

План лекции:

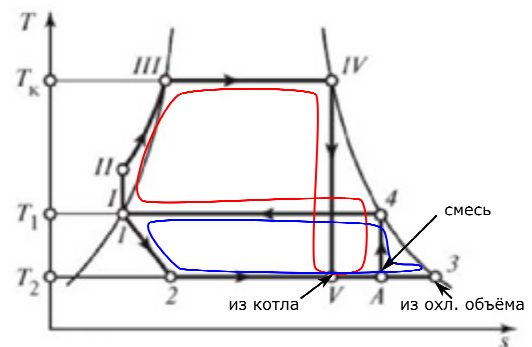
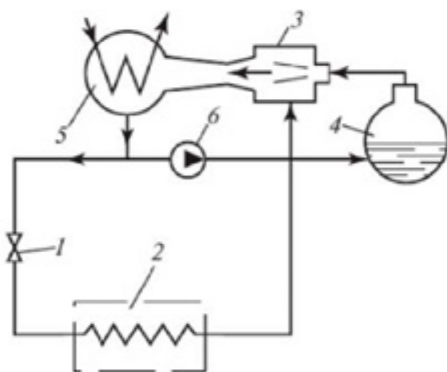
1. Цикл парожеткаторной холодильной установки
2. Цикл абсорбционной холодильной установки
3. Принцип работы теплового насоса
4. Вопросы для дистанционного освоения лекции

1. ЦИКЛ ПАРОЖЕТКАТОРНОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Цикл парожеткаторной холодильной установки, так же как и цикл пароконпрессиионной установки, осуществляется с хладагентом в виде влажного пара. Основное отличие состоит в том, что если в цикле пароконпрессиионной установки сжатие пара производится с помощью конпрессора, то **в парожеткаторной установке для этой цели используется паровой эжетктор**.

Напомним, что **принцип действия эжетктора** основан на передаче энергии одной среды, движущейся с высокой скоростью (рабочая среда), другой (подсасываемая среда). Сжатие и перемещение подсасываемой среды достигаются посредством передачи ей части кинетической энергии рабочей среды в процессе их смешения. Принципиальное различие процессов в эжеткторе и в конпрессоре состоит в том, что сжатие газа или пара в эжеткторе осуществляется не внешним источником механической работы, а рабочей средой, которая смешивается с подсасываемой средой.

Чем вызвано применение парового эжетктора вместо конпрессора? Для получения в холодильных установках не слишком низких температур (примерно от 3 до 10 °С) в качестве хладагента может быть использован водяной пар. Однако при температурах вблизи 0 °С удельный объем пара весьма велик (например, при $T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $v'' = 147,2\text{ м}^3/\text{кг}$). Поршневой конпрессор, сжимающий пар столь малой плотности, представлял бы собой весьма громоздкую машину. Именно поэтому **в цикле холодильной установки, работающей на водяном паре, применяется значительно более компактный, хотя и гораздо менее совершенный, аппарат - паровой эжетктор**, в котором используется дешевый пар низких параметров.



Парожеткаторная установка представляет собой один из самых старых типов холодильных установок.

Водяной пар, образовавшийся при расширении насыщенной воды в редукционном вентиле 1 от давления p_1 , до давления p_2 , поступает в испаритель 2, размещенный в охлаждаемом объеме. Температура в испарителе парожеткаторной холодильной установки может быть ниже температуры тройной точки воды (0,01 °С), если в качестве хладагента

использовать водный раствор соли. Из испарителя пар высокой степени сухости при давлении p_2 , направляется в камеру смешения парового эжектора 3. В сопло эжектора подается пар из котла 4 с давлением p_k . Расходы пара, подаваемого в камеру смешения эжектора из испарителя и в сопло эжектора из котла, подбираются таким образом, чтобы давление пара на выходе из диффузора эжектора равнялось p_1 . Из эжектора сухой насыщенный пар направляется в конденсатор 5, где он конденсируется, отдавая теплоту охлаждающей воде. Поток конденсата при давлении p_1 , выходящий из конденсатора, раздваивается большая часть воды направляется в холодильный контур, на вход редукционного вентиля 1, а меньшая часть – к насосу 6, в котором давление воды повышается p_k . Насос 6 подает воду в котел. Парообразование происходит за счет теплоты, подводимой в котле.

Существенным отличием парозежекторной установки от парокompрессионной является то, что для привода компрессора необходима механическая энергия (от электрического или другого двигателя), а для сжатия пара с помощью эжектора – кинетическая энергия пара, образовавшегося в котле.

На T,s диаграмме, как и в случае цикла парокompрессионной установки, линия 1-2 изображает процесс адиабатного дросселирования насыщенной воды в редукционном вентиле, а линия 2-3 - изобарно-изотермический процесс в испарителе (положим для определенности, что из испарителя выходит сухой насыщенный пар),

На этой же диаграмме изображен цикл, совершаемый той частью пара, которая циркулирует в контуре **котел - эжектор - конденсатор - котел**. Не следует забывать об условном характере изображения этого цикла - расходы пара в каждом из двух контуров установки различны.

На T,s – диаграмме оба цикла изображены в расчете на 1 кг пара. Здесь I-II – процесс повышения давления воды в насосе; II-III-IV – процесс подвода теплоты в котле по изобаре $p_k = \text{const}$ (II-III – нагрев до кипения, III-IV – парообразование), а IV-V – процесс расширения пара в сопле эжектора. Пар расширяется в сопле до давления p_2 (точка V) и смешивается затем с паром того же давления, поступившим в эжектор из испарителя (точка 3). В результате смешения влажного пара в состоянии V с сухим насыщенным паром в состоянии 3 получается пар промежуточной (между V и 3) степени сухости – точка A.

Линия A-4 соответствует повышению давления обоих потоков пара в диффузоре эжектора от p_2 до p_1 , а линия 4-1 – процессу конденсации этого количества пара в конденсаторе установки.

Поскольку в цикле установки работа для сжатия пара извне не подводится, а вместо нее подводится теплота в котле, эффективность цикла такой установки характеризуется коэффициентом теплоиспользования ξ , определяемым в виде:

$$\xi = \frac{q_2}{q_k} = \frac{h_3 - h_2}{(h_{IV} - h_I)g}, \quad (1)$$

где g – отношение количества пара с давлением p_k , подаваемого в сопло эжектора из котла, к количеству пара, поступающего в камеру смешения эжектора из испарителя.

Коэффициент теплоиспользования нельзя непосредственно сравнивать с холодильным коэффициентом ε , поскольку в выражении для ε фигурирует затраченная в цикле работа $l_{ц}$, а в выражении для ξ - затраченная в цикле теплота q_k .

Температура T_2 , в цикле установки этого типа, как уже отмечено выше, лежит в пределах от 3 до 10 °С (давление насыщенных паров воды при этих температурах составляет соответственно от 0,7 до 1,2 кПа). Верхняя температура цикла T_1 , обычно поддерживается в пределах от 30 до 40 °С (давление насыщенных паров соответственно от 4,2 до 7,4 кПа). Давление p_k сухого насыщенного пара, подаваемого в сопло эжектора из котла, обычно выбирается в пределах от 0,3 до 1 МПа (температура в котле T_k достигает 180 °С).

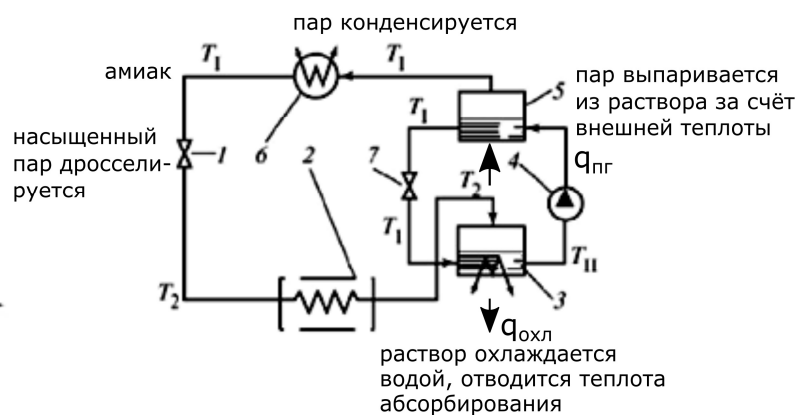
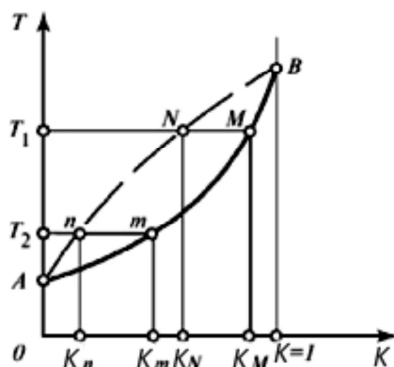
С точки зрения термодинамики цикл парозежекторной холодильной установки весьма несовершенен по сравнению с циклом парокомпрессионной установки, поскольку процесс смешения в эжекторе сопровождается значительными потерями работоспособности вследствие принципиально необратимого характера этого процесса. Тем не менее, благодаря своей простоте (компактность, отсутствие движущихся частей и возможности использования дешевого пара низких параметров) парозежекторные холодильные установки находят применение. Парозежекторные установки могут работать не только с водяным паром; в качестве хладагента в них могут быть использованы, например, фреоны.

2. ЦИКЛ АБСОРБИЦИОННОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Еще одной разновидностью холодильных циклов, в которых используется хладагент в виде влажного пара, является **цикл абсорбционной холодильной установки**. От уже рассмотренных циклов паровых холодильных установок: парокомпрессионной и парозежекторной – он отличается **способом сжатия пара, выходящего из испарителя**.

В рассматриваемой установке **используется явление абсорбции пара жидким раствором**. **Абсорбцией называют поглощение вещества всем объемом поглощающего тела**.

Как известно, пар чистого вещества может быть поглощен (сконденсирован) этим же веществом в жидком состоянии лишь в том случае, если жидкость имеет температуру меньшую, чем температура пара. В отличие от чистых веществ растворы обладают замечательной способностью **абсорбировать (поглощать) пар раствора одного состава жидким раствором другого состава даже в том случае, когда температура жидкости выше температуры пара**. Именно это свойство раствора и используется в абсорбционных холодильных установках.



Температура кипения бинарного раствора при постоянном давлении зависит от состава раствора. При этом **температура кипения будет тем выше, чем больше в растворе доля компонента с более высокой температурой кипения**.

Зависимость температуры кипения бинарного раствора при постоянном давлении от состава раствора изображается кривой кипения на $T-K$ – диаграмме, где K – массовая доля высококипящего компонента. На рисунке кривая кипения – сплошная линия. Характерной особенностью растворов является то, что пар, получающийся при кипении раствора, имеет иной состав, чем находящийся с ним в равновесии жидкий раствор; пар богат низкокипящим компонентом. Кривая пара – линия составов пара, находящегося в равновесии с жидкостью, изображена на $T-K$ – диаграмме штриховой линией.

При температуре T_1 в равновесии с жидким раствором состава K_M находится пар раствора состава K_N , а при температуре T_2 жидкому раствору состава K_m соответствует пар состава K_n .

Если теперь пар состава K_n , имеющий температуру T_2 , привести в соприкосновение с жидким раствором состава K_M при температуре T_1 , по отношению к которому пар состава K_n является переохлажденным, то очевидно, что пар будет конденсироваться (абсорбироваться жидким раствором). Давление жидкости и пара в этом процессе одно и то же. Теплота парообразования, выделяющаяся в процессе абсорбции при температуре T_1 , отводится из раствора. Получается раствор состава $K_m < K < K_N$.

В качестве одного из возможных хладагентов в такой установке используется влажный пар аммиака. Жидкий насыщенный аммиак, дросселируясь в редукционном вентиле 1 от давления p_1 до давления p_2 , охлаждается от температуры T_1 до температуры T_2 . Затем влажный пар аммиака поступает в испаритель 2, где степень сухости пара увеличивается до $x=1$ за счет притока теплоты q_2 от охлаждаемого объема. Сухой насыщенный пар аммиака при температуре T_2 поступает в абсорбер 3, куда подается также раствор аммиака в воде, имеющий температуру T_1 . Поскольку при одном и том же давлении вода кипит при значительно более высокой температуре, чем аммиак, легкокипящим компонентом в этом растворе является аммиак. Этот раствор абсорбирует пар аммиака; теплота абсорбции q_{abc} , выделяющаяся при этом, отводится охлаждающей водой 1. Концентрация аммиака в растворе в процессе абсорбции увеличивается, и, следовательно, из абсорбера выходит обогащенный раствор (при температуре $T_2 < T_{II} < T_1$ и давлении p_2). С помощью насоса 4, повышающего давление этого обогащенного раствора от p_2 до p_1 раствор подается в генератор аммиачного пара 5, где за счет теплоты q_{III} , подводимой к раствору от внешнего источника, происходит испарение раствора. Выделяющийся при этом пар значительно более богат аммиаком, чем раствор, из которого он получается. Практически из раствора выделяется почти чистый аммиачный пар, так как парциальное давление водяного пара в газовой фазе при этих температурах ничтожно мало. Этот аммиачный пар при температуре T_1 и давлении p_1 поступает затем в конденсатор 6, где он конденсируется, и жидкий аммиак в состоянии насыщения направляется в редукционный вентиль 1. Что же касается выходящего из парогенератора 5 раствора, содержание аммиака в котором значительно снизилось в результате выпаривания, то этот бедный аммиаком раствор дросселируется в редукционном вентиле 7 от давления p_1 до давления p_2 , и затем поступает в абсорбер 3, где, как мы уже отмечали, он обогащается аммиаком за счет абсорбируемого аммиачного пара. Следует заметить, что при дросселировании в вентиле 7 температура бедного раствора практически не изменяется, следовательно $T_I = T_1$.

Из приведенной схемы установки видно, что абсорбционный узел этой установки, состоящий из абсорбера 3, генератора аммиачного пара 5, насоса 4 и

редукционного вентиля 7, служит в конечном итоге для сжатия аммиачного пара от давления p_2 на выходе из испарителя до давления p_1 на входе в конденсатор.

Преимущество этого способа сжатия аммиачного пара заключается в том, что если в обычной парокompрессионной установке на сжатие пара затрачивается значительная работа, то в случае абсорбционной установки насос повышает давление жидкости (водоаммиачный раствор). При этом затрата работы на привод насоса пренебрежимо мала по сравнению с затратой работы в компрессоре, да и сам насос компактен и конструктивно прост.

Конечно, выигрыш в работе, затрачиваемой на привод компрессора, компенсируется затратой теплоты в генераторе аммиачного пара 5; эта теплота отводится затем охлаждающей водой в абсорбере 3, так что $q_{\text{абс}} = q_{\text{пг}}$ (если пренебречь работой насоса).

Коэффициент теплоиспользования абсорбционной холодильной установки определяется соотношением

$$\xi = \frac{q_2}{q_{\text{пг}}} \quad (2)$$

здесь q_2 - теплота, отводимая из охлаждаемого объема, а $q_{\text{пг}}$ - теплота, подводимая в генераторе аммиачного пара.

Ранее абсорбционные холодильные установки были довольно широко распространены, однако с развитием компрессоростроения они были вытеснены компрессионными холодильными установками. Однако абсорбционное охлаждение и сейчас иногда применяется в холодильной технике (в том числе в некоторых типах бытовых холодильников). **Абсорбционные холодильные установки целесообразно применять в том случае, когда для выпаривания аммиака из раствора в генераторе аммиачного пара может быть использован отработавший пар или другие теплоносители низкого температурного потенциала.**

В современных абсорбционных холодильных установках для увеличения коэффициента теплоиспользования применяются растворы бромистого лития.

3. ПРИНЦИП РАБОТЫ ТЕПЛООВОГО НАСОСА

В процессе работы всякой холодильной установки теплота отбирается из охлаждаемого объема и сообщается среде с более высокой температурой. Следовательно, результатом осуществления холодильного цикла является не только охлаждение теплоотдатчика, но и нагрев теплоприемника.

Это позволило Кельвину в **1852 году** выдвинуть предложение об использовании холодильного цикла для отопления помещений, т.е. о создании так называемого **теплового насоса**.

Тепловым насосом называют холодильную установку, используемую обычно для подвода теплоты к нагреваемому объему. Такого рода установку называют тепловым насосом потому, что она как бы «перекачивает» теплоту из холодного источника в горячий; в горячий источник поступает теплота равная сумме теплоты q_2 , отобранной от холодильного источника, и работы $l_{\text{ц}}$, подводимой извне для осуществления этого холодильного цикла.

По существу тепловым насосом является всякая холодильная установка, однако этот термин обычно применяется для обозначения тех установок, главной задачей которых является нагрев теплоприемника.

Эффективность теплового насоса оценивается так называемым отопительным коэффициентом, представляющим собой отношение количества теплоты q_1 , сообщенной нагреваемому объему, к работе $I_{ц}$, подведенной в цикле:

$$\varepsilon_{отоп} = \frac{q_1}{I_{ц}} \quad (3)$$

Нетрудно установить связь отопительного коэффициента с холодильным коэффициентом той же установки: $\varepsilon_{отоп} = \varepsilon + 1$.

Из этого соотношения следует, что чем выше холодильный коэффициент, тем выше и отопительный коэффициент цикла.

На осуществление любого холодильного цикла (в том числе, разумеется, и цикла установки, используемой в качестве теплового насоса) расходуется подводимая от внешнего источника работа. Эта работа затрачивается на привод компрессора или другого аппарата, осуществляющего сжатие хладагента. Разумеется, вся эта работа может быть полностью превращена в теплоту (например, в электронагревателе), которую можно будет использовать для нагрева помещения. Преимущество теплового насоса перед любыми другими отопительными устройствами состоит в том, что при затрате одного и того же количества энергии $I_{ц}$ с помощью теплового насоса к нагреваемому помещению подводится всегда большее количество теплоты $I_{ц} + q_2$ чем то, которое подводится при любом другом способе отопления (так, при использовании электронагрева количество теплоты, подведенной к нагреваемому объему, равно $I_{ц}$). Это не должно вызывать удивления: если электронагреватель лишь превращает работу в теплоту, то тепловой насос с помощью того же количества работы превращает теплоту низкого температурного потенциала в теплоту более высокого температурного потенциала («перекачивает» тепло).

Поскольку в тепловом насосе всегда $q_1 > I_{ц}$, следовательно, всегда $\varepsilon_{отоп} > 1$.

Обычно отопительный коэффициент обратимых циклов тепловых насосов значительно больше единицы. Так, если в тепловом насосе осуществляется обратный цикл Карно, то в том случае, если температура охлаждаемого пространства $T_2 = 0$ °С, а температура нагреваемого помещения $T_1 = 25$ °С, отопительный коэффициент такого насоса:

$$\varepsilon_{отоп} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} + 1 = \frac{T_1}{T_1 - T_2} = 11,9, \quad (4)$$

т.е. в этом случае в отапливаемое помещение подается теплота, количество которой в 11,9 раза превышает работу, затраченную в цикле.

Отопительные коэффициенты тепловых насосов, в которых используются циклы холодильных установок, менее совершенные, чем цикл Карно, имеют меньшее значение.

Уменьшение $\varepsilon_{отоп}$ в реальных установках вызывается также неизбежными потерями вследствие необратимости процессов в различных элементах установки. Отопительный коэффициент реальных тепловых насосов может составлять 3, 4 и более.

Впервые парокомпрессионная аммиачная теплонасосная установка была использована для отопления помещения в 1930 году. С тех пор было сооружено большое число тепловых насосов. Особенно быстро количество тепловых насосов растет в последние десятилетия; сфера их применения непрерывно расширяется.

В тепловых насосах используются циклы воздушных, парокомпрессионных и термоэлектрических холодильных установок.

Следует заметить, что холодильные установки могут использоваться и для совместного получения теплоты и холода. Например, еще в 1943 году, была сооружена аммиачная холодильная установка, предназначенная для катка с искусственным льдом; при этом вода, охлаждавшая конденсатор этой установки и за счет этого заметно нагревавшаяся, поступала в сеть городского теплоснабжения.

4. ВОПРОСЫ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ОСВОЕНИЯ ЛЕКЦИИ

1. В чём преимущество эжектора по сравнению с традиционными компрессорами, применяемыми в холодильных установках?
Ответ:
2. Что такое коэффициент теплоиспользования? Запишите формулу, определяющую коэффициент теплоиспользования пароэжекторной холодильной установки.
Ответ:
3. Каким образом повышается давление аммиачного пара в абсорбционной холодильной установке.
Ответ:
4. В чём преимущество абсорбционных холодильных установок по сравнению с другими видами холодильных установок?
Ответ:
5. Оцените отопительный коэффициент теплового насоса, работающего по циклу Карно в диапазоне температур $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в охлаждаемом объёме), $+32\text{ }^{\circ}\text{C}$ в окружающей среде.
Ответ:
Фамилия Имя Отчество:
Группа:
Подпись:
Дата: