины (5°C).

Во всех случаях величина перегрева, требуемого для равновесия ТРВ, зависит от настройки пружины. По этой причине настройку пружины называют настройкой перегрева. Повышение натяжения пружины увеличивает величину перегрева требуемого для приведения вентили в состояние баланса. Большая величина перегрева обычно нежелательна, так как это уменьшает эффективную площадь поверхности испарителя. Однако уменьшение натяжения пружины снижает величину перегрева, необходимого для поддержания вентили в состоянии равновесия, в результате

чего увеличивается эффективная площадь поверхности испарителя. Если перегрев, поддерживаемый вентилем, слишком мал, то прибор работает неустойчиво и периодически подает избыточное или недостаточное количество хладагента в испаритель, т. е. в подаче хладагента происходят колебания. Как правило, ТРВ настраивают на перегрев 4—5°C. В большинстве случаев такая установка удовлетворительна и ее следует изменять только при крайней необходимости.

Если вентиль настроен на определенный перегрев, он поддерживает этот перегрев при любой нагрузке независимо от температуры и давления в испарителе при условии, что не превышены производительность и рабочий диапазон прибора. Допустим, что интенсивность парообразования увеличилась в испарителе за счет большей тепловой нагрузки, в результате чего вся жидкость превратилась в пар к моменту ухода хладагента из точки *B'*, а не из точки *B* (см. рис. 17-6). Большой путь движения пара от точки *C* вызывает увеличение перегрева и повышение давления в термобаллоне. Проходное сечение в клапане вентиля и соответственно количество хладагента, поступающего в испаритель, увеличиваются. Большая площадь поверхности испарителя будет смачиваться жидким хладагентом. Это снова понизит величину перегрева до заданного значения 5°C. Однако необходимо отметить, что при восстановлении равновесия величины давления и температуры хладагента в испарителе становятся более высокими, чем раньше, из-за большей интенсивности парообразования. При этом вентиль поддерживает постоянный перегрев 5°C вследствие более высокой температуры в испарителе, температура в точке *C* также выше, как и температура и давление заполнителя в дилатационном термобаллоне.

Очевидно, что в отличие от автоматического регулирующего вентиля ТРВ может быть настроен только на под-

держание постоянного перегрева, а не определенной температуры и давления в испарителе. Когда в качестве регулятора расхода хладагента применяют ТРВ, температура и давление в испарителе обусловлены нагрузкой на систему, как это описано в главе 13. ТРВ с внутренним уравниванием представлен на рис. 17-7.

ТРВ с внешним уравниванием

При движении через испаритель давление хладагента снижается из-за трения. Поэтому температура насыщения хладагента всегда несколько меньше на выходе испарителя, чем на входе. Когда уменьшение давления хладагента в испарителе относительно невелико, температура насыщения снижается также незначительно и не имеет особого значения. Однако если эта величина значительна, то температура насыщения хладагента на выходе из испарителя намного ниже, чем на входе, что отрицательно сказывается на работе вентиля, так как требуется больший перегрев всасываемого пара для его равно-

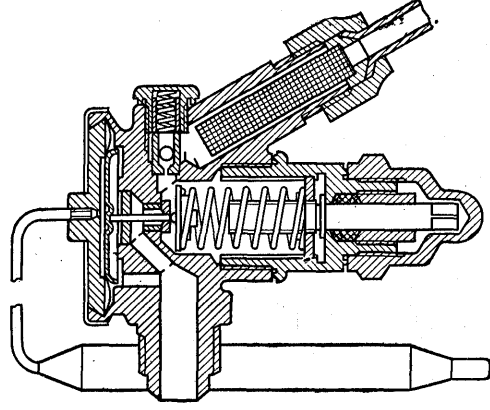


Рис. 17-7. Обычный ТРВ с жидкостным заполнением термосистемы и внутренним уравниванием

веса. Обеспечение более высокого перегрева потребует большей площади поверхности испарителя, вследствие чего упадет давление в испарителе. Компенсация его с помощью внешней уравнительной линии вызовет значительное уменьшение площади поверхности испарителя, которую можно было бы использовать для эффективного охлаждения.

Допустим, что испаритель питается хладагентом R12 посредством ТРВ с внутренним уравниванием, а давление и температура насыщения хладагента на входе в испаритель (точка А) равны соответственно 250 кПа (351 кПа абс.) и 4°C, причем первая величина — это давление в испарителе p_4 , действующее на мембрану вентиля. Если пружина вентиля настроена на давление $p_2 = 60$ кПа, то для равновесия вентиля потребуются давление в термобаллоне $p_3 = 250 + 60 = 310$ кПа.

Предположим, что снижение давления хладагента в испарителе пренебрежимо мало по сравнению с предыдущим примером. При этом давление и температура насыщения хладагента на выходе из испарителя примерно будут равны соответствующим величинам на входе в испаритель, т. е. 250 кПа и 4°C, а величина перегрева всасываемого пара, необходимая для работы вентиля, только 5°C (9°C — 4°C), как показано на рис. 17-6. С другой стороны, допустим, что при движении через испаритель давление хладагента снижается на 62 кПа. В данном случае давление насыщения на выходе из испарителя составляет 188 кПа (250 — 62), т. е. на 62 кПа меньше, чем давление на входе. Температура насыщения, соответствующая давлению 188 кПа (289 кПа абс.), равна примерно —2°C. Чтобы обеспечить температуру всасываемого пара 9°C в точке контакта термобаллона для равновесия вентиля, он должен быть перегрет на 11°C.

Для получения такого значительного перегрева процесс парообразования дол-

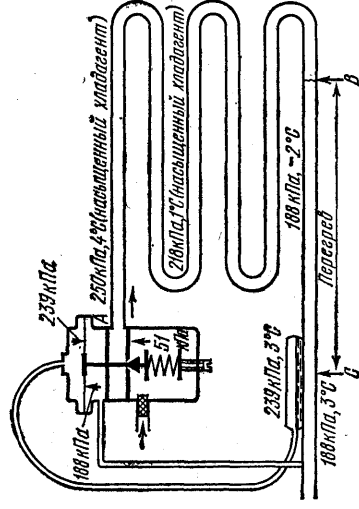


Рис. 17-8. Схема ТРВ с внешним уравниванием

жен завершиться в испарителе в точке В' (см. рис. 17-6), но при этом значительная часть поверхности испарителя выводится из эффективной работы. Естественно, что снижение эффективности поверхности испарителя значительно уменьшает производительность и КПД установки.

Внешнее уравнивание не уменьшает давления в испарителе, но позволяет более полно использовать его поверхность. Обратите внимание, что показанный на рис. 17-8 вентиль с внешним уравниванием сконструирован таким образом, что давление p_4 , которое действует на мембрану вентиля, — это давление на выходе из испарителя, а не на входе. Мембрана вентиля изолирована с помощью сальника от испарителя, а давление на выходе из испарителя возде действует на мембрану через трубку небольшого диаметра, которая присоединена к выходному патрубку испарителя или ко всасывающему трубопроводу на расстоянии 150—200 мм после дистанционного термобаллона в сторону компрессора. Конструкция ТРВ с внешней уравнительной линией представлена на рис. 17-9.

Давление в испарителе p_4 , направленное на мембрану вентиля с внешним уравниванием, — это давление на выходе из испарителя, а не на входе,

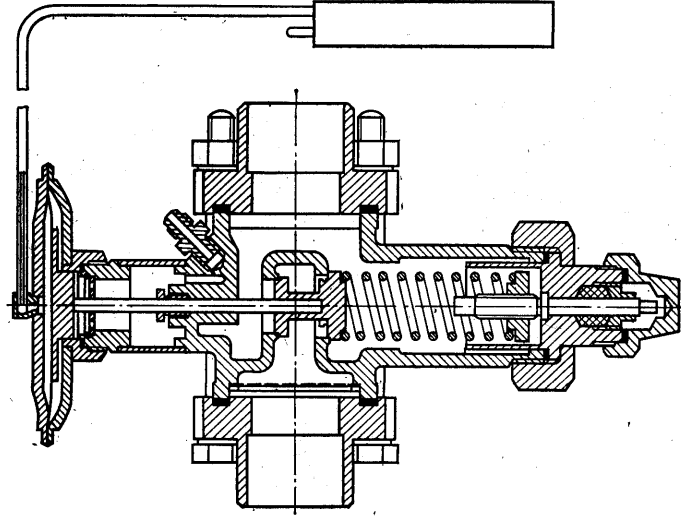


Рис. 17-9. TRB с внешним уравниванием

вследствие чего влияние снижения давления в испарителе уменьшается до минимума. Обратите внимание на рис. 17-8, что давление на выходе из испарителя p_4 , направленное на мембрану, равно 188 кПа. Прибавление этой величины к давлению $p_2 = 51$ кПа образует суммарное давление 239 кПа, которое стремится закрыть вентиль. Следовательно, для создания равновесия требуется давление в термобаллоне 239 кПа (340 кПа абс.), соответствующее температуре насыщения примерно 3°C. Температура насыщения, соответствующая давлению всасываемого пара 188 кПа (289 кПа абс.), равна -2°C , вследствие чего для равновесия вентили требуется перегрев всасываемого пара только на 5°C [$3^\circ\text{C} - (-2^\circ\text{C})$].

ТРВ с ограничением давления

Обычный терморегулирующий вентиль, способный полностью заполнить

испаритель хладагентом независимо от температуры и давления в испарителе, имеет как некоторые преимущества, так и недостатки. Положительное качество TRB состоит в том, что он обеспечивает полное и эффективное использование поверхности испарителя при любой нагрузке, но вместе с тем из-за избыточного давления и температуры в испарителе при большой тепловой нагрузке создается перегрузка привода компрессора.

Другой недостаток обычного TRB — это его способность отрываться и чрезмерно заполнять испаритель хладагентом при включении компрессора, что во многих случаях приводит к попаданию жидкости во всасывающий трубопровод и повреждению компрессора. Избыточное питание хладагентом при пуске обусловлено тем, что давление в испарителе при пуске компрессора быстро снижается, а давление в термобаллоне остается высоким, так как он охлаждается всасываемым паром до нормальной рабочей температуры медленно. Естественно, что при этом вентиль будет несбалансирован и открыт, пока не понизится давление в баллоне.

Указанные трудности можно преодолеть, применяя TRB со встроенным ограничителем давления. Ограничитель давления уменьшает подачу жидкого хладагента в испаритель, управляя вместо дистанционного термобаллона рабочей вентилем, когда давление в испарителе повышается до заданной максимальной величины. Это не только защищает привод компрессора от перегрузки при большой нагрузке, но и исключает выброс жидкого хладагента из испарителя в компрессор при его пуске.

Максимальное рабочее давление TRB ограничивается механическим узлом или дистанционным термобаллоном с газовым заполнением. TRB с механическим ограничением давления имеет пружину или сжимаемый патрон, расположенный между мембраной и штоком вентилем (или толкателями), которые приводят в действие иглу вентилем. Сжимаемый

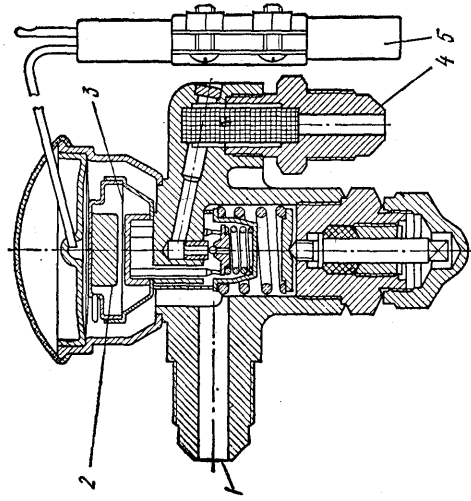


Рис. 17-10. TRV с ограничением давления (со сжимаемым патроном):

1 — выходной шпундер; 2 — сжимаемый патрон; 3 — мембрана; 4 — входной шпундер; 5 — дистанционный термобаллон

патрон (рис. 17-10), заполненный не конденсирующимся газом, действует в качестве жесткого звена между мембраной и штоком вентиля, пока давление в испарителе меньше давления газа в патроне. Следовательно, работой вентиля управляет дистанционный термобаллон. Вентиль функционирует в качестве обычного TRV, пока давление в испарителе меньше давления газа в сжимаемом патроне. Однако, когда давление в испарителе превышает давление газа в патроне, он сжимается, термобаллон не воздействует на клапан TRV и уменьшается проход клапана TRV в испарителе, пока давление в испарителе не станет ниже давления в сжимаемом патроне. В результате этот баллон снова функционирует в качестве жесткого звена, и TRV начинает работать под действием дистанционного термобаллона.

Максимальное давление в испарителе зависит от давления газа в патроне и изменяется простой заменой патрона вентиля. Патроны выпускают на любое максимальное рабочее давление.

Работа TRV с пружинным ограничителем давления (рис. 17-11) подобна

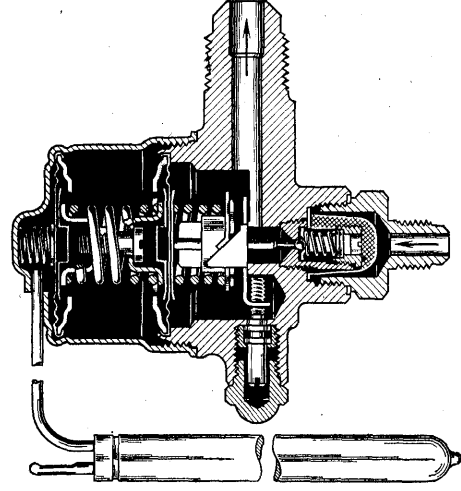


Рис. 17-11. TRV с ограничением давления пружинного типа

работе TRV со сжимаемым баллоном. Пружина функционирует в качестве упругого звена между мембраной и штоком (или толкателями) вентиля, когда давление в испарителе меньше давления пружины. Если давление в испарителе превысит давление пружины, она сжимается до соприкосновения витков, подача хладагента в испаритель уменьшается и давление в испарителе становится ниже давления пружины. Очевидно, что величина максимального рабочего давления в испарителе зависит от настройки пружины вентиля.

Ограничитель давления не только защищает двигатель компрессора от перегрузки, но и исключает возможность выброса жидкого хладагента из испарителя в компрессор при пуске. TRV не открывается до тех пор, пока давление в испарителе не снизится до максимального рабочего давления вентиля. За это время дистанционный термобаллон охлаждается всасываемым паром хладагента. В результате вентиль не открывается полностью и не подает избыточного количества хладагента в испаритель при пуске компрессора.

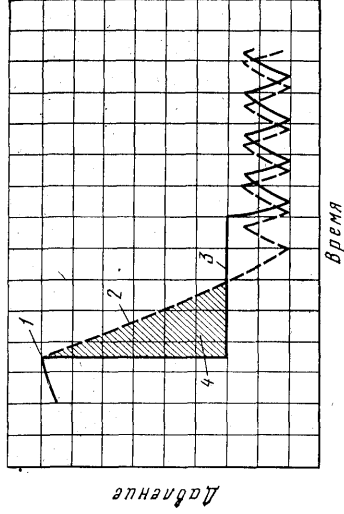


Рис. 17-12. Диаграмма сравнения работы ТРВ с газовым и жидкостным заполнением термосистемы при понижении температуры: 1 — давление на стороне всасывания после длительной остановки компрессора; 2 — вентиль с жидкостным заполнением; 3 — вентиль с газовым заполнением; 4 — зона перегрузки электродвигателя

Характеристики ТРВ с ограничением давления по сравнению с обычным терморегулирующим вентилем приведены на рис. 17-12.

ТРВ с газовым заполнением

ТРВ с газовым заполнением является прибором, ограничивающим давление в испарителе, причем его характеристика зависит от заполнения термобаллона.

Дистанционный термобаллон ТРВ с газовым заполнением, как и в случае с заполнением жидкостью, заряжен хладагентом, на котором работает установка. Однако термобаллон заполняют таким образом, чтобы в нем всегда находилось определенное количество жидкого хладагента. Зарядка термобаллона газом ограничена. При определенной заданной температуре термобаллона вся жидкость превращается в насыщенный пар. Дальнейшее повышение температуры мало влияет на давление в баллоне. Следовательно, зарядка газом дистанционного термобаллона ограничивает максимальное рабочее давление, создаваемое в испарителе. Как и при использовании ТРВ с механическим ог-

раничителем давления, ТРВ с ограничением давления в дистанционном термобаллоне лимитирует давление в испарителе. Равновесие вентили устанавливается только в том случае, когда давление в патроне p_3 равно сумме давлений в испарителе p_1 и пружины p_2 , причем последняя величина постоянная. Поэтому если давление в испарителе превышает максимальное рабочее давление вентили, то сумма давлений в испарителе и пружины всегда больше давления в баллоне и вентиль будет закрыт.

Предположим, что на рис. 17-6 показан ТРВ с газовым заполнением, максимальным рабочим давлением 300 кПа и уставкой перегрева 5°C. Зарядка хладагентом настолько ограничена, что он полностью превратится в насыщенный пар, когда температура баллона достигнет температуры насыщения, соответствующей давлению 360 кПа. Эта величина давления равна сумме максимального давления в испарителе (300 кПа) и давления пружины (60 кПа), эквивалентного 5°C перегрева. При дальнейшем повышении температуры дополнительный перегрев всасываемого пара хладагента оказывает весьма незначительное влияние на давление в баллоне, в результате чего вентиль не открывается больше.

Если давление в испарителе будет выше 300 кПа, то сумма давлений в испарителе и пружины превысит максимальное давление в баллоне, равное 360 кПа, и вентиль будет закрыт. Однако, когда давление в испарителе ниже 360 кПа, сумма давлений в испарителе и пружины меньше максимального давления в баллоне, который управляет работой вентили, нормально реагирующего на любые изменения перегрева всасываемого пара.

ТРВ с газовым заполнением обеспечивает такую же защиту компрессора от перегрузки и от выброса жидкого хладагента из испарителя, как и ТРВ с механическим ограничителем давления.

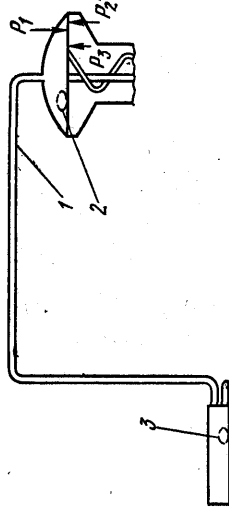


Рис. 17-13. ТРВ с газовым заполнением термосистемы (дистанционный термобаллон перестает функционировать, если газ конденсируется в точках 1 или 2; газ должен конденсироваться в дистанционном термобаллоне — точке 3)

Давление в испарителе косвенно лимитируется посредством ограниченного количества заполнителя в баллоне, и поэтому любое изменение в уставке перегрева (давления пружины) вызывает изменение максимального давления в испарителе. Давление в баллоне P_3 всегда равно давлению в испарителе P_1 . Давление пружины P_2 , повышающее уставку перегрева, снижает максимальное рабочее давление P_1 . При уменьшении уставки перегрева вентиля повышается максимальное рабочее давление в испарителе.

При монтаже ТРВ с газовым заполнением необходимо соблюдать меры предосторожности из-за ограниченной зарядки баллона. Корпус вентиля должен быть установлен в более теплом месте, чем дистанционный термобаллон, а капиллярная трубка, соединяющая дистанционный термобаллон с силовой головкой, не должна касаться более холодной поверхности, иначе заполнитель баллона сконденсируется в холодной точке. Вентиль перестает функционировать, если жидкость в дистанционном термобаллоне отсутствует (рис. 17-13). Термобаллон необходимо устанавливать таким образом, чтобы предотвратить перетекание жидкого хладагента из него в головку вентиля.

Необходимость ограничения давления объясняется тем, что многие холо-

дильные установки периодически подвержены нагрузкам вследствие снижения температуры в камере, которые значительно больше средней нагрузки системы при нормальных условиях работы. При этом давление и температура кипения хладагента в испарителе значительно выше нормального уровня, в результате чего производительность и потребляемая компрессором мощность увеличиваются, что часто приводит к перегрузке привода.

Эта проблема может быть разрешена двумя способами. Первый способ заключается в увеличении мощности привода компрессора с тем, чтобы он имел достаточный запас в период перегрузки. При использовании второго способа максимальное давление в испарителе для предотвращения избыточной нагрузки компрессора ограничивается. Оптимальность применения каждого из этих способов зависит от условий эксплуатации данной установки. Если требуется быстро снизить температуру в помещении или температуру продукта, то рекомендуется использовать первый способ. Однако увеличение мощности привода компрессора для случайной пиковой нагрузки неизбежно увеличивает начальные и эксплуатационные расходы на установку. Если не требуется быстрого снижения температуры, то более практично ограничить давление в испарителе каким-либо максимальным уровнем при нормальных условиях эксплуатации и выбрать привод меньшей мощности, что создает экономию в начальных и эксплуатационных расходах.

Для этой же цели ТРВ с ограничением давления широко используют в настоящее время и особенно в системах кондиционирования воздуха. ТРВ с ограничителем давления выбирают на максимальное рабочее давление на 35—70 кПа выше среднего давления в испарителе при нормальной нагрузке системы.

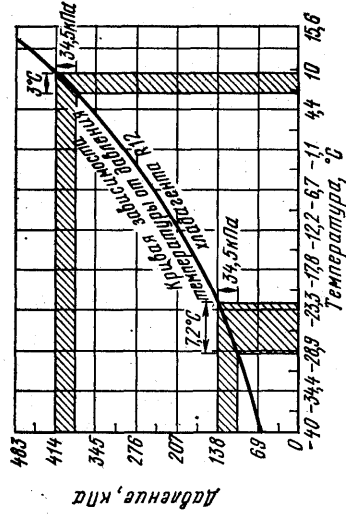


Рис. 17-14. Влияние термобаллонного диапазона работы ТРВ на поддерживаемый перепад

ТРВ с перекрестным заполнением

ТРВ с термобаллоном, заполненным хладагентом, используемым в системе, применяют в большинстве средних и высокотемпературных установок, однако в низкотемпературных машинах они работают неудовлетворительно. Причина этого становится очевидной при анализе зависимости давления от температуры любого распространенного хладагента.

На рис. 17-14 приведена кривая давления — температура для хладагента R12. Обратите внимание, что изменение давления на один градус изменения температуры значительно уменьшается при понижении температуры хладагента. Поэтому величина требуемого перегрева для заданного повышения давления в дистанционном термобаллоне намного больше при низкой температуре, чем при высокой. При температуре кипения хладагента $t_0 = 5^\circ\text{C}$ изменение температуры только на 2°C вызывает изменение давления на 25 кПа, а при $t_0 = -30^\circ\text{C}$ для изменения давления на 25 кПа требуется изменение температуры на 5°C . Очевидно, что величина перегрева всасываемого пара для ТРВ слишком велика при низкой температуре, в результате чего значительная часть поверхности испарителя становится неэффективной. Следовательно, в

низкотемпературных системах необходимо использовать ТРВ с термобаллоном, заполненным другим веществом, а не хладагентом, на котором работает установка. Температура кипения такого вещества обычно ниже температуры кипения хладагента в системе, в результате чего изменение давления в термобаллоне на один градус перегрева всасываемого пара более значительно при заданной рабочей температуре. В этих условиях вентиль функционирует при нормальной величине перегрева всасываемого пара.

ТРВ с термобаллоном, заполненным веществом, не являющимся хладагентом для данной системы, называют вентилем с перекрестным заполнением, так как кривая давление — температура среды пересекается с кривой давления — температуры хладагента. Обратите внимание, что на рис. 17-15 кривая давление — температура среды в термобаллоне (кривая В) несколько более пологая, чем кривая хладагента в системе (кривая А). При повышении давления в испарителе требуется больший перегрев всасываемого пара, чтобы установилось равновесие вентилля. Кривая С (рис. 17-15) характеризует температуру в термобаллоне, необходимую для равновесия вентилля, если пружина напорной перегрева отрегулирована на давление 25 кПа. При высокой температуре

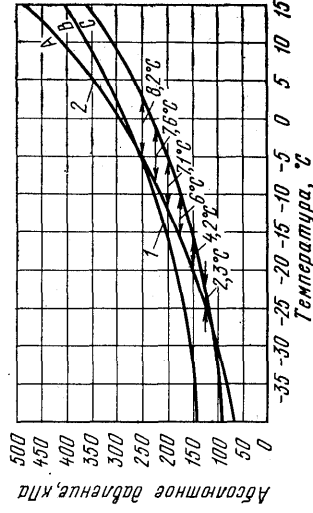


Рис. 17-15. Рабочие характеристики ТРВ с перекрестным заполнением термосистемы: 1 — кривая зависимости температуры от давления наполнителя термобаллона; 2 — кривая зависимости температуры от давления хладагента R12

кипения вентили с перекрестным заполнением работают с большим перегревом и обладают эффектом ограничения давления, что создает определенную защиту от перегрузки электродвигателя и выброса хладагента из испарителя в компрессор при пуске.

Применение ТРВ с перекрестным заполнением не ограничивается низкотемпературными системами. Их широко используют в торговом холодильном оборудовании, в котором необходимо ограничение давления, а изменение перегрева не является недостатком. Они более предпочтительны в этом оборудовании по сравнению с вентилями с газовым заполнением, так как допускают меньшие колебания давления хладагента в испарителе и потому, что расположение дистанционного термобаллона не является определяющим фактором.

ТРВ с перекрестным заполнением работает удовлетворительно только в заданном диапазоне температур, в связи с чем требуются различные виды заполнителей термобаллона для каждого из диапазонов температур.

Многоходовые ТРВ и распределители хладагента

Если в испарителе имеется более одной секции, то хладагент подается в них через распределитель. В некоторых случаях распределитель хладагента является составной частью вентилля, а иногда это отдельный узел. В любом случае важно, чтобы конструкция распределителя обеспечивала равномерное распределение парожидкостной смеси из вентилля ко всем секциям испарителя для обеспечения максимальной производительности. На рис. 17-16 показан многоходовой вентиль с распределителем хладагента. Дросселирование и распределение хладагента происходят в вентиле одновременно. При тщательном расчете проходов радиальный распределитель обеспечивает равномерное рас-

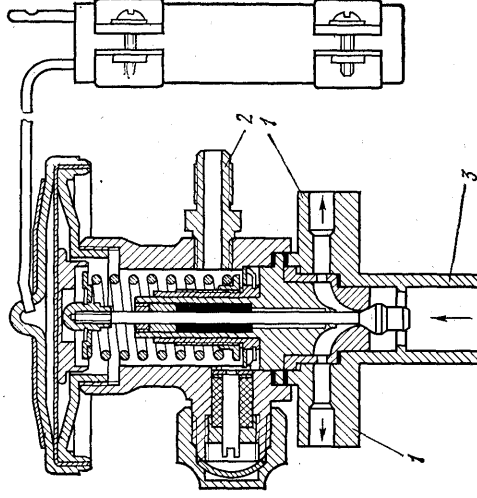


Рис. 17-16. Многоходовой ТРВ:

1 — Выходные штифты; 2 — штифты линии внешнего уравнивания; 3 — входной штифт

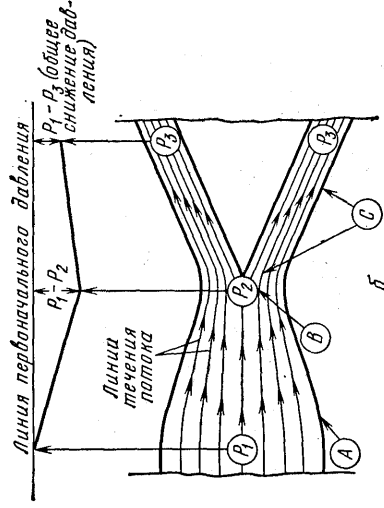
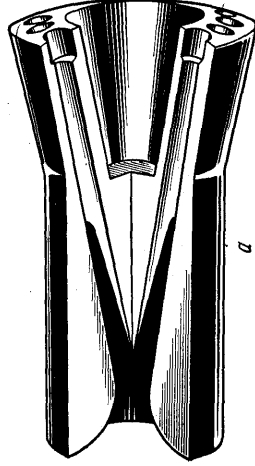


Рис. 17-17. Вихревой распределитель хладагента:

а — разрез; б — диаграмма потока хладагента; А — главное приближение к месту распределения; В — минимальная площадь узкого прохода; С — участок отклонения потока, постепенное снижение его скорости движения, незначительная турбулентность

пределение однородной смеси жидкости и пара к каждой секции испарителя.

В настоящее время широко распространение получили четыре типа распределителей хладагента: вихревой, с перепадом давления, центробежный и коллекторный. Любой из этих распределителей применяется со стандартным одноходовым ТРВ.

На рис. 17-17 представлен вихревой распределитель и характеристика потока хладагента через него. В этом типе распределителя использован принцип восстановления величины давления Вентури. От контура потока хладагента зависит равномерное распределение парожидкостной смеси к каждой секции испарителя. Распределитель обеспечивает минимальные турбулентность потока и снижение давления хладагента. При этом давление хладагента снижается только в результате трения о стенки. Распределитель может быть смонтирован в любом положении.

Распределитель, в котором снижается давление хладагента, представлен на рис. 17-18. Он состоит из корпуса, в выходном конце которого просверлены отверстия для труб, соединяющих его с испарителем. Входной конец углублен для установки фор-

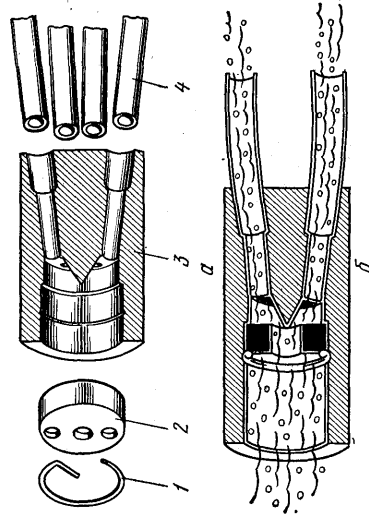


Рис. 17-18. Распределитель с перепадом давления:
а — детали: 1 — стопорное кольцо; 2 — форсунка; 3 — корпус; 4 — трубы; б — схема

сунки, закрепляемой пружинящим стопорным кольцом. Хладагент проходит через ТРВ, входит в распределитель и поступает к форсунке. В форсунке имеется отверстие определенного размера, позволяющее снизить давление. При этом скорость движения потока хладагента уменьшается, что обеспечивает перемешивание жидкости и пара, а также исключает эффект гравитации. Отверстие в форсунке направляет поток хладагента таким образом, что он ударяется в центр конуса, имеющегося в корпусе распределителя. Отверстия в выходном конце расположены вокруг основания конуса, вследствие чего смесь после конуса равномерно распределяется при входе в них. Диаметр отверстия в форсунке определяет производительность распределителя, а снижение давления предотвращает отделение пара, образовавшегося при дросселировании, от жидкости. В результате однородная смесь жидкости и пара проходит через распределитель.

На рис. 17-19 показан центробежный распределитель. Этот тип распределителя работает при высокой

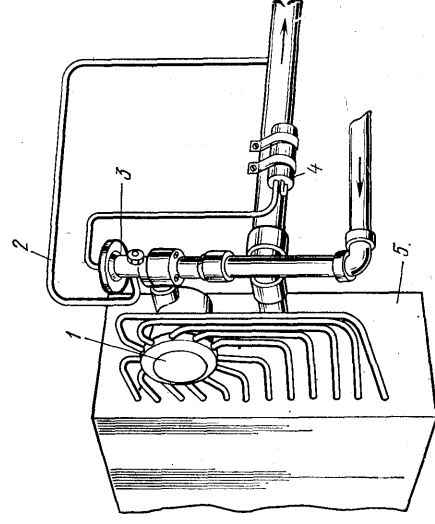


Рис. 17-19. Одноходовый ТРВ с центробежным распределителем:

1 — центробежный распределитель; 2 — линия внешнего уравнивания; 3 — ТРВ; 4 — дистанционный термобаллон; 5 — испаритель

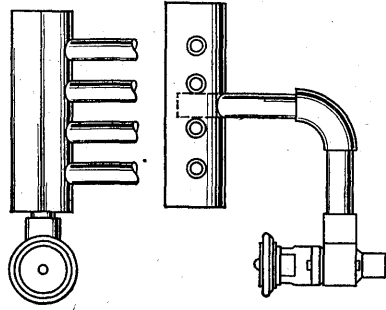


Рис. 17-20. Одноходовой TRV с коллекторным распределителем

скорости движения хладагента на входе и создает эффект завихрения в целях поддержания однородности смеси жидкости и пара, а также равномерного распределения ее по трубам испарителя,

На рис. 17-20 представлен коллекторный распределитель, который монтируют горизонтально. Он работает при низкой скорости движения хладагента на входе для его равномерного распределения по секциям испарителя. На входе в коллектор часто устанавливают шайбу, что уменьшает избыточное питание испарителя хладагентом. Колено между вентилем и входом в коллектор обычно снижает скорость движения хладагента и предотвращает его неравномерное распределение по секциям испарителя. Применение распределителей показано на рис. 17-21

Расположение TRV

Для оптимальной работы TRV должен быть смонтирован как можно ближе к испарителю. За исключением распределителя хладагента, если он применяется, не должно быть никаких препятствий между TRV и испарителем. При необходимости монтажа ручного вентиля на выходной стороне TRV

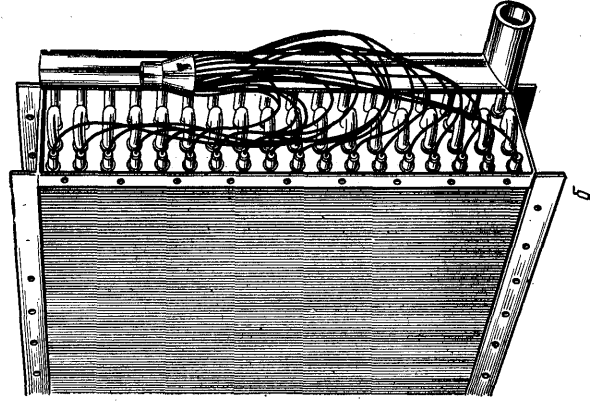
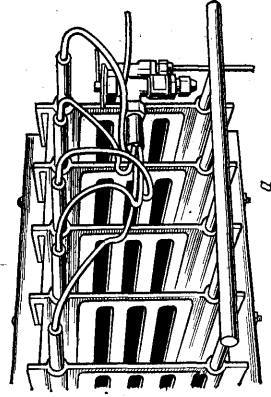


Рис. 17-21. Применение распределителей хладагента:
а — в листотрубном испарителе; б — в ребристом воздухоохладителе

его диаметр должен быть равен диаметру выходного патрубка TRV.

В TRV с жидкостным заполнением имеется достаточно жидкости для того, чтобы вентиль нормально работал при всех условиях. Поэтому TRV с жидкостным заполнением может быть смонтирован в любом положении (силовая головка направлена вверх, вниз, в сторону), внутри или снаружи охлаждаемого пространства независимо от относительной температуры корпуса са вентиля и дистанционного термо-

баллона. Однако вентиль с газовым заполнением необходимо монтировать таким образом, чтобы корпус его всегда был теплее дистанционного термобаллона, а силовая головка направлена вверх.

Когда применяют распределитель хладагента, за исключением коллекторного, ТРВ следует монтировать как можно ближе к распределителю.

Расположение дистанционного термобаллона

Производительность ТРВ в большой степени зависит от правильного расположения и монтажа дистанционного термобаллона. Когда термобаллон монтируют снаружи, а не внутри трубопровода хладагента, то он должен быть прочно закреплен металлическими скобами на горизонтальном участке всасывающего трубопровода около выхода из испарителя, предпочтительно в охлаждаемом пространстве.

Дистанционный термобаллон должен реагировать на температуру пара хладагента во всасывающем трубопроводе. Поэтому необходимо, чтобы термобаллон по всей длине имел хороший тепловой контакт со всасывающим трубопроводом. Если всасывающий трубопровод изготовлен из чугуна или стали, место монтажа термобаллона должно быть тщательно зачищено и покрашено алюминиевой краской для уменьшения возможности коррозии. Дистанционный термобаллон обычно монтируют сверху на всасывающем трубопроводе с внешним диаметром менее 20 мм. Дистанционный термобаллон монтируют на всасывающем трубопроводе с внешним диаметром 20 мм и более в нижней части под углом до 45° к горизонтальной оси трубы (рис. 17-22), что обеспечивает нормальную работу ТРВ. Однако оптимальное расположение термобаллона наилучшим образом определяют эмпирически.

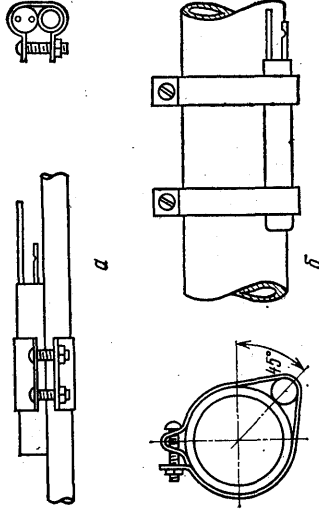


Рис. 17-22. Обычное расположение дистанционного термобаллона ТРВ:

а — термобаллон на всасывающем трубопроводе малого диаметра; *б* — термобаллон на всасывающем трубопроводе большого диаметра

Термобаллон необходимо монтировать таким образом, чтобы на него влияла только температура всасывающего трубопровода, в особенности во время нерабочей части цикла компрессора. Если температура термобаллона поднимается значительно выше температуры в испарителе во время нерабочей части цикла, то вентиль откроется и испаритель заполнится жидким хладагентом, в результате чего жидкость поступит в компрессор при его пуске. При размещении термобаллона в охлаждаемом пространстве разность температур между температурой в помещении и испарителя обычно недостаточна для отрицательного влияния на работу ТРВ. Однако когда необходимо расположить термобаллон снаружи охлаждаемого пространства, то его и всасывающий трубопровод следует хорошо изолировать от окружающей среды. Изоляция должна быть негигроскопичной и уложена по крайней мере на 300 мм по обе стороны от термобаллона.

Термобаллон следует монтировать на расстоянии до 500 мм от точки, где неизолированный всасывающий трубопровод выходит из охлаждаемого объекта. В противном случае теплый воздух, проходящий вдоль всасывающего трубопровода из наружного простран-

ства, может повысить давление в термобаллоне до такой величины, при которой вентиль откроется и жидкость заполняет испаритель во время нерабочей части цикла.

В системах кондиционирования воздуха, в которых применяют ТРВ с ограничителем давления, термобаллон может быть смонтирован как снаружи, так и внутри воздуховода, но всегда вне прямого потока воздуха. Термобаллон располагают ниже уровня жидкости в самой холодной точке бака для рассола или на водоохладителе. Если термобаллон расположен таким образом, что вентиль может открыться во время нерабочей части цикла, то на жидкостном трубопроводе монтируют электромагнитный вентиль непосредственно перед ТРВ, чтобы обеспечить перекрытие потока жидкости во время нерабочей части цикла.

Ни при каких обстоятельствах нельзя монтировать термобаллон в том месте всасывающего трубопровода, где собирается жидкость, так как это вызывает колебания в работе ТРВ. Кроме нескольких особых случаев, дистанционный термобаллон должен быть размещен на той части регенеративного теплообменника, где жидкость выпадает.

На рис. 17-23—17-25 показаны некоторые распространенные ошибки при монтаже дистанционного термобаллона, а также даны рекомендации по монтажу трубопроводов и термобаллонов. Жидкость накапливается в отделителе всасывающего трубопровода на выходе из испарителя (рис. 17-23, а), рабочий перегрев пара становится равным нулю. Вентиль начинает неправильно работать из-за попеременного опорожнения и заполнения жидким хладагентом отделителя. Если вентиль работает неравномерно, то жидкость может поступить в компрессор.

На рис. 17-24 показано место расположения термобаллона, где пред-

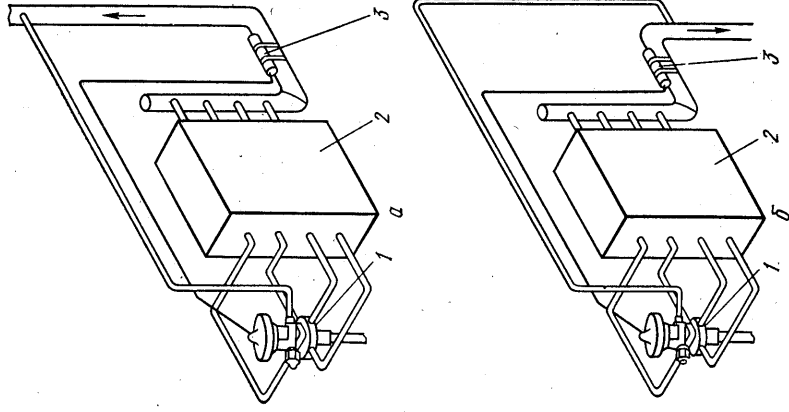


Рис. 17-23. Расположение дистанционного термобаллона:

а — на отделителе жидкости (неправильно); б — на всасывающем трубопроводе со свободным сливом жидкости (правильно); 1 — многоходовой ТРВ; 2 — испаритель; 3 — дистанционный термобаллон

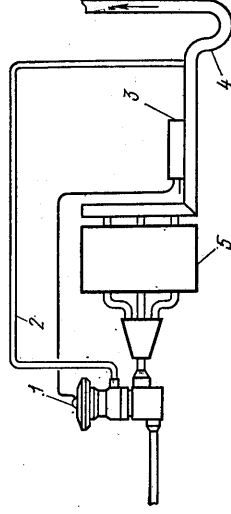


Рис. 17-24. Рекомендуемое расположение дистанционного термобаллона и всасывающего трубопровода:

1 — ТРВ; 2 — линия внешнего уравнивания; 3 — дистанционный термобаллон; 4 — отделитель жидкости; 5 — испаритель

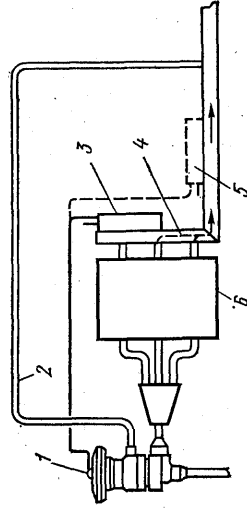


Рис. 17-25. Расположение дистанционного термобаллона на коллекторе испарителя: 1 — ТРВ; 2 — уравнивательная линия; 3 — неправильное расположение термобаллона; 4 — коллектор; 5 — правильное расположение термобаллона; 6 — испаритель

отвращается влияние отделенного масла или жидкого хладагента на работу ТРВ, когда всасывающий трубопровод смонтирован вертикально с движением хладагента вверх. Накапливающийся в отделителе жидкости (или масле) во время нерабочей части цикла не воздействует на термобаллон и испаряется, не попадая в компрессор при его пуске. Трубопроводы подобным образом часто располагают в больших установках.

На рис. 17-25 показано неправильное расположение дистанционного термобаллона на всасывающем коллекторе испарителя. При неудовлетворительной циркуляции воздуха через испаритель жидкий хладагент может проходить в некоторых секциях испарителя, не выкипая и не оказывая влияния на термобаллон, что может вызвать выброс жидкости из испарителя в компрессор. Правильное расположение термобаллона показано пунктирной линией.

Накопление жидкости во всасывающем трубопроводе в месте расположения термобаллона всегда является причиной неудовлетворительной работы ТРВ. Поэтому необходимо принять меры для того, чтобы всасывающий трубопровод у испарителя был расположен таким образом, чтобы масло и жидкость удалялись самотеком от места размещения термобаллона.

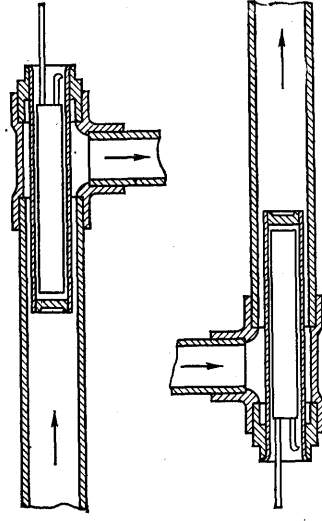


Рис. 17-26. Гильзы для дистанционного термобаллона

По возможности следует избегать монтажа термобаллона на вертикальном участке всасывающего трубопровода. Однако, если другое расположение невозможно, его следует разместить значительно выше отделителя жидкости во всасывающем трубопроводе.

В некоторых случаях целесообразно использовать гильзы, что позволяет практически разместить термобаллон во всасывающем трубопроводе (рис. 17-26). Как правило, гильзы применяют, когда требуется незначительный перегрев или когда на термобаллон может влиять внешняя теплота. Кроме того, ее желательнее использовать в очень коротком всасывающем трубопроводе или при внешнем диаметре его более 50 мм.

Расположение линии внешнего уравнивания

Внешнее уравнивание необходимо в том случае, когда перепад давления в испарителе достаточен для понижения температуры насыщения хладагента более чем на 1°C при температуре в испарителе выше -18°C или более чем на $0,5^{\circ}\text{C}$ при температуре в испарителе ниже -18°C . Естественно, что вследствие зависимости давления хладагента от температуры на максимально допустимый перепад влияет применение

мый хладагент и диапазон рабочих температур. Например, допустимый перепад давления хладагента R12 равен примерно 15 кПа при температуре кипения в испарителе 4°C, а если температура в испарителе ниже — 18°C, то допустимый перепад давления составит только 3 кПа.

Внешнее уравнивание необходимо также при использовании многоходовых TRV и распределителей хладагента независимо от перепада давления в испарителе. Оно требуется для компенсации перепада давления хладагента при движении его через распределитель.

Следует подчеркнуть, что потеря давления хладагента в распределителе не влияет на производительность или КПД установок, если правильно выбран регулирующий вентиль. В любой установке независимо от наличия или отсутствия распределителя хладагент дросселируется. В системах без распределителей дросселирование хладагента полностью происходит в вентиле. Общее снижение давления хладагента и удельная холодопроизводительность испарителя одинаковы в обоих случаях.

Однако снижение давления хладагента в испарителе уменьшает производительность и КПД установок. Следовательно, необходимо избегать по возможности повышенного перепада давления в испарителе.

Линия внешнего уравнивания присоединяется ко всасывающему трубопроводу на расстоянии 150—200 мм от термобаллона TRV ближе к компрессору. Однако в системах, в которых внешнее уравнивание предназначено для балансирования снижения давления хладагента в распределителе и перепад давления в испарителе не слишком велик, линия внешнего уравнивания может быть присоединена к одной из питающих испаритель трубок или к одному из калачей испарителя примерно в его середине. Если линия внешнего уравнивания смонтирована на

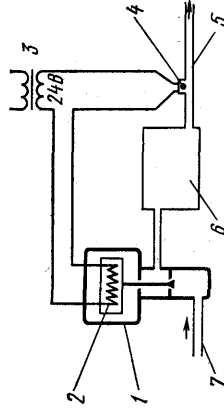


Рис. 17-27. Схема присоединения термоэлектрического регулирующего вентиля: 1 — термозлектрический регулирующий вентиль; 2 — нагреватель; 3 — трансформатор; 4 — термистор; 5 — всасывающий трубопровод; 6 — испаритель; 7 — жидкостный трубопровод

горизонтальном трубопроводе, то она должна быть присоединена сверху для предотвращения слива масла или жидкости в уравнительную трубку.

Термоэлектрический регулирующий вентиль (ТЭРВ)

Термоэлектрический регулирующий вентиль — это простой игольчатый вентиль с датчиком, который реагирует на изменение входного напряжения (рис. 17-27). При повышении напряжения вентиль открывается, а при понижении напряжения расход хладагента увеличивается, а при понижении напряжения расход хладагента уменьшается или вентиль закрывается полностью.

Для плавного регулирования работы вентиля напряжение изменяется с помощью датчиков температуры, давления или состояния хладагента. На значение вентиля может быть изменено при переключении с одного датчика на другой. Вентиль плавно регулирует подачу хладагента в зависимости от входного напряжения. Этот вентиль работает одинаково хорошо на любом хладагенте, кроме аммиака. На работу вентиля не влияет температура или давление хладагента, снижение давления в испарителе (не требуется внешнее уравнивание) и рабочий диапазон температур.

Если вентиль применяют в качестве регулятора перегрева, то небольшой термистор монтируют во всасывающем трубопроводе в потоке хладагента. Термистор соединяют последовательно (электрически) с нагревателем вентиля, в результате чего входное напряжение нагревателя становится функцией сопротивления термистора, которое в свою очередь зависит от состояния хладагента.

Термистор, находящийся в среде паровоздушного перегретого хладагента, нагревается, его сопротивление уменьшается, и подводимое напряжение к вентилю увеличивается. Вентиль реагирует на это, плавно открываясь, в результате чего увеличивается подача хладагента в испаритель. Этот процесс продолжается до тех пор, пока пар, контактирующий с термистором, не станет насыщенным. Жидкий хладагент или влажный пар охлаждают термистор, увеличивая его сопротивление и уменьшая напряжение на клеммах нагревателя, в результате чего вентиль плавно закрывается.

Время окончания кипения хладагента в испарителе зависит от места расположения датчика и может быть изменено с помощью нескольких термисторов, включающихся и выключающихся по команде. Термистор применяют также для регулирования уровня хладагента в отделителе жидкости или испарителе.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОМИНАЛЬНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ВЫБОР РЕГУЛИРУЮЩЕГО ВЕНТИЛЯ

При выборе регулирующего вентиля соответствующего размера учитывают заполнение термобаллона, необходимость ограничения давления, внешнего уравнивания, размер присоединений на входе и выходе из вентиля. Вентиль с внешним уравниванием используют в том случае, когда имеется

значительное снижение давления в испарителе или применяется распределитель хладагента. Размеры присоединений на входе и выходе из вентиля должны быть равны размерам жидкостного трубопровода и испарителя. Допустим немного меньший размер входного патрубка испарителя.

Когда указанные выше вопросы решены, то вентиль соответствующего размера выбирают по каталогу завода изготовителя.

Необходимо иметь следующие данные для выбора вентиля соответствующего размера: температуру кипения хладагента, производительность установки и разность давлений в вентиле. Первые два фактора определяют требуемый расход жидкости через вентиль, а последний — размер отверстия клапана прибора для обеспечения заданного расхода, причем подача хладагента пропорциональна разности давлений в вентиле.

Разность между давлениями нагнетания и всасывания не следует принимать в качестве разности давлений в вентиле. При использовании этих двух давлений в качестве основы для определения разности давлений в регулирующем вентиле необходимо учитывать потери давления в трубопроводах, соединяющих регулирующий вентиль и агрегат на сторонах высокого и низкого давлений установки.

Когда разность давлений в регулирующем вентиле определена, вентиль выбирают производительностью, равной или несколько выше производимости установки при расчетных рабочих условиях. ТЭРВ работают не удовлетворительно при производимости менее 50% от номинальной величины. Поэтому если нагрузка системы ниже 50% от расчетной, то применияют испаритель с двумя или большим количеством секций, причем каждая секция питается хладагентом через отдельный регулирующий вентиль. Такое устройство дает возможность от-

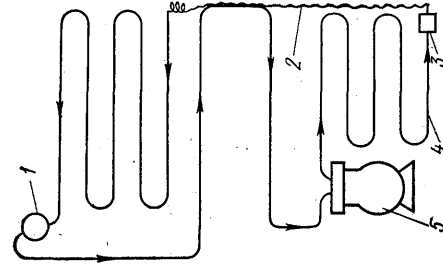


Рис. 17-28. Холодильная машина с капиллярной трубкой:

1 — отделиватель жидкостей; 2 — капиллярная трубка (закрепленная на всасывающем трубопроводе для теплообмена); 3 — фильтр; 4 — конденсатор; 5 — компрессор

ключать секции испарителя при понижении нагрузки, в результате чего производительность любого регулирующего вентиля никогда не опускается ниже 50% от расчетной.

Капиллярные трубки

Капиллярная трубка — это самый простой регулятор расхода хладагента. Капиллярную трубку небольшого диаметра и определенной длины монтируют обычно вместо жидкостного трубопровода между конденсатором и испарителем (рис. 17-28). Она ограничивает или регулирует поток жидкого хладагента из конденсатора в испаритель и поддерживает заданную рабочую разность давлений между этими двумя аппаратами вследствие высокого сопротивления из-за трения. В трубке возникает дроссельный эффект, при котором снижается давление жидкого хладагента и образуется пар.

При любых определенных длине и диаметре сопротивление трубки является постоянной величиной. Поэтому расход жидкости через трубку пропорционален разности давлений в ней, причем указанная разность — это разность между давлениями конденсации и кипения в системе.

Капиллярная трубка и компрессор соединены в системе последовательно, в связи с чем расход хладагента через трубку должен быть равен объемной производительности компрессора. Следовательно, чтобы система работала эффективно и сбалансированно при расчетных рабочих условиях расход хладагента через трубку определенной длины и диаметра при расчетных давлениях кипения и конденсации должен точно соответствовать объемной производительности компрессора при этих условиях.

Если сопротивление трубки таково, что расход хладагента больше или меньше производительности компрессора при расчетных условиях, то между ними устанавливается баланс при других рабочих условиях. Например, сопротивление трубки слишком большое (трубка слишком длинная или диаметр слишком маленький), следовательно, расход жидкого хладагента через трубку из конденсатора в испаритель будет меньше объемной производительности компрессора при расчетных условиях. В данном случае в испаритель поступает недостаточно хладагента, а избыточное количество жидкого хладагента накапливается в нижней части конденсатора около входа в капиллярную трубку. Естественно, что из-за недостаточного питания испарителя понижается давление всасывания, а следствием накопления жидкости в конденсаторе является уменьшение эффективной поверхности аппарата, а значит, и повышение температуры конденсации. Таким образом, в результате ограничения расхода хладагента через капиллярную трубку давление всасывания понижается, а давление конденсации повышается. При обоих этих условиях увеличивается расход хладагента через трубку и одновременно уменьшается производительность компрессора. Поэтому в системе установится равновесие, когда производительность трубки и производи-

тельность компрессора станут одинаковыми. В данном случае баланс наступит при более низком давлении всасывания и более высоком давлении конденсации по сравнению с расчетными давлениями в системе. Производительность компрессора при этом понижается, и поэтому общая производительность системы становится меньше расчетной величины.

Однако если сопротивление в трубке недостаточное (трубка слишком короткая или диаметр слишком большой), то расход хладагента через трубку превышает объемную производительность компрессора, в результате чего происходит избыточное питание испарителя хладагентом с вероянностью выброса жидкости в компрессор. Кроме того, в конденсаторе не образуется гидравлического затвора около входа в трубку и пар проходит в трубку вместе с жидкостью. Очевидно, что поступление теплого пара в испаритель понижает производительность системы. Кроме того, компрессор не может снизить давление в испарителе до заданного уровня из-за повышенного расхода хладагента через трубку.

КПД машины с капиллярной трубкой максимальный, если только условия работы стабильные. Необходимо подчеркнуть, что при работе машины с капиллярной трубкой происходит саморегулирование подачи хладагента до определенной величины, и она удовлетворительно функционирует в определенном диапазоне рабочих условий, если ее конструкция и применение соответствуют требуемым условиям. Уменьшение или увеличение нагрузки на систему в нормальных условиях вызывает изменение расхода хладагента через капиллярную трубку. Это происходит вследствие изменения давления конденсации и величины переохлаждения жидкости в конденсаторе. Например, при увеличении нагрузки на испаритель жидкий хладагент в нем выпкипает и пар сжижается в конден-

саторе интенсивнее, чем подается через трубку в испаритель. В результате жидкость накапливается в конце конденсатора. Одновременно жидкость в конце конденсатора подвергается большему переохлаждению, и поэтому меньше пара образуется при дросселировании в капиллярной трубке. Следовательно, расход хладагента через трубку увеличивается, и производительность установки уравнивается с возросшей нагрузкой на систему. И наоборот, при уменьшении нагрузки на систему давление конденсации и переохлаждение жидкого хладагента уменьшаются, в результате чего понижается его расход через трубку.

Капиллярная трубка отличается от других регуляторов расхода хладагента тем, что она не перекрывает и не останавливает поток хладагента к испарителю во время нерабочей части цикла. Когда компрессор выключается, давления всасывания и нагнетания уравниваются через открытую капиллярную трубку и остаточная жидкость из конденсатора перетекает в испаритель, где более низкое давление, и остается в нем до включения компрессора. По этой причине величина зарядки установки с капиллярной трубкой хладагентом имеет очень важное значение. Между конденсатором и капиллярной трубкой ресивер не устанавливают, и поэтому зарядка хладагентом должна быть минимальной, но достаточной только для заполнения испарителя и создания гидравлического затвора в конденсаторе (на входе в капиллярную трубку) в конце рабочего цикла. Любое избыточное количество хладагента, поступающее в конденсатор, повышает давление конденсации, которое в свою очередь понижает КПД системы и создает в ней дисбаланс, так как расход хладагента через трубку повышается. Если избыток хладагента достаточно велик, то может произойти перегрузка привода компрессора. Однако более важно то, что весь избы-

ток хладагента из конденсатора перетекает в испаритель во время нерабочей части цикла, быстро его нагревает. В результате или оттаивает испаритель, или компрессор работает короткими циклами. Кроме того, если в испаритель поступает значительное количество жидкости во время нерабочей части цикла, то может произойти выброс жидкости из испарителя в компрессор при пуске последнего.

Капиллярная трубка имеет простую конструкцию и низкую стоимость. Ее дополнительное преимущество заключается в том, что обеспечивается определенное упрощение холодильной системы. Это также влияет на снижение стоимости ее изготовления. Давления хладагента уравниваются через капиллярную трубку во время нерабочей части цикла, и компрессор включается в разгруженном состоянии, что дает возможность для привода компрессора применять электродвигатель с низким пусковым моментом. Кроме того, небольшая дозированная зарядка хладагентом при использовании капиллярной трубки исключает необходимость установки ресивера. Естественно, что в результате достигается значительная экономия стоимости изготовления. Капиллярные трубки используют почти во всех бытовых холодильных агрегатах, например в домашних холодильниках и морозильниках, а также в небольших агрегированных машинах торгового холодильного оборудования и в агрегированных кондиционерах.

Капиллярную трубку следует использовать только в системах, которые специально сконструированы для их применения. Она позволяет получить оптимальные результаты в агрегированной машине с герметичным компрессором, нагрузка на которую относительно постоянна. Капиллярная трубка не применяется в машине с сальниковым компрессором, так как при дозированной (без запаса) зарядке хлад-

агентом его утечка через сальник вала компрессора приводит к быстрому выходу из строя машины. Необходимо избегать применение капиллярной трубки, если компрессор расположен на некотором расстоянии от испарителя, так как очень трудно обеспечить точную зарядку таких систем хладагентом. Кроме того, длинные жидкостные и всасывающие трубопроводы требуют большой зарядки хладагентом, который затем накапливается в испарителе во время нерабочей части цикла. Значительный выброс хладагента из испарителя в компрессор может произойти при пуске последнего, если не установить соответствующий отделитель жидкости на всасывающем трубопроводе.

Диаметр труб конденсатора должен быть минимальным, чтобы небольшое количество накопившейся в конденсаторе жидкости создавало повышение давления конденсации и, следовательно, максимальный расход хладагента через трубку.

В испарителе, предназначенном для работы с капиллярной трубкой, должен накапливаться жидкий хладагент на выходе из него для предотвращения выброса жидкости в компрессор при пуске. Это обеспечивает отделитель жидкости (см. рис. 17-28). Избыток жидкого хладагента выкипает в нем и поступает в компрессор в виде пара. Для ускорения возврата масла в картер компрессора жидкость из испарителя обычно подается в отделитель снизу, а пар отсасывается компрессором сверху.

В большинстве случаев оптимальный режим работы обеспечивается при соединении конденсатора и испарителя капиллярной трубкой без промежуточного жидкостного трубопровода. Если конденсатор и испаритель расположены далеко друг от друга, то применяют другой тип регулятора подачи хладагента. Обычно капиллярную трубку припаивают ко всасываю-

щему трубопроводу для обеспечения теплопередачи между ними и уменьшения (до минимума) образования пара в трубке при дросселировании. Пар, образуемый в трубке из-за понижения давления жидкости, в значительной степени уменьшает расход хладагента через нее. Если трубка не припаяна к всасывающему трубопроводу, то она должна быть короче.

Регулирование подачи хладагента в затопленный испаритель

Для питания испарителей хладагентом обычно применяют поплавковые регуляторы расхода хладагента. В регуляторе имеется поплавок (полый металлический шар, цилиндр), который реагирует на уровень жидкого хладагента и открывает или закрывает клапан для впуска большего или меньшего количества хладагента в испаритель в соответствии с изменением уровня жидкости в поплаковой камере. Поплаковая камера может быть расположена как на стороне низкого, так и на стороне высокого давления системы. Если камера расположена на стороне низкого давления системы, то регулятор называется поплачковым регулятором низкого давления, а если на стороне высокого давления, то поплачковым регулятором высокого давления.

Основное преимущество затопленного испарителя заключается в более высокой холодопроизводительности по сравнению с другими испарителями. При работе хладагент, заполняющий испаритель, находится в основном в жидком состоянии, что обеспечивает более высокий коэффициент теплоотдачи в трубах со стороны хладагента, чем в змеевиковом испарителе, в котором большая часть хладагента находится в парообразном состоянии, в особенности в конце аппарата. По этой причине поплачковый регулятор ши-

роко используются в больших установках с затопленным испарителем для охлаждения жидкости. Поплачковый регулятор редко применяют в больших установках. Вместо него используют более универсальный ТРВ, имеющий меньшие размеры, или более простую и экономичную капиллярную трубку.

Поплачковый регулятор низкого давления

Поплачковый регулятор низкого давления поддерживает постоянный уровень жидкости в испарителе, регулируя подачу жидкого хладагента в аппарат. Регулятор реагирует только на уровень жидкости в испарителе и заполняет аппарат жидким хладагентом до заданного уровня при любой нагрузке независимо от температуры и давления.

Поплачковый регулятор может работать непрерывно или циклами. При непрерывной работе регулятор дросселирует хладагент и плавно открывается или закрывается (не полностью), подавая большее или меньшее количество жидкости в испаритель при изменении ее уровня. Работая прерывисто, регулятор реагирует только на минимальный и максимальный уровни жидкости. Он открывается или закрывается полностью под действием встроенного рычажного устройства.

Поплавок может быть установлен непосредственно в испарителе или отделителе жидкости, в которых он регулирует уровень жидкости (см. рис. 11-19, б), или снаружи этих аппаратов в отдельной поплаковой камере (рис. 17-29).

В установках большой холодопроизводительности обычно монтируют байпасную линию с ручным регулирующим вентилем вокруг поплакового регулятора для поддержания процесса производства холода в случае его отказа. Кроме того, ручные запорные

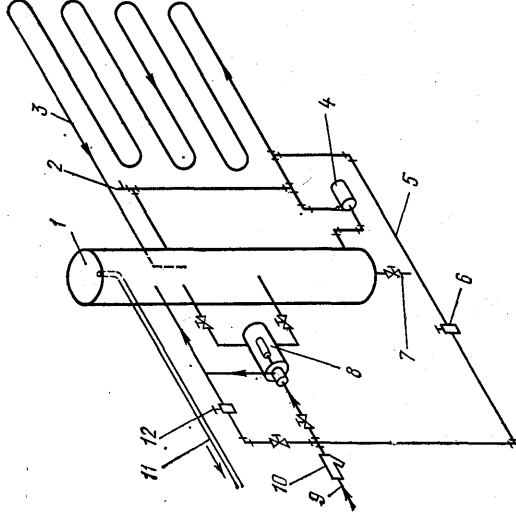


Рис. 17-29. Поплавковый регулятор низкого давления для регулирования уровня хладагента в отделителе жидкости (жидкостный насос применяется для циркуляции хладагента через испаритель):

1 — отделитель жидкости; 2 — предохранительный клапан; 3 — испаритель; 4 — насос; 5 — байпасная линия; 6, 12 — ручные регулирующие вентили; 7 — вентиль спуска масла; 8 — поплавок; 9 — жидкостная линия; 10 — фильтр; 11 — всасывающая линия

вентили в основном монтируют на обеих сторонах поплавкового регулятора, чтобы можно было его изолировать в целях обслуживания без спуска всего хладагента из испарителя. Обратите внимание (см. рис. 17-29), что жидкостный насос предназначен для принудительной циркуляции хладагента через трубы испарителя. Интересно

сравнить этот способ рециркуляции с инжекторным способом (рис. 17-30) и способом движения самотексом (см. рис. 11-19, б). Ручной регулирующий вентиль на байпасной линии вокруг жидкостного насоса (см. рис. 17-29) обеспечивает производство холода в случае отказа насоса.

В холодильных системах можно применять одновременно несколько поплавковых регуляторов низкого давления или вместе с ТРВ. Во многих случаях один поплавок регулятор используют для подачи жидкости в несколько отдельных испарителей.

Поплавковый регулятор высокого давления

Поплавковый регулятор высокого давления, как и поплавок регулятор низкого давления, — это прибор для подачи хладагента. Он срабатывает в зависимости от уровня жидкости и регулирует поток жидкости к испарителю в соответствии с интенсивностью парообразования. Однако поплавок регулятор низкого давления непосредственно регулирует уровень жидкости в испарителе, а поплавок регулятор высокого давления, расположенный на стороне высокого давления системы, регулирует количество жидкости в испарителе косвенно, посредством поддержания постоянного уровня жидкости в своей камере (рис. 17-31).

Принцип работы поплавкового регулятора высокого давления относитель-

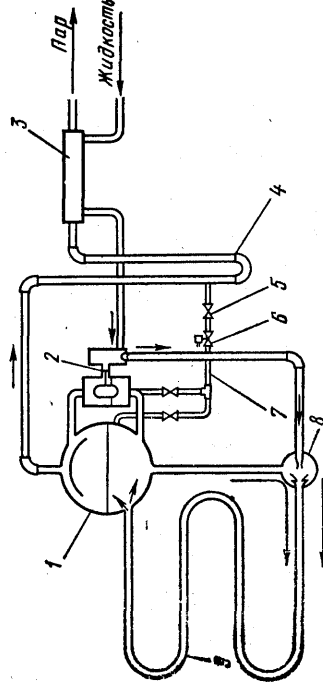


Рис. 17-30. Затопленный испаритель с инжекционной рециркуляцией хладагента:

1 — уравнивательный бак; 2 — поплавок; 3 — регулятор низкого давления; 4 — теплообменник; 5 — отделитель (для обеспечения возврата смеси хладагента с маслом во всасывающий трубопровод); 6 — дозирующий вентиль; 7 — электромагнитный клапан (открыт только при работе компрессора); 8 — линия возврата масла; 9 — инжектор; 10 — испаритель

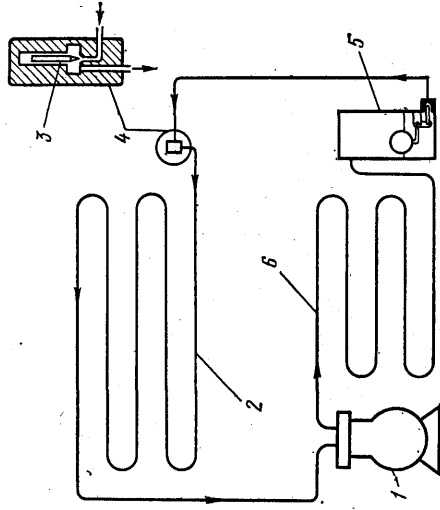


Рис. 17-31. Поплавковый регулятор высокого давления:

1 — компрессор; 2 — испаритель; 3 — игла; 4 — промежуточный (редукционный) вентиль; 5 — поплавок; 6 — конденсатор

тельно прост. Жидкость из конденсатора перетекает в поплавковую камеру и повышается в ней уровень хладагента, и шаровой поплавок поднимается, и клапан регулятора открывается. Соответственно количество жидкости вытекает из поплавковой камеры для пополнения испарителя. Пар конденсируется в конденсаторе с той же интенсивностью, с которой он образуется в испарителе. Поэтому поплавковый регулятор высокого давления непрерывно автоматически подает жидкость в испаритель в количестве, соответствующем с количеством образующего пара, независимо от нагрузки системы. Когда компрессор останавливается, уровень жидкости в поплавковой камере понижается, регулятор закрывается и остается в таком положении до пуска компрессора.

При использовании регулятора основная масса хладагента находится в испарителе, а незначительное количество хладагента — на стороне высокого давления системы. Поэтому величина зарядки хладагентом является важным условием.

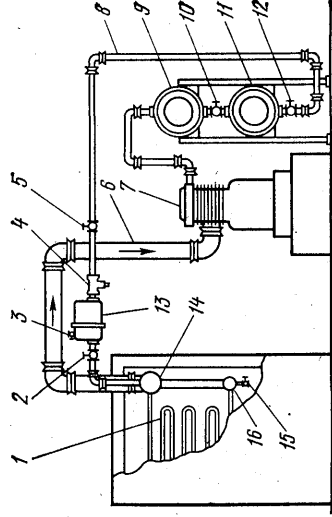


Рис. 17-32. Типичное применение поплавкового регулятора высокого давления:

1 — испаритель погружного типа; 2, 3, 5, 10, 12 — вентили; 4 — фильтр; 6 — всасывающий трубопровод; 7 — компрессор; 8 — жидкостный трубопровод; 9 — конденсатор; 11 — ресивер; 13 — поплавковый регулятор высокого давления; 14 — отделитель жидкости; 15 — вентиль спуска масла; 16 — жидкостный коллектор

Избыток хладагента приводит к тому, что регулятор подает слишком много хладагента в испаритель и жидкий хладагент поступает в компрессор. Кроме того, если в системе большой избыток хладагента, то в поплавковом регуляторе жидкость дросселируется до более высокого давления и компрессор не может снизить давление в испарителе до заданного уровня. Если в системе недостаточно хладагента, то работа поплавка становится неустойчивой и в испаритель не будет поступать достаточное количество хладагента.

Поплавковый регулятор высокого давления может обслуживать змеевиковый испаритель (см. рис. 17-31) или затопленный испаритель (рис. 17-32). В последнем случае жидкий хладагент поступает в отделитель жидкости (ресивер низкого давления), откуда через трубу в дне течет в испаритель. Пар отводится из отделителя жидкости сверху, так же как и пар, появляющийся при дросселировании жидкости, проходящей через поплавковый регулятор. Для предотвращения выброса жидкости из испарителя при изменении нагрузки

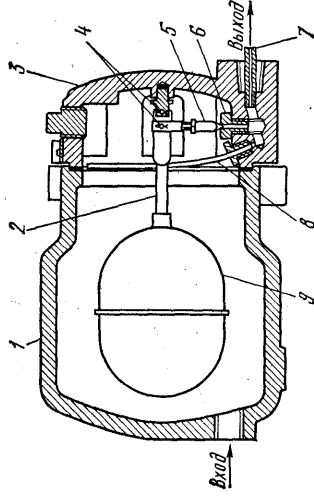


Рис. 17-33. Поплавковый регулятор высокого давления:

1 — корпус; 2 — рычаг поплавка; 3 — крышка; 4 — шарнир; 5 — игла клапана; 6 — седло клапана; 7 — дроссельная трубка; 8 — выпускная трубка; 9 — шаровой поплавок

отделитель жидкости должен иметь объем, равный по крайней мере 25% от объема испарителя.

На рис. 17-33 показана конструкция типичного поплавкового регулятора высокого давления. Обратите внимание, что регулятор открывается при повышении уровня жидкости в его корпусе. Конструкция иглы и шарнира поплавкового рычага такова, что под действием массы шарообразного поплавка игла регулятора перемещается вниз при понижении уровня хладагента в поплавковой камере. Шарообразный поплавок расположен таким образом, что седло регулятора всегда погружено в жидкий хладагент. Это предотвращает возможность прохода пара через клапан. В регуляторе имеется выпускная трубка для удаления неконденсирующихся газов, которые при накоплении в корпусе могут повысить давление и перекрыть поступление жидкости в регулятор. Применение выпускной трубки позволяет монтировать регулятор выше и ниже конденсатора, и он может работать при любом уровне жидкости в камере.

Однако его следует устанавливать возможно ближе к испарителю и всегда на горизонтальном трубопроводе для свободного перемещения шарового поплавка и функционирования всего регулятора. Когда поплавок расположен на некотором расстоянии от испарителя, то необходимо обеспечить поддержание высокого давления жидкости в трубопроводе между регуля-

тором и испарителем для предотвращения дросселирования жидкости перед испарителем. В малых системах это осуществляют посредством монтажа промежуточного вентиля на жидкостном трубопроводе около входа в испаритель. В больших установках для этой цели обычно применяют управляющий вентиль (см. с. 373—375).

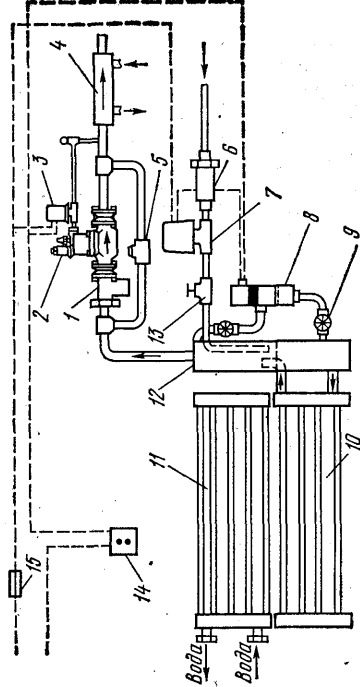
Нельзя использовать одновременно несколько поплавковых регуляторов высокого давления, а также параллельно с другими типами регуляторов расхода хладагента.

Поплавковое реле уровня

Для регулирования уровня жидкости в испарителе можно применить поплавковое реле уровня (рис. 17-34). Поплавковое реле уровня состоит из поплавковой камеры с шарообразным поплавком, поднимающимся и опускающимся при изменении уровня жидкости как в испарителе, так и в самой камере, а также из ртутного реле, которое под действием шарообразного поплавка включает или отключает электромагнитный вентиль на жидкостном трубопроводе при соответствующем понижении или повышении уровня жидкости в испарителе. На жидкостном трубопроводе между электромагнитным вентилем и испарителем монтируют ручную регулирующий вентиль для дросселирования жидкого хладагента и предотвращения помпажа в испарителе вследствие внезапного

Рис. 17-34. Схема автоматизации оросительного охладителя:

1 — фильтр; 2 — регулятор давления в испарителе; 3 — пилотный электромагнитный вентиль; 4 — теплообменник; 5 — предохранительный клапан; 6 — фильтр; 7 — электромагнитный вентиль; 8 — поплавковое реле уровня; 9 — шаровой вентиль; 10 — секция охладителя, охлаждаемая хладагентом; 11 — секция охладителя, охлаждаемая водой; 12 — отсекатель жидкости; 13 — ручной регулирующий вентиль; 14 — пусковая кнопка; 15 — плавкий предохранитель



впуска жидкости при открытии электромагнитного вентиля на жидкостном трубопроводе, а также во избежание его работы короткими циклами.

Поплавковое реле уровня может осуществлять и обратное действие (закрывается при повышении уровня).

Регулирование уровня жидкости с помощью ТРВ

ТРВ с температурным преобразователем применяются для регулирования уровня жидкости в затопленных ис-

парителях. На рис. 17-35 показан такой ТРВ, смонтированный на вертикальном охладителе жидкости.

Температурный преобразователь содержит термобаллон, в который встроены электронагревательный элемент малой мощности (примерно 15 Вт). Термобаллон заключен в кожух. Электронагревательный элемент создает искусственный перегрев, вследствие чего давление в термобаллоне увеличивается, открывается регулирующий вентиль, и больше хладагента подается в испаритель. Когда уровень жидкости в испарителе повышается и большее количество жидкости входит в контакт с термобаллоном, то воздействие электронагревательного элемента прекращается и перегрев уменьшается. ТРВ уменьшает подачу хладагента до восстановления прежнего уровня или закрывается.

ТРВ может подавать жидкость непосредственно в испаритель, отделитель жидкости или в коллектор змеевикового испарителя.

Регулирующие вентили с управляющим устройством

Регулирующие вентили с управляющим устройством (пилотом) применяются в установках большой холодопроизводительности. Управляющими устройствами, приводящими в действие регулятор подачи жидкости, служат

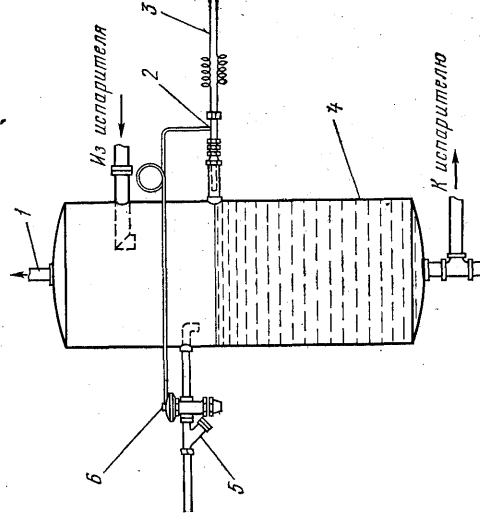


Рис. 17-35. ТРВ в качестве регулятора уровня жидкости:

1 — всасывающий трубопровод; 2 — встроены термобаллон ТРВ; 3 — электрический привод; 4 — отсекатель жидкости; 5 — фильтр; 6 — ТРВ

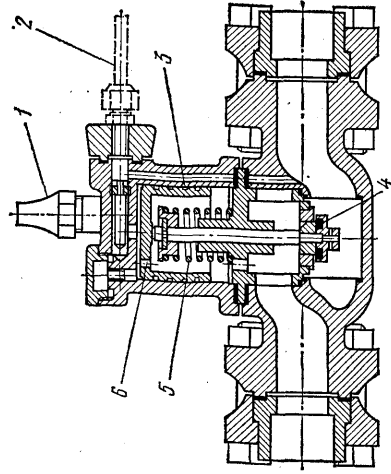


Рис. 17-36. Исполнительное устройство дроссельного пилотного регулятора давления 1 — ручная шток; 2 — пилотная линия; 3 — главный поршень; 4 — клапан; 5 — пружина; 6 — пусковое отверстие

обычно TRV, поплавковый регулятор низкого или высокого давления. Регулятор подачи, сконструированный для работы с TRV, показан на рис. 17-36. Регулятор подачи жидкости открывается, когда давление подводится к поршню через управляющий трубопровод и через небольшое выпускное отверстие на днище поршня — к выходной стороне регулятора. Когда воздействие давления на поршень прекращается, пружина закрывает регулятор подачи жидкости.

На рис. 17-37 показана схема присоединения TRV (в качестве управляющего устройства) к кожухотрубному

испарителю. При изменении температуры и давления всасываемого пара с помощью TRV с внешним уравниванием давление действует на поршень регулятора. Когда перегрев всасываемого пара повышается, TRV открывается, давление, действующее на поршень, возрастает и он перемещается вниз, в результате чего увеличивается подача хладагента. И наоборот, когда перегрев всасываемого пара уменьшается, что указывает на необходимость снижения потока хладагента, TRV закрывается. Давление на поршень снижается, он поднимается и подача хладагента уменьшается. TRV и поршень регулятора занимают в процессе работы одно из промежуточных положений в зависимости от нагрузки.

На рис. 17-38 показан регулятор подачи хладагента, сконструированный для работы с поплавковым регулятором высокого давления в качестве управляющего устройства. Установка, содержащая этот тип регулятора расхода, показана на рис. 17-39. Работа управляющего устройства в виде поплавкового регулятора высокого давления подобна работе управляющего устройства на базе TRV. При повышении уровня жидкости в управляющем ресивере поплавок открывается и жидкость высокого давления поступает к поршню регулятора подачи жидкости. Это давление действует на пружину и откры-

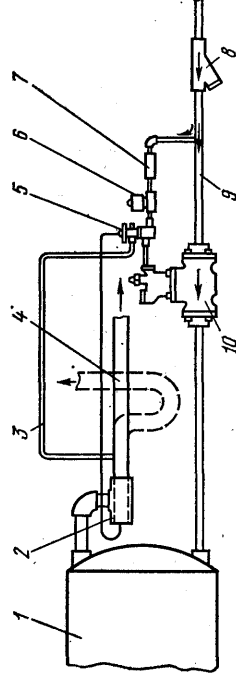


Рис. 17-37. Схема питания испарителя хладагента с помощью дроссельного пилотного регулятора температуры:

1 — кожухотрубный испаритель; 2 — гильза дистанционного термобаллона; 3 — линия внешнего уравнивания; 4 — всасывающий трубопровод; 5 — TRV (пилот); 6 — электромагнитный вентиль (пилот); 7 — фильтр на пилотной линии; 8 — фильтр на главном трубопроводе; 9 — жидкостный трубопровод; 10 — исполнительный механизм дроссельного пилотного регулятора температуры

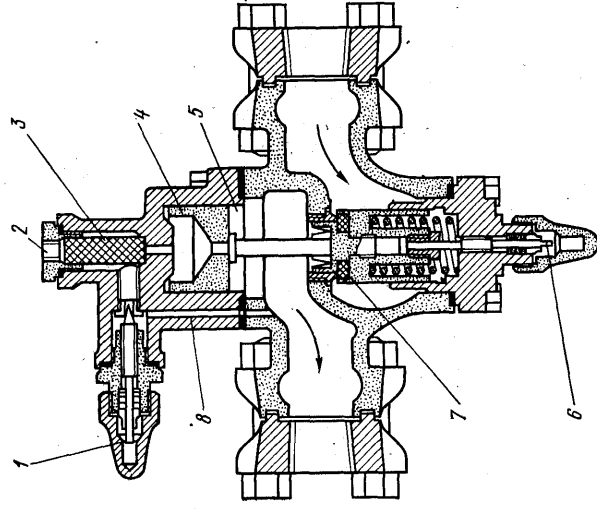


Рис. 17-38. Исполнительный механизм дросельного регулятора давления «До себя».

1 — шток переноски; 2 — штуцер для присоединения пилотной линии; 3 — сетка фильтра; 4 — поршень; 5 — цилиндр; 6 — шток ручного управления; 7 — клапан; 8 — перепускное отверстие

вает шток для подачи жидкости в испаритель. При понижении уровня в управляющем ресивере регулятор закрывается.

Регулятор подачи жидкости, сконструированный для работы с поплавковым реле низкого давления, представлен на рис. 17-40. Типичный пример применения регулятора низкого давления показан на рис. 17-41. При понижении уровня жидкости в испарителе поплавок реле низкого давления включает электромагнитный вентиль и управляющая линия соединяется с испарителем. Давление над поршнем регулятора снижается. Жидкость высокого давления, действующая снизу на поршень регулятора подачи жидкости, поднимает его, и в испаритель поступает хладагент. При повышении уровня жидкости в испарителе с помощью управляющего поплавкового

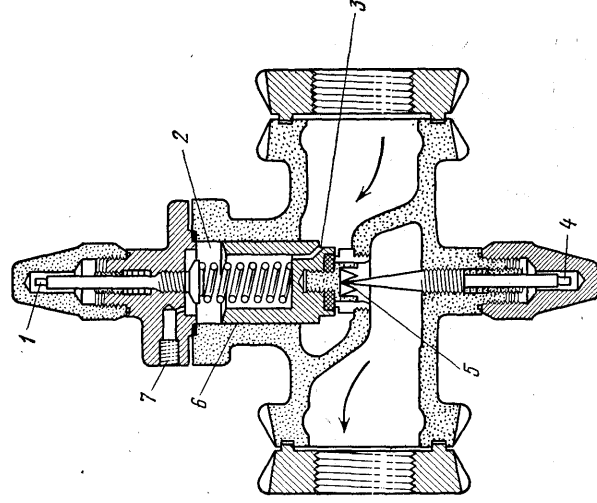


Рис. 17-40. Исполнительный механизм дросельного регулятора «После себя»:

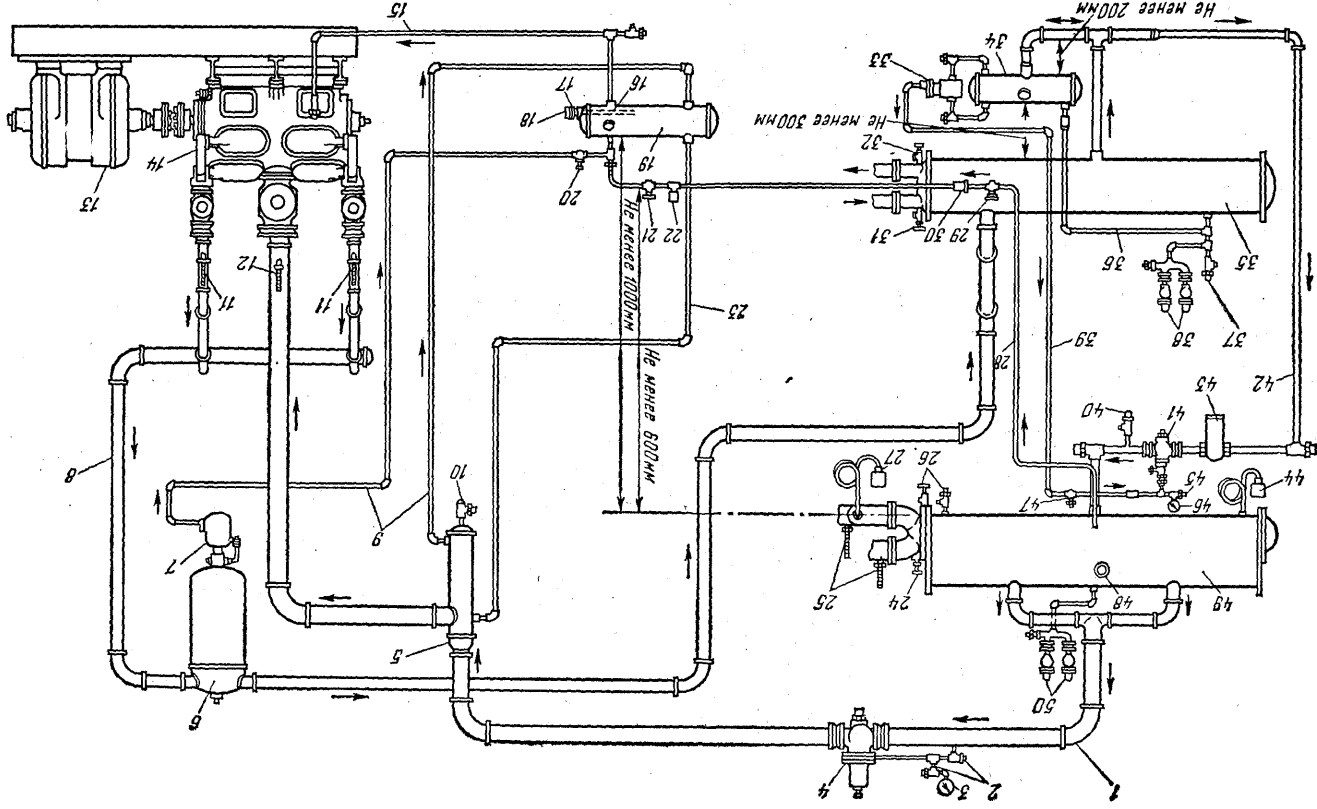
1 — шток регулирования натяжения пружины; 2 — цилиндр; 3 — перепускное отверстие; 4 — ручная шток; 5 — клапан; 6 — поршень; 7 — отверстие для присоединения пилотной линии

реле закрывается электромагнитный вентиль и хладагент высокого давления перепускается в зону над поршнем через отверстие в его нижнем торце. Под действием высокого давления поршень направляется вниз, в результате чего закрывается регулятор. Сечение отверстия не регулируется, но плавное управление обеспечивается посредством пружины.

Электромагнитные вентили

Электромагнитные вентили широко используют на трубопроводах подачи хладагента, воды и рассола вместо ручных запорных вентилях. Некоторые функции этих вентилях описаны в соответствующих главах данной книги. Электромагнитный вентиль состоит из катушки с изолированным медным проводом и железным сердечником, или

Рис. 17-39. Холодильная установка с дроссельным пилотным регулятором давления «До себя»:



1 — всасывающий трубопровод; 2 — вентиль; 3, 46 — манометры; 4 — регулятор давления всасывания; 5 — маслоотделитель на линии всасывания; 6 — маслоотделитель на линии нагнетания; 7 — подплавковая камера; 8 — нагнетательный трубопровод; 9 — линия слива масла; 10, 32 — сухие вентили; 11, 12, 25 — термометры; 13 — электродвигатель; 14 — компрессор; 15 — линия возврата масла в картер компрессора; 16 — нагреватель; 17, 27, 44 — термореле; 18 — сигнальная лампа; 19 — ресивер масла; 20, 29, 46, 47 — запорные вентили; 21 — илтоуач-ный вентиль; 22 — электромеханический вентиль; 23 — паровая уравнительная линия; 24, 31 — вентили выпуска воздуха; 26 — сухие вентили; 28 — сухая линия испарителя; 30, 43 — фильтры; 33 — пилот подплавкового типа дроссельного регулятора давления; 34 — пилотный ресивер; 35 — конденсатор; 36 — уравнительная линия высокого давления; 37 — продувочный вентиль; 38, 50 — предохранительные клапаны; 39 — пилотная линия; 40 — запорный вентиль; 41 — испонителный механизм дроссельного пилотного регулятора давления; 42 — жидкост-ный трубопровод; 48 — смотровое стекло; 49 — испаритель

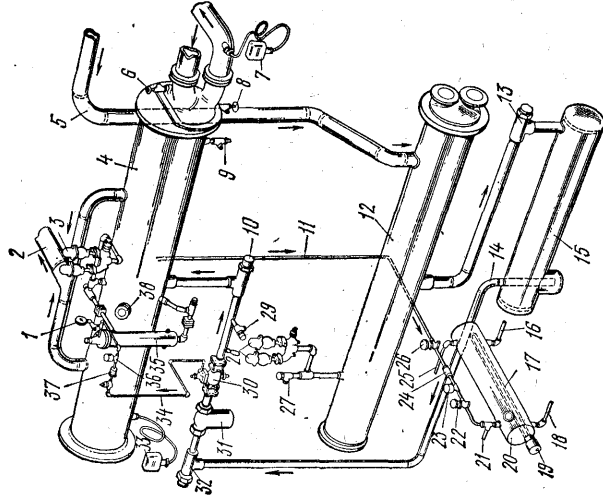


Рис. 17-41. Холодная установка с дроссельным пилотным регулятором давления «После себя»:

1 — манометр; 2 — всасывающий трубопровод; 3, 28 — предохранительные клапаны; 4 — испаритель; 5 — нагретый трубопровод; 6 — вентиль выпуска воздуха; 7 — термореле (хладосистема); 8, 9 — сухие вентили; 10, 13, 32 — жидкостные вентили; 11, 16, 21 — линии поступления масла; 12 — конденсатор; 14 — жидкостный трубопровод; 15 — линия ресивера; 17 — нагретый масло; 18 — линия возврата масла в картер компрессора; 19 — термореле нагретого масла; 20 — ресивер масла; 22 — игольчатый вентиль; 23, 36 — электромагнитные вентили; 24, 31, 37 — фильтры; 25 — уравнительная линия; 26 — запорный вентиль; 27 — продувочный вентиль; 29 — зарядный вентиль; 30 — исполнительный механизм дроссельного пилотного регулятора давления «После себя»; 33 — термореле (хладанта); 34 — пилотная линия; 35 — пилот ползкового типа дроссельного регулятора давления «После себя»; 38 — смотровое стекло

якорем (называемым иногда плунжером), который втягивается под действием магнитного поля в катушку при подаче напряжения. Шток с иглой вентилля, прикрепленный к якорю, открывает и закрывает клапан вентилля при включении и выключении катушки.

Электромагнитные вентили бывают двух основных типов: прямого действия и непрямого действия с управляющим устройством. Небольшие электромагнитные вентили обычно прямого действия (рис. 17-42), а боль-

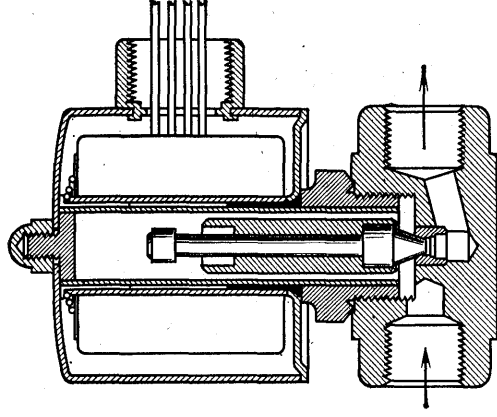


Рис. 17-42. Электромагнитный вентиль прямого действия

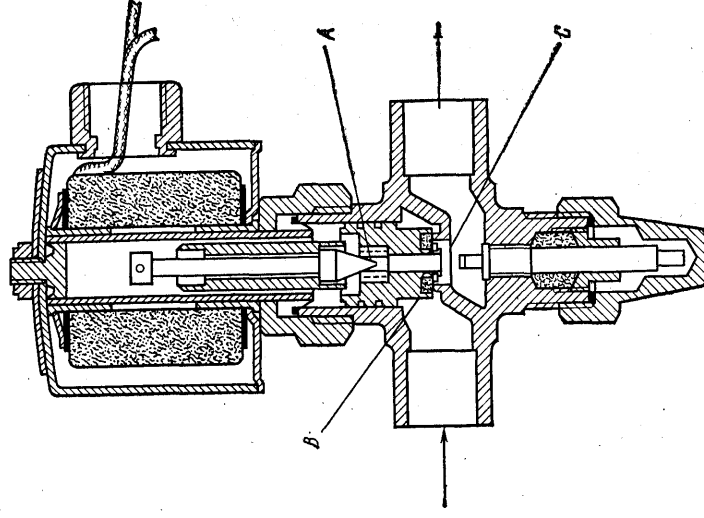


Рис. 17-43. Электромагнитный вентиль непрямого действия

шие вентили имеют управляющее устройство (рис. 17-43). В вентиле прямого действия шток, закрепленный на якоре, непосредственно воздействует на главный клапан вентиля. В вентиле с управляющим устройством якорь является частью управляющего клапана, а не главного. При подводе напряжения якорь втягивается в катушку и управляющий клапан открывается. Отверстие в главном поршне соединяет полость над ним с выходным патрубком вентиля. Под действием создавшейся разности давлений поршень перемещается вверх, главный клапан вентиля открывается. Когда катушка обесточивается, якорь выходит из катушки и управляющий клапан закрывается. Давление над главным поршнем начинает повышаться, поршень опускается и закрывает главный клапан вентиля.

Электромагнитный вентиль всегда монтируют в вертикальном положении с расположением катушки вверх, кроме случаев, когда вентиль специально сконструирован для горизонтального монтажа.

Размер электромагнитного вентиля зависит от требуемого расхода среды, а не от диаметра трубопровода, на котором его монтируют. При выборе вентиля необходимо учитывать максимально допустимую разность давлений и перепад давления в вентиле.

Регуляторы на всасывающем трубопроводе

Эти регуляторы могут быть двух типов: регуляторы давления в испарителе и регуляторы давления всасывания. Регулятор давления в испарителе предназначен для предотвращения понижения давления и, следовательно, температуры кипения хладагента в испарителе ниже заданного минимального уровня независимо от того, насколько снижается давление во всасывающем трубопроводе при работе компрессора. Регуляторы давления в ис-

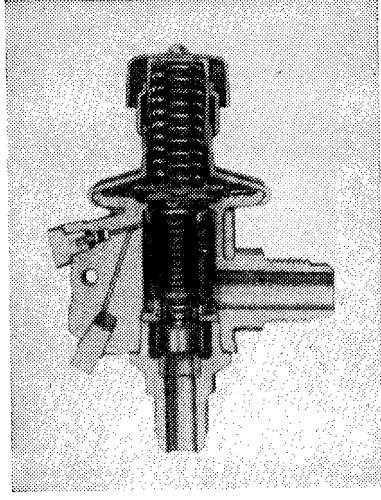


Рис. 17-44. Дроссельный регулятор давления в испарителе

парителе выпускают с дроселирующим действием (с плавным регулированием) или мгновенного двухпозиционного действия (полностью открыт или полностью закрыт). Регулятор мгновенного действия создает условия для автоматического оттаивания воздухоохладителей непосредственного охлаждения во время нерабочей части цикла, если температура в охлаждаемом помещении достаточно высока.

Регулятор давления в испарителе с дроселирующим действием (рис. 17-44) никогда не закрывается полностью при работе компрессора. Если нагрузка на испаритель понижается и давление в нем опускается ниже заданного минимального уровня, то регулятор плавно срабатывает в направлении закрытия и дроселирует пар, всасываемый компрессором, поддерживая тем самым давление в испарителе выше заданного минимального уровня. При повышении нагрузки и давления в испарителе выше уставки регулятора последний плавно срабатывает в направлении открытия. При большой нагрузке регулятор полностью открыт.

Регулятор давления в испарителе можно применять в установках, в которой давление и температура в испарителе должны поддерживаться выше

заданного минимального уровня. Его широко используют в испарителях для охлаждения воды и рассола, чтобы предотвратить их замерзание при минимальной нагрузке. Регуляторы расстроены также в воздухоохладителях, в которых для соответствующего регулирования влажности должен быть обеспечен минимальный уровень температуры кипения хладагента. В многоиспарительных системах, где все испарители работают примерно при одинаковой температуре кипения, можно установить один регулятор на всасывающем трубопроводе для регулирования давления во всех аппаратах. Если к одному компрессору присоединено несколько испарителей, работающих при различных температурах кипения, то на всасывающем трубопроводе каждого высокотемпературного испарителя необходимо установить отдельный регулятор давления (см. с. 462—464) для предотвращения понижения давления ниже заданного уровня.

На больших установках регуляторы давления в испарителе имеют управ-

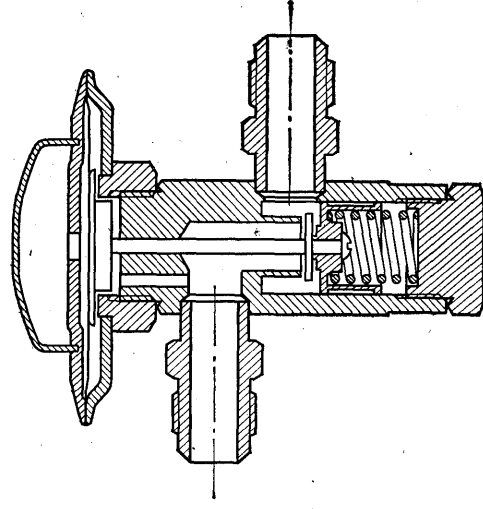


Рис. 17-46. Регулятор давления в картере

ляющее устройство. Регулятор, показанный на рис. 17-45, предназначен для работы со встроенным или внешним управляющим устройством. При наличии встроенного управляющего устройства регулятор работает аналогично электромагнитному вентилю с управляющим устройством, описанному выше. Регулятор с внешним управляющим устройством работает подобно регулятору подачи жидкости с управляющим устройством, описанному ранее.

Функция регулятора давления всасывания (рис. 17-46), который иногда называется регулятором давления в картере, заключается в ограничении давления всасывания на входе в компрессор до заданного максимального уровня независимо от повышения давления в испарителе при увеличении нагрузки. Регулятор давления всасывания предназначен для защиты привода компрессора от перегрузки, когда давление в испарителе выше нормального.

Регуляторы давления всасывания рекомендуются применять на любой установке, в которой требуется

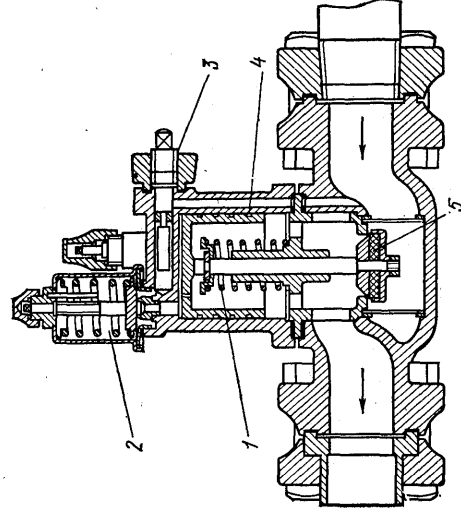


Рис. 17-45. Дроссельный пилотный регулятор давления в испарителе:

1 — главная пружина; 2 — встроенный пилот; 3 — штуцер для присоединения линии от внешнего пилота; 4 — основной поршень; 5 — основной клапан

защита электродвигателя вследствие высокой пусковой нагрузки, колебаний давления всасывания, высокого давления всасывания, вызванного оттаиванием горячим паром хладагента или работой в режиме теплового насоса,

Глава 18

КОНСТРУКЦИИ И ИХ СМАЗКА

ТИПЫ КОМПРЕССОРОВ

В холодильной технике применяют три типа компрессоров: поршневые, ротационные, центробежные. В поршневых и ротационных компрессорах сжатие пара осуществляется механически, посредством сжимающего элемента. В поршневом компрессоре таковым элементом является поршень, совершающий возвратно-поступательное движение, а в ротационном компрессоре — катящийся ротор и пластин. В центробежном компрессоре нет сжимающего элемента, и пар сжимается под действием центробежной силы, создаваемой при вращении рабочего колеса с высокой частотой.

Все три типа компрессоров имеют определенные преимущества в области их применения. Тип применяемого компрессора зависит в основном от размера и назначения установки, а также хладагента.

Поршневые компрессоры

Поршневой компрессор — это самый распространенный тип компрессора, который применяется во всех областях холодильной техники. Он работает на хладагентах, требующих относительно небольшого объема цилиндров и конденсирующихся при высоком давлении. Поршневые компрессоры чаще всего работают на хладагентах R12, R22, R500, R502 и R717 (аммиак).

длительной работы при повышенном давлении всасывания.

Большие регуляторы давления всасывания, как и регуляторы давления в испарителе, имеют управляющее устройство.

КОМПРЕССОРОВ

Вследствие ограниченного диаметра отверстия в клапане поршневые компрессоры не могут работать экономично с хладагентами низкого давления, для которых нужна большая объемная производительность на единицу холодопроизводительности. Компрессоры этого типа работают оптимально в системах, в которых давление в испарителе выше атмосферного, однако они успешно применяются и в низкотемпературных установках.

Поршневые компрессоры выпускаются с диапазоном потребляемой мощности от 90 Вт (в небольших бытовых агрегатах) до 1000 кВт и более в больших промышленных установках. Широкое распространение поршневых компрессоров в холодильной технике обусловлено экономичностью их изготовления, длительным сроком службы и высокими КПД в широком диапазоне рабочих условий.

Поршневые компрессоры могут быть простого и двойного действия. В компрессорах простого действия сжатие пара происходит только по одну сторону поршня, а в компрессорах двойного действия пар сжимается попеременно по обе стороны поршня, т. е. дважды за один оборот коленчатого вала.

Компрессор простого действия обычно бескрейцкопфного типа, в котором поршень приводится в действие шатуном, соединенным с коленчатым валом. Шатун и коленчатый вал распо-

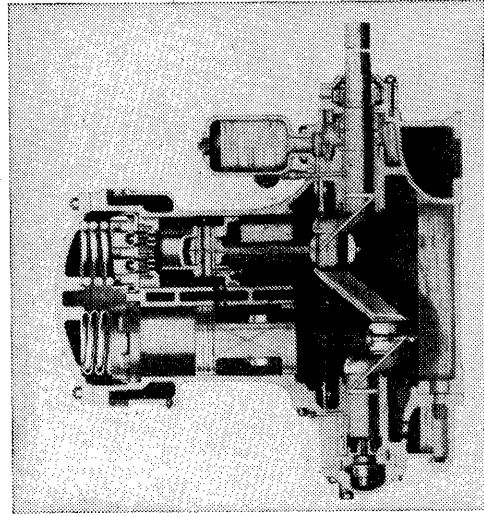


Рис. 18-1. Вертикальный компрессор простого действия

ложены в герметичном картере (рис. 18-1). В компрессоре двойного

действия картер обычно открытого типа, изолирован от хладагента, имеющегося в системе. В данном случае поршень приводится в действие штоком, соединенным с крейцкопфом, который в свою очередь приводится в действие шатуном, соединенным с коленчатым валом (рис. 18-2).

Непрактично использовать компрессор двойного действия в установках небольшого размера из-за сложности его конструкции. Поэтому компрессоры этого типа нашли распространение только в больших промышленных установках. Стоимость компрессора двойного действия значительно выше стоимости компрессора простого действия, но он более доступен для обслуживания, так как его картер изолирован от хладагента в системе. Основной недостаток компрессора этого типа заключается в том, что уплотнение штока подвергается

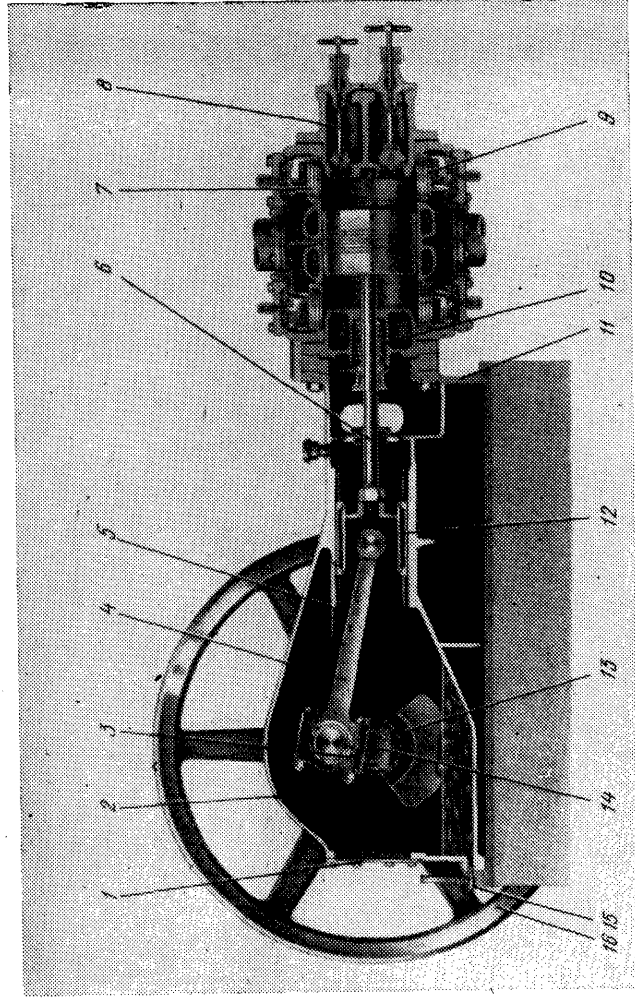


Рис. 18-2. Горизонтальный компрессор двойного действия:

1 — крышка смотрового люка; 2 — маслонепроницаемый картер; 3 — коленчатый вал; 4 — кованый стальной шатун; 5 — палец и направляющая крейцкопфа; 6 — шток; 7 — всасывающий клапан; 8 — дополнительный мертвое пространство в задней крышке; 9 — нагнетательный клапан; 10 — сальник штока; 11 — рама; 12 — крейцкопф; 13 — противовес; 14 — коленчатый вал; 15 — масляный манометр; 16 — маховик

ется попеременному воздействию давления всасывания и нагнетания, а сальник коленчатого вала в компрессоре простого действия испытывает только воздействие давления всасывания. Это серьезный недостаток, так как намного сложнее поддерживать герметичность уплотнения штока, совершающего возвратно-поступательное движение в компрессоре двойного действия, чем герметичность уплотнения вращающегося вала в компрессоре простого действия.

Поршневые компрессоры простого действия отличаются большим разнообразием конструкций в зависимости от назначения. Как указывалось ранее, они классифицируются на сальниковые, герметичные и бессальниковые (см. с. 88). Все поршневые компрессоры, работающие на аммиаке, сальникового типа, а работающие на галоидзамещенных хладагентах чаще всего герметичного или бессальникового типа, в особенности компрессоры малой и средней производительности.

Производительность компрессора зависит от количества и расположения цилиндров, типа поршней, типа и расположения клапанов, частоты вращения коленчатого вала и скорости хода поршня, диаметра цилиндра и длины хода поршня, типа коленчатого вала, способа смазки и др.

Цилиндры

Количество цилиндров в компрессоре может быть от одного до шестнадцати. В многоцилиндровых компрессорах цилиндры расположены параллельно, радиально или под углом друг к другу (V- или W-образные.) В двух- или трехцилиндровых компрессорах цилиндры обычно расположены параллельно. В компрессорах с четырьмя или большим количеством цилиндров применяют V-, W-образное или радиальное расположение цилиндров. Пре-

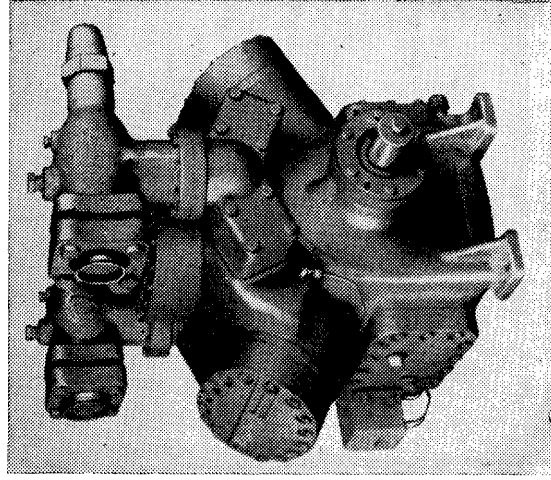


Рис. 18-3. Современный сальниковый компрессор с непосредственным приводом и W-образным расположением цилиндров

имущество параллельного расположения цилиндров заключается в возможности применения одной клапанной плиты, а V-, W-образное и радиальное расположение цилиндров обеспечивают лучшее динамическое равновесие, а также позволяют уменьшить габаритные размеры компрессора.

На рис. 18-3 представлен современный сальниковый компрессор с непосредственным приводом и W-образным расположением цилиндров.

Цилиндры компрессора обычно изготавливают из мелкозернистого чугуна, который легко подвергается машинной обработке без деформации. Цилиндры и картер малых компрессоров часто отливают в виде одного узла, что позволяет осуществлять очень точное центрирование рабочих частей. Цилиндры и картер больших компрессоров отливают раздельно и соединяют с помощью фланцев и болтов.

Цилиндры больших компрессоров обычно снабжены взаимозаменяемыми гильзами.

В малых компрессорах цилиндры и их крышки оборудованы литыми ребрами для улучшения охлаждения, а цилиндры больших компрессоров часто заключены для этой цели в водяные рубашки.

Поршни

В холодильных компрессорах изменяют поршни двух распространенных типов: автомобильные и тронковые. Тип поршня зависит в основном от способа всасывания пара и расположения всасывающих клапанов. Автомобильные поршни используют в том случае, когда пар хладагента поступает в цилиндр через всасывающие клапаны, расположенные в крышке цилиндра (клапанной плите), как показано на рис. 18-4. Тронковые поршни применяют, как правило, в компрессорах средней и большой производительности. Пар хладагента проходит через отверстия в стенке цилиндра и на образующей поршня через всасывающие клапаны в его днище (см. рис. 18-1).

Обратите внимание, что в нижней части поршня имеется перегородка, которая изолирует полую часть поршня от картера.

Пленки масла на стенке цилиндра обычно достаточно для предотвращения перетечки пара через зазор между поршнем и цилиндром в малых компрессорах. По этой причине на поршнях диаметром менее 50 мм редко применяют кольца. Эти поршни обычно имеют канавки для облегчения смазки стенок цилиндра. Автомобильные поршни диаметром более 50 мм часто снабжены двумя компрессионными и одним масляным кольцом, причем последнее иногда располагают у нижнего торца поршня.

Тронковый поршень имеет от одного до трех компрессионных колец у днища и одно или два масляных кольца около нижнего торца поршня.

Поршни, как и кольца, изготавливают, как правило, из мелкозернистого чугуна. Применяют также алюминиевые поршни. Они чаще всего снабжены, по крайней мере, одним компрессионным кольцом.

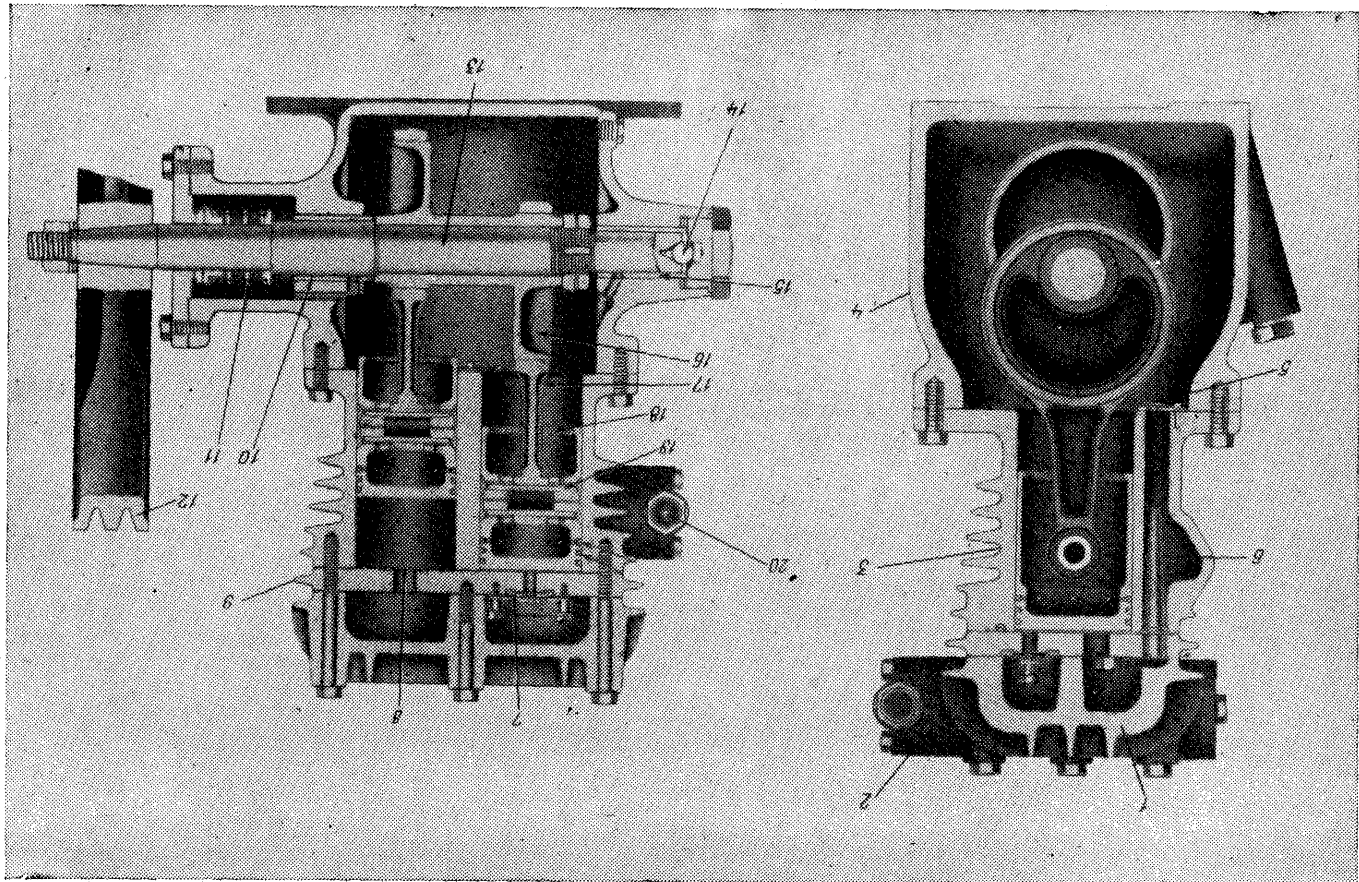
Всасывающие и нагнетательные клапаны

Конструкция всасывающих и нагнетательных клапанов существенно влияет на факторы, определяющие коэффициент подачи и индикаторный КПД компрессора. Ниже показано, что конструкция клапана в большой степени определяет конструкцию компрессора.

Потери на трение (дросселирующий эффект) пара, протекающего через клапаны и каналы в компрессоре, зависят от скорости движения пара. Потери увеличиваются при повышении скорости движения пара. Для получения минимальных потерь от дросселирования клапан должен быть сконструирован таким образом, чтобы обеспечивалось его наибольшее открытие с наименьшим усилием. Клапаны располагают таким образом, чтобы пар через них и каналы компрессора перемещался прямооточно. Клапаны конструируют и располагают таким образом, чтобы не увеличить мертвый объем компрессора. Проходное сечение клапана должно быть достаточным для движения пара с максимальной скоростью. Максимально допустимая скорость пара — это такая скорость, за пределами которой увеличение эффекта дросселирования приводит к заметному уменьшению коэффициента подачи компрессора и значительному увеличению потребляемой мощности.

Клапаны должны быстро и плотно закрываться, чтобы обратная перетечка пара через клапаны была минимальной. Клапаны изготавливают из легких материалов и применяют в компрессорах с малым ходом поршня. Это обеспечивает их легкое открытие и быстрое закрытие. Они должны быть прочными,

Рис. 18-4. Разрез двухцилиндрового холодильного компрессора с эксцентриковым валом:
 1 — головка цилиндра; 2 — нагнетательный клапан; 3 — цилиндр; 4 — картер; 5 — обратный клапан для масла; 6 — сепараторный фильтр; 7 — на-
 гнетательный клапан; 8 — всасывающий клапан; 9 — клапанная плита; 10, 16 — подшипники; 11 — сальник вала; 12 — маховик; 13 — эксцен-
 триковый вал; 14 — стальной шарик; 15 — двойной эксцентрик; 17 — шатун; 18 — поршень; 19 — поршневой палец; 20 — всасывающий клапан



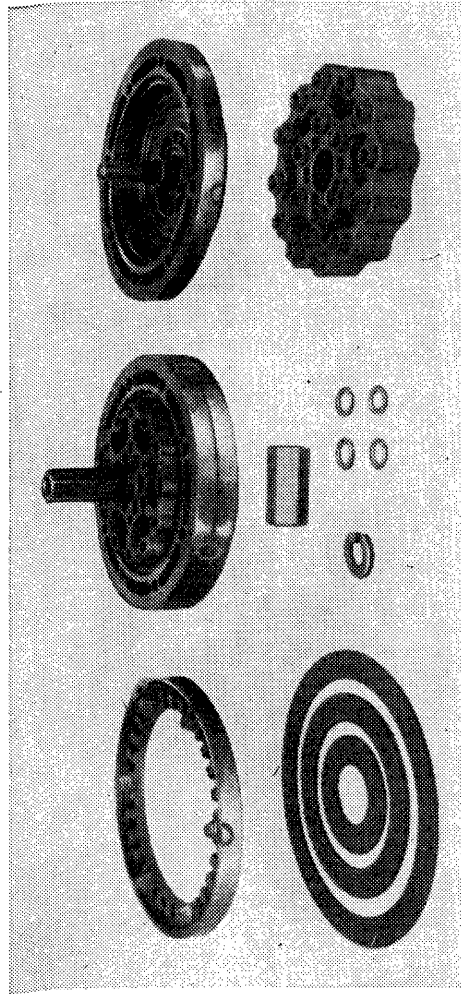


Рис. 18-5. Кольцевой клапан (внешняя кольцевая пластина — всасывающий клапан, два внутренних кольца образуют нагнетательный клапан)

бесшумными в работе в течение длительного срока.

Выпускают много модификаций клапанов, однако все клапаны, применяемые в холодильных компрессорах, можно разделить на три основных типа: шпиндельные, кольцевые, полосовые. Эти клапаны работают автоматически, т. е. открываются и закрываются в зависимости от давления в цилиндре. Большое шпинство нагнетательных и некоторые всасывающие клапаны снабжены пружинами для облегчения быстрого закрытия.

Шпиндельные клапаны. Шпиндельный клапан подобен автомобильному, за исключением того, что его шток намного короче. Клапан заключен в корпус, который является одновременно седлом и направляющей стержня, а также держателем пружины. В конструкции клапана имеются пружина, амортизатор или устройство для демпфирования хода клапана. Кроме мелких различий, конструкция у всасывающего и нагнетательного шпиндельных клапанов в основном одинакова.

Шпиндельный клапан — один из первых типов клапанов и в настоящее время находит ограниченное применение

только в некоторых типах тихоходных компрессоров. В быстроходных компрессорах вместо шпиндельного клапана используют кольцевой и полосовой клапаны, которые более приспособлены для высоких скоростей. Основное преимущество шпиндельного клапана заключается в том, что он может быть установлен заподлицо и не увеличивает поэтому мертвый объем цилиндра компрессора.

Кольцевые клапаны. Кольцевой клапан (рис. 18-5) состоит из седла, розетки, одной или большего количества кольцевых пластин, пружин и держателя. Кольцевые пластины прочно прижимаются к седлу пружинами, которые обеспечивают также быстрое закрытие клапана. Розетка-держатель предназначена для удержания пружин на месте и ограничения хода клапана.

Кольцевой клапан применяют в тихом и быстроходном компрессорах в качестве всасывающего или нагнетательного клапана. Когда всасывающий и нагнетательный клапаны расположены в крышке компрессора, они обычно заключены в один корпус. Например, на рис. 18-5 показано, что внешнее кольцо выполняет функцию всасываю-

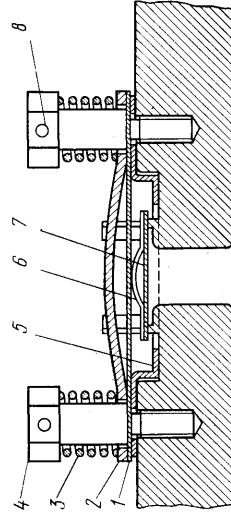
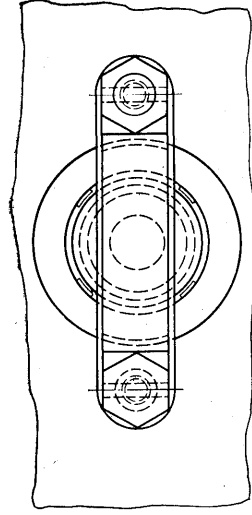


Рис. 18-6. Пятачковый нагнетательный клапан:

1 — плоская пружина клапана; 2 — держатель; 3 — спиральная пружина; 4 — винт; 5 — вставка клапана; 6 — тарелка; 7 — пяточный пластинчатый клапан; 8 — отверстие под мягкую медную проволоку для фиксации винтов

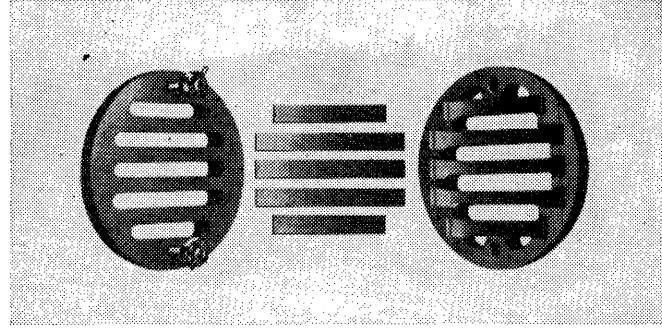


Рис. 18-7. Распространенная конструкция ленточного полосового клапана

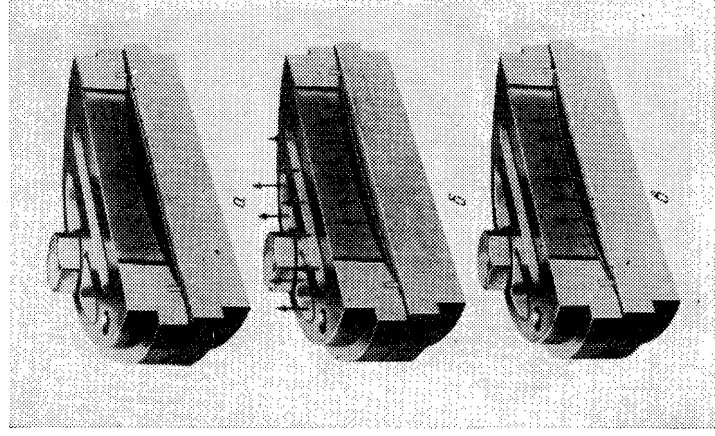


Рис. 18-8. Принцип действия ленточного полосового клапана:
а — клапан закрыт; б — клапан начинает открываться; в — клапан открыт полностью

щего клапана, а два меньших кольца работают в качестве нагнетательного клапана.

Модификацией кольцевого клапана является пяточный клапан (рис. 18-6), который представляет собой тонкую пластину, удерживаемую на седле держателем.

Полосовые клапаны. Конструкции полосовых клапанов различаются в большей степени, чем конструкции шпиндельных и кольцевых клапанов. Ленточный клапан (рис. 18-7) — это распространенный тип полосового клапана, который применяют в компрессорах средней и большой производительности. Он состоит из седла, нескольких стальных полос и держателя. Гибкие металлические полосы расположены над щелями в седле и удерживаются держа-

телем. Схема работы полосового ленточного клапана изображена на рис. 18-8. Необходимо обратить внимание на то, что пластины клапана не закреплены жестко на концах и могут изгибаться под давлением. Основное преимущество полосового ленточного клапана заключается в том, что пластины имеют маленькую массу, легко открываются. В этом типе клапана можно создать достаточно большое проходное сечение, уменьшающее дросселирующий эффект до минимума.

Недостаток полосового клапана, который характерен также и для кольцевого клапана, заключается в том, что его нельзя монтировать заподлицо, как шпindelный клапан, и он создает большой мертвый объем в цилиндре.

Широкое распространение в малых компрессорах получила конструкция лепесткового клапана. Лепестковый клапан представляет собой тонкую стальную пластину, которая жестко закреплена на одном конце, а противоположный свободный конец опирается на седло над отверстием клапана. Свободный конец пластины изгибается, закрывая или открывая отверстие клапана (рис. 18-9).

Конструкция полосового ленточного клапана показана на рис. 18-10. Пластина клапана удерживается над его отверстием подпружиненной пружиной, изогнутой в центре. Подпружиненная пружина является также предохранительным устройством для защиты компрессора от повреждения в слу-

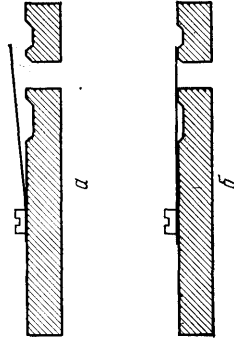


Рис. 18-9. Лепестковый пластинчатый клапан:

а — отверстие открыто; б — отверстие закрыто

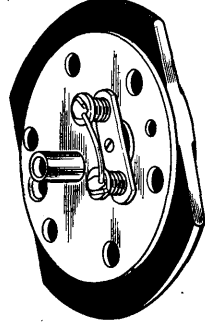


Рис. 18-10. Ленточный клапан

чае попадания жидкого хладагента или масла в отверстие клапана. Клапан не имеет достаточного проходного сечения для прохода жидкости. Однако конструкция клапана, представленная на рис. 18-10, такова, что весь клапан поднимается, пропуская жидкость. При обычном давлении нагнетания натяжения пружины достаточно для жесткого ее прижатия к концам пластины.

Мембранный клапан является распространенным типом пластинчатого клапана. Он состоит из гибкой металлической пластины, которая прижимается к седлу винтом или болтом, проходящим через ее центр. Пластина изгибается вверх или вниз, открывая или закрывая отверстие клапана. На рис. 18-11 представлен всасывающий клапан мембранного типа, который смонтирован в днище поршня.

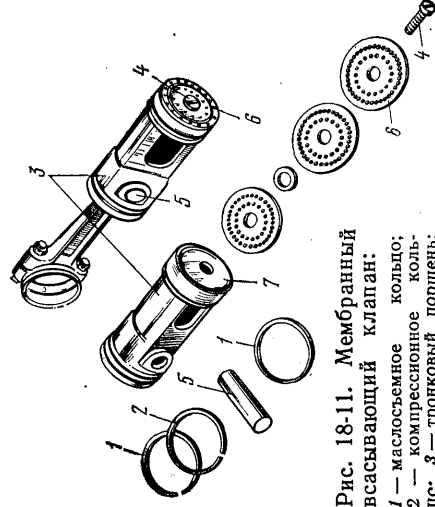


Рис. 18-11. Мембранный всасывающий клапан:

1 — маслоуплотнительное кольцо; 2 — компрессионное кольцо; 3 — тронковый поршень; 4 — винт всасывающего клапана; 5 — поршневой палец; 6 — всасывающий клапан; 7 — отверстие в седле всасывающего клапана

Расположение клапанов. Как указывалось ранее, нагнетательные клапаны обычно располагают в крышке цилиндра, а всасывающие клапаны — в крышке цилиндра (в этом случае всасываемый пар поступает в цилиндр через крышку) или в днище поршня (всасываемый пар поступает в цилиндр сверху). В больших компрессорах всасывающие клапаны размещают в поршне и всасываемый пар поступает через стенку цилиндра. Всасывающие клапаны смонтированы на клапанной плите цилиндра малых и средних компрессоров. В крышке цилиндра должна быть перегородка для разделения всасываемого и нагнетаемого пара, если в ней смонтированы оба клапана.

Большинство крупных компрессоров снабжены крышками безопасности, которые устанавливаются на цилиндре и удерживаются спиральной пружиной (см. рис. 18-1). Крышка безопасности прочно удерживается на месте пружиной при нормальном давлении нагнетания. Однако если в цилиндр поступает жидкость, то крышка безопасности поднимается из-за повышенного давления. Жидкость перетекает в крышку цилиндра, предотвращая тем самым повреждение компрессора. В малых компрессорах защита от влажного хода, как правило, обеспечивается буферным устройством нагнетательного клапана.

Клапаны и седла в больших компрессорах съемные, что позволяет их быстро заменить. В малых компрессорах всасывающий и нагнетательный клапаны смонтированы на клапанной плите, которая снимается и заменяется как один узел.

Частота вращения коленчатого вала и скорость движения поршня

В современном компрессоростроении имеется тенденция повышения частоты вращения вала в целях уменьшения размера и массы компрессора. Рабочий объем цилиндра определяется его диа-

метром, ходом поршня и частотой вращения. Увеличивая частоту вращения, можно пропорционально уменьшить диаметр цилиндра и сократить ход поршня без потери объемной производительности при условии, что коэффициент подачи компрессора остается без изменения.

Значения частоты вращения вала в диапазоне от 500 до 1750 об/мин довольно распространены, но некоторые компрессоры работают успешно при частоте вращения вала до 3500 об/мин. Максимальная частота вращения вала компрессора ограничивается в той или иной степени предельно допустимой скоростью движения поршня.

Теоретически нет ограничений скорости движения поршня. Однако практически максимальная скорость движения поршня составляет 4 м/с, причем ограничивающим фактором является проходное сечение клапана.

Клапаны имеют умеренные проходные сечения, так как очень трудно найти достаточно места в компрессоре для их размещения. Если скорость движения поршня будет более 4 м/с, то скорость движения пара хладагента через клапаны становится излишне высокой, в результате чего коэффициент подачи компрессора уменьшается, а расход мощности увеличивается.

Скорость движения поршня — это функция частоты вращения вала компрессора и хода поршня, выражаемая следующей зависимостью:

$$\omega = n/60S \cdot 2 \quad (18-1)$$

где ω — скорость движения поршня, м/с; n — частота вращения коленчатого вала, об/мин; S — ход поршня, м.

Например, компрессор с ходом поршня 100 мм (0,1 м) и частотой вращения 1200 об/мин имеет скорость движения поршня:

$$\omega = (1200 \text{ об/мин}/60) 0,1 \text{ м} \cdot 2 = 4 \text{ м/с}.$$

Если повысить частоту вращения компрессора до 3600 об/мин при ско-

рости движения поршня 4 м/с, то ход поршня должен быть уменьшен:

$$S = 4 \text{ м/с} \cdot 60 / (3600 \text{ об/мин} \cdot 2) = 0,0333 \text{ м (33,3 мм)}.$$

Очевидно, что максимальная частота вращения вала компрессора без превышения допустимой скорости движения поршня зависит от хода поршня. Чем короче ход поршня, тем выше максимально допустимая частота вращения вала. Это объясняется тем, что коэффициент подачи компрессора остается постоянным или незначительно увеличивается при повышении частоты вращения до определенной величины, после чего коэффициент подачи компрессора начинает уменьшаться, если частота вращения продолжает увеличиваться.

Диаметр цилиндра и ход поршня

Зависимость диаметра цилиндра от хода поршня неодинакова в компрессорах разной конструкции. Диаметр может быть меньше или больше хода поршня, однако высокооборотные компрессоры конструируются в настоящее время с большим диаметром цилиндров и коротким ходом поршня. Если всасывающий и нагнетательный клапаны расположены в крышке цилиндров, то требуется большой диаметр цилиндра для обеспечения достаточного проходного сечения клапанов. Ход поршня и частота вращения вала несколько ограничиваются максимально допустимой скоростью движения поршня. Поэтому единственным практическим средством увеличения рабочего объема цилиндра является увеличение его диаметра. Увеличение рабочего объема цилиндра из-за увеличения его диаметра не должно обязательно повысить скорость движения пара хладагента через клапаны компрессора, так как увеличение диаметра расширяет проходное сечение клапанов.

Величина перегечки пара в заторе между цилиндром и поршнем увеличивает

вается при большем отношении диаметра цилиндра к ходу поршня. Поэтому в хороших конструкциях диаметр цилиндра приблизительно равен 1,25 хода поршня.

Диапазон диаметров цилиндров может быть от 25 мм в компрессорах быстрого холодильного оборудования до примерно 500 мм в компрессорах некоторых больших промышленных агрегатов.

Коленчатые валы, шатуны и подшипники

В больших компрессорах применяют коленчатые валы, которые изготавливают из ковкой стали или легированного чугуна. Шейки вала полированные и цементированные, в особенности при использовании латунных или алюминиевых подшипников. Шейка коленчатого вала имеет определенную конусность под маховик, который закреплен на коленчатом валу с помощью сегментной шпонки и контргайки. Обычно опорами коленчатого вала служат подшипники скольжения, но используют и подшипники качения (роликовые или шариковые). Подшипники скольжения изготавливают из бронзы, алюминия и баббита.

В малых компрессорах иногда применяют прямой стальной вал, на который насажен литой чугунный эксцентрик (см. рис. 18-4). Эксцентрик уравнивает и закреплен на валу стопорным винтом. Эксцентрик является опорной поверхностью шатуна.

Шатуны изготавливают из бронзы, алюминия, ковanej стали или литого чугуна. Втулка под поршневой палец представляет собой подшипник скольжения. Ее изготавливают из бронзы и впрессовывают в шатун.

Сальник коленчатого вала

Место прохождения коленчатого вала через картер уплотнено сальником

для предотвращения утечки хладагента и масла из картера (или поступления в воздух в картер, когда давление в последнем ниже атмосферного). Один из самых старых, но все еще применяемых на некоторых больших аммиачных компрессорах способов уплотнения коленчатого вала заключается в использовании сальника с набивкой (см. рис. 18-2). Сальник представляет собой цилиндрический корпус, который отлит в качестве составной части картера, откуда выступает вал. В нем имеется отверстие, внутренний диаметр которого несколько больше диаметра коленчатого вала. Уплотнительные кольца смонтированы на валу и заполняют пространство между валом и корпусом сальника. Эта набивка удерживается на месте резьбовой гайкой, которая при затяжке сжимает кольца, которые плотно прижимаются к валу и корпусу, образуя между ними паронепроницаемое уплотнение. Кольца постепенно изнашиваются вследствие трения о вращающийся вал, и хладагент начинает просачиваться вокруг вала. При этом необходимо снова затянуть гайку для восстановления герметичного уплотнения. Сальниковые уплотнения с набивкой удовлетворительно работают на больших аммиачных установках, так как механик, постоянно их обслуживающий, может при необходимости осуществить затяжку, но это уплотнение непригодно в компрессорах, работающих в автоматическом режиме.

Уплотнение коленчатого вала компрессора в автоматическом оборотовании имеет устройство для саморегулирования, компенсирующее износ и изменение давления в картере. Когда вал вращается или находится в нерабочем состоянии, в нем не должно быть утечки хладагента и масла ни под давлением, ни под вакуумом. Уплотнение должно быть самосмазывающимся, иметь длительный срок службы и легко заменяться на месте эксплуатации. Существует ряд различных конструкций сальников,

которые удовлетворяют этим требованиям и применяются в настоящее время. Довольно простая конструкция сальника коленчатого вала, которая находит все большее распространение, представлена на рис. 18-12. Сальник состоит из подпружиненной бронзовой или твердой графитовой уплотняющей передней части, которая удерживается на коленчатом валу с помощью синтетической резиновой прокладки. Пружина на плотно поджимает переднюю часть сальника к полированному стальному торцу на крышке сальника. Масляная пленка между этими двумя гладкими поверхностями образует эффективное паронепроницаемое уплотнение. Обратите внимание, что уплотнение осуществляется в трех местах: в месте расположения резиновой прокладки между передней частью сальника и коленчатым валом, между передней частью сальника и торцом крышки, в месте расположения прокладки между крышкой сальника и корпусом картера.

В компрессоре, показанном на рис. 18-1, использован двойной сальник. Сальник полностью погружен в масло во время рабочей и нерабочей части цикла.

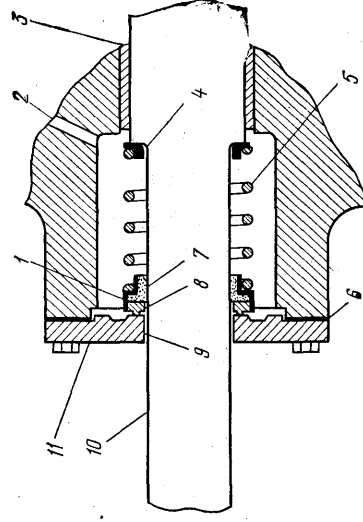


Рис. 18-12. Сальник коленчатого вала:
1 — металлическое стопорное кольцо; 2 — отверстие для масла; 3 — втулка; 4 — держатель пружины; 5 — пружина сальника; 6 — прокладка; 7 — синтетическая резиновая прокладка; 8 — передняя часть уплотнения; 9 — задняя часть уплотнения; 10 — коленчатый вал; 11 — крышка сальника

СМАЗОЧНЫЕ МАСЛА, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В КОМПРЕССОРЕ

В компрессоре применяют смазочное масло специального состава, которое часто взаимодействует и смешивается с хладагентом. Ниже приведены некоторые наиболее важные свойства масла, которые необходимо учитывать при его выборе: химическая стойкость, температуры застывания и помутнения, диэлектрическая прочность, вязкость. При оценке этих свойств масла для применения в том или другом компрессоре необходимо учитывать следующие факторы: тип и конструкцию компрессора, используемый хладагент, температуру кипения и температуру нагнетания хладагента.

Химическая стойкость

Важность химической стойкости определяется тем, что смазочное масло в течение длительного времени должно осуществлять непрерывную и эффективную смазку компрессора без изменения своего состава. Масло практически не заменяется в герметичных компрессорах со встроенным электродвигателем, т. е. оно работает в течение всего срока службы агрегата, который иногда приходится 10 лет и более. Способность смазочного масла сохранять стойкость и сопротивляться распаду под действием высокой температуры особенно важна при выборе смазочного масла для герметичных агрегатов со встроенным электродвигателем, в которых имеется место высокая температура нагнетания.

Химическая стойкость масла тесно связана с количеством ненасыщенных углеводородов в нем. Чем меньше ненасыщенных углеводородов содержится в масле, тем выше его стойкость. В холодильной технике применяют высококачественное масло с очень низким содержанием ненасыщенных углеводородов. Эти масла обычно светлого цвета.

Температура застывания и помутнения

Температура застывания масла — это самая низкая температура, при которой масло обладает текучестью в определенных условиях. Из двух масел одинаковой вязкости одно из них может иметь более высокую температуру застывания, что обусловлено более высоким содержанием парафина. Температура застывания является важной характеристикой при выборе масла для низкотемпературных систем. Естественно, что температура застывания масла должна быть намного ниже минимальной температуры в испарителе. Если температура застывания масла слишком высока, то оно застывает на поверхности труб испарителя, в результате чего КПД этого аппарата понижается. Застывшее масло не возвращается в компрессор, и это может быть причиной недостаточной смазки последнего.

Все смазочные масла содержат некоторое количество парафина, который осаждается при соответствующем понижении температуры масла. Масло при этом становится мутным. Температура начала осаждения парафина называется температурой помутнения масла. Если температура помутнения масла слишком высока, то парафин осаждается из масла в испарителе и в регуляторе расхода хладагента. Небольшое количество парафина в испарителе оказывает незначительное отрицательное воздействие на этот аппарат. Однако небольшое количество парафина в регуляторе расхода хладагента вызывает прекращение его функционирования, а следовательно, и всей системы.

Температура помутнения масла в смеси с хладагентом — это температура, при которой парафин осаждается из смеси, состоящей из R12 (90%) и масла (10%) по объему. Применение хладагента, растворимого в масле, снижает вязкость последнего и влияет на его температуры застывания и помут-

нения. Поэтому если применяют хладагенты, растворимые в масле, то температура помутнения масла в смеси с хладагентом — это более важное свойство, чем температуры застывания и помутнения чистого масла.

Температура помутнения масла в смеси с хладагентом — мера относительной способности масла отделять парафин, в связи с чем она является важной характеристикой при выборе масла для работы с хладагентом при температурах кипения ниже -18°C . Если используют хладагент, который не смешивается с маслом, то температура помутнения масла в смеси не имеет никакого значения.

Диэлектрическая прочность

Диэлектрическая прочность масла характеризует сопротивление масла электрическому току. Она выражается в величинах напряжения, требуемого для образования электрической дуги через зазор 2,5 мм между двумя полюсами, погруженными в масло. Влага, растворенные металлы или другие примеси в масле понижают его диэлектрическую прочность. Поэтому высокая электрическая прочность является признаком относительной чистоты масла. Это особенно важно для масел, используемых в герметичных агрегатах, так как масло с низкой диэлектрической прочностью способствует пробоем на корпус или короткому замыканию обмоток электродвигателя.

Вязкость

В главе 16 указывалось, что вязкость — это сопротивление среды движению потока. Вязкость смазочного масла определяют как способность масла осуществлять смазку посредством образования защитной пленки между различными движущимися частями компрессора, разделяя и предотвращая их износ. Масло должно иметь определенную вязкость для нормальной смазки

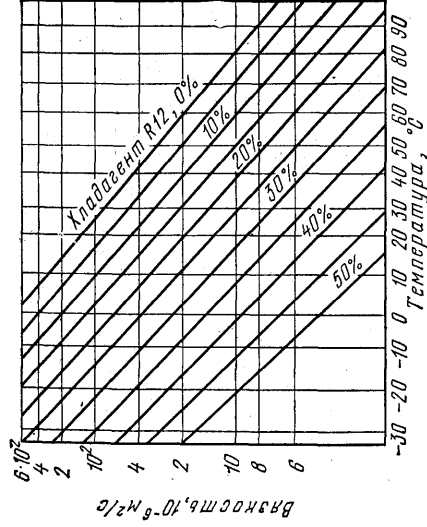


Рис. 18-13. Зависимость вязкости масла от температуры смеси хладагента R12 с маслом

компрессора. Если масло имеет слишком низкую вязкость, то оно не будет разделять движущиеся части и масляная пленка не сможет предотвратить повышенный износ трущихся поверхностей. Масло применяют не только для смазывания деталей, но и в качестве уплотнения между сторонами низкого и высокого давления в компрессоре. Если вязкость масла слишком мала, то происходит протечка пара вокруг поршней (в поршневом компрессоре) или лопастей (в ротационном компрессоре). И наоборот, в случае слишком высокой вязкости масла увеличивается трение и потребляемая компрессором мощность. Кроме того, иногда высоковязкое масло может не обладать достаточной текучестью для проникновения между различными трущимися поверхностями, в частности когда допуски небольшие. Поэтому части компрессора смазываются недостаточно.

Вязкость смазочного масла обычно измеряют в 10^{-6} м²/с при 50 или 100°C . Вязкость смазочного масла зависит от температуры. При понижении температуры его вязкость увеличивается. На рис. 18-13 показано влияние температуры на вязкость смазочного масла (верхняя кривая обозначает масло без

хладагента). Обратите внимание, что вязкость масла при 44°C равна $4 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{г}$, но увеличивается до $4 \times 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$, когда температура масла понижается до 7°C .

На рис. 18-13 показано также влияние растворения хладагента в смазочном масле на его вязкость. Например, чистое масло при температуре 44°C имеет вязкость примерно $4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, при той же температуре вязкость масла, если в нем растворено 15% хладагента R12, составляет $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$.

Очевидно, что при выборе масла необходимо учитывать диапазон рабочих температур и влияние растворения хладагента в масле. Во всех случаях необходимо следовать рекомендациям завода — изготовителя компрессора.

Способы смазки

Способы смазки компрессора различны и зависят от типа и размера компрессора. Однако можно выделить два наиболее распространенных способа смазки: смазка разбрызгиванием и принудительная смазка. Принудительную смазку иногда используют даже в очень малых компрессорах, однако, как правило, малые вертикальные герметичные компрессоры производительною до 10 кВт смазываются разбрызгиванием масла. Компрессоры большего размера обычно смазываются принудительно. В некоторых компрессорах применяют комбинацию смазки разбрызгиванием и принудительной смазки.

При смазке разбрызгиванием картер компрессора заполняется маслом почти до нижнего края коренного подшипника. При каждом обороте коленчатого вала шатун и коленчатый вал (или эксцентрик) погружаются в масло, в результате чего оно разбрызгивается на стенки цилиндров, подшипники и другие трущиеся поверхности. Обычно в картере над главными подшипниками имеются небольшие полости для масла. В этих полостях собирается масло,

которое стекает на главные подшипники и в полость сальника вала (см. рис. 18-4). В некоторых случаях в шатунах просверлены отверстия для подачи масла к втулкам верхней головки. На концах шатунов иногда имеются черпаки для интенсификации разбрызгивания или принудительной подачи масла через просверленные каналы.

Усовершенствованный способ смазки разбрызгиванием, иногда называемый смазкой погружением, предполагает наличие маслоотражательных колец, дисков, с которых масло стекает на подшипники коленчатого вала и подается через каналы к различным поверхностям трения (см. рис. 6-13). Этот способ наиболее приемлем для малых быстходных компрессоров, в которых обычная система смазки разбрызгиванием может привести к избыточному уносу масла в систему из-за интенсивного его разбрызгивания в картере.

При принудительной смазке масло подается под давлением через трубки или просверленные отверстия в коленчатом валу и шатунах к различным поверхностям трения. После смазки масло стекает в картер компрессора. Масло циркулирует под давлением, создаваемым небольшим масляным насосом, расположенным обычно у торца коленчатого вала в картере компрессора (см. рис. 18-1). Большинство масляных насосов автоматически реверсируются, и поэтому смазка компрессора осуществляется при любом направлении вращения коленчатого вала. Если направление вращения вала имеет значение для обеспечения смазки, например в компрессоре, в котором имеются черпаки для разбрызгивания масла, то на маховик или картер обычно наносят указательную стрелку.

Масляные фильтры в основном устанавливаются на входе в масляный насос для предотвращения попадания в него или в подшипники посторонних примесей. Масляные фильтры не всегда требуются, однако их необходимо уста-

навливать во всех системах принудительной смазки для предотвращения закупорки линий подачи масла вследствие накопления шлама или других осадков. Во всех системах принудительной смазки применяют предохранительное реле давления масла (см. главу 21).

В некоторых больших компрессорах цилиндры смазываются с помощью механических масленок, которые монтируют на картере компрессора. В этих случаях система смазки цилиндров полностью отделена от внутренней системы смазки под давлением.

Подшипники и крейцкопфы горизонтальных сальниковых компрессоров обычно смазываются разбрызгиванием (см. рис. 18-2). Масло из картера подается к крейцкопфу по желобам. Цилиндры и сальники штока смазываются с помощью механических масленок.

Жидкий хладагент в картере компрессора

Присутствие жидкого хладагента в картере компрессора всегда нежелательно. Во-первых, избыточное разжижение масла в картере жидким хладагентом может привести к неравномерной смазке частей компрессора. Самое главное, однако, это то, что жидкий хладагент в картере превращается в пар, вызывая пенообразование масла, в результате чего резко увеличивается количество масла, поступающего в нагнетательный трубопровод. При определенных условиях пенообразование может быть таким бурным, что из картера уносится все масло. Компрессор остается без смазки, и несжимаемая смесь жидкого хладагента с маслом поступает в цилиндры, вызывая тяжелые повреждения компрессора в виде поломанных клапанов и поршней, изогнутых или поломанных шатунов и валов. При значительном пенообразовании в компрессоре с принудительной смазкой масло часто подается неравномерно, так как

масляный насос не может создать достаточного давления для подачи его к различным поверхностям трения.

Кроме того, парообразование жидкого хладагента в картере уменьшает производительность и КПД компрессора, так как образующийся пар отсасывается в цилиндр и замещает пар, который при нормальных условиях поступал бы из всасывающего трубопровода. Поступление жидкого хладагента в картер обусловлено несколькими причинами:

неправильное применение или настройка регулятора расхода хладагента часто является причиной постоянного или прерывистого избыточного питания испарителя, в результате чего жидкий хладагент переливается из испарителя во всасывающий трубопровод и подается в картер компрессора. Как указывалось в главе 17, это происходит чаще всего при пуске. В любом случае это явление легко предотвратить или исправить, правильно применяя и настраивая регулятор расхода хладагента, а также правильно смонтировав всасывающий трубопровод;

жидкий хладагент может стекать под действием гравитации в картер компрессора из испарителя или всасывающего трубопровода во время нерабочей части цикла (вследствие неправильного проектирования или монтажа системы, в особенности испарителя и всасывающего трубопровода). Протечка в регуляторе расхода также способствует попаданию хладагента в картер. Это легко устраняется или предотвращается соответствующими мерами;

если температура в картере компрессора опускается ниже температуры в испарителе, то жидкий хладагент в испарителе выкипает и конденсируется в картере компрессора. Естественно, что это может происходить только во время нерабочей части цикла и только в том случае, когда температура окружающей среды вблизи картера может опуститься ниже температуры в испа-

рителе. Указанное явление происходит чаще всего зимой, если компрессор установки смонтирован на открытом воздухе, в подвале или в другом холодном месте. Для исправления данного недостатка необходимо поддерживать температуру в картере выше температуры насыщения хладагента, что осуществляется посредством размещения электронагревателя в картере или установки компрессора в более теплом месте. Другим решением является поддержание низкого давления в картере компрессора.

В связи с тем что смазочное масло поглощает пар хладагента, некоторое количество жидкого хладагента всегда растворено в смазочном масле. Это имеет место в любой системе, работающей на хладагенте, который растворяется в масле, так как обычно они находятся в контакте друг с другом. Количество хладагента, которое может раствориться в масле, находящемся в картере, зависит от следующих факторов: степени растворимости хладагента, давления пара хладагента, температуры смазочного масла и длительности контакта пара и масла при установившемся рабочем режиме.

На рис. 18-14 графически показана растворимость хладагента R12 в масле при различных температуре и давлении. Обратите внимание, что количество хладагента R12, которое может быть растворено в масле, значительно увеличивается при понижении температуры масла и повышении давления пара хладагента. Например, если температура масла 40°C, а давление пара хладагента 100 кПа, то максимальное количество R12 в смеси с маслом в картере равно приблизительно только 7% по массе. Однако если масло охлаждается до 25°C, а давление пара хладагента повышается до 400 кПа, то количество хладагента в смеси с маслом может достичь 40%. Другими словами, так называемое смазочное масло в картере

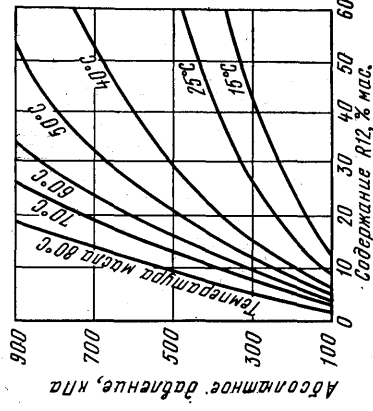


Рис. 18-14. Растворимость хладагента R12 в масле в зависимости от температуры и давления

на самом деле содержит 40% хладагента R12.

Практическое значение сказанного выше иллюстрируется следующим примером. Предположим, что во время нерабочей части цикла компрессора давление на стороне всасывания системы, работающей на R12, повышается до 330 кПа, а температура в картере опускается до 25°C. Если нерабочая часть цикла достаточно длительна для установления равновесия, то количество жидкого хладагента в смеси с маслом в картере приблизительно равно 30% по массе, как это видно на рис. 18-14. Теперь допустим, что компрессор включается, и давление в испарителе и картере немедленно понижается до 200 кПа. При этом более низком давлении максимальное количество хладагента, который может быть в смеси с маслом, равно только 15%. Поэтому в течение нескольких секунд примерно 50% хладагента (15% по массе от общего количества смеси) обязательно должно испариться из смеси. Естественно, что испарение такого количества хладагента из смеси в такое короткое время вызывает бурное пенообразование в масле, в результате чего значительное количество масла поступает из картера в цилиндр.

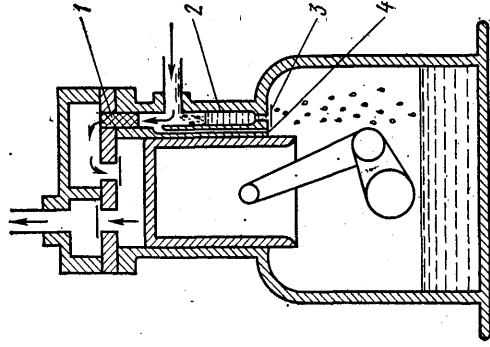


Рис. 18-15. Масляный обратный клапан:

1 — фильтр во всасывающем канале; 2 — полость для масла; 3 — обратный клапан; 4 — выпускное отверстие

Существует несколько способов уменьшения пенообразования масла и уноса масла из картера при пуске компрессора. Распространенным способом является монтаж обратного масляного клапана, который устанавливается под масляной полостью между всасывающим каналом компрессора и картером (рис. 18-15). При работе на хладагентах, смешивающихся с маслом, оно уносится в систему и обычно возвращается в компрессор вместе со всасываемым паром. Проходя через всасывающий патрубок, масло ударяется о стенку компрессора, отделяется от пара, который поступает в цилиндр. Отделенное масло стекает в картер через специальный масляный канал, который предназначен также для уравнивания давления в картере с давлением всасывания компрессора. Обратный клапан, монтируемый в масляном канале, предотвращает перепуск хладагента, имеющегося в картере, во всасывающий трубопровод. Этим предотвращается внезапное понижение давления в картере, которое является причиной пенообразования при пуске.

Однако масло не может стекать по каналу в картер, если давление в картере не понижено до давления всасывания. Вблизи обратного клапана (или в нем) делают небольшое спускное отверстие для медленного перепуска хладагента из картера во всасывающий канал после включения компрессора. Спускное отверстие необходимо также для перепуска пара из цилиндра обратно во всасывающий патрубок компрессора. Если пар не подается во всасывающий канал, то давление в картере повышается до такой величины, что не только предотвращает возврат масла в картер, но и вызывает значительное повышение мощности, потребляемой компрессором.

Во время нормального рабочего цикла давление в картере приблизительно равно давлению всасывания. Незначительное колебание давления всасывания при дросселировании в регуляторе расхода хладагента создает разность давлений для слива масла через обратный клапан в картер. Однако всасывающая полость компрессора должна быть достаточной величины для размещения в нем масла, которое возвращается в компрессор и не поступает в картер, пока давление в нем слишком высокое для слива масла.

Другой способ уменьшения пенообразования в масле при пуске, который находит широкое распространение в настоящее время, заключается в установке маломощного электронагревателя в картере компрессора. Нагреватель картера включается при выключении компрессора. Нагреватель поддерживает масло в картере в теплом состоянии во время нерабочей части цикла, и поэтому в масле может раствориться относительно небольшое количество хладагента.

Другой способ уменьшения пенообразования в масле при пуске компрессора заключается в поддержании низкого давления в картере. Низкое давление в картере ограничивает коли-

чество хладагента, поглощаемого маслом. Применение способа поддержания низкого давления в картере компрессора в отделимости или совместно с обратным масляным клапаном или с нагревателем картера очень эффективно для уменьшения пенообразования в масле.

РОТАЦИОННЫЕ КОМПРЕССОРЫ

Ротационные компрессоры делятся на два типа: компрессоры с катящимся поршнем, ротационные пластинчатые компрессоры. В компрессорах с катящимся поршнем происходит цилиндрический стальной ротор, который вращается на эксцентриковом валу, смонтированном в цилиндре (рис. 18-16). Вследствие эксцентриситета вала ротор расположен эксцентрично относительно цилиндра и почти касается стенки цилиндра в точке минимального зазора. При вращении вала ротор перекатывается по стенке

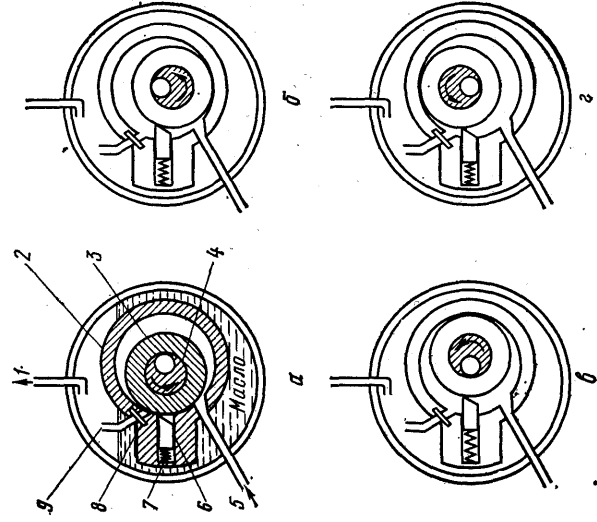


Рис. 18-16. Ротационный компрессор: 1, 9 — нагнетательные патрубки; 2 — цилиндр; 3 — ротор; 4 — вал; 5 — всасывающий патрубок; 6 — лопасть; 7 — пружина; 8 — нагнетательный клапан

цилиндра в направлении вращения вала, находясь при этом в постоянном контакте со стенкой цилиндра. Внутренняя поверхность ротора движется относительно эксцентрикового вала в направлении, противоположном направлению вращения вала, как подшипник большой головки шатуна. Подпружиненная лопасть в щели стенки цилиндра постоянно и плотно прижимается к ротору. Лопасть входит и выходит из щели в цилиндре, постоянно следуя за ротором при перекатывании последнего по стенке цилиндра.

Торцевые крышки цилиндра, закрывающие его с обеих сторон, выполняют одновременно функцию опоры эксцентрикового вала. Длина ротора и лопасти равна длине цилиндра, причем между ними и торцевыми крышками имеется только рабочий зазор. Всасывающее и нагнетательное отверстия расположены на противоположных сторонах в стенке цилиндра вблизи щели для лопасти. Пар непрерывно проходит через всасывающее и нагнетательное отверстия, за исключением того момента, когда ротор закрывает одно или другое отверстие. Всасываемый и нагнетаемый пар разделены в цилиндре точкой контакта между лопастью и ротором, с одной стороны, и ротором и стенкой цилиндра — с другой.

Расположение точки контакта ротора со стенкой цилиндра непрерывно меняется при обкатывании им цилиндра. В одной точке во время каждого цикла сжатия ротор закрывает нагнетательное отверстие, в результате чего в цилиндре находится только пар низкого давления. Цикл сжатия пара при разном положении ротора показан на рис. 18-16, а, б, в, г.

Весь узел цилиндра заключен в корпус и работает в состоянии полного погружения в масло. Обратите внимание, что пар высокого давления нагнетается в пространство над уровнем масла в корпусе, откуда поступает в нагнетательный трубопровод. Все поверх-

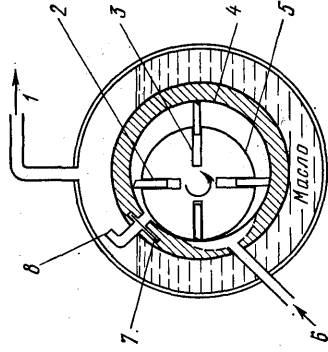


Рис. 18-17. Ротационный пластинчатый компрессор:

1 — нагнетательный патрубок; 2 — пластина ротора; 3 — щель в роторе; 4 — цилиндр; 5 — ротор; 6 — всасывающее отверстие; 7 — нагнетательный клапан; 8 — нагнетательное отверстие

ности трения в компрессоре, включая торцевые крышки, тщательно отполированы и плотно прилегают друг к другу. При работе компрессора масляная пленка образует уплотнение между зонами высокого и низкого давления. Однако, когда компрессор останавливается, масло из зазора между ротором и цилиндром выдвигается и давления в компрессоре уравниваются. На всасывающем или нагнетательном трубопроводе устанавливают обратный клапан для предотвращения возврата пара высокого давления через компрессор и всасывающий трубопровод в испаритель при выключении компрессора.

В ротационном пластинчатом компрессоре используется ряд вращающихся пластин, которые устанавливаются на равном расстоянии между собой на периферии в пазах ротора (рис. 18-17). Вал ротора монтируют эксцентрически в стальном цилиндре так, что ротор почти касается с одной стороны стенки цилиндра, причём в этой точке ротор и стенка цилиндра разделены только масляной пленкой. На противоположной от этой точки стороне зазор между ротором и стенкой цилиндра достигает максимальной величины. На концах цилиндра устанавливают торцевые крыш-

ки, запирающие цилиндр. При этом они служат для опоры вала ротора. Пластины радиально движутся вперед и назад в пазах ротора, следуя контуру стенки цилиндра при вращении ротора. Пластины плотно прижимаются к стенке цилиндра под действием центробежной силы, создаваемой вращающимся ротором. В некоторых случаях пластины подпружинены для более плотного прилегания к стенке цилиндра.

Пар, всасываемый в цилиндр через отверстие в стенке цилиндра, поступает в полость между соседними вращающимися пластинами. Пар сжимается при уменьшении объема полости в результате вращения пластин от точки с максимальным зазором между ротором и цилиндром до точки с минимальным зазором. Сжатый пар нагнетается из цилиндра через отверстие в его стенке вблизи точки с минимальным зазором. Максимальная степень сжатия для ротационного пластинчатого компрессора равна 7.

Как и в компрессоре с катящимся поршнем, ротационный пластинчатый компрессор также должен иметь обратный клапан во всасывающем или нагнетательном трубопроводе для предотвращения перетечки нагнетаемого пара обратно через компрессор и всасывающий трубопровод в испаритель при отключении компрессора.

Хотя ротационные компрессоры являются машинами с внутренней конструктивной степенью сжатия, они менее подвержены вибрации и в них почти нет пульсации нагнетаемого пара хладагента по сравнению с поршневыми компрессорами, вследствие вращательного движения ротора и более плавного и постоянного характера потока всасываемого и нагнетаемого пара. Как и поршневые, ротационные компрессоры имеют объемные потери и потери при сжатии из-за обратной перетечки пара в зазорах вследствие нагрева цилиндра и дросселирования. Однако, в связи с тем что мертвый объем и соответствующую

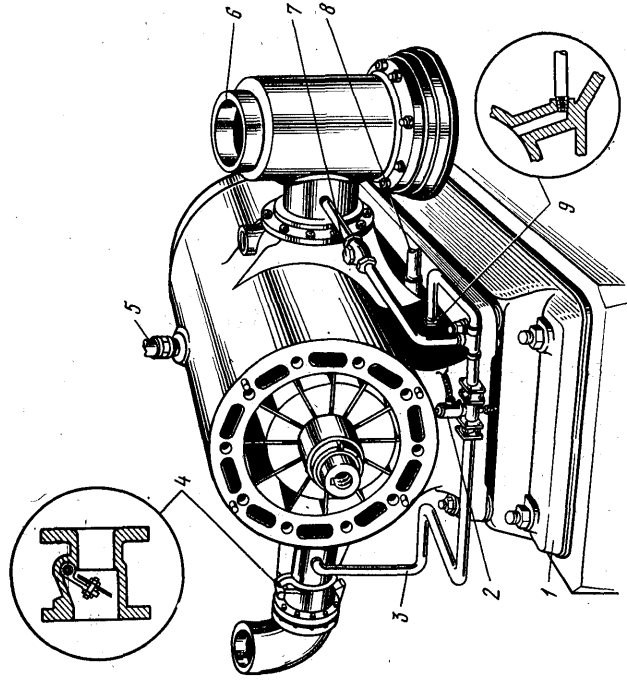


Рис. 18-18. Ротационный пластинчатый компрессор большой производительности:

1 — рама компрессора; 2 — автоматический вентиль для регулирования производительности; 3 — байпасная линия; 4 — обратный клапан нагнетаемого пара; 5 — выходное отверстие для масла в рубашке цилиндра; 6 — фильтр всасываемого пара; 7 — обратный клапан на уравнивательной линии; 8 — входное отверстие для масла в рубашку цилиндра; 9 — расширительная полость кармана

щее повторное расширение пара из мертвого объема невелики, коэффициент подачи ротационных компрессоров относительно высок и имеет величину от 0,65 до 0,8 в зависимости от конструкции и рабочих условий.

Небольшие ротационные компрессоры с катящимся поршнем и ротационные пластинчатые компрессоры применяются в течение многих лет в домашних холодильниках и морозильниках, работающих на хладагентах R12 и R114. В последнее время в некоторых небольших агрегированных кондиционерах используют ротационные компрессоры с катящимся поршнем потребляемой мощностью до 6 кВт.

Большие ротационные пластинчатые компрессоры (рис. 18-18) широко используются в качестве ступени низкого

давления (бустер-компрессора) в многоступенчатых компрессyjnych холодильных установках, работающих на R12, R22 и аммиаке при температуре кипения хладагента до -87°C .

Эти компрессоры имеют масляную или водяную охлаждающую рубашку для предотвращения перегрева и повышения КПД компрессора. Одна фирма применяет для этой цели способ непосредственного охлаждения хладагентом R11.

Большие компрессоры обычно смазываются под давлением с помощью ротационного шестеренчатого насоса с непосредственным приводом от вала компрессора. В некоторых случаях масло охлаждается и подается в цилиндр для смазки и охлаждения пластин, а также для создания масляной пленки