

влажности воздуха в порах материала равной  $\varphi = 90\%$ , с течением времени, за счет десорбции, влажность ячеистого бетона будет снижаться и станет равной  $W_{\text{мат}}^{\text{д}} \approx 11\%$  по массе, а при относительной влажности воздуха в порах материала равной  $\varphi = 75\%$  – станет равной  $W_{\text{мат}}^{\text{д}} \approx 4\%$  по массе. При последующем увеличении относительной влажности воздуха в порах материала с  $\varphi = 75\%$  до  $\varphi = 90\%$  происходит увлажнение материала до  $W_{\text{мат}}^{\text{с}} \approx 7\%$  по массе в соответствии с изотермой сорбции.

На основании изложенного следует вывод, что для ячеистых бетонов, имеющих технологическую влагу после возведения здания, при их высыхании изменение влажности будет происходить в соответствии с изотермой десорбции, а увлажнение – в соответствии с изотермой сорбции при условии:  $W_{\text{мат}}^{\text{с}} > W_{\text{мат}}^{\text{д}}$ . Учитывая, что влажности материалов при десорбции выше чем при сорбции, фактические коэффициенты теплопроводности ячеистого бетона могут быть выше расчетных, приведенных в [2].

При моделировании тепло-влажностного режима ограждающих конструкций, в том числе с использованием ячеистого бетона, необходимо определять, как изотерму сорбции, так и изотерму десорбции материалов.

### Литература

1. Здания и сооружения. Энергетическая эффективность. СН 2.04.02-2020. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2021. – 24 с.
2. Строительная теплотехника. СП 2.04.01-2020. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2020. – 72 с.
3. Рыхленок, Ю. А. Особенности эксплуатации и причины снижения долговечности наружных стен из ячеистобетонных блоков автоклавного твердения / Ю. А. Рыхленок, А. Б. Крутилин // Проблемы современного бетона и железобетона: Сборник научных трудов. – Минск, Издательский центр БГУ, 2012. – Вып. 4. – С. 107–119.

УДК 620.97

### Рекуперация от холодильного оборудования с целью получения теплоты для нужд отопления и ГВС

Сермяжко В. Л., Станецкая Ю. А.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*В статье рассмотрены основные аспекты ТЭО рекуперации теплоты от холодильного оборудования и некоторые принципиальные схемы.*

В соответствии с определением Экологического энциклопедического словаря рекуперация (от лат. recuperatio – обратное получение) – это возвращение части материалов или энергии для повторного использования в том же технологическом процессе. Рекуперация является основой безотходного производства, наиболее прогрессивного метода рационального использования природных ресурсов и охраны природы [1].

По данным Ассоциации предприятий индустрии микроклимата и холода (АПИМХ) среднегодовое количество электрической энергии, расходуемой в Республике Беларусь на работу холодильных машин, составляет около 35 %. Среднесуточная мощность в энергосистеме в летний период составляет порядка 5 ГВт, из них промышленностью отбирается порядка 73 %, таким образом, для работы холодильных машин необходимо порядка 1,277 ГВт мощности:

$$5 \cdot 0,73 \cdot 0,35 = 1,277 \text{ ГВт.}$$

В установившейся практике, теплота, отводимая холодильными машинами, сбрасывается в атмосферу через воздушные конденсаторы. Практический смысл применения рекуперации теплоты заключается в нагреве воды путем передачи ей тепловой энергии, отводимой в процессе охлаждения продуктов, холодоснабжения технологических процессов или кондиционирования воздуха **без дополнительных затрат** электрической энергии.

Рассматривая термодинамический цикл парокомпрессионной холодильной машины, видно, что перенос теплоты осуществляется от условно «холодного тела» (процесс 4–1) к условно «горячему телу» (процесс 2–3). Греемая среда, которой являются продукты питания, технологические процессы, требующие отвода теплоты, кондиционируемый воздух – это условно «холодное тело», которое передает тепловую энергию хладагенту в испарителе холодильной машины.

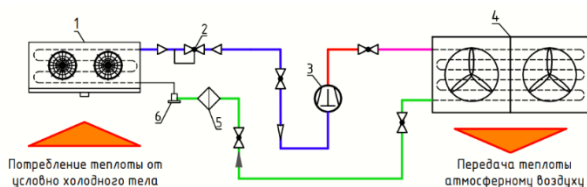


Рис. 1. Принципиальная схема парокомпрессионной холодильной машины:  
1 – испаритель; 2 – регулятор давления испарения; 3 – компрессор; 4 – воздушный конденсатор; 5 – фильтр; 6 – терморегулирующий вентиль (ТРВ)

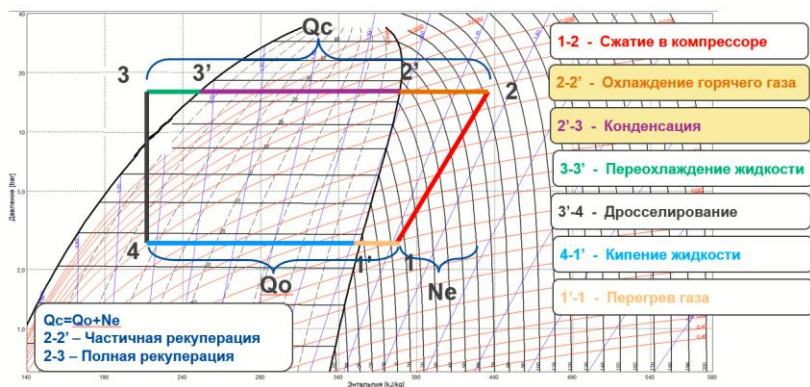


Рис. 2. Цикл холодильной машины

Далее хладагент после сжатия в компрессоре (процесс 1–2) и повышения температуры перемещается в конденсатор, где передает тепловую энергию нагреваемой среде, то есть условно «горячему телу» (процесс 2–3). Температура хладагента в конденсаторе выше, чем в испарителе. Тем самым обеспечивается подогрев нагреваемой среды до температуры большей, чем температура греющей среды. Холодильная машина в этом процессе применяется в режиме **теплового насоса** [2].

В конденсаторе холодильной машины должна быть отведена как воспринятая теплота в испарителе  $Q_o$ , так и теплота, эквивалентная затраченной мощности компрессора на адиабатическое сжатие паров холодильного агента, ккал/ч [3]:

$$Q_c = Q_o + 860N_{im} ,$$

где  $Q_c$  – теплопроизводительность (для конденсатора);  $Q_o$  – холодопроизводительность (для испарителя);  $N_{im}$  – теоретическая индикаторная мощность компрессора, затраченная на адиабатическое сжатие паров холодильного агента.

В общем случае принципиальные схемы для проектирования систем рекуперации включают в себя специальные теплообменники, в которых нагрев воды происходит за счет охлаждения паров фреона (процесс 2–2'), конденсации его в жидкость (процесс 2'–3') и переохлаждения до температуры испарения (процесс 3'–3). Применение **накопительных емкостей (теплоаккумуляторов)** является обязательным, так как это позволяет сглаживать не-

равномерность и неодновременность потребления горячей воды и потребность в охлаждении. Также необходимо предусматривать системы автоматического регулирования, насосное оборудование и расширительные баки.

На рис. 3 приведена схема **частичной рекуперации теплоты** с применение кожухотрубного пароохладителя. Применяется для нагрева воды при небольшой потребности в теплоте относительно мощности холодильной машины. Нагрев происходит за счет охлаждения горячего газа хладагента до температуры конденсации (процесс 2–2').

При выборе схемы для системы рекуперации теплоты от холодильного оборудования важным аспектом является сбор исходных данных и технико-экономическое обоснование (ТЭО). Для этого необходимо проанализировать мощности и режимы работы холодильного оборудования, количество необходимой тепловой энергии для нужд отопления, горячего водоснабжения (ГВС), теплоснабжения приточных установок и воздушно тепловых завес. Так же необходимо оценивать стоимости существующих источников тепловой энергии и сравнивать их с капитальными затратами на проектирование и строительство систем рекуперации для расчета срока окупаемости. Нужно учитывать, что срок окупаемости не должен превышать 5–6 лет.

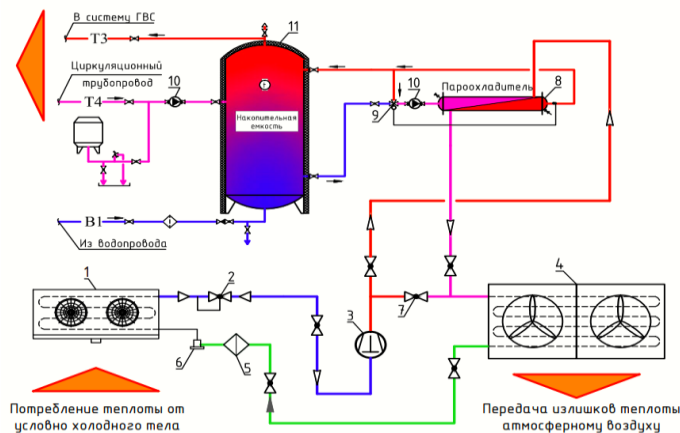


Рис. 3. Принципиальная схема парокомпрессионной холодильной машины с пароохладителем для частичной рекуперации теплоты:

- 1 – испаритель; 2 – регулятор давления испарения; 3 – компрессор; 4 – воздушный конденсатор; 5 – фильтр; 6 – терморегулирующий вентиль (ТРВ); 7 – байпасный кран для ТО теплообменника; 8 – кожухотрубный пароохладитель; 9 – трехходовой термостатический клапан; 10 – циркуляционный насос; 11 – накопительная емкость

Нагрев воды для систем горячего водоснабжения (ГВС), является приоритетным в данных схемах рекуперации, так как потребность в ГВС существует круглогодично.

На рис. 4 приведена схема с **полной рекуперацией теплоты** с применением последовательно установленного кожухотрубного пароохладителя и конденсатора.

Применяется для нагрева воды при расходах теплоты сопоставимых с мощностью и режимом работы холодильной машины. Нагрев воды происходит в два этапа:

1 этап – предварительный нагрев воды до температуры 38–42 °С за счет тепловой энергии, отводимой при конденсации хладагента и переохлаждения (процесс 2'–3);

2 этап – нагрев воды до температуры 50–55 °С за счет тепловой энергии, отводимой при охлаждении горячего газа хладагента до температуры конденсации (процесс 2–2').

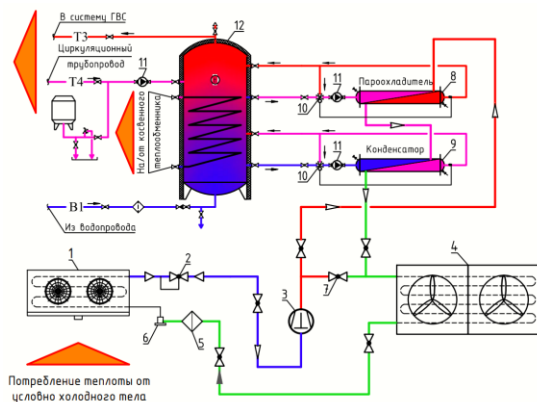


Рис. 4. Принципиальная схема парокомпрессионной холодильной машины с пароохладителем и конденсатором для полной рекуперации теплоты:  
 1 – испаритель; 2 – регулятор давления испарения; 3 – компрессор; 4 – воздушный конденсатор; 5 – фильтр; 6 – терморегулирующий вентиль (ТРВ); 7 – байпасный кран для ТО теплообменников; 8 – кожухотрубный пароохладитель; 9 – кожухотрубный конденсатор; 10 – трехходовой термостатический клапан; 11 – циркуляционный насос; 12 – накопительная емкость

На рис. 2 видно, что энтальпия частичной рекуперации составляет около 15–20 % от полной рекуперации. В связи с этим, реализация схемы полной

рекуперации является более энергетически целесообразной и позволяет получать больший объем воды с более высокой температурой, но не всегда находит практическое применение при небольших расходах энергии только для нужд ГВС. Поэтому схемы с полной рекуперацией целесообразны при использовании полученной тепловой энергии для нагрева ГВС круглогодично и для отопления через контуры теплого пола, теплоснабжения приточных установок и воздушно тепловых завес в отопительный период. При использовании рекуперативной тепловой энергии в системах вентиляции нужно уделять особое внимание подбору теплообменников в приточных установках. При недостаточной мощности в расчетный период они могут использоваться в качестве теплообменников первого (предварительного) подогрева.

При проектировании систем рекуперации важными являются меры по защите холодильного оборудования от неправильного режима работы.

При отсутствии регулирующего органа высока вероятность переохлаждения хладагента до температуры ниже, чем требуется для его испарения при определенном давлении. В таком случае в автоматике холодильной машины сработает защита по низкому давлению испарения (кипения).

На рис. 5 показано как установка трехходового термостатического клапана обеспечивает поддержание температуры теплоносителя, выходящего из теплообменника (датчик TE2), тем самым ограничивая избыточный теплосъем и переохлаждение хладагента (датчик TE4).

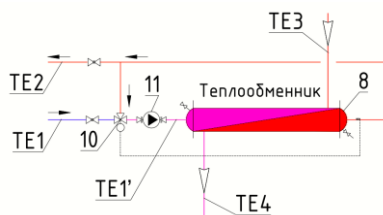


Рис. 5. Принципиальная схема автоматического регулирования:  
8 – теплообменник; 10 – трехходовой термостатический клапан;  
11 – циркуляционный насос

Регулирование происходит плавно благодаря постоянному потоку, поддерживаемому циркуляционным насосом (11) и смешению необходимого объема холодной воды (датчик TE1) и горячей воды (датчик TE2) до результирующей температуры (датчик TE1'). Данная схема позволяет под-

держивать постоянный перепад температуры между нагреваемой и греющей средой ( $\Delta T = TE2 - TE4$ ), а также исключает влияние потребления теплоты от режима работы холодильной машины и расход хладагента.

Энергетическая эффективность холодильных машин с полной рекуперации энергии T.E.R. (Total Energy Recovery) есть отношение суммы холодопроизводительности и теплопроизводительности к полной затраченной мощности в расчетном режиме эксплуатации.

$$T.E.R. = E.E.R + C.O.P. = Q_o / N_e + Q_c / N_e ,$$

где E.E.R. (Energy Efficiency Ratio) – коэффициент энергетической эффективности – отношение холодопроизводительности машины к полной затраченной мощности в расчетном режиме эксплуатации; C.O.P. (Coefficient of Performance) – коэффициент производительности холодильной машины в режиме теплового насоса – это отношение теплопроизводительности к полной затраченной мощности в расчетном режиме эксплуатации;  $Q_o$  – мощности холодопроизводительности;  $Q_c$  – мощность теплопроизводительности;  $N_e$  – мощность электрической энергии.

**Экономическая эффективность** рекуперации теплоты от холодильного оборудования определяется путем сопоставления затрат на ее реализацию и последующую эксплуатацию с доходами от сэкономленных средств на ТЭР. Следует отметить, что рекуперация теплоты от холодильного оборудования в некоторых случаях относится к импортозамещающим мероприятиям и сокращает зависимость от роста цен на энергоносители. Сокращение потребления энергии через снижение выбросов парниковых газов при производстве тепловой энергии имеет и положительный **экологический эффект**.

### Выводы

1. Применение рекуперации теплоты от холодильного оборудования имеет огромную экономическую выгоду, относящуюся к энергосберегающим мероприятиям, снижает зависимость от роста цен на энергоносители.

2. Перечень объектов, на которых может применяться одновременное охлаждение и нагрев довольно широкий:

- молочно-товарные фермы, на которых для хранения молока применяется его охлаждение в специальных емкостях;

- мясокомбинаты, на которых используется охлаждение и глубокая заморозка мясных продуктов;

- овощехранилища, и продовольственные магазины, где применяются холодильные камеры и витрины для хранения продуктов;

- фармацевтические производства;

– строительство офисных и многофункциональных зданий с повышенным комфортом, где применение одновременного кондиционирования и нагрева воды для ГВС является экономически целесообразным.

3. Положительный экологический эффект.

### Литература

1. Экологический энциклопедический словарь. – Кишинев: Главная редакция Молдавской советской энциклопедии, 1989.

2. Дячек, П. И. Кондиционирование воздуха и холодоснабжение / П. И. Дячек. – М: АСВ, 2017.

3. Кокорин, О. Я. Установки кондиционирования воздуха / О. Я. Кокорин. – М: Машиностроение, 1978.

УДК 620.97

### Мониторинг эффективности систем рекуперация от холодильного оборудования.

Сермяжко В. Л., Станецкая Ю. А.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

*В статье рассмотрены методы оценки эффективности принятых технических решений по рекуперации теплоты с помощью цифрового мониторинга и системного анализа исторических данных, накопленных в ходе процесса эксплуатации.*

В соответствии с определением в Законе Республики Беларусь от 8 января 2015 г. № 239-З «Об энергосбережении», **энергетическая эффективность** (энергоэффективность) – характеристика, отражающая отношение полученного эффекта от использования топливно-энергетических ресурсов к затратам топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), произведенным в целях получения такого эффекта [1].

Эффективное и рациональное использование ТЭР является стратегической задачей для достижения целей «устойчивого развития» (задача 12.6) [2]. Область знаний об энергетической эффективности находится на стыке физико-математических, технических и экономических наук.

Использование энергосберегающих решений и оборудования на этапе проектирования должно подтверждаться технико-экономическим обоснованием инвестиций в комплекс мероприятий по энергосбережению. ТЭО должно включать качественный и количественный расчет капитальных за-