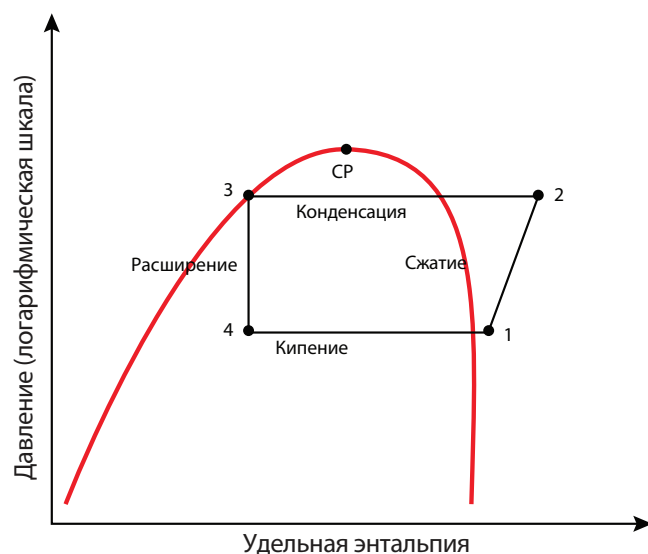


Рекуперация тепла в транскритических системах на CO₂

Общее описание

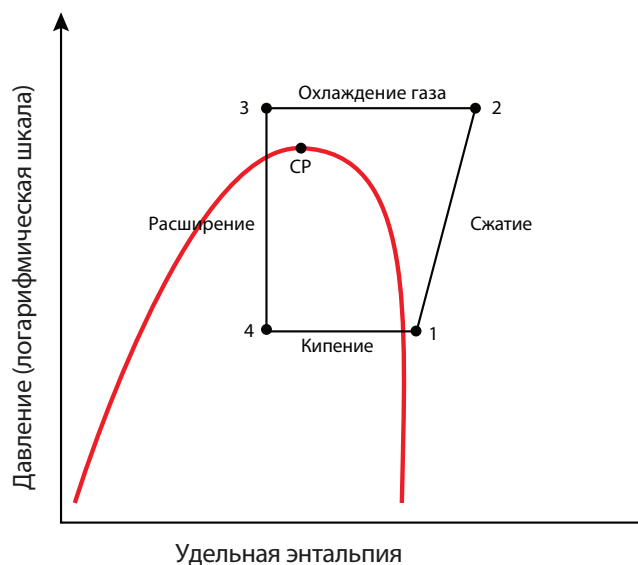
При использовании CO₂ в качестве хладагента, критическая точка достигается уже при 31°C (74 бар). При температурах и давлениях выше этой точки, зависимости между давлением и температурой уже нет (они не связаны между собой, как это происходит в субкритических процессах охлаждения), поэтому температура и давление могут регулироваться независимо друг от друга. Фазовые изменения в таких условиях не происходят, жидкость отсутствует, а смесь наилучшим образом описывается как газ. Обычно температура нагнетания компрессора находится в диапазоне 80-120°C, кроме того, в условиях транскритического охлаждения имеется возможность рекуперировать большую часть энергии, которая в обычных условиях выделяется газоохладителем.

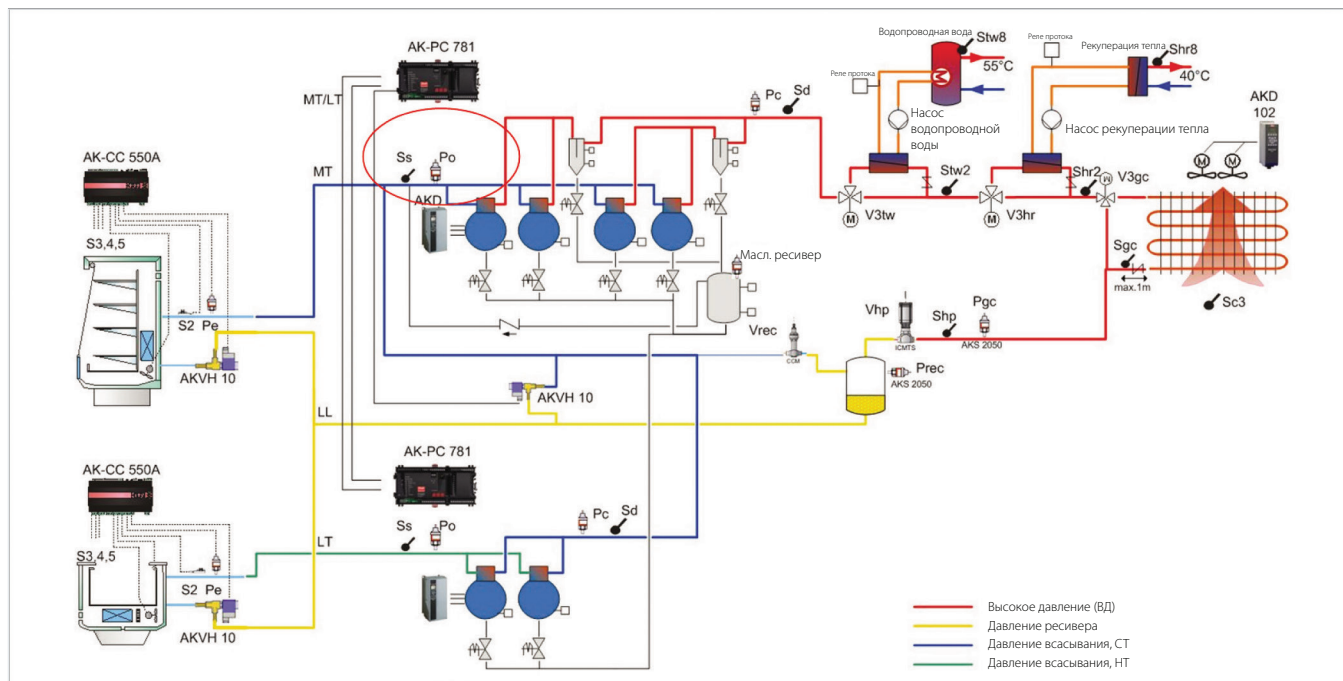
Эти уникальные свойства используются при рекуперации тепла, которое обычно выделяется или теряется в газоохладителе с воздушным охлаждением.



Разница между транскритическим и субкритическим процессом охлаждения

Для создания возможности рекуперировать тепло, перед газоохладителем устанавливаются один или два теплообменника. Для обеспечения надежного процесса охлаждения ключевым является качественный алгоритм управления давлением и температурой при рекуперации тепла, чтобы не допустить конденсации жидкости в теплообменниках и избежать риска гидроудара. Также важно, чтобы минимальная температура на выходе из газоохладителя была, по меньшей мере, на 3 К выше, чем давление в ресивере (давление, сконвертированное в температуру), чтобы не допустить конденсации газа в ресивере при попадании холодной жидкости, что приведет к слишком низкому давлению в ресивере.





Эффективная рекуперация тепла в системах с CO₂

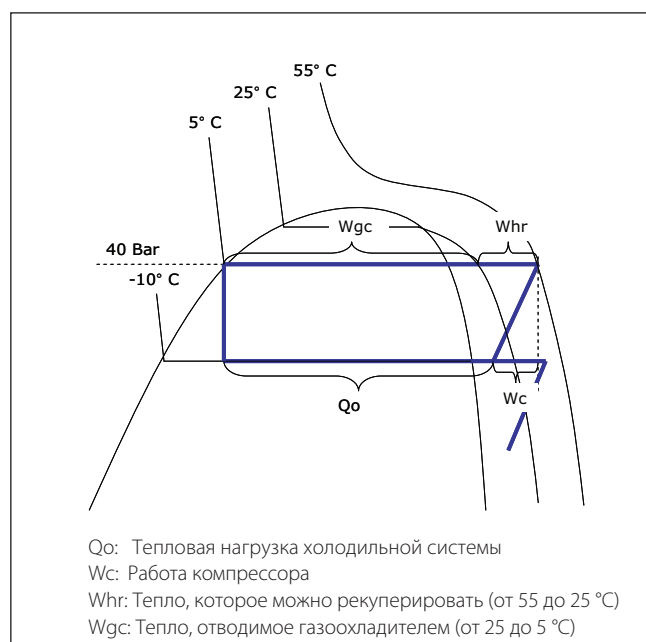
Теоретически все тепло, выделяемое в процессе охлаждения, может быть рекуперировано. При использовании системы в супермаркетах, это относится для всей теплоты, отведенной в холодильных витринах и холодильных камерах, а также к электричеству, используемому компрессорами. Скажем, если холодопроизводительность 3 кВт при COP равном 3, то выделяемое тепло составит 3 кВт + 1 кВт нагрузки компрессора – всего 4 кВт, которые эмпирически могли бы быть рекуперированы. К сожалению, в холодный сезон нагрузка системы охлаждения обычно низкая, тогда как системы отопления испытывают высокую нагрузку. Однако есть смысл рекуперировать тепло, в первую очередь, для горячей водопроводной воды, потребление которой, как правило, постоянно находится на одном уровне на протяжении всего года.

Если в качестве хладагента применяется CO₂, то становится выгодно инвестировать в рекуперацию тепла, благодаря более высоким температурам нагнетания (часто 100–120 °C) и более высокой энтальпии по сравнению с традиционно применяемыми хладагентами HFC. Это позволяет рекуперировать большую часть выделенного тепла (энергии) или рекуперировать больше тепла с более высокой эффективностью по сравнению с традиционными хладагентами HFC. При использовании CO₂ в среднетемпературных системах охлаждения, можно работать с температурами конденсации, сниженными до 5 °C. Учитывая размерный критерий, минимальная температура на выходе из газоохладителя часто устанавливается в диапазоне от 5 до 8 °C, а минимальное давление в газоохладителе обычно устанавливается около 40–45 бар, чтобы обеспечить величину давления в ресивере в диапазоне 35–40 бар для поддержания достаточного перепада давления на расширительных клапанах холодильных витрин.

Рекуперация тепла без ухудшения COP

На практике, температура нагнетания высокотемпературных компрессорных агрегатов в транскритических бустерных системах CO₂ обычно выше 55°C даже в зимних условиях. С учетом вышеупомянутого размерного критерия, можно рекуперировать тепло для горячей водопроводной воды без увеличения давления, что позволяет рекупериро-

вать тепло при самом высоком возможном значении COP. Чем выше окружающая температура, тем больше тепла может быть рекуперировано без ухудшения значения COP.

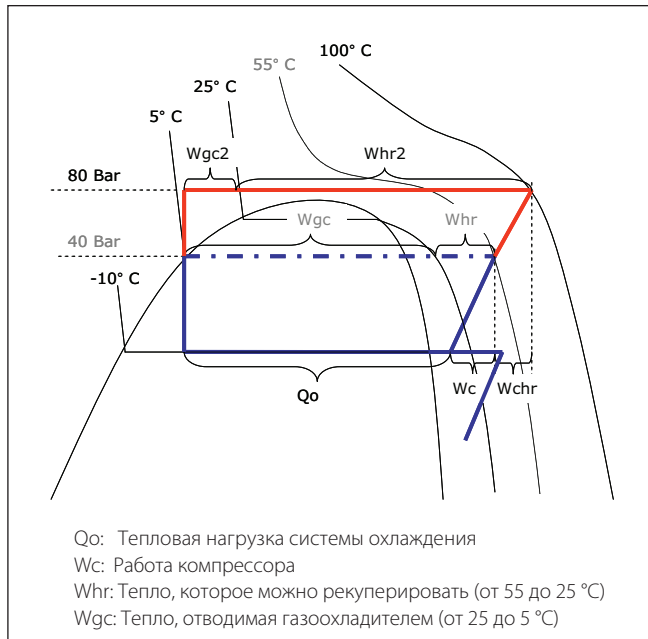


Сверхкритическая бустерная система, эксплуатирующаяся в зимних условиях (субкритические условия)

Повышение давления в газоохладителе

Если нужно больше тепла, например, для подогрева полов, то имеется возможность повысить давление в газоохладителе, что приведет к увеличению работы компрессора. Однако поскольку значение COP обычно находится в диапазоне 2–7 (в зависимости от условий эксплуатации), то рекуперация тепла часто является привлекательным источником тепла, по сравнению с другими источниками, даже в зимнее время.

Что сразу бросается в глаза, так это то, что, увеличив ограниченную дополнительную работу компрессора (Wchr), сразу получаем возможность рекуперировать около 80 % тепла (Whr2) (от 100 до 25 °C), и только 20 % обычно невозможно рекуперировать из-за того, что температура газа ниже 25 °C.

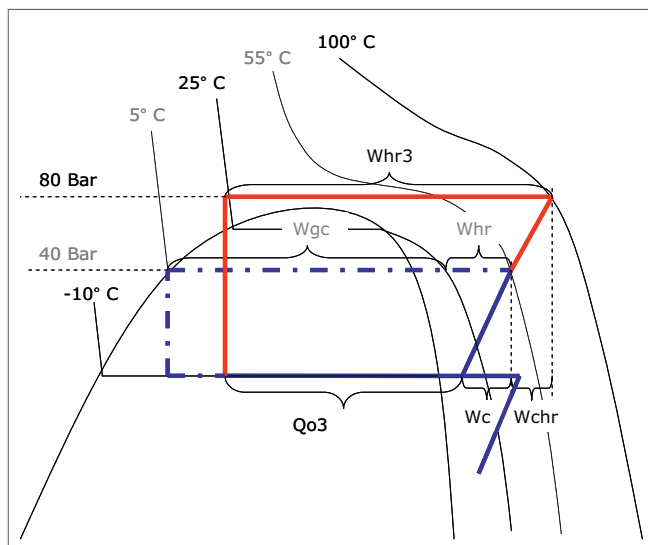


Давление было увеличено до 80 бар (транскритические условия)

При байпасировании газоохладителя – рекуперация 100 % тепла

Чтобы можно было рекуперировать оставшуюся часть тепла, выделяемого газоохладителем, необходимо байпасировать газоохладитель. Так как обычно невозможно рекуперировать тепло при температуре ниже, чем 25°C (чтобы поддерживать 20°C в супермаркете), то температура газа должна быть установлена выше 5–25 °C (только при низкой окружающей температуре), что приведет к понижению Q_o . Чтобы сохранить значение Q_o , необходимо снова повысить производительность компрессора, что приведет к снижению COP, но даст возможность рекуперировать произведенное тепло на 100 % с понижением температуры со 100 °C до 25 °C.

При байпасировании газоохладителя температура газа повышается с 5°C (только при низкой окружающей температуре) до 25°C, предоставляя возможность рекуперировать тепло $Whr3$, произведенное системой охлаждения, на 100 %. Для компенсации уменьшенного тепла Q_o (Q_{o3}) требуется повысить массовый расход хладагента, что приведет к повышению производительности компрессора или к необходимости более продолжительной его работы.



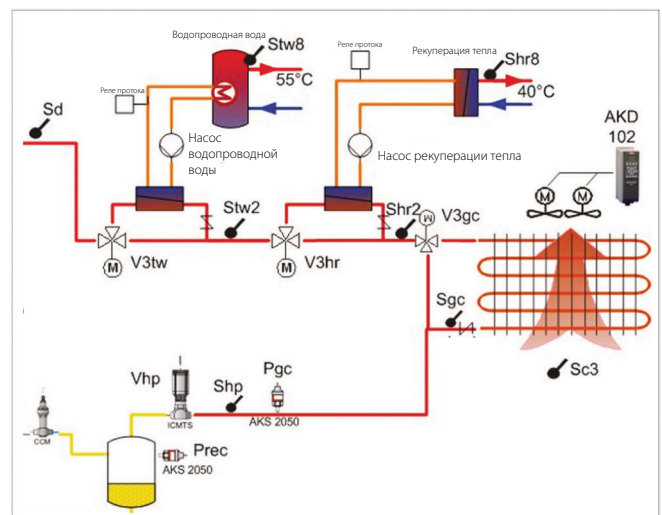
Тот же процесс, но с байпасированным газоохладителем

Аргументы за рекуперацию тепла в системах с CO₂

Даже в зимнее время, когда система работает в субкритических условиях, тепла обычно достаточно для рекуперации для горячей водопроводной воды без повышения давления в газоохладителе.

Если требуется больше тепла, то можно повысить давление в газоохладителе. При переходе в транскритический режим, с помощью увеличения ограниченной дополнительной работы компрессора сразу появляется намного больше тепла для рекуперации.

Иногда рекуперация 100 % тепла из системы охлаждения становится достаточным источником тепла для удовлетворения потребностей в отоплении и горячей воде супермаркета, что позволяет сэкономить на вложениях и эксплуатационных затратах на другие источники тепла. Все зависит от условий нагрузки и стоимости альтернативных источников тепла. Рекуперация оставшейся части тепла не очень эффективна, поэтому необходимо оценить затраты в сравнении с альтернативными источниками тепла.



Рекуперация тепла с помощью контроллера АК-РС 781

Встроенная в АК-РС 781 функция рекуперации тепла даёт возможность регулировать температуру подогрева в двух независимых контурах. Первый контур обычно используется для горячей водопроводной воды, а второй обычно используется для отопления помещения при низких температурах. Есть возможность выбора только подогрева воды, рекуперации тепла только для отопления или решения обеих этих задач (выбор в сервисной утилите между "None" (ничего), "Tap water" (водопроводная вода), "Heat reclaim" (рекуперация тепла), "Tap and heat" (вода и отопление)).

Если рекуперация тепла задана, но не затребована, то контроллер байпасирует теплообменники с помощью клапанов $V3tw$ и $V3hr$, а насосы Pump tw и Pump hr будут остановлены. Если рекуперация тепла не затребована, то процесс охлаждения регулируется при самой низкой возможной температуре газа Sgc , зависящей от окружающей температуры $Sc3$, и при оптимальном давлении Pgc , чтобы обеспечить оптимальный COP процесса охлаждения.

Функции обеспечения безопасности

Встроены несколько функций для обеспечения требуемых параметров охлаждения пищевых продуктов и безотказной эксплуатации. Эти функции требуют, чтобы все показанные датчики были смонтированы для создания возможности активировать рекуперацию тепла.

Защита от закипания воды:

При достижении температуры, измеренной любым датчиком в водяном контуре, 95°C, рекуперация тепла в конкретном контуре будет отключена.

Температура нагнетания Sd слишком низкая:

Если измеренное значение Sd ниже, чем температура на возврате в водяном контуре Stw3 / Shr3, то рекуперация тепла для конкретного контура будет отключена и не сможет быть активирована.

Выход из строя датчики температуры:

Если какой-либо датчик температуры в конкретном контуре рекуперации тепла вышел из строя, то рекуперация тепла для этого контура будет отключена и не сможет быть активирована.

Слишком низкая температура газа:

Если температура газа на выходе из теплообменников Stw2 / Shr2 слишком низкая, то для конкретного контура рекуперация тепла будет отключена и не сможет быть активирована.

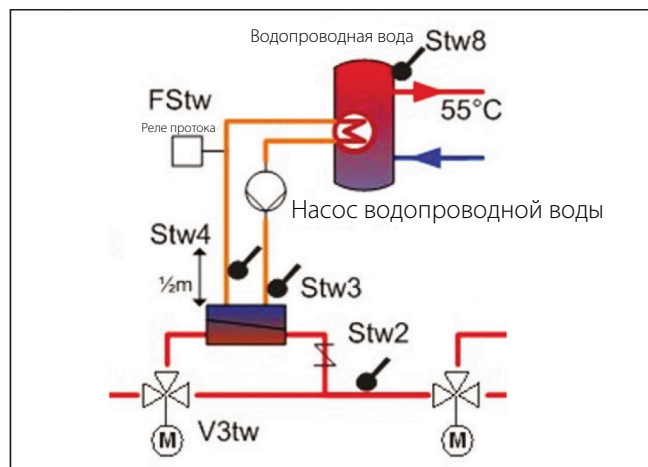
Нет протока воды:

Если установлено реле протока (опционально), то при работе насоса оно должно быть активно с учётом задержки времени (напр., 30 с), в течение которого рекуперация тепла не может быть активирована. Если сигнал реле протока пропал при работе насоса, рекуперация тепла будет деактивирована после истечения заданного времени задержки.

Рекуперация тепла для горячей водопроводной воды

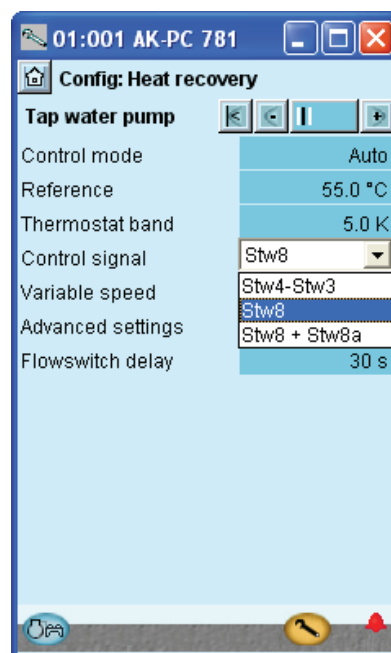
Общий контрольный датчик для рекуперации тепла для горячей водопроводной воды - Stw8. Можно задать контрольное значение для температуры горячей водопроводной воды, например, 55°C. Вокруг контрольного значения можно задать диапазон для срабатывания термореле, например 5 °C, при этом рекуперация тепла будет запускаться при 52,5 °C и прекращаться при 57,5 °C.

Чтобы избежать слишком частых пусков и остановок рекуперации тепла для горячей воды, имеется возможность установить второй датчик температуры в водяном бойлере на более низком уровне и использовать два датчика Stw8 и Stw8a для выполнения функции термореле. Если значение температуры, измеренное датчиком Stw8 равно или ниже 52,5°C, то функция рекуперации тепла запускается, а останавливается, когда температура воды по датчику Stw8a, который расположен ниже, достигнет значения 57,5 °C.



Имеется возможность выбора между тремя стратегиями управления / контрольными датчиками

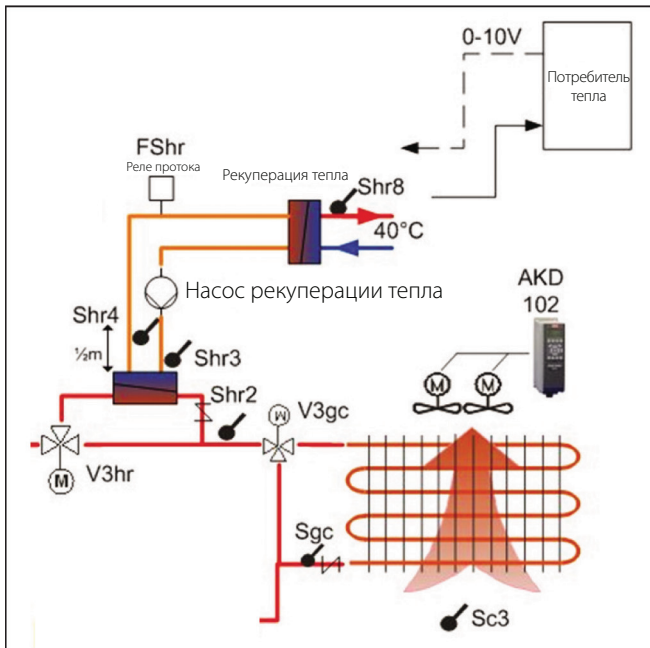
- Используя разницу температур между Stw4 и Stw3. При этом насос должен быть только с инвертором, на котором должно задаваться контрольное значение для разницы температур («delta T») (Stw4-Stw3). Можно установить значения Kp и Tn для контура управления PI, а также значения минимальной и максимальной скорости насоса.
- Используя контрольное значение и диапазон термореле для Stw8. В этом случае насос может эксплуатироваться двумя разными способами:
 - «Вкл-выкл» по контрольному значению с учетом диапазона срабатывания термореле.
 - С переменной скоростью (0–10 В), используя значение Stw8. Можно задать значения Kp и Tn для контура управления PI, а также минимальную и максимальную скорость насоса.
- Используя контрольное значение комбинации Stw8 и Stw8a. В этом случае насос может эксплуатироваться только в режиме «вкл-выкл», включаясь по сигналу от Stw8 и выключаясь по сигналу от Stw8a.



При рекуперации тепла через водяной контур нет возможности добиться снижения давления до заданного минимума. Если требуется повысить давление водопроводной воды, то можно дополнительно использовать для воды контур рекуперации тепла для отопления.

Рекуперация тепла для отопления

Если система используется в супермаркетах, то обычно рекупируется больше тепла, чем необходимо для горячей водопроводной воды, поэтому есть смысл вложить средства в рекуперацию тепла для подогрева полов или предварительного подогрева систем вентиляции.



Рекуперация тепла для отопления может быть настроена на три различных режима:

«No HP-Offset» (Без смещения ВД)

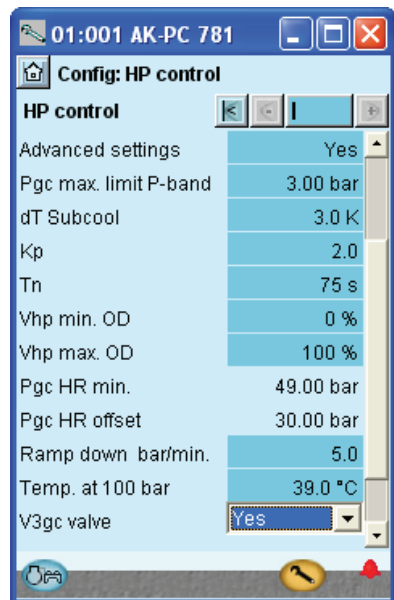
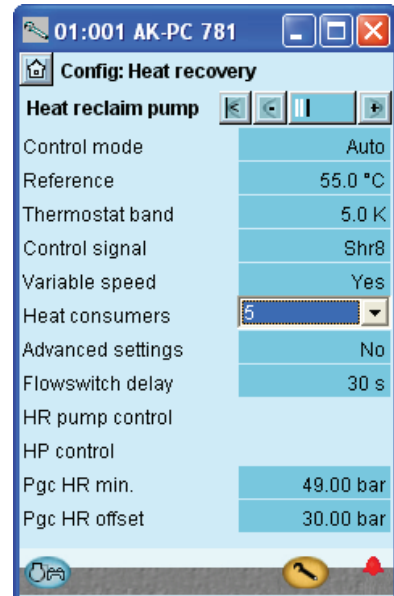
Если выбран данный режим, то работа системы очень похожа на работу при рекуперации тепла для горячей водопроводной воды, когда давление сохраняется на самом низком возможном уровне в соответствии с окружающей температурой.

«HP-Offset» (Со смещением ВД)

При низких температурах окружающей среды может возникнуть необходимость в повышении давления в газоохладителе, чтобы получить больше энергии для рекуперации тепла. При рекуперации с вариантом внешней коррекции от внешних потребителей тепла (до 5-ти) можно задать минимальное значение давления (Pgc HR min). Потребитель тепла с самой высокой потребностью (определяемой входными аналоговыми сигналами 0–10 В) будет управлять повышением давления до установленного значения «Pgc HR offset». Например, $49 + 30 = 79$ бар при 10 вольтах.

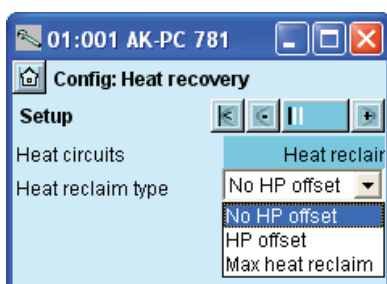
«Max heat reclaim» (Максимальная рекуперация тепла)

В тех случаях применения, когда необходима рекуперация тепла на 100 %, имеется возможность байпасировать газоохладитель с помощью клапана V3gc, что необходимо указать в дополнительных настройках конфигурации регулирования «HP control».



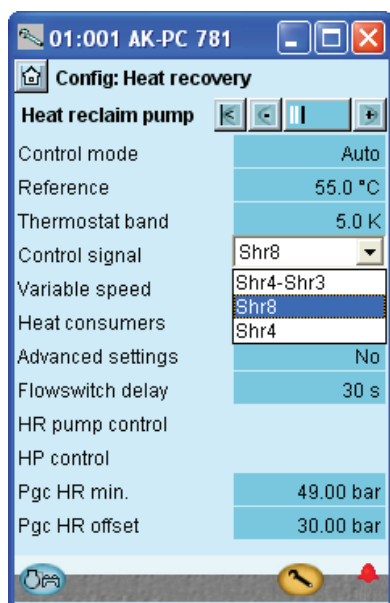
Руководствуясь самым высоким сигналом коррекции (0–10 В) от внешних потребителей тепла (до 5 штук), функция выполняется за 4 шага:

1. Запуск рекуперации тепла при повышении давления до минимальной заданной границы.
2. Подъем давления газоохладителя до значения максимального отклонения.
3. Повышается контрольное значение для вентиляторов газоохладителя (контрольное значение вычисляется контроллером), чтобы снизить производительность вентилятора.
4. Газоохладитель байпасируется.



Имеется возможность выбора между тремя различными стратегиями управления (использования датчиков) для управления насосом «Pump hr» (насос рекуперации тепла):

- Используя разницу температур между Shr4 и Shr3. В этом случае насос должен иметь только привод с регулируемой скоростью, в котором задается «Delta T» ($\text{Shr4} - \text{Shr3}$). Можно задать значения KP и Tn для контроллера PI, а также минимальную и максимальную скорость насоса.
- Используя контрольное значение и диапазон термореле для Shr8. В этом случае насос может эксплуатироваться двумя различными способами:
 - «Вкл-выкл» по контрольному значению с учетом диапазона термореле.
 - Управление инвертором (0–10 В) по контрольному значению для Shr8. Можно задать значения KP и Tn для контроллера PI, а также минимальную и максимальную скорость насоса.
- Используя постоянное значение температуры воды Shr4. В этом случае насос может управляться только инвертором, для которого контрольное значение («Reference») – задание для Shr4. Диапазон термореле («Thermostat band») продолжает использоваться для остановки или пуска рекуперации тепла. Можно задать значения KP и Tn для контроллера PI, а также минимальную и максимальную скорость насоса.



Контрольный датчик

Если в качестве контрольного сигнала используются Shr8 или Delta T ($\text{Shr4} - \text{Shr3}$), то датчиком общей рекуперации тепла для отопления будет являться Shr8 и можно задать контрольное значение требуемой температуры воды, например, 40°C. Диапазон срабатывания термореле, например, 5°C накладывается на это контрольное значение, обеспечивая старт рекуперации тепла, например при 37,5°C и остановку рекуперации тепла при 42,5°C.

Если в качестве контрольного сигнала выбран Shr4 (для контроля постоянной температурой воды к потребителям тепла), то датчиком общего контроля рекуперации тепла будет являться Shr4, а Shr8 используется только для мониторинга.

Заключение

Контроллер компрессорного агрегата АК-РС 781 обладает рядом встроенных функций, разработанных, главным образом, для транскритических бустерных систем на CO₂:

- Управление давлением газа при оптимизированном коэффициенте COP
- Управление ресивером и байпасированием газа
- Управление переменной скоростью основного компрессора и вентиляторов газоохладителя
- Функции маслообеспечения
- Повышение степени рекуперации тепла для водопроводной воды и отопления

С помощью всех функций управления можно управлять транскритическим компрессорным агрегатом, сохраняя наивысшее значение COP при любых нагрузках. Наряду с безопасностью, качество охлаждаемых пищевых продуктов имеет наивысший приоритет, поэтому встроенные функции безопасности и коррекции обеспечивают оптимальное управление системой охлаждения. Необходимое количество рекуперированного тепла автоматически регулируется, учитывая тепловую нагрузку на холодильную систему, встроенные функции управления автоматически выведут контур рекуперации тепла из работы, если отведено слишком большое количество тепла, что обычно приводит к потере холодопроизводительности.