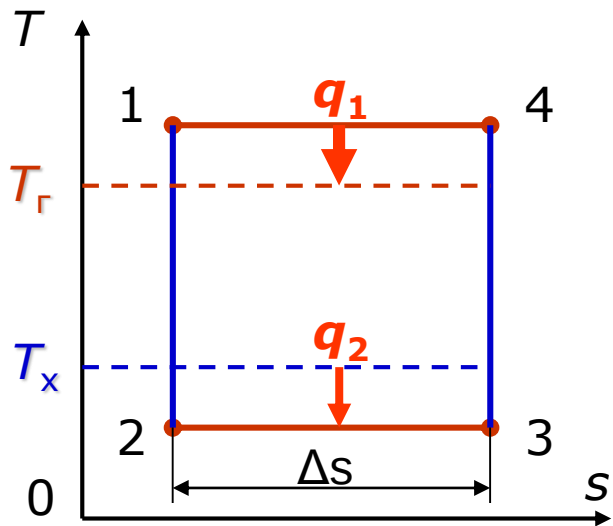


Термодинамика

**Циклы холодильных установок и
тепловых насосов
(обратные термодинамические
циклы)**

Обратный цикл Карно



Холодильная установка предназначена для передачи теплоты q_2 от холодного источника T_x к горячему T_g .

По II закону термодинамики это возможно только при затрате внешней работы l .

Идеальным циклом холодильных машин является **обратный цикл Карно**: 1-2 – адиабатное расширение рабочего тела; 2-3 – изотермический подвод теплоты от холодного источника к рабочему телу; 3-4 – адиабатное сжатие рабочего тела; 4-1 – изотермический отвод теплоты к горячему источнику.

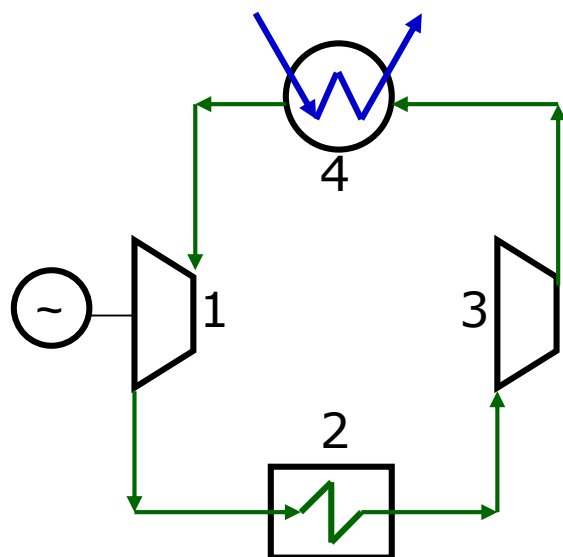
Холодильный коэффициент

Запишем для цикла выражение I закона термодинамики $q = q_1 - q_2 = l$, так как изменение внутренней энергии для цикла $\Delta u = u_1 - u_1 = 0$.

Основной характеристикой обратного цикла является его **холодильный коэффициент** – доля теплоты, переданной от холодного источника к горячему, на единицу затраченной работы:

$$\varepsilon = \frac{q_2}{l} = \frac{q_2}{q_1 - q_2} = \frac{T_2 \Delta s}{T_1 \Delta s - T_2 \Delta s} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} = \frac{1}{\frac{T_1}{T_2} - 1} . \quad (1)$$

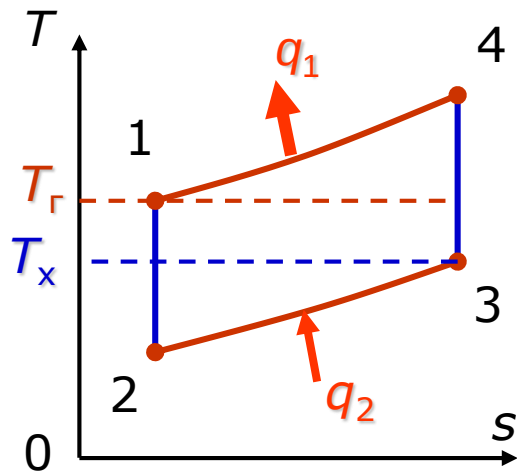
Воздушная холодильная установка



Воздушная холодильная установка была одной из первых использованных на практике холодильных машин:

- 1 – детандер;
- 2 – холодильная камера;
- 3 – компрессор;
- 4 – охладитель.

Цикл воздушной холодильной установки



1-2 адиабатное расширение воздуха в турбодетандере;
2-3 – изобарный подвод теплоты q_2 от холодного источника T_x к воздуху;
3-4 – адиабатное сжатие воздуха в турбокомпрессоре;
4-1 – изобарный отвод теплоты q_1 от воздуха к горячему источнику T_g .

Цикл воздушной холодильной установки можно рассматривать как обратный цикл ГТУ с изобарным подводом теплоты.

Холодильный коэффициент

Холодильный коэффициент по формуле (1):

$$\varepsilon = \frac{q_2}{q_1 - q_2} = \frac{c_p(T_3 - T_2)}{c_p(T_4 - T_1) - c_p(T_3 - T_2)} \quad (2)$$

После сокращения на c_p выражение (2) можно представить в виде:

$$\varepsilon = \frac{1}{\frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} - 1} = \frac{1}{\frac{(T_4 / T_1) - 1}{(T_3 / T_2) - 1} \frac{T_1}{T_2} - 1} \quad (3)$$

Окончательное выражение холодильного коэффициента

Для адиабатных процессов 1-2 и 3-4:

$$T_1/T_2 = (p_1/p_2)^{(k-1)/k};$$

$$T_4/T_3 = (p_4/p_3)^{(k-1)/k} = (p_1/p_2)^{(k-1)/k} = T_1/T_2;$$

То есть $T_4/T_1 = T_3/T_2$, тогда из выражения (3) окончательно:

$$\varepsilon = \frac{1}{\frac{T_1}{T_2} - 1} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} = \frac{1}{(p_1 / p_2)^{(k-1)/k} - 1} .$$

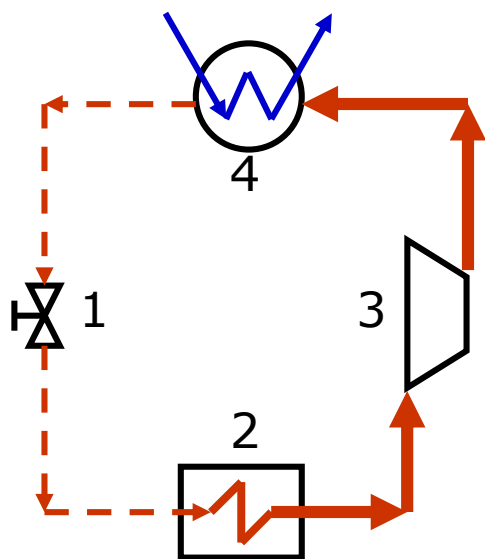
Эффективность воздушной холодильной установки

Если бы можно было отводить теплоту из холодильной камеры обратимо при $T_3 = T_x$ и отдавать теплоту в охладителе обратимо при $T_1 = T_r$, то это соответствовало бы обратному циклу Карно.

Холодильный коэффициент – это фактически удельная холодопроизводительность.

Для воздушной холодильной установки $\varepsilon \sim 1$, то есть на перенос единицы теплоты от холодного источника к горячему затрачивается единица работы, что малоэффективно.

Парокомпрессорная холодильная установка

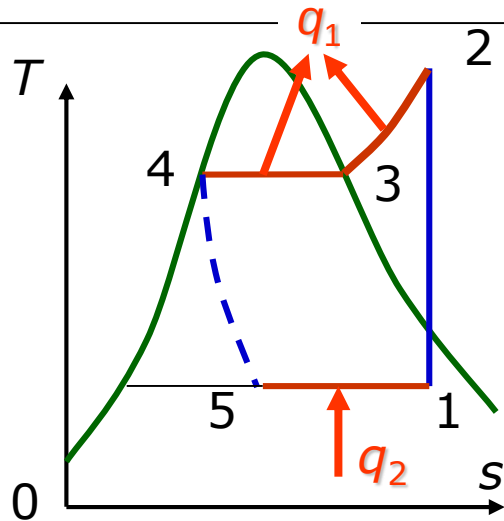


- 1 – дроссель;
- 2 – холодильная камера;
- 3 – компрессор;
- 4 – конденсатор.

Холодильными агентами в таких установках являются низкокипящие жидкости ($t_n < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ при $p=1$ бар).

К ним относятся фреоны, аммиак, сернистый ангидрид и др.

Цикл парокомпрессорной холодильной установки



1-2 – адиабатное сжатие пара в компрессоре;
2-3 – изобарное охлаждение пара до температуры конденсации;
3-4 – изобарно-изотермическая конденсация пара в конденсаторе;
4-5 – дросселирование;

5-1 – изобарно-изотермическое кипение жидкого холодильного агента в испарителе.

Цикл парокомпрессорной холодильной установки почти соответствует обратному циклу ПТУ.

Холодильный коэффициент

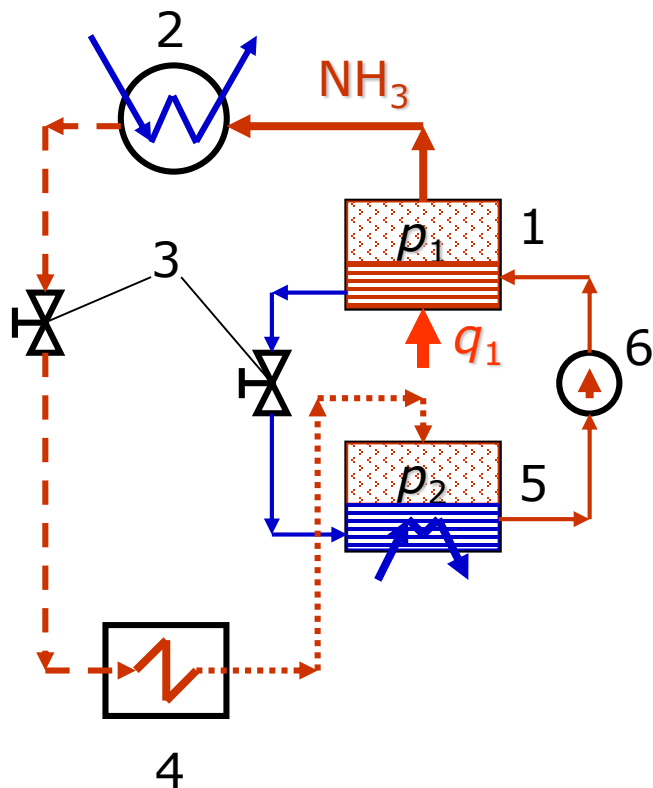
Холодильный коэффициент парокомпрессорной холодильной установки ($\varepsilon=3-4$):

$$\varepsilon = \frac{q_2}{q_1 - q_2} = \frac{h_1 - h_5}{(h_2 - h_4) - (h_1 - h_5)} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = \frac{q_2}{l}.$$

Требования к холодильному агенту:

- $t_{\text{н}} < 0$ °С при $p_{\text{н}} > p_{\text{атм}}$, чтобы исключить подсос воздуха в испаритель;
- значительная скрытая теплота парообразования при низких удельных объемах пара, чтобы снизить габариты компрессора;
- низкие давления сжатия, чтобы снизить массу компрессора.

Водо-аммиачная абсорбционная холодильная установка



- 1 – испаритель (концентрированный раствор NH_3 в воде);
- 2 – конденсатор;
- 3 – дроссель;
- 4 – холодильная камера;
- 5 – абсорбер (слабый раствор NH_3 в воде);
- 6 – насос.

Холодильный агент

Холодильным агентом в такой машине является аммиак NH_3 с температурой насыщения $t_n \sim -33^\circ\text{C}$ при $p_n = 1$ бар.

Абсорбент же – это слабый раствор аммиака в воде.

При изменении концентрации аммиака в воде в диапазоне $c = 100\text{--}0\%$ температура насыщения раствора $t_n = -33\text{--}100^\circ\text{C}$.

В абсорбционной холодильной установке затрачивается не внешняя работа, а теплота q_1 , поэтому холодильный коэффициент

$$\varepsilon = \frac{q_2}{q_1}.$$

Температурный потенциал воды, охлаждающей конденсатор

В обычной холодильной установке конденсация рабочего тела происходит при $t_h = 30-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, то есть температура охлаждающей воды на выходе $t''_в = 25-45\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Теплота такой воды низкопотенциальная и ее невозможно использовать для отопления.

Если же повысить температуру конденсации до $t_h = 80-90\text{ }^{\circ}\text{C}$, то температура $t''_в$ будет $75-85\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ее уже можно будет использовать в системе отопления.

Тепловой насос

Тепловой насос – это холодильная установка, перекачивающая теплоту на более высокий температурный уровень.

При этом испаритель помещается снаружи отапливаемого помещения в воздухе или в водоеме, а конденсатор является сам отопительным радиатором или нагретая в конденсаторе охлаждающая вода поступает в отопительное устройство.

Экономичность теплового насоса оценивается отопительным коэффициентом.

Отопительный коэффициент

Отопительный коэффициент – это удельная теплота, отданная горячему источнику, на единицу работы:

$$\varepsilon_{от} = \frac{q_1}{l} = \frac{q_2 + l}{l} = \varepsilon + 1 \quad .$$

То есть для парокомпрессорных установок $\varepsilon_{от}=4-5$.

Тепловой насос может использоваться и для совместного получения теплоты и холода, например, в 1943 году была сооружена аммиачная холодильная установка для катка с искусственным льдом, вода из конденсатора которой поступала в сеть городского теплоснабжения.

Криогенные жидкости

Холодильные агенты – это низкокипящие жидкости ($T_{\text{н}}=200\text{--}250\text{ К}$ при атмосферном давлении).

Температуры насыщения некоторых **криогенных жидкостей** при атмосферном давлении:

• кислород	O_2	$T_{\text{н}}=90,2\text{ К};$
• воздух		$T_{\text{н}}\sim 80\text{ К};$
• азот	N_2	$T_{\text{н}}=77,4\text{ К};$
• водород	H_2	$T_{\text{н}}=20,4\text{ К};$
• гелий	He	$T_{\text{н}}=4,2\text{ К}.$

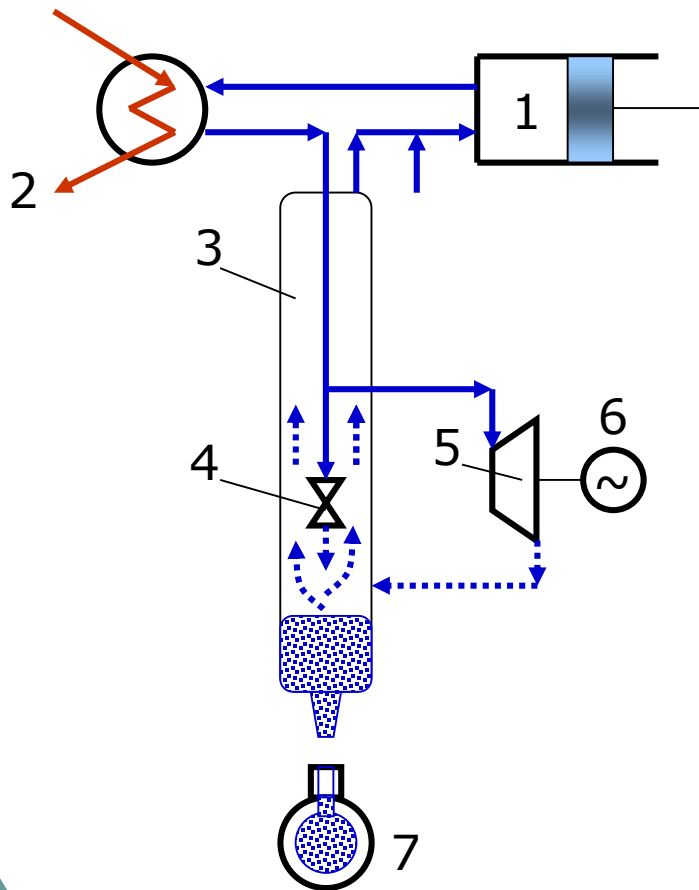
Применение криогенных жидкостей

Криогенные жидкости используются для поддержания низких температур в энергетике, медицине, пищевой промышленности, на транспорте и др.

Например, если залить жидкий азот в охлаждаемый объем, то пока весь азот не испарится, в объеме будет сохраняться постоянная температура, равная температуре насыщения азота при атмосферном давлении $T_n = 77,4 \text{ K}$.

Для длительного хранения сжиженных газов используются стеклянные или стальные сосуды Дьюара с двойными стенками, разделенными вакуумным промежутком.

Ожижение газов по методу Клода



- 1 – компрессор;
- 2 – жидкий азот (посторонний хладагент);
- 3 – теплообменник;
- 4 – редукционный клапан;
- 5 – турбодетандер;
- 6 – электрогенератор;
- 7 – сосуд Дьюара.

В настоящее время выпускаются установки с посторонним хладагентом или без него.