



**Автономная некоммерческая образовательная организация
«Учебный центр «Остров»**

Ул. Коммунистическая, д. 23, г. Мытищи Московской области, 141011, Россия
Тел./Факс: (495) 726-53-53 Факс: (495) 726 53 66
www.ostrov-edu.ru E-mail: edu@ostrov.ru

Определение количества хладагента и объема ресивера для холодильных установок

Вольфганг Линк, г. Фридберг и Манфред Гибе, г. Майнталь

Существует непосредственная зависимость между требуемым количеством холодильного агента в установках различного типа и объемом ресивера, и поэтому их расчет нельзя проводить раздельно друг от друга.

В технической литературе часто приводятся приблизительные вычисления количества хладагента. Кроме того, в большинстве случаев не учитывается миграция хладагента по холодильному контуру при простое оборудования. Все это приводит к ошибочному определению размеров ресивера и возможным сбоям в работе холодильных установок. В нижеприведенных вычислениях во внимание приняты практические условия эксплуатации холодильных установок и требования техники безопасности. Рассчитанные таким образом холодильные установки как правило не испытывают сбоев в работе.

Применение алгоритма расчета количества хладагента и объема ресиверов будет продемонстрировано на двух примерах.

Количество хладагента

Для расчета количества хладагента холодильной установки применяется коэффициент заполнения Φ , то есть, отношение объема заполненной жидкостью секции V_F к общему объему V данной секции установки.

$$\Phi = \frac{V_F}{V} \text{ коэффициент заполнения (1)}$$

Общее количество циркулирующего в установке хладагента равняется M

$$M = \sum_{i=1}^n V_i (\Phi \cdot \rho_{Fi} + (1 - \Phi) \cdot \rho_{Di}) \text{ [кг] (2)}$$

Где:

V_i = внутренний объем секции установки, м^3

i = порядковый номер n секции установки

ρ_{Fi} = плотность жидкости, кг/м^3

ρ_{Di} = плотность пара, кг/м^3

Значения плотности берутся с учетом температуры и давления хладагента на рассматриваемом участке установки, из таблиц свойств пара, либо, из диаграмм свойств используемого хладагента. Для оценки достаточно расчетов только по жидким составляющим.

Коэффициенты Φ секций, однозначно заполненных только паром или только жидкостью, вычисляются просто. Согласно определению, коэффициент Φ для следующих узлов будет равняться:

Узел	Φ
Жидкостный трубопровод (от конденсатора до расширительного клапана)	1
Всасывающий трубопровод (от испарителя до компрессора)	0
Нагнетательный трубопровод (от компрессора до конденсатора)	0

Испаритель и конденсатор заполнены паром и жидкостью. Для них существуют опытные величины коэффициентов заполнения, зависящие от конструкционных особенностей и уровня нагрузки на секцию.

Теплообменники воздушного охлаждения

Узел	Φ
Конденсатор	0,5 - 0,6
Испаритель	0,18 (полная нагрузка)
	0,3 (частичная нагрузка)

Необходимо, разумеется, также учитывать составляющую имеющегося в наличии ресивера. Его размеры сильно зависят от схемы холодильного контура, (см. далее). В силу этого *количество хладагента рассчитывается сначала без учета ресивера.*

Теплообменники водяного охлаждения

Узел	Φ
Пластинчатый испаритель (подача воды снизу)	0,8
Пластинчатый конденсатор	0,25 - 0,35
Кожухотрубный конденсатор (конденсация в кожухе)	0,3 - 0,4
Кожухотрубный испаритель (испарение в отдельной трубке)	0,5 - 0,6

Схема 1

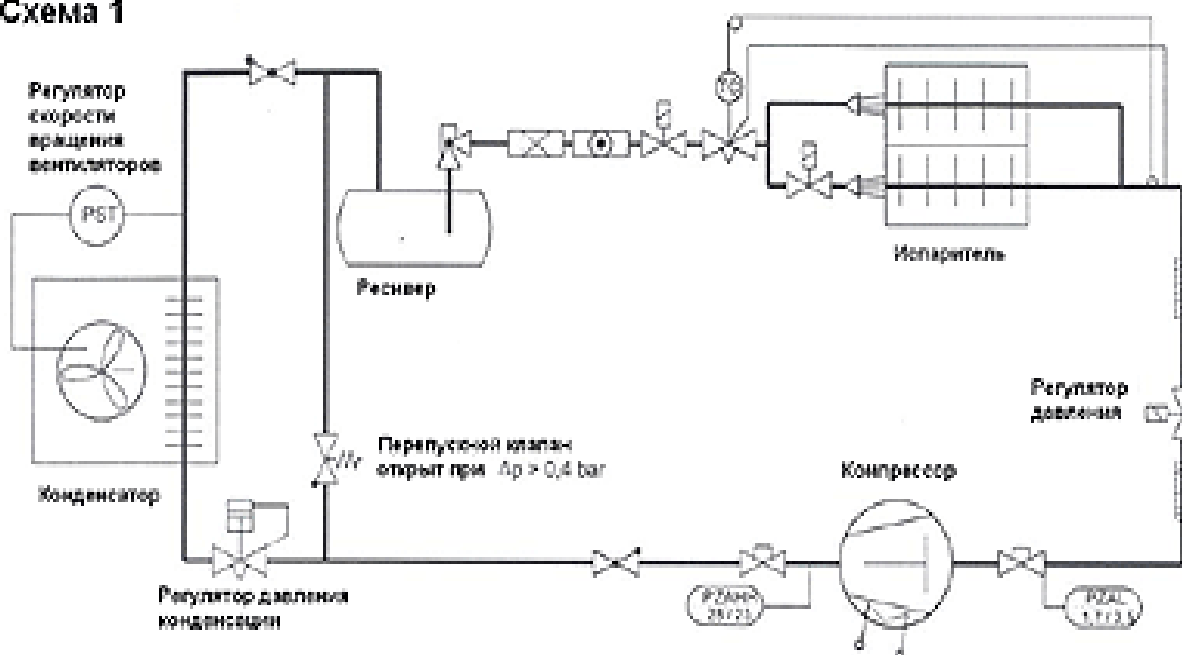


Схема 1. Схема холодильного контура с конденсатором воздушного охлаждения

Установки со сложной конструкцией, включающие в себя промежуточные регенеративные теплообменники, системы регулирования производительности компрессоров через обводной трубопровод (байпасирование), аккумуляторы жидкого хладагента на линии всасывания и прочее должны рассматриваться в таком же ключе.

Начать следует со сбора данных об объемах отдельных участков установки, определить согласно холодильному циклу плотности и коэффициенты заполнения, и получить путем подстановки данных в уравнение (2), расчетное количество хладагента.

Кроме того, при стоянке (неработающих компрессорах) оборудования хладагент скапливается в наиболее холодных частях установки. Для установок с теплообменниками воздушного охлаждения - это открытые в холодное время года участки установки. Коэффициент заполнения для соответствующих узлов (плотность - при минимальной температуре окружающей среды) будет иметь следующие значения:

Узел	φ
Конденсатор	1
Нагнетательный трубопровод от регулятора давления до конденсатора	1
Нагнетательный трубопровод без регулятора давления	0
Жидкостный трубопровод	1

Полученные величины количества хладагента для установок, эксплуатируемых во всех режимах, и при простое, необходимо сравнить. **Наибольшая из них будет соответствовать требуемому количеству хладагента без ресивера.**

Объем ресивера

Ресивер предназначен для предотвращения сбоев в работе холодильной установки, возникающих при различных штатных ситуациях и при изменении условий окружающей среды.

Необходимо также заранее определить, будет ли ресивер использоваться для приема всего объема хладагента, к примеру, на время ремонтных работ, или только для компенсации расхода хладагента вследствие различных условий эксплуатации (частичная нагрузка, изменившаяся температура окружающей среды). Промежуточное решение - холодильные установки, оснащенные системой регулирования давления в конденсаторе с регуляторами давления и трубопроводом обвода конденсатора.

Следует стремиться к использованию по возможности, меньшего по объему ресивера, чтобы сократить количество хладагента в системе, и, соответственно, снизить затраты на его закупку и нанесение возможного экологического вреда при аварии. Слишком большой ресивер не создаст дополнительных трудностей, но обойдется дорого. Неоправданно маленький ресивер, может стать причиной выхода из строя установки.

Количество хладагента, и все зависимые от него параметры, известны. Предназначение подлежащего использованию ресивера, очевидно. Таким образом, можно приступить к расчету его объема.

Серийные установки *с теплообменниками водяного охлаждения* (т.н. чиллеры) имеют компактную конструкцию. Количество хладагента для них рассчитано производителем и указано в сопроводительной документации. Вследствие укороченной длины трубопроводов уход хладагента едва ли может достигнуть критических масштабов, поэтому в таких установках используются ресиверы малого размера или не устанавливаются вовсе.

Не исключена при определенных обстоятельствах и эксплуатация холодильных установок с теплообменниками воздушного охлаждения без ресивера. Такие установки должны быть оснащены конденсатором с резервной производительностью, т.е. иметь дополнительный объем, или на протяжении всего срока эксплуатации работать практически в стабильном режиме. Наряду с этим, требуется точное заполнение системы. Малые холодильные установки с такой конструкцией встречаются крайне редко, а аналогичные установки большой производительности с воздушным охлаждением практически неосуществимы. Объемное расширение, например, жидкого хладагента R22 в температурных пределах от -18 °С и до +50 °С (температура конденсации) составляет 25%.

Если установка оснащена пластинчатым конденсатором, который по отношению к своей производительности имеет малый внутренний объем, необходимо (ввиду изменения объема хладагента в пределах минимальной и максимальной рабочей температуры) предусмотреть некий буферный объем в виде расширения (увеличения диаметра) трубопровода после конденсатора. Следует замерить минимальную и максимальную рабочую температуру и вычислить, не учитывая газонаполненные секции с соответствующими плотностями ρ_F и коэффициентами Φ , разницу объемов:

$$\Delta V = \sum_{i=1}^n \frac{V_i \cdot \Phi_i \cdot (\rho_{F_{\max}} - \rho_{F_{\min}})_i}{\rho_{F_{расч}}}. 10^3 \text{ [дм}^3\text{]} \quad (3)$$

Для учета допусков заполнения объема компенсационного ресивера берется двойное значение от рассчитанной разницы объемов:

$$V_{\text{полн}} = 2 \cdot \Delta V \text{ [дм}^3\text{]} \quad (4)$$

Для *компактных холодильных установок с воздушным охлаждением* (с короткими трубопроводами, двумя воздушными потоками, встроенным конденсатором) этого также

достаточно, если система оснащена малым компенсационным ресивером, объем которого соответствует величине, вычисленной по формулам (3) и (4).

Его объем должен быть пропорционален степени удаленности конденсатора от холодильной установки. Несмотря на это, при холодном пуске компенсационный ресивер и жидкостный трубопровод заполнены только паром. Проходит достаточно много времени, пока эти узлы вновь не заполнятся жидкостью, жидкий хладагент не поступит на расширительный клапан и давление всасывания не достигнет значения, достаточного для обеспечения стабильной работы холодильной установки. На это время клапан регулятора давления на всасывании должен быть перекрыт. Продолжительность данной фазы должна быть, по возможности, минимальна, так как, в это время снабжение компрессора маслом не гарантировано.

Чтобы разрешить эту проблему, имеет смысл контролировать давление в конденсаторе путем регулирования воздушного потока. Например, путём регулирования частоты вращения вентилятора или путём регулирования расхода воздуха с помощью механических регуляторов. Оба метода направлены на создание достаточно высокого давления конденсации в возможно короткие сроки.

Воздушное охлаждение и регулирование давления в конденсаторе

Требуемый объем ресивера зависит от способа регулирования. При регулировании давления путем регулирования воздушных потоков допустимая продолжительность времени перекрытия регулятора давления на всасывании является критерием того, необходим ли малый компенсационный ресивер или больший полноразмерный ресивер. Объем компенсационного ресивера рассчитывается по формулам (3) и (4). Наличие большего по объему ресивера сокращает пусковой период. Кратчайшее время пуска достигается, если ресивер рассчитан в соответствии со схемой установки регулирования давления в конденсаторе при помощи регуляторов давления. Если применяется способ регулирования давления в конденсаторе с использованием обводного трубопровода в обход конденсатора, то необходимо обязательное сохранение остаточного 10-15%-ного заполнения для обеспечения надёжного пуска установки при низкой температуре окружающей среды.

Таким образом, значения коэффициента заполнения Φ ресивера равняются:

Узел	Φ
Ресивер	0,1
Ресивер с резервом допустимых изменений количества хладагента	0,25

Ресивер с остаточным заполнением, не предназначенный для приема всего объема хладагента

Допустим, что подлежащий применению ресивер, подобно компенсационному ресиверу, компенсирующему только разницу объемов во время работы установки, также обязан дополнительно вмещать 10%-ный объем остаточного заполнения, как в случае, рассмотренном выше, но не предназначен для приема всего объема хладагента. При каком-то режиме эксплуатации он должен быть заполнен хладагентом на 100%, и поэтому, не может быть перекрыт со стороны впуска по отношению к холодильной установке. Требуемый объем такого ресивера вычисляется по формуле:

$$V_{\text{рез.}} = \frac{M_{\text{max}} - M_{\text{min}}}{0,9 \cdot \rho_{F \text{ расчет.}}} \cdot 10^3 \text{ [дм}^3 \text{]} \quad (5)$$

где

M_{max} = наибольшее расчетное количество хладагента [кг]

M_{min} = наименьшее расчетное количество хладагента [кг]

$\rho_{F \text{ расчет.}}$ = плотность жидкого хладагента при расчетной температуре [кг/м³]

Выбираем наиболее близкий по объему ресивер, из всех имеющихся в наличии, объем которого будет равен $V_{\text{ресивера}}$.

Количество хладагента с учетом такого ресивера вычисляется, см. формулу (2), следующим образом:

$$M_{\text{общ.}} = M_{\text{max}} + V_{\text{ресивера}} (\varphi \cdot \rho_{F20^\circ} + (1 - \varphi) \cdot \rho_{D20^\circ}) \text{ [кг]} \quad (6)$$

ρ_{F20° = плотность жидкого хладагента при температуре +20 °С [кг/м³]

ρ_{D20° = плотность парообразного хладагента при температуре +20 °С [кг/м³]

$V_{\text{ресивера}}$ = объем ресивера

Ресивер с остаточным заполнением, предназначенный

для приема всего объема хладагента

На практике большинство установленных ресиверов в состоянии вмещать весь объем хладагента системы и могут быть перекрыты с впускной и выпускной стороны. Также им необходимо удерживать как 10-15%-ный объем остаточного заполнения, так и парообразную прослойку до 10% собственного объема при температуре +20 °С, в случае заполнения общим количеством хладагента, циркулирующего в системе.

Оно равно:

$$M = M_{\text{max}} + V_{\text{рез.}} (\varphi \cdot \rho_{F \text{ min}} + (1 - \varphi) \cdot \rho_{D \text{ min}}) \quad (7)$$

$\rho_{F \text{ min}}$ = плотность жидкого хладагента при наименьшей температуре окружающей среды, [кг/м³]

$\rho_{D \text{ min}}$ = плотность парообразного хладагента при наименьшей температуре окружающей среды, [кг/м³]

M = текущее значение количества хладагента, [кг]

Вследствие требования вмещения газообразной прослойки объемом 10% собственного объема ресивера справедливо следующее тождество:

$$0,9 \cdot V_{\text{рез.}} = \frac{M}{\rho_{F20^\circ}} \quad (8)$$

Значение M из формулы (7) вводим в формулу (8) и, перенеся неизвестное в левую сторону равенства, получаем:

$$V_{\text{рез.}} = \frac{M_{\text{max}}}{0,9 \cdot \rho_{F20^\circ} - \varphi \cdot \rho_{F_{\text{min}}} - (1 - \varphi) \cdot \rho_{D_{\text{min}}}} \cdot 10^3 \quad [\text{дм}^3] \quad (9)$$

После этого мы должны подобрать близкий по объему ресивер из имеющихся в каталогах, а затем окончательное количество хладагента рассчитать по формуле (6).

Ресивер, вследствие применения хладагентов первой группы (R22, R407C, R404A и др.), подлежит испытанию согласно Правилам Ростехнадзора ПБ 03-576-03 (Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов под давлением), если значение произведения рабочего избыточного давления [бар] и полезного внутреннего объема ресивера [дм³] превышает 200 бар*дм³.

При применении хладагентов второй группы (например, NH₃), или третьей группы (например, R290 пропана), ресиверы также подлежат испытаниям, но даже, если значение произведения рабочего избыточного давления [бар] и внутреннего объема ресивера [дм³] не превышает 200 бар*дм³.

Если ресивер перекрывается с обеих сторон, как показано на схеме 1, то требуется установка дополнительного предохранительного перепускного устройства, предотвращающего превышение допустимых значений избыточного рабочего давления жидкости. В случае расчета ресивера в соответствии с формулой (9), величина избыточного рабочего давления не может превысить допустимую величину. Однако следует обеспечить заполнение установки хладагентом не выше положенной нормы.

Схема 2

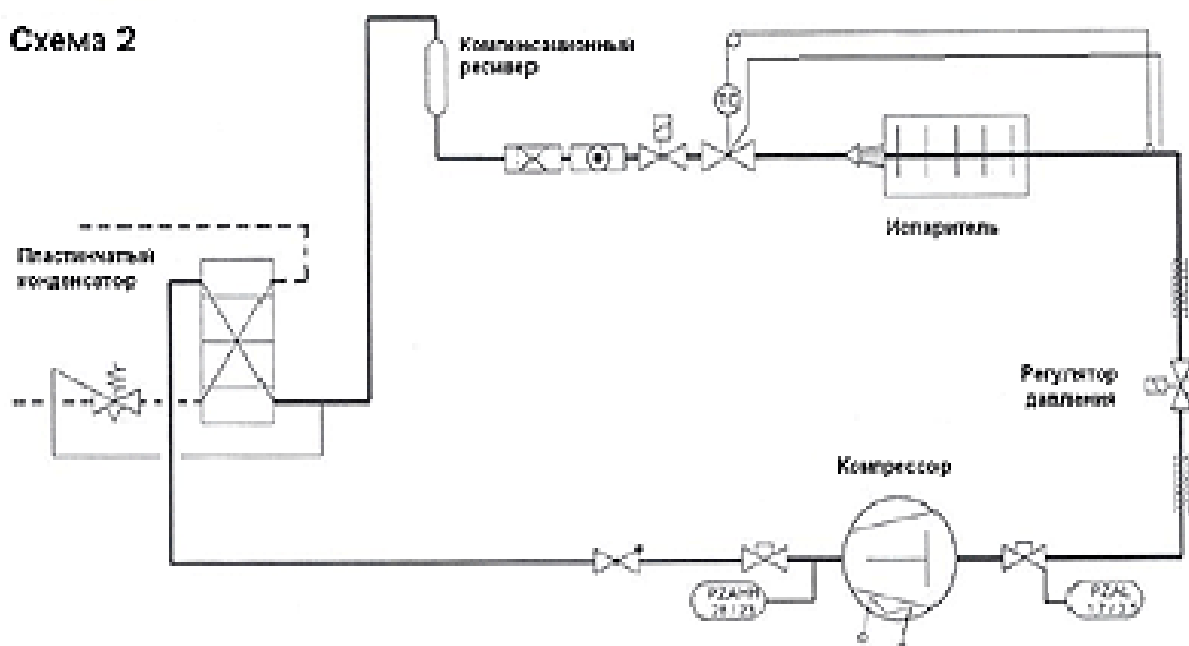


Схема 2. Схема холодильного контура с конденсатором водяного охлаждения

Пример 1

Холодильная установка с теплообменниками воздушного охлаждения

(схема холодильного контура 1)

Регулирование давления в конденсаторе с помощью регулятора давления

Регулирование производительности компрессора с помощью дросселя на всасывании

Ресивер, вмещающий общий объем хладагента

Хладагент R22

Холодопроизводительность 25 кВт

Температура конденсации +45 °С, переохлаждение 2 К

Температура испарения +6 °С, перегрев 10 К

Объем конденсатора, включая трубопроводы коллектора 0,019 м³ $\Phi=0,6$

Объем испарителя, исключая трубопроводы коллектора 0,0104 м³ $\Phi=0,3$

Объем жидкостного трубопровода $\varnothing 18 \times 1$ 0,00633 м³

Объем напорного трубопровода $\varnothing 22 \times 1$ 0,00943 м³

Объем всасывающего трубопровода $\varnothing 28 \times 1$ 0,00160 м³

Без учета компрессора

Минимальная температура окружающей среды при стоянке оборудования -18 °С

Коэффициент заполнения ресивера, минимальный $\Phi=0,15$

Сначала рассчитаем количество хладагента без ресивера. Для этого понадобятся значения плотностей хладагента, приведенные в Таблице 1.

Таблица 1

Температура	Плотность ρ		Примечание
	Жидкость	Пар	
°С	кг/м ³	кг/м ³	
94		54,9	Нагнетание
45	1108	75,07	Конденсатор
43	1117	71,27	Жидкостная линия
20	1214	38,4	Установка в состоянии покоя
16		34,28	Всасывание
6	1265	25,52	Испарение
-18	1344	11,57	Мин. t° окр. среды

Количество хладагента в рабочем состоянии по формуле (2), суммируется в соответствии с Таблицей 2.

Таблица 2

Обозначение	V	Φ	ρ_F	$\Phi \cdot \rho_F$	ρ_D	$(1-\Phi) \cdot \rho_D$	$V [\Phi \cdot \rho_F + (1-\Phi) \cdot \rho_D]$
	1	2	3	4	5	6	7
Ед. измерения	м ³	-	кг/м ³	кг/м ³	кг/м ³	кг/м ³	кг
Конденсатор	0,019	0,6	1108	664,8	75,07	30,03	13,2
Испаритель	0,0104	0,3	1265	379,5	25,52	17,86	4,13
Жидкостный трубопровод	0,00633	1	1117	1117		0	7,07
Нагнетательный трубопровод	0,00943	0			54,9	54,9	0,52
Всасывающий трубопровод	0,0016	0			34,28	34,28	0,055
Всего:							24,98

Количество хладагента в состоянии покоя, при температуре -18°C, определяется в соответствии с Таблицей 3.

Таблица 3

Обозначение	V	Φ	ρ_F	$\Phi \cdot \rho_F$	ρ_D	$(1-\Phi) \cdot \rho_D$	$V [\Phi \cdot \rho_F + (1-\Phi) \cdot \rho_D]$
	1	2	3	4	5	6	7
Ед. измерения	м ³	-	кг/м ³	кг/м ³	кг/м ³	кг/м ³	кг
Конденсатор	0,019	1	1344	1344		0	25,54
Испаритель	0,0104	0		0	38,4	38,4	0,40
Жидкостный трубопровод	0,00633	1	1344	1344		0	8,51
Нагнетательный трубопровод до регулятора давления	0,00721	0		0	11,57	11,57	0,08
Нагнетательный трубопровод от регулятора давления до конденсатора	0,00222	1	1344	1344		0	2,98
Всасывающий трубопровод	0,0016	0			38,4	38,4	0,06
Всего:							37,57

Текущее рассчитанное количество равно 37,6 кг.

Необходимый объем ресивера в соответствии с формулой (9), составит:

$$V_{\text{необх.}} = \frac{37,6 \cdot 10^3}{0,9 \cdot 1214 - 0,15 \cdot 1344 - 0,85 \cdot 11,57}$$

$$V_{\text{необх.}} = 42,7 \text{ дм}^3$$

Ближайшие по объему ресиверы, из имеющихся, например, в каталоге "Битцер" **DP-300-6**:

- горизонтальный F552T, имеет объем 54 дм³,
- вертикальный FS562, имеет объем 56 дм³.

Таким образом, в соответствии с формулой **(6)**, окончательное количество хладагента в холодильной установке с горизонтальным ресивером F552T будет равняться:

$$M_{\text{общ.}} = 37,6 + 0,054 \cdot (0,15 \cdot 1214 + 0,85 \cdot 38,4)$$

$$M_{\text{общ.}} = 49,2 \text{ кг}$$

Пример 2

Холодильная установка с теплообменниками водяного охлаждения

(схема холодильного контура 2)

Пластинчатый конденсатор с регулятором расхода охлаждающей жидкости

Компенсационный ресивер

Хладагент R134a

Холодильная мощность 18 КВт

Расчетная температура конденсации +48 °С, переохлаждение 2 К

Температура испарения +8 °С, перегрев 10 К

Объемы

Конденсатор 1,2 дм³ $\Phi = 0,3$

Испаритель 9,0 дм³ $\Phi = 0,3$

Жидкостный трубопровод 0,09423 дм³ $\Phi = 1$

Расчет по формулам **(3)** и **(4)**, без учета заполненных паром секций установки в соответствии со значениями, приведенными в **таблице 4**.

Таблица 4

Обозначение	Объем	температура		плотность		$\Delta\rho$	Φ	числитель из (3)
		макс.	мин.	макс.	мин.			$V[\varphi \cdot \rho_F + (1 - \varphi) \cdot \rho_D]$
	1	2	3	4	5	6	7	8
Ед. измерения	дм ³	°С	°С	кг/м ³	кг/м ³	кг/м ³	-	дм ³ * кг/м ³
Конденсатор	1,2	62	32	1041,8	1178,8	137	0,3	49,32
Испаритель	9,0	11	3	1256,3	1283,4	27,1	0,3	73,17
Жидкостный трубопровод	0,09423	62	32	1041,8	1178,8	137	1	12,91
Всего:		46		1120,0				135,40

Таким образом, в соответствии с формулой **(3)**, объем ΔV равен:

$$\Delta V = \frac{135,40}{1120} = 0,12 \text{ дм}^3,$$

а объем компенсационного ресивера по формуле (4), равен:

$$V_{\text{полн.}} = 2 \cdot \Delta V = 0,24 \text{ дм}^3.$$

Следовательно, необходимо использовать компенсационный ресивер с внутренним объемом, равным 0,24 дм³.

В качестве компенсационного ресивера в данном случае можно использовать, например, отрезок медной трубы Ø35x1,5x300, или отрезок медной трубы Ø54x2x120, интегрированный в жидкостной трубопровод установки.

Выводы

Расчет объема ресивера дает возможность определить верного количества хладагента, при этом окончательное количество можно вычислить только после установления внутреннего объема используемого ресивера.

В компактных холодильных установках с теплообменниками воздушного или водяного охлаждения с собранным в едином корпусе испарителем с расширительным клапаном, компрессором и конденсатором, для поглощения расширяющегося хладагента достаточно использования малого компенсационного ресивера.

Для установок с внешним конденсатором (в основном, с воздушным охлаждением), следует обязательно обращать внимание на возможную миграцию хладагента во время выключения компрессора, в расположенные за пределами корпуса установки участки холодильного контура. Если в результате расчетов необходимое количество хладагента при простое окажется больше требуемого в рабочем режиме, следует установить ресивер, позволяющий вмещать избыток хладагента.

Ресивер установки, оснащённой регуляторами давления в конденсаторе, должен обязательно оставаться заполненным минимально необходимым количеством хладагента в случае его миграции во время стоянки.

Если ресивер блокируется со сторон входа и выхода хладагента, то необходимо предусматривать защиту ресивера от превышения максимально допустимого избыточного рабочего давления. То есть на ресивере следует установить предохранительное устройство, предотвращающее превышение допустимых значений избыточного рабочего давления, например, автономный клапан, перепускающий с избыточное давление хладагента на сторону всасывания.