

## **Профессиональная публикация**

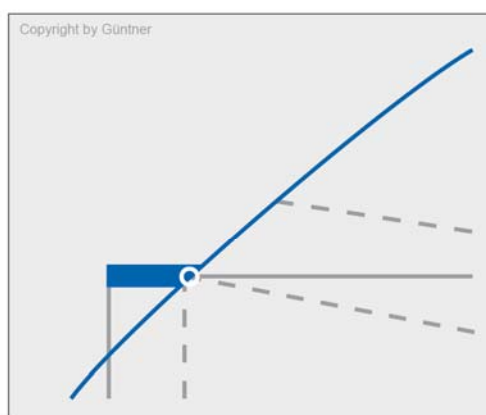
***Влияние переохлаждения хладагента на эффективность работы установки: «Переохлаждать, но правильно!»***

Основные аспекты темы:

- Теоретические основы и различные концепции переохлаждения
- Общее планирование установки
- Влияние переохлаждения на расчет компонентов и взаимодействие компонентов и настроек
- Практическая и экономическая оценка различных возможностей
- Энергетическая выгода и повышение эффективности
- Физические и технические границы переохлаждения

В данной статье представлен исчерпывающий обзор опубликованных на сегодняшний день работ по этому вопросу. Основное внимание уделено следующим аспектам:

- теоретические принципы
- различные концепции переохлаждения
- общее проектирование холодильной установки
- влияние переохлаждения на выбор компонентов
- взаимодействие компонентов и устройств управления
- практическая и экономическая оценка различных возможностей
- энергетический эффект и, как следствие, повышение кпд
- а также физические и технические границы переохлаждения.



Переохлаждение в (детальной) логарифмической диаграмме  $p, h$

**Рис. 1.** Переохлаждение в (детальной) логарифмической диаграмме  $p, h$

После краткого изложения технической вводной информации мы опишем состояние хладагента со стороны высокого давления в классической холодильной установке и его прохождение через компоненты контура. Хладагент подается из конденсатора через ресивер жидкого хладагента, регулирующий вентиль, испаритель и поступает во входной патрубок компрессора.

Для упрощения здесь будет описан контур хладагента однофазной компрессионной холодильной установки, в которой применяется метод холодного пара. Детальные условия разъясняются в соответствующих примерах или в сравнительных описаниях.

Промышленные холодильные установки, которые будут описаны подробно в этой статье, следует рассматривать как уникальный образец. Это означает, что для оптимальной эксплуатации холодильной установки необходимо сочетание трех факторов:

- навыки проектирования
- профессиональный монтаж
- обученный персонал с навыками использования технологии системы (эксплуатация)

**Переохлаждение жидкого хладагента в компрессионной холодильной установке является ОБЯЗАТЕЛЬНЫМ УСЛОВИЕМ для обеспечения эксплуатационной надежности!**

Далее мы подробнее рассмотрим, каким образом достигается переохлаждение, и для какого хладагента в той или иной степени целесообразно применять переохлаждение.

Здесь вкратце обобщаются известные основания указанных выше требований:

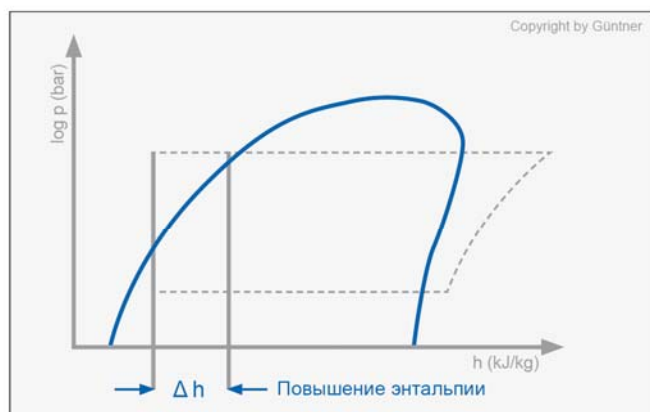
- Главная цель: обеспечить отсутствие пузырьков газа в хладагенте перед регулирующим вентилем.  
это также следует гарантировать при падении давления в жидкостной линии, вызванном фитингами или трубными соединениями и разницей в геодезической высоте (в случае, если поток хладагента подается из горизонтального положения вверх).
- гарантировать работу ТРВ в соответствии с характеристиками, указанными в технической документации  
(в основном для регулирующего вентиля при переохлаждении 4 К);
- предотвратить кавитацию в седле клапана;
- увеличить используемую энтальпию испарения = повышение производительности всей холодильной установки (см. рис. 2);
- для использования ВТО (внутреннего теплообменника) в особых условиях предусмотрена дополнительная защита компрессора.

Таким образом, речь идет не о том, скажем мы «ДА» или «НЕТ» переохлаждению, а скорее о том, «ОТКУДА оно берется?» и «КАК ДОРОГО оно обходится?»

Далее в статье будут представлены данные о том, что можно сделать на практике с конкретной холодильной установкой без высоких дополнительных затрат при соответствующих граничных условиях, и будет ли это иметь смысл.

$$\Delta Q_0 = m \cdot \Delta h$$

$\Delta Q_0$  = повышение холодопроизводительности [кВт],  $m$  = массовый расход хладагента [кг/с],  $\Delta h$  = повышение энтальпии, вызванное переохлаждением [кДж/кг]



Повышение энтальпии, вызванное переохлаждением

**Рис. 2.** Повышение энтальпии, вызванное переохлаждением

Далее мы подробнее рассмотрим, каким образом достигается переохлаждение, и для какого хладагента в той или иной степени целесообразно применять переохлаждение.

Здесь вкратце обобщаются известные основания указанных выше требований:

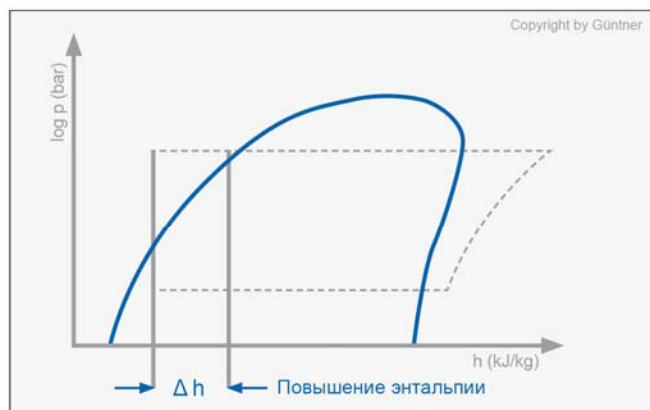
- Главная цель: обеспечить отсутствие пузырьков газа в хладагенте перед регулирующим вентилем.  
это также следует гарантировать при падении давления в жидкостной линии, вызванном фитингами или трубными соединениями и разницей в геодезической высоте (в случае, если поток хладагента подается из горизонтального положения вверх).
- гарантировать работу TRV в соответствии с характеристиками, указанными в технической документации  
(в основном для регулирующего вентиля при переохлаждении 4 К);
- предотвратить кавитацию в седле клапана;
- увеличить используемую энтальпию испарения = повышение производительности всей холодильной установки (см. рис. 2);
- для использования ВТО (внутреннего теплообменника) в особых условиях предусмотрена дополнительная защита компрессора.

Таким образом, речь идет не о том, скажем мы «ДА» или «НЕТ» переохлаждению, а скорее о том, «ОТКУДА оно берется?» и «КАК ДОРОГО оно обходится?»

Далее в статье будут представлены данные о том, что можно сделать на практике с конкретной холодильной установкой без высоких дополнительных затрат при соответствующих граничных условиях, и будет ли это иметь смысл.

$$\Delta Q_0 = m \cdot \Delta h$$

$\Delta Q_0$  = повышение холодопроизводительности [кВт],  $m$  = массовый расход хладагента [кг/с],  $\Delta h$  = повышение энтальпии, вызванное переохлаждением [кДж/кг]



Повышение энтальпии, вызванное переохлаждением

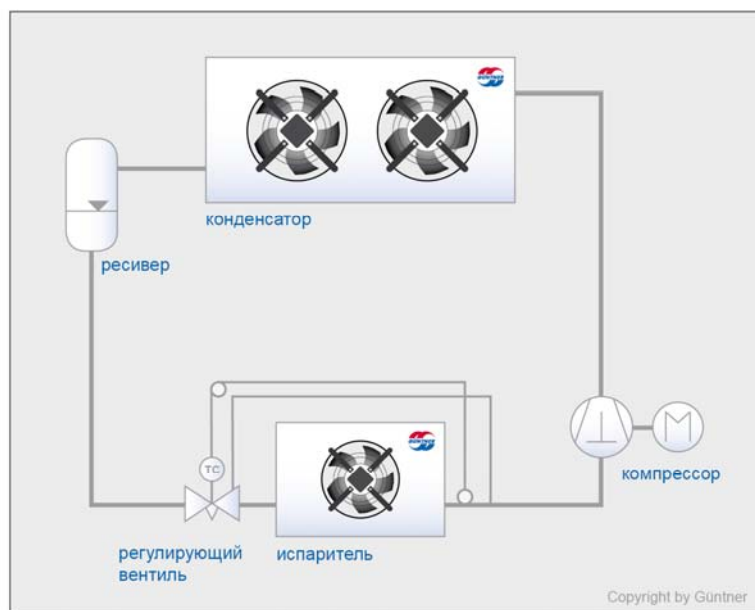
**Рис. 2.** Повышение энтальпии, вызванное переохлаждением

## Возможные типы переохлаждения

- Нерегулируемое, без дополнительного теплообменника -

1

### конденсаторе с воздушным охлаждением без дополнительных компонентов для переохлаждения



Создание переохлаждения в конденсаторе с воздушным охлаждением без дополнительных компонентов для переохлаждения

#### Преимущества:

- отсутствие дополнительных затрат
- отсутствие необходимости в дополнительных компонентах

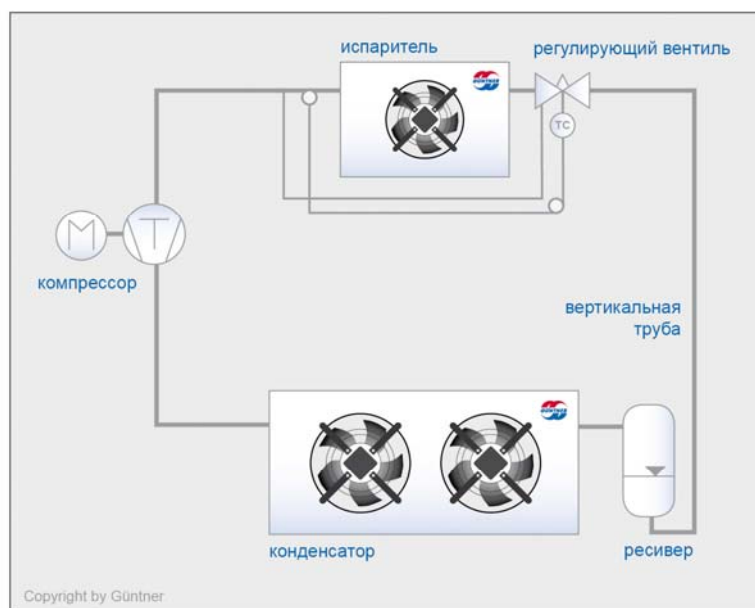
#### Недостатки:

- со стандартными конденсаторами реально достижимое переохлаждение не превышает 1 К
- отсутствие возможности регулирования степени переохлаждения
- термодинамическая неэффективность ввиду недостаточной теплоотдачи при одинаковой трассе трубопровода (низкая скорость жидкости)

**Рис. 3.** Создание переохлаждения в конденсаторе с воздушным охлаждением без дополнительных компонентов для переохлаждения

### ...в конденсаторе с воздушным охлаждением с вертикальной трубой после конденсатора

2



Создание переохлаждения в конденсаторе с воздушным охлаждением с вертикальной трубой после конденсатора

#### Преимущества:

- по сравнению с типом 1 возможно достижение более высоких значений
- отсутствие дополнительных затрат
- отсутствие необходимости в дополнительных компонентах

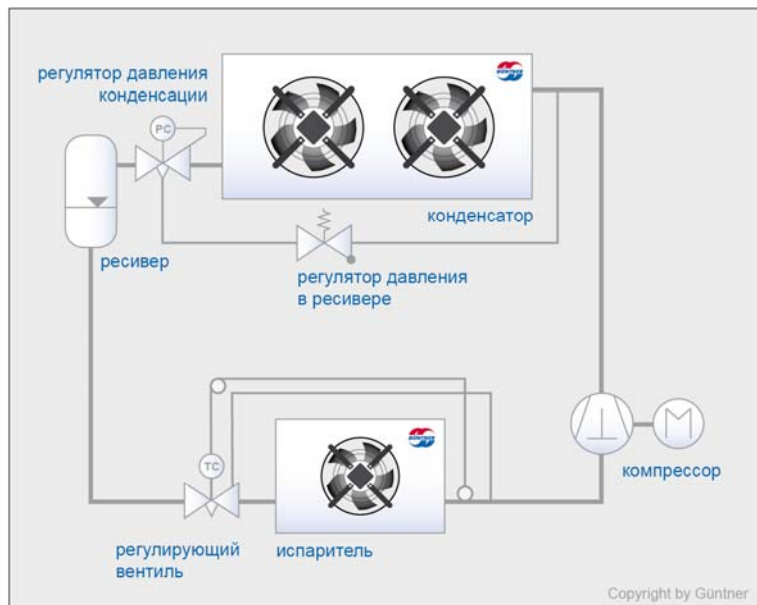
#### Недостатки:

- отсутствие возможности регулирования степени переохлаждения
- перепад давления зависит от геодезической высоты, соответственно, снижается КПД использования энергии
- термодинамическая неэффективность ввиду недостаточной теплоотдачи при одинаковой трассе трубопровода (низкая скорость жидкости)
- отсутствие достоверности относительно степени переохлаждения
- уменьшение используемой поверхности конденсатора
- вертикальная труба приводит к дополнительным перепадам давления (см. табл. 3)

**Рис. 4.** Создание переохлаждения в конденсаторе с воздушным охлаждением с вертикальной трубой после конденсатора

**...в конденсаторе с воздушным охлаждением за счет накопления хладагента, например, с помощью вентилей регулирования давления для зимнего режима**

3



Создание переохлаждения в конденсаторе с воздушным охлаждением за счет накопления хладагента, например, с помощью регулятора накопления для зимнего режима (вторичный эффект)

**Преимущества:**

- по сравнению с типом 1 возможно достижение более высоких значений
- отсутствие дополнительных затрат
- отсутствие необходимости в дополнительных компонентах

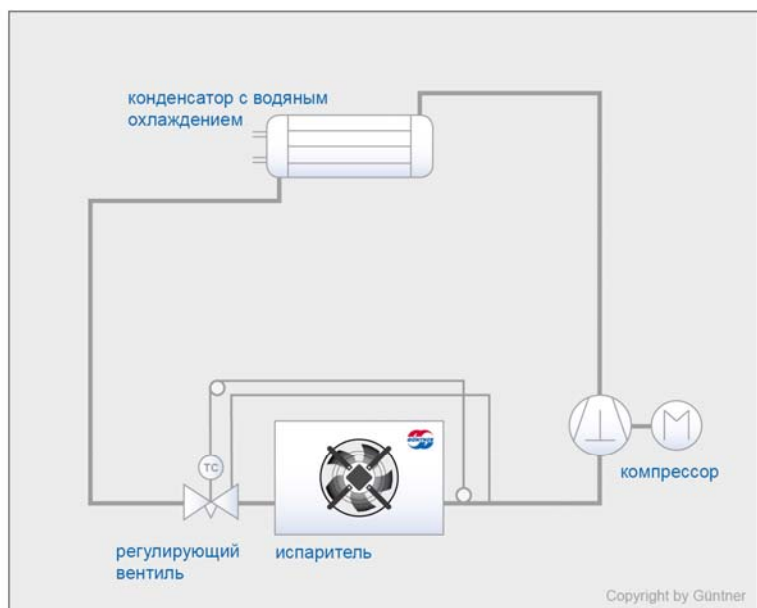
**Недостатки:**

- отсутствие возможности регулирования степени переохлаждения
- перепад давления, вызванный компонентами — соответственно снижается КПД использования энергии
- термодинамическая неэффективность ввиду недостаточной теплоотдачи при одинаковой трассе трубопровода (низкая скорость жидкости)
- отсутствие достоверности относительно степени переохлаждения
- уменьшение используемой поверхности конденсатора

**Рис. 5.** Создание переохлаждения в конденсаторе с воздушным охлаждением за счет накопления хладагента, например, с помощью регулятора накопления для зимнего режима (вторичный эффект)

**...в конденсаторе с водяным охлаждением**

4



Создание переохлаждения в конденсаторе с водяным охлаждением

**Преимущества:**

- почти никаких дополнительных затрат
- использование регенерации тепла
- почти идентичные степени переохлаждения при постоянных значениях температуры воды

**Недостатки:**

- преимущественно более высокие эксплуатационные затраты
- потребность в охлаждающей воде с подходящей температурой

**Рис. 6.** Создание переохлаждения в конденсаторе с водяным охлаждением

5

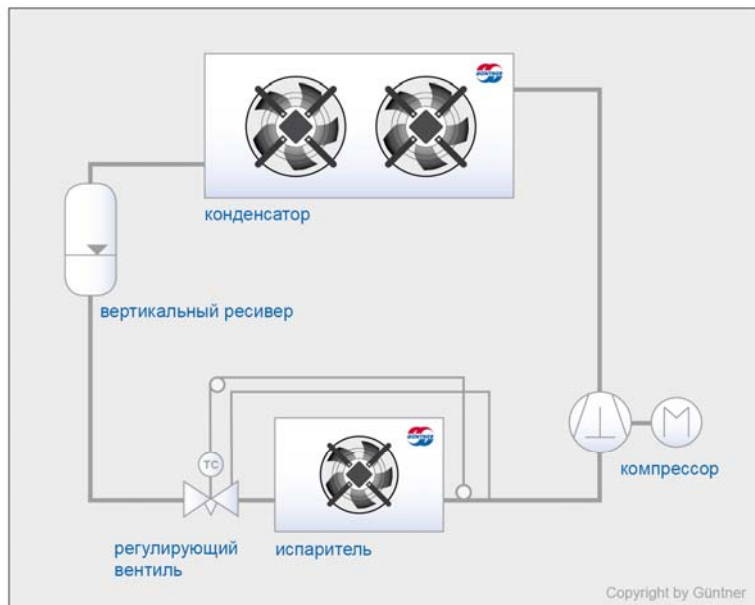
...в (вертикальном) ресивере

**Преимущества:**

- отсутствие дополнительных затрат

**Недостатки:**

- отсутствие возможности регулирования степени переохлаждения  
 - высокая зависимость степени переохлаждения от температуры окружающей среды  
 - переохлаждение может быть достигнуто в основном только с помощью вертикальных ресиверов с повышенным жидкостным уплотнением (больше хладагента = более низкий показатель TEWI (полный эквивалент глобального потепления))



Создание переохлаждения в вертикальном ресивере

Рис. 7. Создание переохлаждения в вертикальном ресивере

6

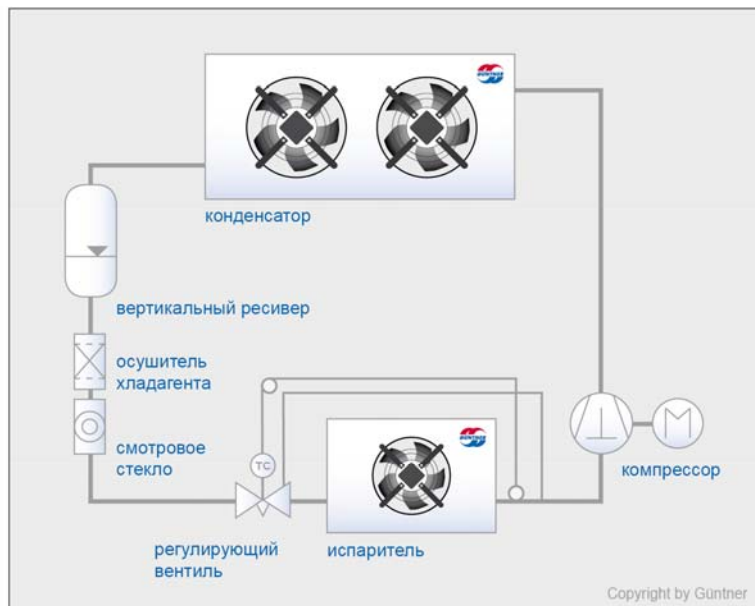
...в жидкостной линии и/или трубопроводной арматуре

**Преимущества:**

- отсутствие дополнительных затрат  
 - увеличение переохлаждения с помощью горизонтального или нисходящего трубопровода ( $t_{\text{хладагент}} > t_{\text{окруж.}}$ )

**Недостатки:**

- отсутствие возможности регулирования степени переохлаждения  
 - переохлаждение должно быть выполнено до первого перепада давления в жидкостной линии – иначе в линии может образовываться так называемый дроссельный пар с возможной последующей конденсацией.



Создание переохлаждения в жидкостной линии и трубопроводной арматуре

Рис. 8. Создание переохлаждения в жидкостной линии и трубопроводной арматуре

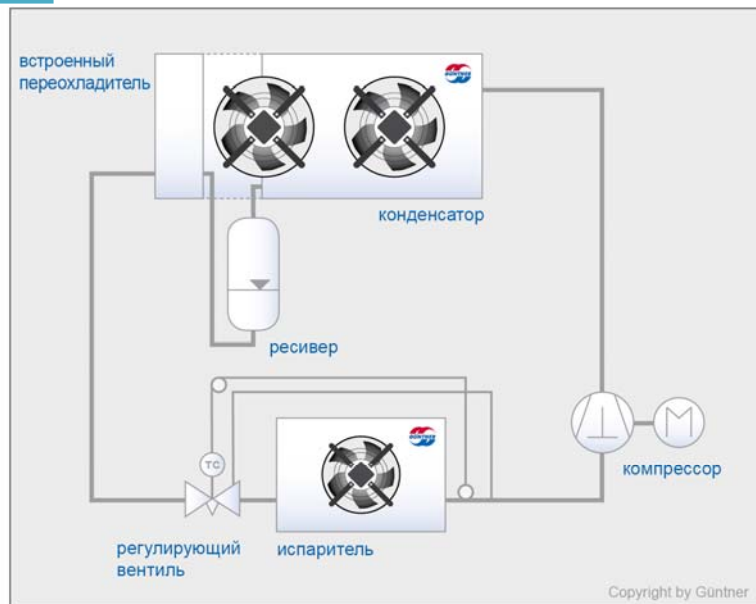


**- Нерегулируемое, с дополнительным теплообменником -**

**...в конденсаторе с воздушным охлаждением с отдельным блоком переохладителя**

(последовательность компонентов: конденсатор->ресивер->блок переохладителя конденсатора)

7



Создание переохлаждения в конденсаторе с воздушным охлаждением с отдельным змеевиком для переохлаждения

**Преимущества:**

- по сравнению с типом 1 возможно достижение более высоких значений  $-\Delta t = t_c - t_{L1}$  например,  $\Delta t = 12\text{ K} \rightarrow \Delta t_u = 10\text{ K}$
- реально достижимы значения переохлаждения примерно до 10 K

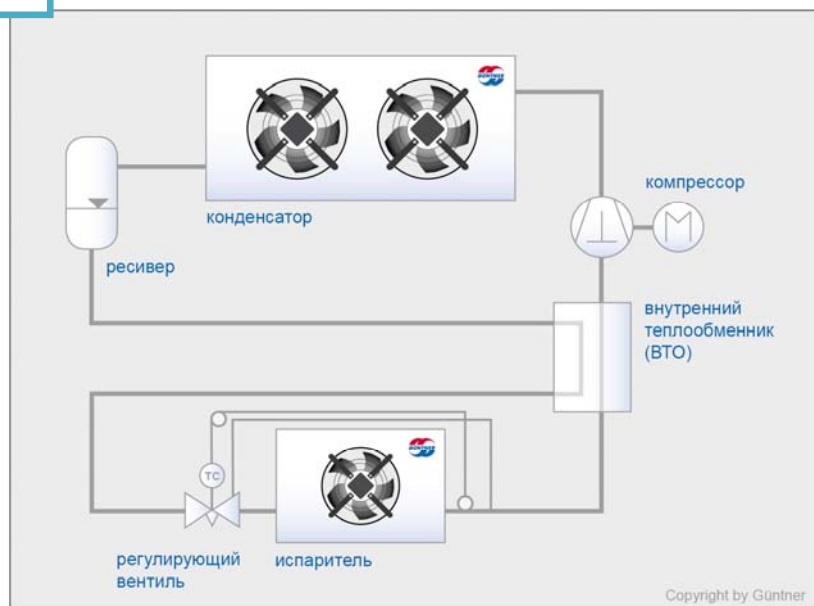
**Недостатки:**

- повышенные затраченные усилия на установку
- повышенные затраты на конденсатор, связанные со вторым контуром циркуляции
- при пониженной температуре окружающей среды может иметь место сильное, не предполагаемое переохлаждение (особенно в случае с горизонтальными конденсаторами, что вызвано тепловыми свойствами); ситуацию можно исправить путем прокладки трубопроводов через теплые помещения (возможно образование конденсата - > обеспечить изоляцию)

**Рис. 9.** Создание переохлаждения в конденсаторе с воздушным охлаждением с отдельным блоком для переохлаждения

**...во внутреннем теплообменнике, сокращенно: ВТО**

8



Создание переохлаждения во внутреннем теплообменнике (ВТО)

**Преимущества:**

- ВТО выполняет функции переохлаждения хладагента и дополнительного перегрева всасываемого пара
- небольшие дополнительные затраты
- дополнительная защита компрессора

**Недостатки:**

- отсутствие возможности регулирования степени переохлаждения
- недостоверность результатов относительно степени переохлаждения, однако степень можно рассчитывать для конкретного эксплуатационного режима
- слегка завышенные затраченные усилия на установку
- не подходит для хладагентов с показателем изэнтропии выше 1 (например, R717)
- применение этих хладагентов повышает риск коксования масла при высокой температуре перегрева
- дополнительный перепад давления особенно значителен при наличии низкотемпературных установок на стороне низкого давления

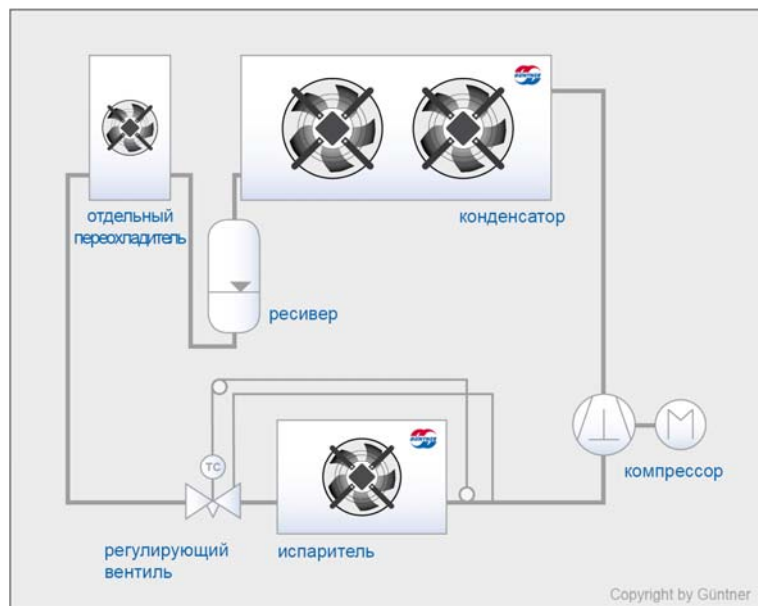
**Рис. 10.** Создание переохлаждения во внутреннем теплообменнике (ВТО)



- Регулируемое -

9

... в отдельном переохладителе с воздушным охлаждением



Создание переохлаждения в отдельном переохладителе с воздушным охлаждением

**Преимущества:**

- возможность целенаправленного регулирования переохлаждения в заданных границах
- относительная независимость от температуры окружающей среды
- для компонентов в жидкостной линии создается почти постоянный рабочий режим
- реально достижимы значения переохлаждения примерно до 10 К

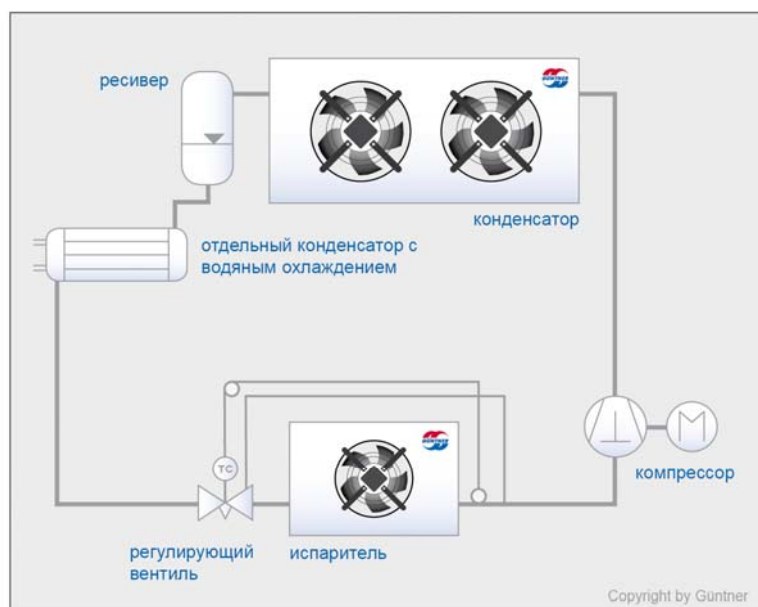
**Недостатки:**

- дополнительные затраты на компоненты и регулятор
- предельное значение превышения температуры окружающей среды составляет примерно 2 К

Рис. 11. Создание переохлаждения в отдельном переохладителе с воздушным охлаждением

10

... в отдельном конденсаторе с водяным охлаждением



Создание переохлаждения в отдельном конденсаторе с водяным охлаждением

**Преимущества:**

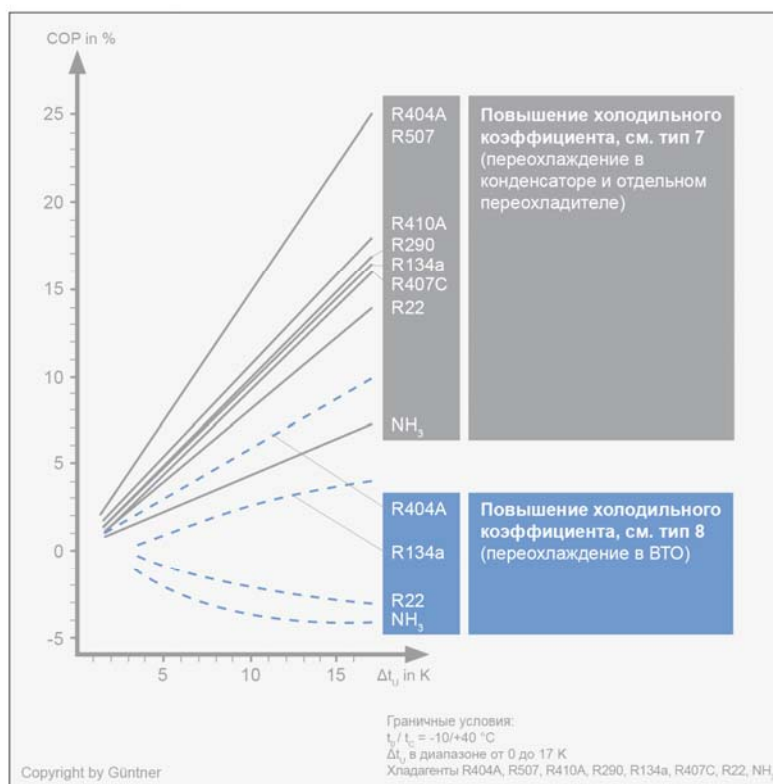
- возможность целенаправленного регулирования переохлаждения в заданных границах
- зависит только от холодного состояния воды
- температура окружающей среды почти не влияет на переохлаждение
- при необходимости: дополнительное применение для регенерации тепла

**Недостатки:**

- потребность в достаточном количестве технической воды с необходимой температурой
- дополнительный теплообменник и/или трассировка трубопроводов

Рис. 12. Создание переохлаждения в отдельном конденсаторе с водяным охлаждением

## Переохлаждение и оптимальный выбор хладагента:



Переохлаждение и оптимальный выбор хладагента

Рис. 13. Сравнение: влияние различных хладагентов на переохлаждение

Хладагент	Показатель изэнтропы K*	Энтальпия испарения R* / кДж/кг	Температура на выходе из компрессора t** / °C	Возможность применения переохлаждения	
				см. тип 7	см. тип 8
R404A / R507	1,02	168,3	≈ 70	++	++
R134a	1,06	198,8	≈ 77	+	—
R407C	1,09	214,0	≈ 85	+	—
R410A	1,10	222,5	≈ 90	+	—
R22	1,14	202,2	≈ 100	+	—
R290 (пропан)	1,07	374,5	≈ 75	+	—
R717 (NH <sub>3</sub> )	1,29	1262,2	≈ 165	—	—
R723 (NH <sub>3</sub> /DME)	...	913,4	≈ 140	+	—

\* при  $t = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$

По данным компании Solvay Fluor GmbH

\*\* при  $t / t_c / t_{0h} = -10 / +40 / +5$

Поршневой компрессор открытого типа  
 Неохлаждаемая компрессорная головка

++ хорошо подходит

+ отчасти подходит

— не подходит

(см. рис. 13)

Табл. 1. Сравнение хладагентов по термодинамическим свойствам

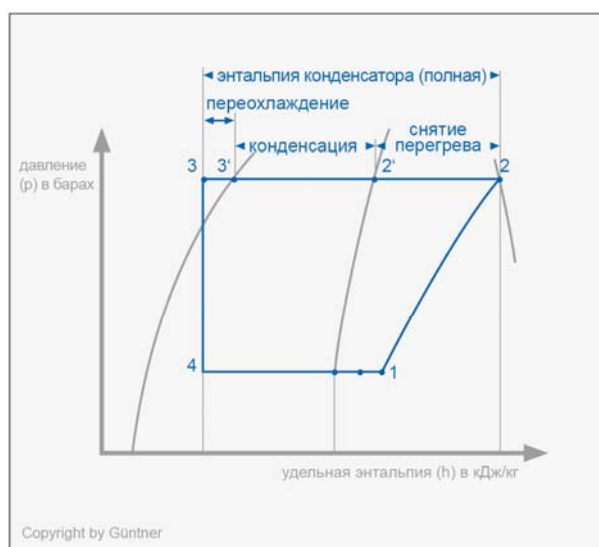
## Переохлаждение и конденсаторы с воздушным охлаждением

### Тезис:

«В конденсаторах с воздушным охлаждением реально достижима достаточная степень переохлаждения.»

Это верно только до известной степени. В специальной литературе три стадии переноса энергии в конденсаторе описаны абсолютно правильно.

1. Охлаждение горячего пара
2. Конденсация хладагента
3. Переохлаждение жидкого хладагента



Представление трех стадий конденсатора в логарифмической диаграмме  $p, h$

**Рис. 14.** Представление трех стадий конденсатора в логарифмической диаграмме  $p, h$

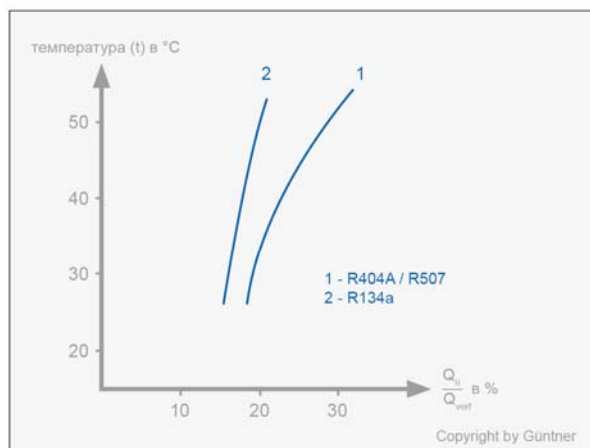
Степень конечного переохлаждения является, тем не менее, относительно низкой для стандартного конденсатора. Общеизвестно, что для переохлаждения хладагент должен быть полностью в жидком состоянии без пузырьков. Если хладагент не накапливается на выходе из конденсатора (например, регуляторе давления нагнетания и т.п.), значит степень переохлаждения является довольно низкой. На практике достижимо значение менее 1 К. Более крупный конденсатор, возможно даже избыточного размера, необязательно обеспечит повышенную степень переохлаждения — он, скорее, понизит давление конденсации; это одно из самых эффективных решений для сокращения затрат энергии, но оно не связано непосредственно с переохлаждением.

Основная функция конденсатора — осуществлять конденсацию хладагента. Для этой цели сначала должно быть выполнено снятие перегрева. Эта область представляет, в зависимости от температуры конденсации и конструкции, примерно от 5 % (R134a,  $t_c=25^\circ\text{C}$ ) до 15 % (R404a,  $t_c=50^\circ\text{C}$ ), для аммиака используется до 20 % доступной поверхности теплообменника.

Остальная поверхность используется в основном для конденсации; эта поверхность изменяется, но в противоположных направлениях, в зависимости от температуры конденсации. Таким образом, для конденсации используется примерно от 93 % (R134a,  $t_c=25^\circ\text{C}$ ) до 82 % (R404a,  $t_c=50^\circ\text{C}$ ).

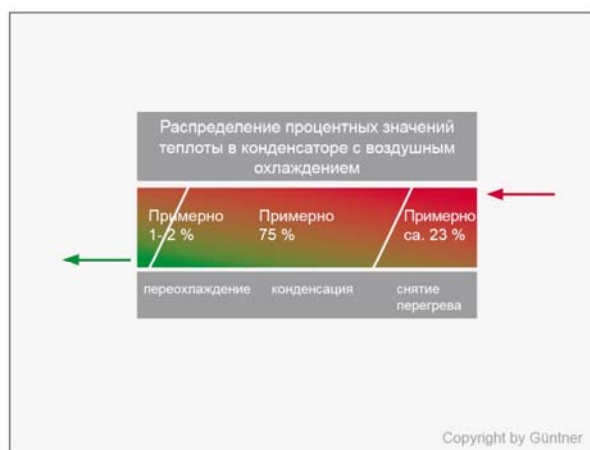
Коэффициент эффективного переохлаждения в конденсаторе является, соответственно, довольно низким и обеспечивает остающийся процент, чтобы покрыть 100 %. Он составляет только от 1,5 % (R134a,  $t_c = 25^\circ\text{C}$ ) примерно до 3,5 % (R404a,  $t_c = 50^\circ\text{C}$ ). При использовании аммиака процентное значение значительно ниже 1 %.

В диаграмме эта связь показана на примере R404A/R507 и R134a:



Процентное отношение энергии перегрева к теплоте конденсации

Рис. 15. Процентное отношение энергии перегрева к теплоте конденсации



Распределение процентных значений теплоты в конденсаторе с воздушным охлаждением (хладагент: R404A при  $t_c \sim 40^\circ\text{C}$ )

Рис. 16. Распределение процентных значений теплоты в конденсаторе с воздушным охлаждением (хладагент: R404A при  $t_c \sim 40^\circ\text{C}$ )

При стандартной конструкции конденсатора с воздушным охлаждением и дополнительного переохладителя с воздушным охлаждением можно достичь максимальных значений переохлаждения примерно 10 К, если оно возникает в результате перепада температур  $\Delta t = t_c - t_{le}$  не более 12 К.

Кроме того, здесь играет роль термодинамический аспект, т. е. значения теплоотдачи, при одинаковой длине трубопровода, в жидкой фазе в конденсаторе значительно уменьшаются. Помимо других причин этого явления, можно выделить низкую скорость потока и пониженную турбулентность (ламинарное течение) по сравнению с показателями во время конденсации. Следовательно, коэффициент теплоотдачи не так уж эффективен.

### **Переохлаждение из конденсатора на выход ресивера хладагента**

#### **Тезис:**

*«Переохлаждение, с трудом достигнутое в конденсаторе, может быть полностью сведено на нет газовой подушкой в ресивере.»*

Это также теория. Если бы данное утверждение было правильным, это означало бы, что многие холодильные установки работали бы на практике очень неудовлетворительно, т.е. с дроссельным паром. Тем не менее, действительно невозможно переохладить хладагент в закрытом контейнере (к примеру, баллон с хладагентом = статика) за исключением случаев, когда он заполнен на 100 %, но такой факт следует рассматривать здесь только теоретически.

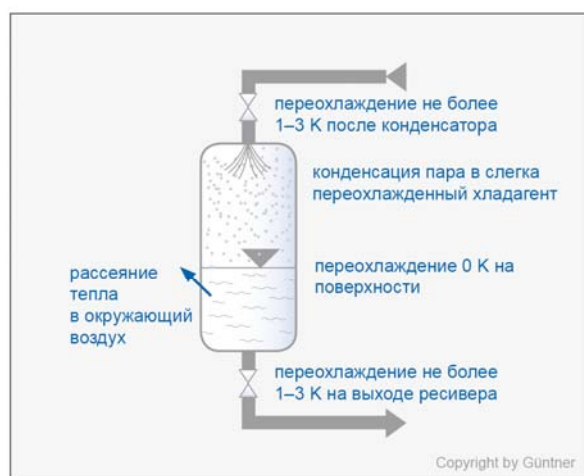
Предположим, что существует следующая ситуация. Хладагент, который был переохлажден на 1 К, подается на выход из конденсатора. Прохождение по конденсаторопроводу зачастую затруднительно для хладагента. По причине слишком маленьких поперечных сечений труб и изменений в нагрузочных характеристиках установки (в короткий промежуток времени в ресивере будет больше хладагента, чем требуется точкам охлаждения) поток хладагента будет нарушен паром, поступающим обратно в конденсатор.

На практике это явление можно наблюдать в крупных установках через смотровое стекло в ресивере. Из конденсатора хладагент закачивается в ресивер. Теперь отчасти переохлажденный хладагент поступил в ресивер. Большой объем ресивера приводит к снижению давления до минимума, и хладагент, который немного холоднее, чем пар в ресивере, в этот момент достигает жидкой поверхности ресивера. При прохождении хладагента через насыщенный хладагентом пар небольшое его количество конденсируется в слегка переохлажденную жидкость. Во время этого прохождения достигнутое переохлаждение почти полностью реверсируется.

Важным фактором является тип конструкции ресивера (горизонтальный = большая поверхность жидкости; как правило, не идеальное инженерное решение), (вертикальный = длинное прохождение к жидкости в режиме частичной нагрузки, но также и преимущество благодаря использованию столба жидкости). Этот столб жидкости уменьшает турбулентность в хладагенте и способствует повышению давления, которое преобразуется в переохлаждение при постоянной температуре.

На поверхности переохлаждение окончательно приравнивается к 0 К с точки зрения физической теории. Но поскольку мы рассматриваем динамическую ситуацию в холодильной установке (все находится в движении), часть уже умеренно переохлажденной массы может достигать нижней части ресивера (в оптимальном варианте вертикального), не потребляя полностью достигнутое переохлаждение. К тому же, жидкостное уплотнение в ресивере, обеспеченная пониженная температура среды и далее охлаждаются ниже температуры насыщения, для того чтобы хладагент мог покинуть ресивер в слегка переохлажденном состоянии. Это можно наблюдать в крупных заполненных ресиверах. Температура в нижней части ресивера существенно ниже (тепловое расслоение). Но на это

нельзя полагаться, потому что первые перепады давления происходят в основном в линиях после ресивера; и это объясняет, почему множество установок работает стабильно без отдельного переохладителя после ресивера.



Упрощенная схема термодинамических процессов в ресивере хладагента

**Рис. 17.** Упрощенная схема термодинамических процессов в ресивере хладагента

Для стабильной эксплуатации холодильной установки важна правильная интеграция ресивера после конденсатора.

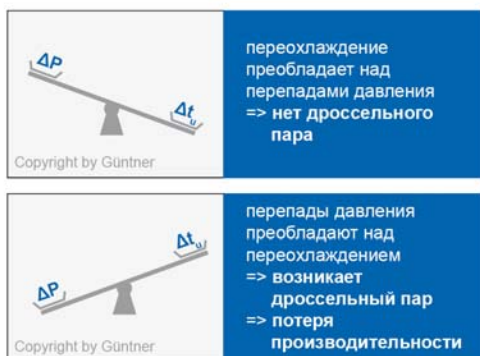
### Переохлаждение из ресивера на регулирующий вентиль

#### Тезис:

*«Переохлаждение, вызываемое рассеянием тепла жидкости в окружающую среду, способно устранять существующие перепады давления в жидкостной линии, не давая тем самым образовываться дроссельному пару.»*

Это означает: полагаться на волю случая. На практике во многих холодильных установках, находящихся в эксплуатации, создание переохлаждения позволяет избежать образования дроссельного пара.

Окружающая температура в области жидкостных линий обычно ниже температуры жидкости, что, в свою очередь, положительно влияет на переохлаждение хладагента.



Взаимосвязь перепадов давления и переохлаждения при прохождении хладагента из ресивера на регулирующий вентиль

**Рис. 18.** Взаимосвязь перепадов давления и переохлаждения при прохождении хладагента из ресивера на регулирующий вентиль



Как показано на схеме, на пути от ресивера к регулирующему вентилю хладагент достигает своего рода равновесия, которое возникает между переохлаждением (т.е. рассеянием тепла в окружающую среду из жидкостной линии (см. табл. 2) и ее компонентов) и преодолением существующих перепадов давления в трубопроводе, компонентах и разницы в геодезической высоте (см. табл. 3).

Наружный диаметр трубы	Длина трубы			
	5 м	10 м	15 м	20 м
12 мм	0,4 К	0,8 К	1,2 К	1,5 К
16 мм	0,3 К	0,5 К	0,8 К	1,0 К
18 мм	0,2 К	0,4 К	0,7 К	0,9 К
22 мм	0,1 К	0,3 К	0,6 К	0,8 К

**Табл. 2.** Переохлаждение хладагента в жидкостной линии при разнице  $\Delta t = 20$  К с окружающей температурой (при отсутствии мощного воздушного потока, изоляции трубы, перепадов давления; с учетом медной трубы, скорости потока примерно 0,7 м/с) (источник: вычислительная программа «Armacell»).

Разница в высоте	Длина 10 м				
	Нисходящая труба		Горизонтальная	Нагнетательная труба	
	-10 м	-5 м	+/- 0 м	+5 м	+10 м
Увеличение (+) или уменьшение (-) переохлаждения в К для <b>R404A</b>	+1,8 К	+0,9 К	-0,1 К	-1,1 К	-2,1 К
<b>R407C</b>	+2,1 К	+1,0 К	-0,1 К	-1,2 К	-2,3 К
<b>R134a</b>	+4,3 К	+2,2 К	-0,2 К	-2,5 К	-5,2 К
<b>R717</b>	+1,5 К	+0,8 К	-0,2 К	-0,7 К	-1,5 К

**Табл. 3.** Перепад давления, вызванный изменениями в высоте, для жидкостной линии  $\varnothing$  15 мм при холодопроизводительности  $Q_0 = 10$  кВт (аппроксимированные значения) (источник: программа DANVEN).

### Ограничения для компонентов труб

Экстремальные значения переохлаждения в сочетании с запуском/отключением установки и одной точкой охлаждения могут привести к ускорению движения жидкости с возникающими в результате этого известными проблемами. В таких ситуациях, при открытии электромагнитных вентилях (= временный перепад давления) в жидкостной линии, отсутствие газовой подушки хладагента позволит замедлить поток жидкости. Таким образом, движение жидкости (если она не замедлена, поскольку сильно переохлаждена) ускоряется, и она достигает регулирующего вентиля, на котором происходит внезапная остановка. Жидкость теперь обладает кинетической энергией, которая проявляется в виде гидроударов в трубопроводе. В прошлом уже случались аварии, произошедшие в результате разрыва трубопровода или осушителей хладагента. Измеренное давление гидравлического удара в жидкостных линиях превышало 75 бар (с высокой частотой).

## Переохлаждение и регулирующий вентиль

### Тезис:

«Если повышается степень переохлаждения, то увеличивается также пропускная способность вентиля.»

При постоянных граничных условиях, таких как нагрузка, перегрев, температура испарения и разность давления до вентиля, в расчет принимается постоянный диаметр отверстия или массовый расход хладагента через вентиль. В результате переохлаждения увеличиваются энтальпия на входе и общая энтальпия испарения. Этот процесс выражается формулой:  $\Delta Q_0 = m \times \Delta h$

В отличие от режима работы без переохлаждения, при постоянном диаметре отверстия и постоянном отверстии вентиля это приводит к увеличению холодопроизводительности на  $\Delta Q_0$ .

При увеличенной степени переохлаждения удельный объем во время расширения [ $\text{м}^3/\text{кг}$ ] уменьшается. При постоянном диаметре отверстия вентиля даже увеличенный массовый расход хладагента,  $m$  [ $\text{кг}/\text{с}$ ], будет реально достижим и, соответственно, упомянутая выше производительность будет дополнительно увеличена.

Переохлаждение до регулирующего вентиля	0,1 К	4 К – данные по каталогу	10 К	15 К	20 К
Номинальная холодопроизводительность	10,0 кВт	10,7 кВт	11,7 кВт	12,5 кВт	13,2 кВт
Изменение производительности	93 %	100 %	109 %	116 %	123 %

**Табл. 4.** Изменение производительности регулирующих вентиляей, вызванное влиянием переохлаждения  $-10^\circ\text{C}$  /  $+40^\circ\text{C}$  (источник: программа DANVEN).

Обобщая, можно сказать, что параллельно с изменением значений по шкале Кельвина производительность регулирующего вентиля в результате переохлаждения изменяется примерно на 1 %.

Другим важным аспектом, связанным с регулирующими вентилями, является состояние переохлаждения при слишком низкой температуре. Каковы его последствия?

Как уже разъяснялось, отсутствие или слишком незначительные степени переохлаждения после ресивера (!), вызванные существующими перепадами давления в жидкостной линии, приводят в худшем случае к предварительному испарению (образованию дроссельного пара). Эти газовые подушки должны пропускаться через седло клапана во время эксплуатации холодильной установки и имеют объем, намного превышающий объем той же массы в жидком состоянии. Таким образом, количество хладагента, впрыскиваемого на самом деле, сначала уменьшается. На это реагирует чувствительный элемент на выходе из испарителя (увеличивается перегрев). Увеличение температуры перегрева в испарителе приводит к повышению давления в чувствительном элементе. В результате вентиль увеличит диаметр отверстия. Если состояние до вентиля изменяется (временное отсутствие газовой подушки), в испаритель впрыскивается большее количество хладагента (изменение плотности жидкости). Это также фиксируется чувствительным элементом, в результате вентиль закрывается. Таким образом, перегрев уже невозможно постоянно регулировать, и система «испаритель — регулирующий вентиль» начинает пульсировать. Эти явления часто можно наблюдать при полном отключении вентиляторов конденсатора (прессостатическое ступенчатое регулирование).

## Ограничения для регулирующего вентиля

Описанное содержание пара после и во время расширения приводит к снижению скорости потока хладагента в вентиле и предусмотрено специально. Различные изготовители регулирующих вентилях устанавливают предельные значения содержания пара  $x > 20\%$  ( $x > 0,2$ ).

В данной диаграмме предельное значение переохлаждения, существующее для регулирующего вентиля, может быть отображено независимо от используемого хладагента.

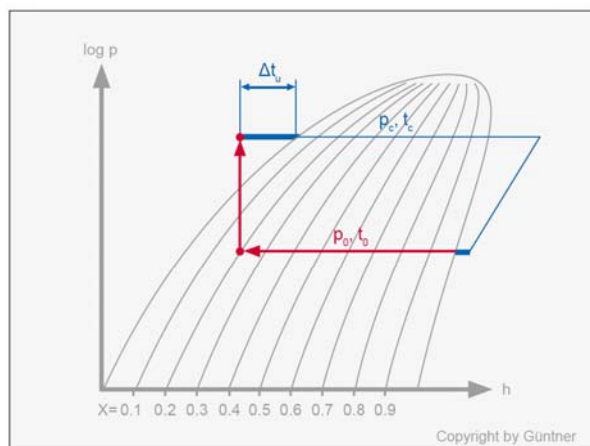


Диаграмма для определения максимально возможного переохлаждения для регулирующего вентиля (содержание пара в вентиле при 20 %)

**Рис. 19.** Диаграмма для определения максимально возможного переохлаждения для регулирующего вентиля (содержание пара в вентиле при 20 %)

Теоретически существует возможность создать такие высокие значения переохлаждения с помощью внешнего переохладителя, при которых расширение в регулирующем вентиле еще не приводит к созданию парообразного хладагента (слева от кривой кипения). Однако такую практику нельзя рекомендовать. С одной стороны, возможна ситуация, когда дросселированный хладагент сначала потребуется нагревать до температуры испарения, пока он не начнет испаряться, а значения теплоотдачи, скорее всего, будут неверными из-за низкого процентного содержания пара. С другой стороны, это может привести к последующему повреждению вентиля из-за отсутствия смягчающей подушки и, соответственно, к его повышенному фрикционному износу. Кроме того, жидкостная линия должна быть изолирована от водоконденсата.

## Кавитация в седле клапана, вызванная отсутствием переохлаждения в регулирующем вентиле

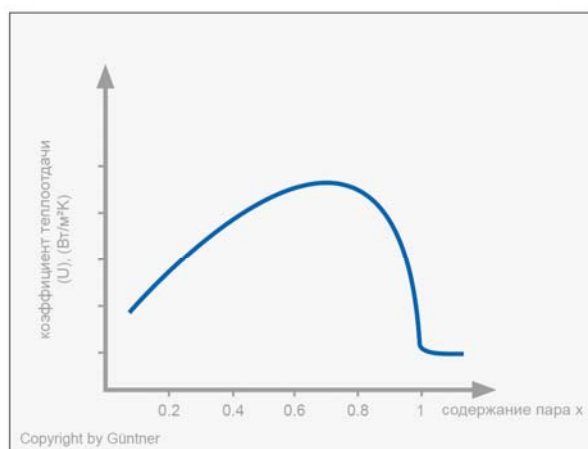
Газовая подушка перед регулирующим вентилем, тем не менее, может также привести к повреждению седла клапана. Это так называемая кавитация, известная из области, связанной с гребными винтами судов.

Газовая подушка, скапливающаяся перед регулирующим вентилем (дроссельный пар), взорвется при падении давления и его возникновении в сопле вентиля. Это приведет к разрыву очень мелких

металлических деталей сопла, в результате чего клапан утратит способность правильно закрываться после продолжительной эксплуатации. Таким образом, возможна ситуация, в которой транспортировка жидкого хладагента компрессором будет осуществляться частично в режиме неполной нагрузки.

### Переохлаждение и испаритель

Как описано в начале статьи, увеличение производительности за счет повышения степени переохлаждения в испарителе незначительно. И наоборот. Без подготовки специальных мер теплоотдача хладагента будет в целом неудовлетворительной из-за низкого процентного содержания пара после расширения. Этот эффект вызван отсутствием турбулентности в хладагенте. Турбулентность увеличивается в процессе нарастания содержания пара, и в результате также повышается теплоотдача.



Схематическая диаграмма коэффициента теплоотдачи в зависимости от содержания пара хладагента

**Рис. 20.** Схематическая диаграмма коэффициента теплоотдачи в зависимости от содержания пара хладагента

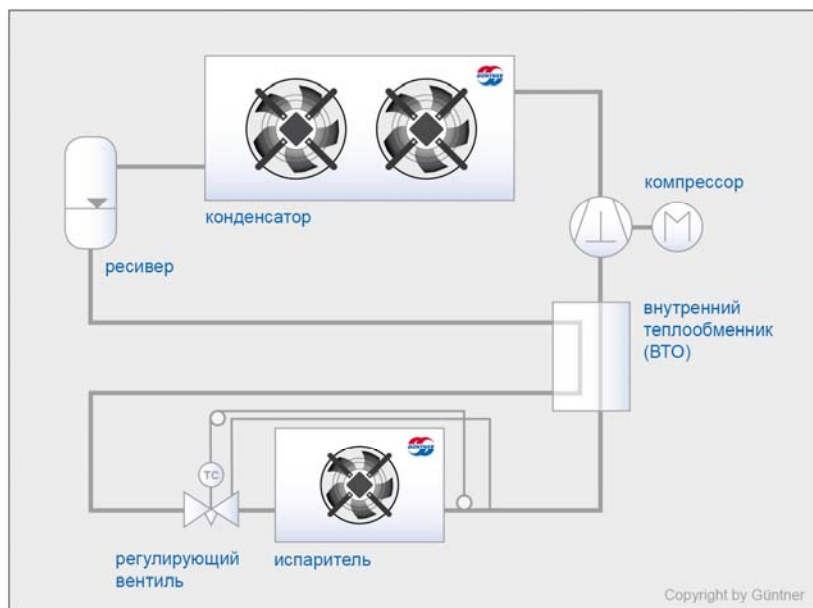
На диаграмме показано, как при повышении содержания пара во время испарения увеличивается также коэффициент теплоотдачи.

### Переохлаждение в регенеративном внутреннем теплообменнике, сокращенно ВТО

На эффективную эксплуатацию ВТО существенное влияние оказывает используемый хладагент. Хладагенты с показателем изоэнтропы, близким к 1, идеально подходят для использования с ВТО (см. график на стр. 6).

В таблице можно увидеть, например, что хладагенты R404a/R507 имеют очень низкие показатели изоэнтропы, а у R717 (аммиак) он значительно выше.

Использование ВТО объединяет в себе несколько положительных эффектов. Жидкость должна быть переохлаждена до преодоления перепадов давления. Это означает, что оптимальным положением для установки ВТО в контуре является положение после ресивера хладагента. В противоточном варианте (по двухтрубному принципу) всасываемый пар поглощает тепло из жидкого хладагента и подвергается дополнительному перегреву. См. схему:



Создание переохлаждения во внутреннем теплообменнике (ВТО)

**Рис. 10.** Создание переохлаждения во внутреннем теплообменнике (ВТО)

С некоторым упрощением можно сказать, что этот дополнительный перегрев имеет преимущества и недостатки.

**Положительный** момент заключается в том, компрессор может быть дополнительно защищен от не испарившегося хладагента. Перепады давления хладагента могут достигать компрессора по следующим причинам:

- неоптимальная работа ТРВ,
- непредвиденные изменения нагрузок,
- неправильное положение датчика (или ослабленное крепление датчиков),
- так называемое «рыскание» регулирующих вентилей при частичной нагрузке,
- изменение рабочего режима после оттаивания горячим паром

... и т.д.

Не испарившийся хладагент испарится не далее как во всасывающей линии, в корпусе компрессора, в области обмотки (компрессор охлаждения всасываемого пара) или во всасывающей полости.

Это приводит к потерям производительности, значительной нагрузке на обмотках, повышенному вспениванию масла в начале эксплуатации, разжижению масла и дополнительной механической нагрузке на компрессор вплоть до заклинивания.

**Отрицательный** момент заключается в том, что такой ВТО, в любом случае, создает дополнительный перепад давления (различной силы, в зависимости от типа конструкции ВТО). Это – особенно для случаев применения в условиях низкой температуры – недостаток с точки зрения КПД использования энергии. Нерегулируемый дополнительный перегрев ведет к увеличению объема всасываемого пара (пусть даже и незначительному), который при постоянной производительности поршня и постоянной скорости приводит к более низкому коэффициенту полезного действия. Эти предполагаемые недостатки можно рассматривать как незначительные по сравнению с преимуществами, позволяющими получать фактическую выгоду. КПД существенно зависит от выбранного хладагента. Он может быть

выражена приблизительным соотношением 1:2 (в К) для дополнительного переохлаждения (значение 1) и дополнительного перегрева (значение 2) после ВТО.



Пример теплопередачи в ВТО; переохлаждение в 1 К приравнивается к перегреву приблизительно 2 К

**Рис. 21.** Пример теплопередачи в ВТО; переохлаждение в 1 К приравнивается к перегреву приблизительно 2 К

Для этой цели также можно использовать пластинчатый теплообменник, но его размеры должны быть определены очень точно. Для применения в супермаркетах иногда выбирается место монтажа теплообменника, близкое к точке охлаждения. В данном случае, помимо планируемого переохлаждения и последующего наращивания производительности, преследуется цель сокращения неэффективной подачи тепла на всасывающей (изолированной) линии. Соответственно, всасывающая линия с подогревателем будет поглощать меньше энергии из окружающего воздуха. Для всех видов применения должны соблюдаться соответствующие предельные значения перегрева, установленные изготовителем (температура соединительной муфты всасывающей линии).

### Заключение

Переохлаждение хладагента, с одной стороны, необходимо в техническом плане для обеспечения безопасной эксплуатации холодильной установки. С другой стороны, переохлаждение может до некоторой степени улучшить суммарный коэффициент полезного действия холодильной машины.

Переохлаждение может быть достигнуто различными способами. В сущности говоря, переохлаждение хладагента эффективно только в том случае, если оно достигается после ресивера.

Максимальное повышение эффективности использования энергии может быть достигнуто за счет переохлаждения хладагентов R404A и R507A, как показано на рис. 13.

В дополнение к повышению КПД использования энергии переохлаждение хладагента является необходимым условием надежной эксплуатации установки. Фитинги, фильтры, смотровые стекла и регуляторы, а также вышеустановленные испарители являются причиной перепадов давления в жидкостной линии, что может приводить к образованию дроссельного пара.

Как правило, переохлаждение хладагента происходит в жидкостной линии, так как окружающая температура там ниже. Расположение жидкостной линии может значительно повышать эффект переохлаждения (нисходящая или горизонтальная труба), однако вертикальные трубы могут снижать этот эффект. При планировании необходимо обязательно принимать во внимание расположение жидкостной линии, так как оно играет важную роль.



В конструкции установки со встроенным в конденсатор переохладителем невозможно регулировать степень переохлаждения хладагента. Поэтому следует отдавать предпочтение конструкции установки с отдельным переохладителем после ресивера. Управление вентилятором отдельного переохладителя может осуществляться непрерывно без каких-либо проблем. Благодаря инновационным конденсаторам серии GVX, разработанным компанией Güntner AG & Co. KG на основе микроканальной технологии, возможно создание конденсаторов с отдельным переохладителем с соответствующей системой регулирования.

**Дополнительные сведения о новых конденсаторах серии GVX см. в нашей информационной брошюре с описанием продукции GVX.**