

Высокоэффективная рекуперация тепла в системах на CO₂

Введение

В последние годы транскритические системы охлаждения на CO₂ прочно заняли позиции на рынке. С 2007 года рынок в Дании начал переходить с традиционных систем охлаждения на хладагентах HFC или каскадных систем на CO₂ и HFC на транскритические системы на CO₂. В настоящее время применение транскритических систем стало обычным делом, а данная технология хорошо отработана.

Проведённое в рабочих условиях исследование, рассматривающее только системы охлаждения, показывает, что годовое потребление энергии находится на таком же уровне или лучше, чем у систем, работающих на хладагентах HFC с непосредственным охлаждением. В данной статье содержится краткая информация о теории рекуперации тепла в транскритических системах, при этом их эффективность сравнивается с эффективностью систем на HFC.

Общая информация о транскритических системах

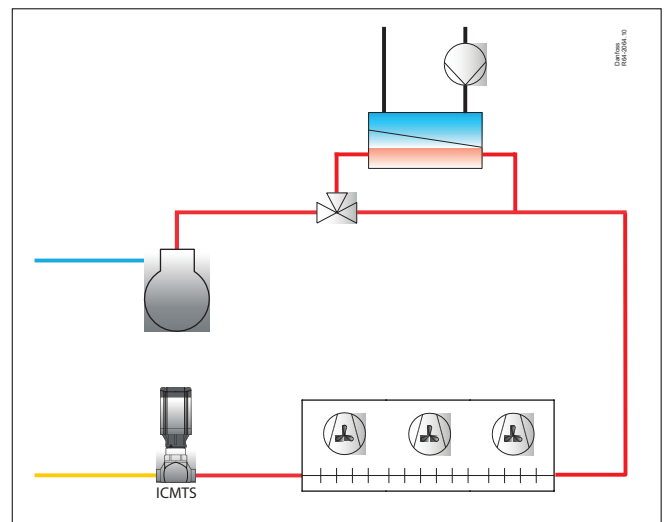
В обычных системах, работающих с хладагентами HFC, значения давления и температуры взаимосвязаны, а в транскритических системах давление и температура могут регулироваться независимо друг от друга. Это предоставляет дополнительные возможности по рекуперации тепла.

В процессе нормальной эксплуатации без рекуперации тепла давление поддерживается на уровне, позволяющем иметь оптимальный коэффициент COP. Это осуществляется автоматически с помощью электронного контроллера. В холодные периоды давление обычно поддерживается на минимальном уровне 40 бар (~ 5 °C) или выше. При таком давлении практически не выделяется тепло для рекуперации. Если давление повышается, то повышается и количество тепла, которое можно рекуперировать.

Пример

Вода нагревается от 15°C до 55°C. Окружающая температура -5°C, тепловую нагрузку на систему требуется рекуперировать с минимально возможным потреблением энергии. Разница температур в рекуперационном теплообменнике задана на уровне 5 К. Температура на выходе газоохладителя поддерживается на уровне 4 °C во всех случаях, когда газоохладитель в работе.

Используемая система состоит из одного или нескольких компрессоров, теплообменника рекуперации тепла с насосом, 2-х трехходовых клапанов, газоохладителя с воздушным охлаждением и регулирующего клапана высокого давления с электронным контроллером.



В этих условиях температура нагнетания компрессоров находится на уровне около 35°C, поэтому получить горячую воду с температурой 55°C невозможно.

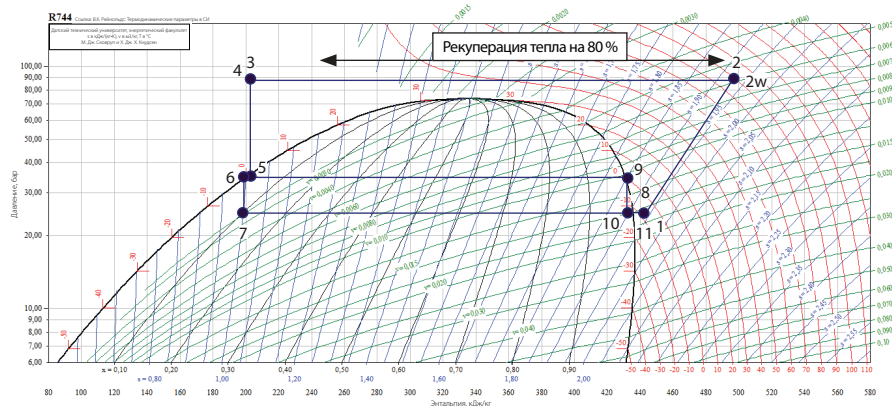
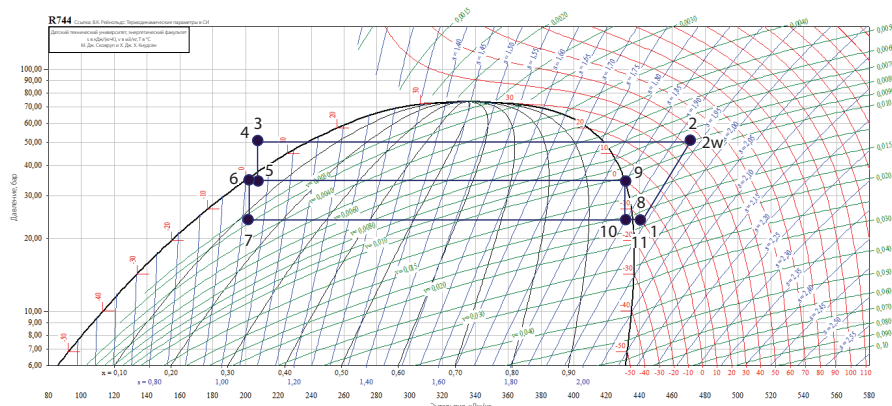
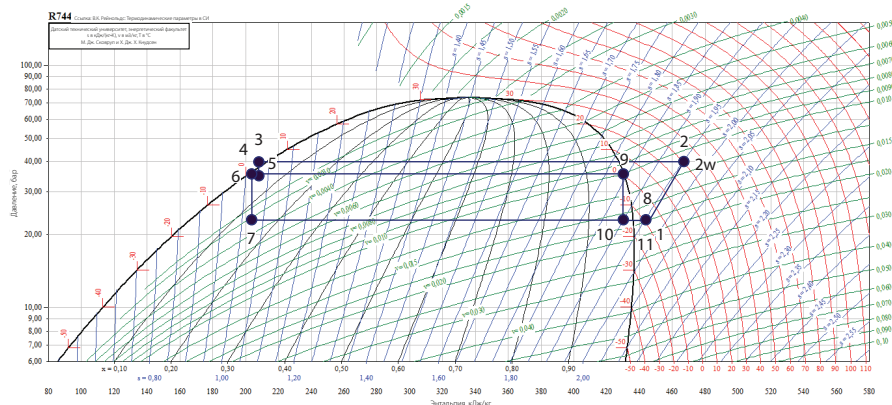
Чтобы добиться возможности достичь температуры воды 55°C, температура нагнетания в системе должна быть как минимум 55 °С, следовательно, необходимо повысить давление.

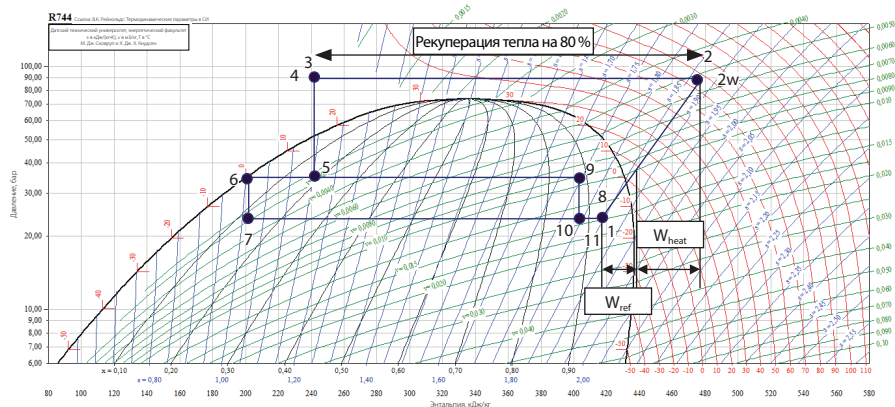
При давлении 50 бар температура нагнетания равна 55°C и, следовательно, имеется возможность начать рекуперацию тепла из системы, но при этом отсутствует разница температур в теплообменнике.

При дальнейшем повышении давления количество тепла, отводимого из системы, увеличивается.

При давлении 80 бар, примерно 80 % тепла рекуперировается при значении холодильном коэффициенте COP = 3,13. Для того, чтобы отводить больше 80% тепла, можно повысить давление, а газоохладитель можно байпасировать.

В результате доля отводимого тепла повысится до 100 %. Так как нет потерь тепла в окружающую среду, все тепло рекуперировается. Это приведет к необходимости использования большего количества компрессоров для компенсации пониженной производительности компрессора при высоком давлении нагнетания.





В этих условиях все тепло рекуперировано, а значение COP системы находится на уровне около 2,6.

Так как количество отводимого из системы тепла зависит от давления, то интересно посмотреть, чему равен тепловой коэффициент COP системы. Система потребляет энергию в условиях оптимизированного давления (в данном примере - 40 бар). Это означает, что независимо от количества отводимого из системы тепла, она будет потреблять энергию. Следовательно, тепловой коэффициент COP системы рассчитывается как теплопроизводительность, деленная на потребляемую мощность компрессора. Такой расчет выполняется для возможности сравнения теплового коэффициента COP с альтернативными источниками тепла.

| P _{гс} , бар | Холодильный коэффициент COP | Доля, отводимого тепла | Тепловой коэффициент COP |
|-----------------------|-----------------------------|------------------------|--------------------------|
| 40 | 8,8 | 0 % | - |
| 50 | 5,7 | 0 % | - |
| 60 | 4,3 | 25 % | 2,6 |
| 70 | 3,6 | 40 % | 3,1 |
| 80 | 3,1 | 80 % | 5,1 |
| 80 | 3,1 | 100 %* | 5,1 |

*Байпасирование газоохладителя с воздушным охлаждением

Доля отводимого тепла – это соотношение между максимальным имеющимся количеством тепла и количеством используемого тепла.

Тепловой коэффициент COP зависит от окружающей температуры. При высокой температуре окружающей среды нагрузка компрессора, используемая для охлаждения выше и, следовательно, нагрузка компрессора, используемая для обогрева ниже. При низких температурах окружающей среды давление понизить нельзя, следовательно, влиять на тепловой коэффициент COP таким образом невозможно. Если задать температуру окружающей среды 3°C вместо -5°C, то в результате получатся результаты, указанные в таблице:

| P _{гс} , бар | Холодильный коэффициент COP | Доля, отводимого тепла | Тепловой коэффициент COP |
|-----------------------|-----------------------------|------------------------|--------------------------|
| 50 | 5,7 | 0 % | - |
| 60 | 4,3 | 25 % | 5,6 |
| 70 | 3,6 | 40 % | 5,0 |
| 80 | 3,1 | 80 % | 7,3 |
| 80 | 3,1 | 100 %* | 7,3 |

*Байпасирование газоохладителя с воздушным охлаждением

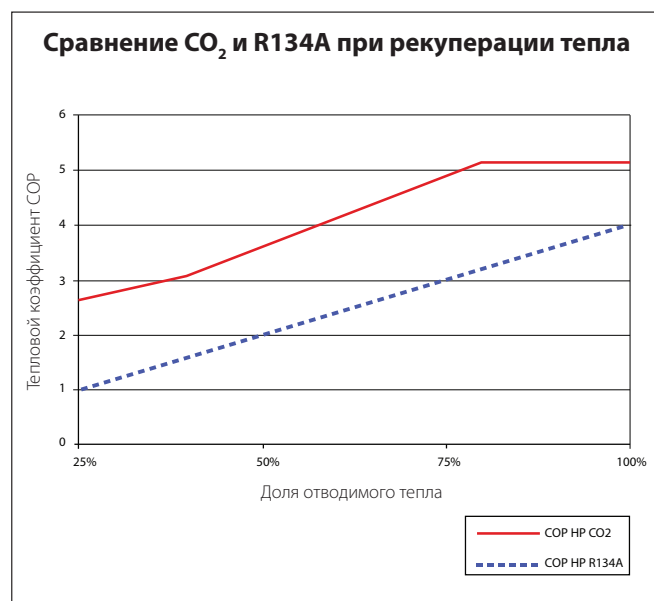
Результаты показывают, что окружающая температура имеет значительное влияние на тепловой коэффициент и, что самый высокий тепловой коэффициент COP достигается при полной нагрузке. Для получения более высокого значения теплового коэффициента COP при частичной нагрузке, может использоваться тепловой насос, работающий на CO₂, смонтированный на базе холодильной системы.

Сравнение транскритической системы на CO₂ с другими источниками тепла

В вышеизложенном разделе был рассчитан тепловой коэффициент COP, однако интересно выяснить, дешевле или дороже получается данный источник тепла в сравнении с другими системами рекуперации тепла и другими источниками тепла.

Другие системы рекуперации тепла

Сравнение теплового коэффициента при использовании CO₂ с тепловым коэффициентом, получаемым при использовании других хладагентов, должно выполняться корректно. Для других хладагентов принято, что при работе с температурой кипения -10°C и температурой конденсации 55°C возможно получение горячей воды с температурой 55°C. Задано, что температура переохлаждения составляет 2 K, а минимальная температура конденсации 15 °C.



Из этого графика видно, что тепловой коэффициент для CO₂ лучше, чем для R134A, на величину от 25 до 150%. Самое лучшее значение получается при неполной нагрузке, которая имеет место на протяжении большей части года.

Системы тепловых насосов

Чтобы преодолеть трудности, возникающие при неполной нагрузке, в холодильной системе можно использовать тепловой насос. Это поможет получить наилучший коэффициент COP системы независимо от нагрузки.

Тепловой коэффициент рассчитан при температуре кипения 5°C (эквивалентна самой низкой возможной температуре конденсации в транскритических системах на CO₂), при температуре конденсации 55 °C и при переохлаждении 2 K. Расчёты производились для наиболее часто используемых на рынке хладагентов.

| Хладагент | Тепловой коэффициент COP |
|--|--------------------------|
| R134A | 3,7 |
| R290 | 3,7 |
| R404A | 3,3 |
| R410A | 3,4 |
| Транскритический тепловой насос на CO ₂ | 5,1 |

В таблице показаны тепловые коэффициенты для различных хладагентов. Из приведённых данных видно, что система на CO₂ обеспечивает тепловой коэффициент на 38-55 % выше, чем системы на традиционных хладагентах.

Другие источники энергии

Альтернативой для системы рекуперации тепла на CO₂, могут послужить мазутные и газовые котлы. Вопрос заключается в том, какой выбор наиболее экономичный? Коэффициент COP, рассчитанный в данном примере для системы рекуперации на CO₂, находится на уровне между 2,6 и 7,3. Значение коэффициента COP зависит от того, какая система используется (тепловой насос или рекуперация тепла), профиля нагрузки для рекуперации тепла и окружающей температуры. Полученное значение можно сравнить с другими источниками энергии с помощью следующего уравнения.

$$\text{Отношение} = \frac{\text{Стоимость электричества, евро/кВ·ч}}{\frac{\text{Стоимость альтернативной энергии, евро/кВ·ч}}{\text{Тепловой коэффициент COP}}}$$

Если это отношение меньше 1, то применение системы с CO₂ не является самым экономичным. В большинстве случаев рекуперация тепла или тепловой насос являются экономически более привлекательными. Во многих случаях рекуперация тепла выглядит более предпочтительно, если коэффициент COP выше 2 или 3, но это, разумеется, зависит от стоимости энергии и величины местных сборов.

Заключение

Примеры, приведенные выше, показывают, что:

- Тепловой коэффициент в транскритической системе рекуперации тепла имеет значение от 2,6 до 7,3, в зависимости от нагрузки и окружающей температуры.
- Системы рекуперации тепла на CO₂ лучше на 25-150 % (в зависимости от нагрузки) систем, работающих на R134A.
- Использование CO₂ в системе теплового насоса на 38-55 % выгоднее, чем хладагентов HFC, с которыми проводились сравнения.
- Коэффициент COP системы теплового насоса выше, чем у системы рекуперации тепла при неполной нагрузке, но при полной нагрузке эта разница очень незначительная. Имеет ли смысл устанавливать тепловой насос, зависит от профиля нагрузки и стоимости инвестиций.
- Очень часто тепловые насосы или системы рекуперации тепла на CO₂ являются очень привлекательной альтернативой мазутным или газовым котлам.

Заключение сделано на основе данных, указанных в примере. Если данные будут другими, будет другим и заключение, но существуют несколько основных принципов.

- Целесообразно применять CO₂ при большом перепаде температуры. Чем ниже температура воды или среды на входе, тем более эффективным будет применение CO₂. Температура на выходе не так важна. Вполне реально получить с хорошей эффективностью температуру до 80°C.
- Не стоит выбирать CO₂ в качестве хладагента, если температура среды на выходе низкая и разница температур между входом и выходом тоже низкая.

По всему миру установлены тысячи установок на CO₂. Однако в настоящее время транскритические системы на CO₂ безоговорочно заняли самую большую долю рынка распределенных систем охлаждения именно на Европейском континенте. Уже стало нормой то, что установки проектируются с рекуперацией тепла, так как преимущество рекуперации тепла доказано даже для жаркого климата.