

## Тема 2. ХОЛОДИЛЬНЫЕ МАШИНЫ И ТЕПЛОВЫЕ НАСОСЫ

1. Назначение холодильной установки и теплового насоса. Условия их работы.
2. Способы охлаждения.
3. Цикл паровой компрессионной холодильной установки
4. Цикл теплового насоса
5. Типы холодильных машин

### 1. НАЗНАЧЕНИЕ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И ТЕПЛООВОГО НАСОСА, УСЛОВИЯ ИХ РАБОТЫ.

\*Во многих отраслях производства, например при хранении сельскохозяйственных продуктов, а также в различных технологических процессах необходимо поддерживать температуру на более низком уровне, чем температура окружающей среды. Иногда требуется трансформация теплоты с более низкого температурного уровня на более высокий.

Холодильные установки предназначены для понижения температуры тел ниже температуры окружающей среды и ее поддержания на требуемом уровне.

\*Промышленное получение искусственного холода впервые было осуществлено с помощью холодильной установки, в которой в качестве рабочего тела использовался воздух. Существенный ее недостаток—малая эффективность цикла и весьма ограниченная область возможного применения.

Цикл теплового насоса в принципе не отличается от цикла холодильных машин.

Тепловые насосы применяют для отбора теплоты из окружающей среды и передачи ее объекту с более высокой температурой. Если для холодильных установок теплоприемником является окружающая среда, то для теплового насоса она служит источником теплоты.

Источником теплоты низкой температуры для теплового насоса могут служить внешняя атмосфера, вода водоемов или термальных вод, теплота земли (геотермальные источники), а также охлаждающая вода конденсаторов турбин или компрессоров, выпускные газы двигателей внутреннего сгорания, воздух, удаляемый из помещений ферм, и т. д.

Теплоприемником может быть система отопления помещений или различные технологические процессы.

\*Использование тепловых насосов для отопления зданий впервые было предложено В. Томсоном, а детальная техническая разработка этой идеи осуществлена В. А. Михельсоном.

Принцип действия холодильных установок и тепловых насосов основан на совершении рабочим телом обратного термодинамического кругового процесса. В результате этого теплота отводится от охлаждаемого тела и передается окружающей среде, имеющей более высокую температуру.

Количество теплоты, отводимой от охлаждаемого тела за единицу времени (за час), называется *холодильной мощностью холодильной установки*. Холодильная мощность, отнесенная к 1 кг холодильного агента (рабочего тела), называется *удельной холодильной мощностью холодильного агента*. Для характеристики эффективности обратного цикла вводят понятие холодильного коэффициента  $\epsilon_x$ .

Наибольшее распространение в сельском хозяйстве нашли компрессионные установки, в которых энергия, необходимая для выработки искусственного холода, затрачивается в виде механической энергии на привод компрессора и абсорбционные установки, в которых для повышения давления рабочего тела используется термохимическая компрессия.

В настоящее время в качестве рабочих тел (холодильных агентов) применяют так называемые низкокипящие жидкости:

- а) аммиак  $\text{NH}_3$  ( $t_{\text{кип}} = - 33,35 \text{ }^\circ\text{C}$ ),
- б) различные фреоны — фторхлорпроизводные углеводородов типа  $\text{C}_m\text{H}_n$ :
  - трихлорфторметан: Фреон R11, Фреон-11, Хладон-11 ( $t_{\text{кип}} = - 23,8 \text{ }^\circ\text{C}$ )

- дифтордихлорметан— Фреон R12, Фреон-12, Хладон-12 ( $t_{\text{кип}} = -29,8 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и др.

Фреоны очень инертны в химическом отношении, поэтому они не горят на воздухе, взрывобезопасны даже при контакте с открытым пламенем.

## 2. СПОСОБЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

**Охлаждение** – процесс понижения температуры материала путем отвода от него теплоты. Охлаждение всегда связано с переносом тепла от тела с более высокой температурой к телу с более низкой температурой.

Различают **естественное** и **искусственное охлаждение**.

**Естественное охлаждение** — это отвод тепла от охлаждаемого тела в окружающую среду. При этом способе температуру охлаждаемого тела можно понизить только до температуры окружающей среды. Это самый простой **способ охлаждения** без затраты энергии.

**Искусственное охлаждение** — это охлаждение тела ниже температуры окружающей среды. Для искусственного охлаждения применяют холодильные машины или холодильные установки. При этом **способе охлаждения** необходимо затратить энергию.

Способы получения искусственного холода классифицируются по требуемой температуре охлаждения. Условно различают умеренное охлаждение (диапазон температур  $+20 \dots -100 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и глубокое охлаждение (температура ниже  $-100 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Существует несколько способов получения **искусственного холода**. Самый простой — охлаждение с помощью льда или снега.

**Ледяное охлаждение** имеет существенный недостаток — температура охлаждения ограничена температурой таяния льда.

В качестве охладителей используют водный лед, льдосоляные смеси, сухой лед и жидкие холодильные агенты (хладоны и аммиак).

**Льдосоляное охлаждение** производится с применением дробленого водного льда и соли. Из-за добавления соли скорость таяния льда увеличивается, а температура таяния льда опускается. Охлаждение сухим льдом основано на действии твердого диоксида углерода — при поглощении тепла сухой лед переходит из твердого состояния в газообразное. С помощью сухого льда можно получить более низкую температуру, чем при использовании водного льда: охлаждающее действие 1 кг сухого льда почти в 2 раза больше, чем 1 кг водного льда, при охлаждении не возникает сырости, выделяемый газообразный диоксид углерода обладает консервирующими свойствами, способствует лучшему сохранению продуктов. Сухой лед применяется при перевозках замороженных продуктов, охлаждении фасованного мороженого, хранении замороженных фруктов и овощей.

Наиболее распространенным и удобным при эксплуатации является машинное охлаждение. По сравнению с другими видами охлаждения машинное охлаждение обладает следующими преимуществами:

- возможностью создания низкой температуры в широких пределах;
- автоматизацией процесса охлаждения;
- доступностью эксплуатации и технического обслуживания и др.

**Машинное охлаждение** получило наибольшее распространение в связи с рядом достоинств: автоматическим поддержанием постоянной температуры хранения в зависимости от вида продуктов, рациональным использованием полезной емкости для охлаждения продуктов, удобством обслуживания, высокой экономичностью и возможностью создания необходимых санитарно-гигиенических условий хранения продуктов.

По виду затрачиваемой энергии холодильные машины подразделяются на компрессионные, теплоиспользующие и термоэлектрические.

Компрессионные машины используют механическую энергию; теплоиспользующие — тепловую от источников теплоты, температура которых выше окружающей среды; термоэлектрические — электрическую.

При охлаждении в компрессионных и теплоиспользующих машинах теплота переносится в результате совершаемого рабочим телом — холодильным агентом (хладагентом) обратного кругового процесса, а в термоэлектрических — при воздействии потока электронов на атомы вещества.

Охлаждение в **термоэлектрических машинах** основано на термоэлектрическом эффекте, известном как эффект Пельтье, заключающемся в том, что при пропускании постоянного электрического тока по замкнутой цепи, состоящей из двух разнородных проводников или полупроводников, один из спаев нагревается (горячий спай), а другой охлаждается (холодный спай). Для того чтобы холодный спай термоэлемента имел постоянную низкую температуру и был источником холода, горячий спай нужно охлаждать. В этом случае система представляет собой холодильный агрегат, в котором электрический ток переносит энергию от холодного спаю термоэлемента к горячему.

Количество перенесенной энергии пропорционально силе тока в цепи термоэлемента. Изменение полярности электрического тока приводит к перемене мест холодного и горячего спаев. Основным показателем качества термоэлемента — коэффициент добротности (эффективности вещества), определяющий максимальную разность температур горячего и холодного спаев. К достоинствам такого рода устройств можно отнести непосредственное использование электрической энергии для переноса теплоты без промежуточных веществ и механизмов; бесшумность и автономность работы; компактность и простоту автоматизации и обслуживания. Однако они значительно дороже других холодильных машин.

### 3. ЦИКЛ ПАРОВОЙ КОМПРЕССИОННОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

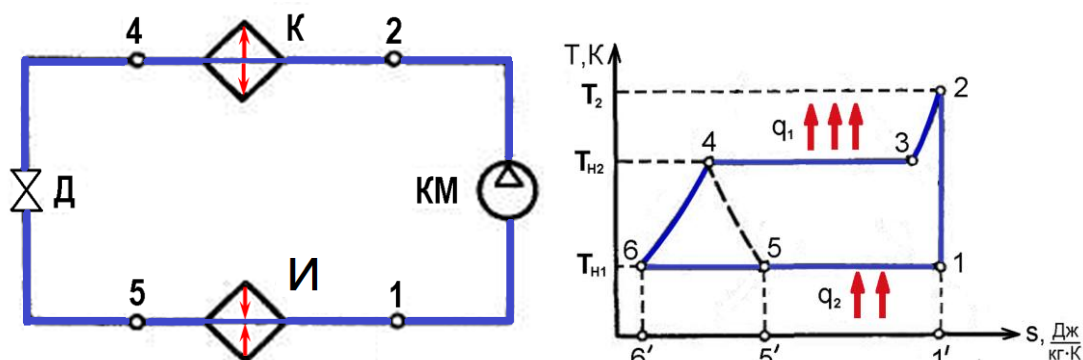


Рис. 1. Схема компрессионной паровой холодильной установки и изображение цикла в Ts-координатах: КМ — компрессор; И — испаритель; Д — дроссельный клапан; К — конденсатор.

Принципиальная схема установки изображена на рисунке 1, здесь же приведен ее цикл в Ts-координатах (цифры на схеме соответствуют точкам, указанным на Ts-диаграмме).

Установка работает следующим образом.

1) Из испарителя «И» влажный насыщенный пар со степенью сухости  $x_1$  при давлении  $p_1$  и температуре  $T_{Н1}$  всасывается компрессором «КМ» и сжимается адиабатно (процесс 1—2) до давления  $p_2$  и температуры  $T_2$ .

2) Из компрессора пар подается в конденсатор «К», где, охлаждаясь водой или окружающим воздухом, при постоянном давлении  $p_2$  превращается вначале в сухой насыщенный пар (процесс 2—3), а затем полностью переходит в жидкость (процесс 3—4).

На T-s-диаграмме теплота  $q_1$ , отданная рабочим телом в конденсаторе, эквивалентна площади: 2—3—4—5—5'—1'—2.

3) На выходе из конденсатора жидкое рабочее тело, проходя через клапан «Д», дросселируется (на диаграмме этот процесс условно изображен линией 4—5).

Дросселированием называется процесс, происходящий при движении потока через местное сопротивление в трубопроводе, связанный с падением давления в направлении течения (рис. 2). Опыт показывает, что если на пути потока встречается местное сопротивление в виде суженного

сечения, то в процессе течения потока давление рабочего тела понижается. Дросселирование – это адиабатный процесс, т.к. протекает без подвода (отвода) теплоты извне без совершения внешней работы. Этот процесс необратим и сопровождается возрастанием энтропии.

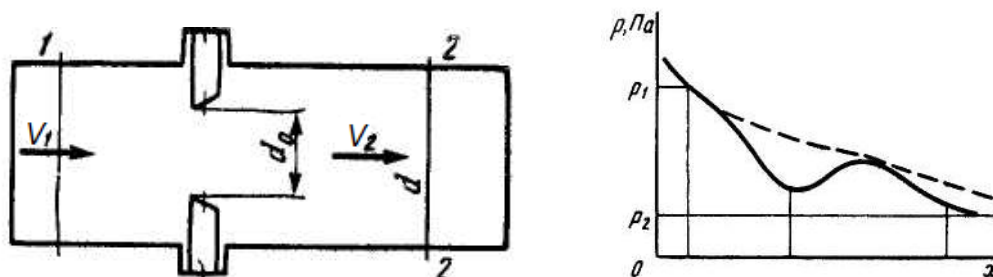


Рис. 2. Схема дросселирования потока и изменение давления вдоль канала при дросселировании.  
 $v_1$  и  $v_2$  – скорость движения рабочего тела до и после сужения, м/с  
 $d_0$  и  $d$  – диаметры дроссельного отверстия и трубопровода, м

Для идеального газа температура одинакова как до суженного сечения, так и после него.

У реальных газов и паров происходит изменение температуры после дроссельного отверстия. Явление изменения температуры рабочего тела в результате адиабатного дросселирования называют *эффектом Джоуля — Томсона*. Изменение температуры происходит в зависимости от изменения давления:

$$\alpha = \frac{\partial T}{\partial p} \quad (1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент адиабатного дросселирования, или коэффициент дифференциального дроссель-эффекта.

Знак изменения  $dT$  зависит от знака  $\alpha$ . Если  $\alpha > 0$ , то  $dT < 0$ , т.е. при дросселировании рабочее тело охлаждается. Это явление называют *положительным эффектом Джоуля—Томсона*. При  $\alpha < 0$   $dT > 0$ , т.е. при дросселировании рабочее тело нагревается — *отрицательный эффект Джоуля — Томсона*. При  $\alpha = 0$   $dT = 0$  т.е. в результате дросселирования рабочее тело не меняет своей температуры.

При дросселировании энтальпия рабочего тела не изменяется  $h_4 = h_5$ , при этом давление падает от  $p_2$  до  $p_1$ . В нашем случае коэффициент адиабатного дросселирования  $\alpha > 0$ , поэтому температура рабочего тела снижается до  $T_{H1}$ . В точке 5 пар влажный насыщенный (степень сухости  $x_5$ ).

4) После дроссельного клапана рабочее тело поступает в рефрижератор. В результате подвода теплоты  $q_2$ , хладагент испаряется до состояния, изображаемого точкой 1 (процесс 5—1).

На T-s-диаграмме подведенная теплота  $q_2$  эквивалентна площади: 5—1—1'—5'—5.

Холодильный коэффициент этой установки

$$\varepsilon_x = \frac{q_2}{q_1 - q_2} = \frac{h_1 - h_5}{h_2 - h_1} \quad (2)$$

где  $h_1$  и  $h_2$  – энтальпии рабочего тела до и после компрессора;  
 $h_5$  – энтальпия рабочего тела после дроссельного клапана.

Работа, затраченная в компрессоре равна:

$$l_K = h_2 - h_1 \quad (3)$$

#### 4. ЦИКЛ ТЕПЛООВОГО НАСОСА

Схема теплового насоса приведена на рисунке 3.

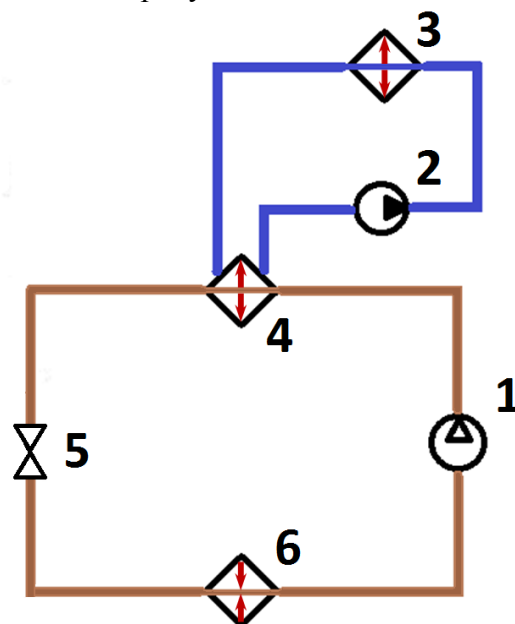


Рис. 3. Схема теплового насоса.

1) В испарителе 6 холодильный агент испаряется за счет теплоты  $q_2$ , подведенной из окружающей среды, например из водоема.

2) Затем пар поступает в компрессор 1, где сжимается за счет затраченной работы  $l_{ц}$ .

3) После сжатия в компрессоре хладагент подается в конденсатор 4, где превращается в жидкое состояние.

Змеевик омывается водой, циркулирующей через обогреваемый объект (к примеру, в системе отопления помещения).

При этом к воде подводится кроме теплоты  $q_2$ , по своей сути даровой, также теплота, эквивалентная затраченной работе компрессора  $l_{ц}$ .

4) Затем конденсат через дроссельный клапан 5 поступает в испаритель 6.

5) Из змеевика конденсатора 4 с помощью насоса 2 нагретая вода поступает к радиатору отопления 3.

Эффективность теплового насоса оценивают *коэффициентом преобразования*, представляющим собой отношение количества теплоты  $q_1$ , сообщенной нагреваемому объекту к затраченной работе  $l_{ц}$ :

$$\psi = \frac{q_1}{l_{ц}} = \frac{(q_2 + l_{ц})}{l_{ц}} = \varepsilon_x + 1 \quad (4)$$

где  $\varepsilon_x$  — холодильный коэффициент.

Отсюда следует, что коэффициент преобразования  $\psi$  больше единицы. Его значение колеблется в пределах 3... 7, а при использовании высокотемпературных источников (к примеру, выпускных газов тепловых двигателей) еще выше.

#### 5. ТИПЫ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН

Холодильной машиной называют комплект оборудования, необходимый для осуществления холодильного цикла.

В зависимости от вида физического процесса, в результате которого получают холод, холодильные машины подразделяют на следующие типы: использующие процесс расширения

воздуха (газовые, вихревые); использующие фазовый переход рабочего тела из жидкого в газообразное состояние (компрессионные паровые, абсорбционные, сорбционные, парозежекторные).

В зависимости от вида потребляемой энергии различают холодильные машины на механической энергии (компрессионные паровые, газовые), теплоиспользующие (парозежекторные, абсорбционные и сорбционные).

К холодильным машинам можно также отнести воздушные детандерные, использующие процесс расширения воздуха с производством внешней работы, и безмашинные термоэлектрические, потребляющие непосредственно электроэнергию на основе эффекта Пельтье.

### Газовые и вихревые холодильные машины.

В газовых холодильных машинах холодильными агентами являются газообразные вещества, агрегатное состояние которых не изменяется при совершении цикла, в основном воздух; поэтому их называют воздушными холодильными машинами.

Первые воздушные холодильные машины появились 100 лет назад. Однако тогда они не получили широкого распространения и были вытеснены с рынка парокомпрессионными, так как удельная массовая холодопроизводительность воздуха значительно меньше, чем кипящего холодильного агента в цикле паровой холодильной машины. При использовании воздушных холодильных машин требуется большая массовая подача холодильного агента, поэтому только по мере развития газотурбинной и особенно турбореактивной техники удалось создать воздушные турбохолодильные машины, близкие по экономичности в области относительно низких температур (от  $-80$  до  $-120^{\circ}\text{C}$ ) к парокомпрессионным.

Цикл воздушной холодильной машины имеет большие необратимые потери, поэтому термодинамически он целесообразен, если машина осуществляет комбинированный цикл, охлаждающая и нагревающая одновременно.

В воздушных холодильных машинах типа ТХМ, разработанных в нашей стране, охлаждение происходит благодаря расширению воздуха в расширительной машине — детандере с производством внешней полезной работы. Такие машины имеют холодопроизводительность 30 — 60 кВт и более и используются для быстрого замораживания эндокринного сырья (желез внутренней секреции, направляемых на медицинские цели), некоторых видов продуктов растительного происхождения (плодов, овощей, ягод), кулинарных изделий.

Машины вихревого типа представляют собой цилиндрическую трубу, разделенную диафрагмой на холодную и горячую части.

С термодинамической точки зрения процессы, протекающие в вихревой трубе, сводятся к тому, что слои воздуха, вращающиеся вблизи оси, отдают кинетическую энергию остальной (периферийной) массе воздуха и при этом охлаждаются. Другая же часть воздуха воспринимает эту энергию и нагревается в результате трения, на преодоление которого затрачивается значительная часть кинетической энергии.

Термодинамическое совершенство воздушных холодильных машин вихревого типа не превышает нескольких процентов и зависит от использования теплоты потока воздуха, выходящего из горячей части вихревой трубы. Если эта теплота утилизируется, то общая эффективность повышается. Вихревые трубы просты в изготовлении и эксплуатации, компактны и высоконадежны. Однако область их использования ограничена вследствие низкой экономичности термодинамических процессов.

### Компрессионные паровые холодильные машины

подавляющее большинство действующих холодильных машин — парокомпрессионные, которые в зависимости от типа используемого компрессора подразделяют на поршневые, центробежные, винтовые и ротационные. Для обеспечения требуемых температур кипения и конденсации рабочего тела используют одноступенчатые, многоступенчатые и каскадные компрессионные паровые холодильные машины.

Функциональные схемы паровой одноступенчатой холодильной машины с детандером и дросселем и их циклы, а также принципиальная схема многоступенчатых парокompрессионных машин и их цикл были рассмотрены выше. Также было дано описание Циклов в парокompрессионных холодильных машинах.

Для реализации цикла в комплект компрессионной паровой холодильной машины входят компрессор, конденсатор, испаритель, теплообменник, приборы автоматики, пускозащитная электроаппаратура, монтажные трубопроводы и другие элементы.

Наиболее широко распространены компрессионные паровые холодильные машины с поршневыми компрессорами, обладающие наиболее высокими по сравнению с машинами других типов энергетическими коэффициентами, способностью работать при более высоком отношении давлений конденсации и кипения. Однако они менее надежны, чем машины с центробежными и винтовыми компрессорами. Это машины средней холодопроизводительности. Их используют в рассольных системах охлаждения, но можно применять и в системе непосредственного охлаждения, как и машины малой холодопроизводительности.

Холодильные машины с центробежными компрессорами имеют низкую энергетическую эффективность при небольшой холодопроизводительности (менее 700 кВт), поэтому используются при повышенной холодопроизводительности.

Холодильные машины с винтовыми маслозаполненными компрессорами высоконадежны, имеют удовлетворительные энергетические показатели при производительности, превосходящей верхний предел эффективности холодильных машин с поршневыми компрессорами. Несмотря на основной недостаток — наличие металлоемкой масляной системы, холодильные машины с винтовыми компрессорами получили большое распространение.

Холодильные машины с ротационными пластинчатыми компрессорами отличаются простотой устройства, изготовления и эксплуатации, большей уравновешенностью, чем поршневые, так как в них нет деталей, совершающих возвратнопоступательное движение, нечувствительностью компрессора к гидравлическим ударам. Однако они имеют недостатки: значительные потери на трение, повышенный шум.

При холодопроизводительности от нескольких сот ватт до нескольких киловатт сравнимы с показателями холодильных машин с поршневыми компрессорами.

### Абсорбционные и сорбционные холодильные машины

Абсорбционные и сорбционные холодильные машины отличаются от компрессионных тем, что в них отвод теплоты от охлаждаемого объекта к окружающей среде осуществляется путем затраты внешней энергии в виде теплоты, а не работы.

В абсорбционных холодильных машинах циркулирует рабочее тело, представляющее собой бинарный раствор веществ, имеющих различные нормальные температуры кипения. Низкокипящее вещество выполняет роль холодильного агента, а высококипящее — абсорбента (поглотителя).

Бинарные растворы, используемые наиболее широко, — это аммиак — вода и вода — бромид лития. Причем аммиак в первом растворе и вода во втором являются холодильными агентами. Водоаммиачные машины используют для получения относительно низких температур (до  $-70^{\circ}\text{C}$ ), а бромистолитиевые — для более высоких. Теплоиспользующие абсорбционные холодильные машины перспективны с точки зрения экономии топливно-энергетических ресурсов, поскольку позволяют использовать вторичные ресурсы (отходящие газы, отработанный пар, горячую воду), теплоту ТЭЦ в неотапительный период. С точки зрения экологии также есть положительные моменты: эти машины позволяют избежать применения в качестве хладагентов хлорфторуглеродов, отрицательно воздействующих на озоновый слой атмосферы, а также выбросов машинного масла в окружающую среду.

Однако абсорбционные холодильные машины работают при температуре греющего источника  $70 — 180^{\circ}\text{C}$  (чаще  $155 — 180^{\circ}\text{C}$ ), поэтому диапазон температур до  $70^{\circ}\text{C}$  не реализуется и соответственно теплота часто просто сбрасывается в атмосферу. В этом диапазоне могут работать сорбционные холодильные машины, к которым подводится теплота низкого уровня температур, а запасы тепловой энергии в указанном температурном диапазоне огромны.

В сорбционных холодильных машинах используют рабочие смеси, обладающие эффектом не только сорбции, но и полной взаимной растворимости компонентов.

Сорбционные холодильные машины (СХМ) не имеют конкурентов в выработке холода от теплоты низкого потенциала, начиная с температуры, превышающей всего на 10 — 15 °С температуру среды, охлаждающей конденсатор. Рабочими веществами таких машин могут быть ацетон (50 %) и пропанбутановая смесь техническая зимняя (50 %), а также водные растворы роданида аммония и др. С помощью СХМ возможно получение холода на уровне -30 °С при тепловом коэффициенте от 5 до 10 % и выше.

Область применения СХМ — бытовые холодильники и кондиционеры, автомобильный транспорт, выбрасывающий в окружающую среду большое количество теплоты на уровне температур выше 70 °С.

В бытовых холодильниках и кондиционерах может быть использована энергия солнечного излучения, полученная с помощью солнечных коллекторов. СХМ, установленные на холодильниках агропромышленного комплекса и торговли, позволяют дополнительно вырабатывать холод за счет использования теплоты перегрева паров хладагента и теплоты охлаждающего масла винтовых компрессоров. Холодопроизводительность СХМ составляет порядка 1 кВт.

### Пароэжекторные холодильные машины

Пароэжекторные холодильные машины относятся к группе теплоиспользующих. В них осуществляются одновременно два цикла: прямой (силовой), в котором теплота превращается в механическую работу, и обратный (холодильный), в котором эта механическая работа используется для получения холода. В качестве рабочих тел в пароэжекторных холодильных машинах могут быть использованы вода, аммиак и хладоны. Однако практически применяют чаще всего пароводяные эжекторные холодильные машины, в которых рабочим телом и одновременно хладоносителем служит вода.

Пароводяные эжекторные холодильные машины работают при температуре кипения выше 0 °С. В них охлаждают воду для установок кондиционирования воздуха и производственно-технологических нужд. Холодильный цикл протекает при давлении ниже атмосферного, температура кипения рабочей воды обычно 2 — 15 °С, что соответствует остаточному давлению в испарителе 700 — 1700 Па. Показатель  $\mu$  современных пароэжекторных холодильных машин в зависимости от условий работы и конструкции составляет 0,14 — 0,18.

Машины обычно выполняют в виде агрегатов, включающих теплообменные аппараты, эжекторы и внутримашинный трубопровод с запорной, регулирующей и защитной арматурами. Агрегатированные пароэжекторные холодильные машины имеют холодопроизводительность от 200 до 2000 кВт.