

Накопление холода как способ энергосбережения и оптимизации энергопотребления

Д-р техн. наук А.М. АРХАРОВ, акад. РАН А.И. ЛЕОНТЬЕВ, д-р техн. наук В.В. СЫЧЕВ, д-р техн. наук И.А. АРХАРОВ,
Е.Н. КРИЖАНОВСКАЯ, П.В. КУСТОВ

The problem of cold accumulation, important for many industries, is considered in terms of its interest for large consumers of cold in the field of moderate low and cryogenic temperatures. Cold generators for these conditions can be air refrigerating machines (VHM) or vapor-compression Freon (R22) refrigeration machines (PKM). The calculations of energy consumption for VHM and PKM are presented for the conditions of cold accumulation, and an entropy-statistical analysis of work loss distribution in the elements of machines for stationary operating conditions is given. The actual work values calculated by analysis differ from those, determined in the refrigerating cycles, by about 1 %. The cost of production of 1 kg of ice is considered in both cases for all-day operation of the plants and for night operation in the conditions of different electrical energy tariffs in Moscow. A threshold temperature has been determined, below which the use of VHM is appropriate for the accumulation of cold. It's 60 °C, however in the case of combined operation (PKM all day and BHM in night time) this threshold is increased to –30 °C.

Введение

Остро обозначенная проблема экономии электроэнергии и энергоресурсов побудила специалистов самых различных областей не только к поиску способов сокращения энергопотребления, но и к разработке систем накопления и трансформирования электроэнергии и теплоты, которые позволяют оптимизировать режимы их генерации и потребления. Последняя задача, по нашему убеждению, имеет непосредственное отношение и к низкопотенциальной теплоте — холоду. Она издавна решалась в простейших вариантах как за рубежом, так и в России, в странах с континентальным и жарким климатом, но еще далеко не осмыслена в соотношениях с уровнем современных возможностей. Основными причинами, побуждающими к исследованию данной проблемы сегодня, являются, с одной стороны, постоянно увеличивающаяся доля общей вырабатываемой электроэнергии, используемая для генерации холода (она уже превышает 20 %), и существенные различия стоимости электроэнергии в дневное и ночное время — с другой (1 кВт·ч в ночное время может быть дешевле в 1,5(2) — 4 раза!).

Проблема накопления холода напрямую связана с использованием естественных суточных и сезонных изменений температуры окружающей среды, потенциально позволяющих обеспечить уменьшение затрат энергии на генерацию холода, то есть сберечь энергию. Другими словами, при реализации систем “холодонакопления” мож-

но запастись необходимым количеством холода (нужного качества, т.е. температуры) ночью (или в холодный период), а утилизировать его днем (или в теплое время). В числе объектов, которые могли бы коммерчески выгодно использовать системы накопления холода, мы видим сегодня крупные холодильные склады, спортивные сооружения, крупные объекты кондиционирования воздуха, большегрузные суда, а также крупнотоннажных производителей и потребителей сжиженного природного газа (СПГ). Бытовая холодильная техника и климатотехника также могут рассматриваться как объекты использования таких аккумуляторов. Необходимый при этом контроль потребления электроэнергии в ночное и дневное время вполне реален: так называемые двухтарифные счетчики электроэнергии существуют и уже используются, наиболее широко во вновь строящихся домах. Помимо этого, особенно в условиях северных широт, возможно искусственное доохлаждение естественных аккумуляторов холода (льда, воды и др.) с дальнейшим их использованием по назначению, в том числе при генерировании более низкотемпературного холода, например в процессах ожижения природного газа.

Ясно, что проблема накопления холода является комплексной и немаловажное значение в ней имеют технические вопросы, относящиеся к возможным хладоносителям, температурам генерируемого и аккумулируемого холода, способам утилизации холода и, конечно, к холо-

дильным машинам (для крупных потребителей холода), генерирующим холод. В данной статье рассматриваются технические аспекты накопления большого количества холода (крупные потребители) в области умеренно низких и криогенных температур с помощью генераторов холода двух типов: воздушной холодильной машины (ВХМ) и парокомпрессионной холодильной машины (ПКМ) на R22, которая, несомненно, более эффективна при генерации холода на уровне температур ориентировочно не ниже 220...210 К. В то же время при температурах ниже определенного “порогового” значения практически целесообразным для накопления холода может оказаться применение ВХМ (например, в ночное время для целей ожижения природного газа). Поэтому представляет интерес оценка величины этой “пороговой” температуры при различных тарифах на электроэнергию и возможных значениях степени термодинамического совершенства холодильных машин и их основных узлов [1, 2, 3, 5].

Рабочими телами (хладоносителями) для накопления (аккумулирования) холода могут быть самые разнообразные вещества – рассолы, чистые жидкие и твердые вещества и их смеси. В расчетных примерах нами выбрана вода, как самое распространенное, доступное и экологически нейтральное вещество, проходящее в пусковых режимах стадии охлаждения и затвердевания. Начальная температура воды (для расчета пускового режима) принята $T_{нач} = 300 \text{ К}$ ($+27 \text{ }^\circ\text{C}$), а конечная температура охлажденного льда $T_{кон}$ варьировалась от 243 К ($-30 \text{ }^\circ\text{C}$) до 163 К ($-110 \text{ }^\circ\text{C}$). В установившихся режимах аккумуляирования и утилизации холода участвует только твердая фаза воды – лед. Принято, что в режиме утилизации охлажденный лед в процессе теплообмена с охлаждаемым объектом нагревается на $20 \text{ }^\circ\text{C}$, например от $T_{Хmin} = 243 \text{ К}$ ($-30 \text{ }^\circ\text{C}$) до $T_{Хmax} = 263 \text{ К}$ ($-10 \text{ }^\circ\text{C}$). В режиме накопления холода лед охлаждается соответственно от $T_{Хmax}$ до $T_{Хmin}$, т.е. в приведенном примере от 263 К ($-10 \text{ }^\circ\text{C}$) до 243 К ($-30 \text{ }^\circ\text{C}$).

Ниже приведены примеры расчетов ВХМ, работающей по обратному циклу Брайтона с рекуператором, и ПКМ на R22, используемых для охлаждения льда в стационарном режиме накопления холода. Следуя этим примерам, были осуществлены соответствующие расчеты для процессов генерирования и аккумуляирования холода при более низких температурах, например в системах ожижения природного газа, что весьма актуально.

Термодинамическая интерпретация задачи накопления генерируемого холода

На рис. 1 показана принципиальная общая схема системы для накопления генерируемого холода.

* Первоначально эта “пороговая” температура (около $-70 \text{ }^\circ\text{C}$ при едином тарифе на электроэнергию) была определена еще в 1955 г. профессором В.С. Мартыновским и доцентом Л.З. Мельцером [4].

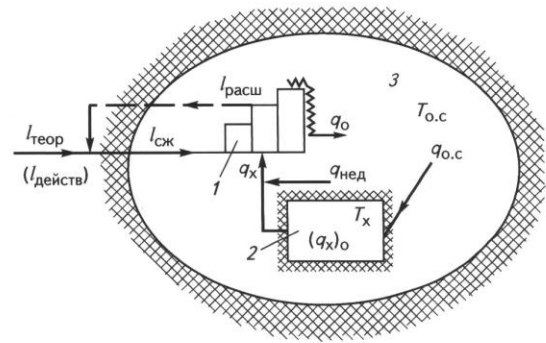


Рис. 1. Схема внешнеадиабатной системы: 1 – генератор холода – низкотемпературная установка (НТУ); 2 – аккумулятор холода при температуре T_x ; 3 – окружающая среда при температуре $T_{о.с}$

Исходя из двух фундаментальных принципов – сохранения энергии и возрастания энтропии в адиабатно изолированной системе тел, – запишем следующие уравнения.

Уравнение энергетического баланса генератора холода при стационарном состоянии НТУ:

$$l_{теор} + q_x = q_0, \quad (1)$$

где $l_{теор}$ – теоретически необходимая величина затрачиваемой работы (электроэнергии),

$$l_{теор} = l_{сж} - l_{расш}, \text{ причем для ПКМ } l_{расш} = 0;$$

$q_x = (q_x)_0 + q_{о.с} + q_{нед}$ – количество генерируемого холода при температуре T_x («полная» холодопроизводительность);

$(q_x)_0$ – количество аккумуляированного холода;

$q_{о.с}$ – теплопритоки из окружающей среды;

$q_{нед}$ – холод, теряемый вследствие недорекуперации.

q_0 – количество теплоты, переданной от НТУ в окружающую среду, имеющую температуру $T_{о.с}$.

Уравнение энтропийного баланса всей внешнеадиабатной стационарной системы (см. рис. 1):

$$q_0/T_{о.с} - q_x/T_x = \left(\sum_{i=1}^m \Delta S'_i \right)_{теор}, \quad (2)$$

где $\left(\sum_{i=1}^m \Delta S'_i \right)_{теор}$ – суммарное производство (приращение)

энтропии в результате необратимости m рабочих процессов, необходимых для генерации и аккумуляирования холода.

Из уравнений (1) и (2) находим:

$$l_{теор} = q_x \frac{T_{о.с} - T_x}{T_x} + T_{о.с} \left(\sum_{i=1}^m \Delta S'_i \right)_{теор}, \quad (3)$$

или

$$l_{теор} = l_{MIN} + \left(\sum_{i=1}^m \Delta I'_i \right)_{теор}, \quad (4)$$

где l_{MIN} – минимально необходимая работа для генерации холода q_x при температуре T_x ;

$\left(\sum_{i=1}^m \Delta l'_i\right)_{\text{теор}}$ – сумма минимально необходимых работ для компенсации производства энтропии в рабочих процессах при генерации и аккумуляции холода.

При использовании для генерации холода циклов с потоками рабочего тела величина $\left(\sum_{i=1}^m \Delta l'_i\right)_{\text{теор}}$ равна сумме соответствующих работ изотермического сжатия рабочего тела.

Действительные (реальные) величины затрачиваемой работы для генерации q_x могут быть определены только в первом приближении с привлечением дополнительно необходимых среднестатистических или расчетных данных. В соответствии с энтропийно-статистическим методом анализа [1, 2, 3] для рассматриваемой задачи можно принять следующие варианты записи для действительной величины работы:

$$l_{\text{действ}} \approx \left(l_{\text{MIN}} + \sum_{i=1}^m \Delta l'_i\right) \frac{1}{\eta_{\text{из}}} + \left(\sum_{i=m+1}^n \Delta l'_i\right) \frac{1}{\eta_{\text{терм.НТУ}}}, \quad (5)$$

или

$$l_{\text{действ}} \approx \left(l_{\text{MIN}} + \sum_{i=1}^m \Delta l'_i\right) \frac{1}{\eta_{\text{из}}} + \left(\sum_{i=m+1}^n \delta q_i\right) \varphi_{\text{НТУ}}, \quad (6)$$

где n – общее число необратимых процессов в рассматриваемой системе;

m – число необратимых процессов низкотемпературного цикла, компенсируемых изотермической работой сжатия;

$(n - m)$ – число необратимых процессов, компенсируемых затратами генерированной холодопроизводительности, для компенсации теплопритоков $q_{\text{о.с.}}$ из окружающей среды к аккумулятору холода и НТУ и потерь холода $q_{\text{нед}}$ вследствие недорекуперации;

δq_i – вынужденные затраты генерируемой холодопроизводительности для компенсации потерь $(n - m)$, то есть в данном случае $q_{\text{о.с.}}$ и $q_{\text{нед}}$;

$\eta_{\text{из}}$ – изотермический КПД компрессора, выражающий степень термодинамического совершенства процессов сжатия в охлаждаемых компрессорах;

$\eta_{\text{терм.НТУ}}$ – степень термодинамического совершенства низкотемпературной установки, $\eta_{\text{терм.НТУ}} = l_{\text{MIN}}/l_{\text{действ}}$; $\varphi_{\text{НТУ}}$ – коэффициент удельных затрат электроэнергии при генерации холода в НТУ, Вт эл.мощн./Вт холодопр.

При принятых выше условиях для режимов накопления холода определяются необходимое его удельное количество на 1 кг льда и минимально необходимая удельная работа.

Например, для стационарного режима накопления холода при охлаждении льда от температуры 263 К до 243 К:

– удельные затраты холода на охлаждение льда

$q_{\text{охл.льда}} = c_{\text{льда}} (T_{\text{Xmax}} - T_{\text{Xmin}}) = 2,12 (263 - 243) = 42,4 \text{ кДж/кг}$ льда при минимальной температуре генерируемого холода 243 К;

– минимально необходимая работа для охлаждения 1 кг льда

$$L_{\text{min охл.льда}} = q_{\text{охл.льда}} \left[T_{\text{о.с.}} / (T_{\text{Xmax}} - T_{\text{Xmin}}) \ln (T_{\text{Xmax}} / T_{\text{Xmin}}) - 1 \right] = 42,4 \left[300 / (263 - 243) \ln (263 / 243) - 1 \right] = 7,903 \text{ кДж/кг льда.}$$

Расчет ВХМ в режиме охлаждения льда от температуры

$T_{\text{Xнач}} = 263 \text{ К}$ до $T_{\text{Xкон}} = 243 \text{ К}$.

Исходные данные:

$T_{\text{о.с.}} = 300 \text{ К}$ – средняя температура окружающей среды;

$R = 0,287 \text{ кДж/(кг·К)}$ – газовая постоянная воздуха;

$\eta_{\text{из}} = 0,76$ – среднестатистическое значение изотермического КПД компрессора;

$\eta_{\text{ад}} = 0,8$ – среднестатистическое значение адиабатного КПД компрессора, выражающее степень термодинамического совершенства процесса сжатия в адиабатных условиях;

$\eta_s = 0,9$ – среднестатистическое значение изотропного КПД детандера, выражающее степень термодинамического совершенства процесса расширения в адиабатных условиях;

$q_{\text{о.с.}} = 1,5 \text{ кДж/кг сж. в.}$ – удельная (на 1 кг сжатого воздуха) величина теплопритоков из окружающей среды к холодному блоку (аккумулятору холода и НТУ);

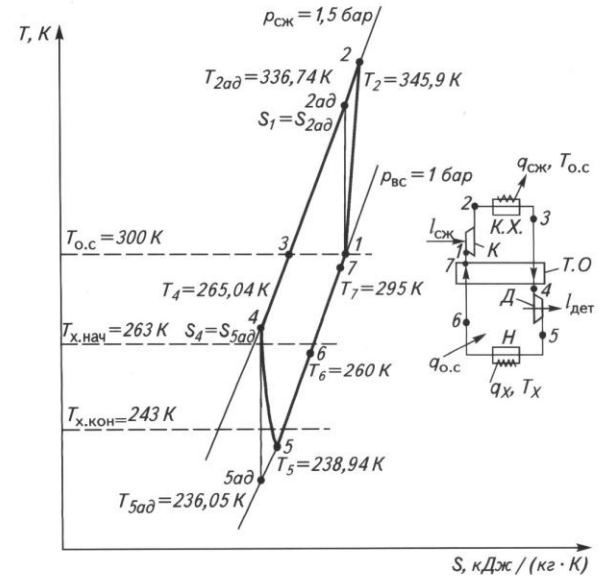


Рис. 2. Схематическое изображение воздушного рекуперативного обратного цикла Брайтона в $T - S$ координатах и установки для охлаждения льда от температуры 263 К до 243 К:

$К$ – компрессор; $Д$ – детандер; $К.Х.$ – концевой холодильный; $Н$ – теплообменник нагрузки; $Т.О$ – основной теплообменник; 1 – 7 – точки цикла, параметры которых приведены в табл. 1

Таблица 1
Параметры точек обратного цикла Брайтона (см. рис. 2)

Точки	Энтальпия i , кДж/кг	Темпера- тура T , К	Энтропия S , кДж/(кг·К)
1.	529,02	300	3,95092
2	575,3	345,9	3,97807
2ад	566,04	336,74	3,95092
3	528,91	300	3,83418
4	493,61	265,04	3,70909
5	467,43	238,94	3,72135
5ад	464,52	236,05	3,70909
6	488,67	260	3,80657
7	523,97	295	3,93396

$q_{\text{нед}} = c_p \Delta T_{\text{нед}} = 5$ кДж/кг сж. в. – среднестатистическая удельная величина потерь холодопроизводительности из-за недогрева обратного потока в рекуператоре,

$$\Delta T_{\text{нед}} = 5 \text{ К};$$

$c_p = 1$ кДж/(кг·К) – теплоемкость воздуха при нормальных условиях;

$\sigma_{\text{сж}} = p_{\text{сж}}/p_{\text{вс}} = 1,5$ – степень повышения давления при сжатии, принятая по результатам предварительных оптимизационных расчетов ($p_{\text{сж}} = 1,5$ бар, $p_{\text{вс}} = 1$ бар).

Рабочие процессы в ВХМ и ее принципиальная схема показаны на рис. 2.

Определение основных характеристик рабочих процессов цикла и холодильной установки

Теоретическая (полная) удельная холодопроизводительность цикла:

$$q_x = (q_x)_T = i_1 - i_3 + i_4 - i_5 = 26,29 \text{ кДж/кг сж. в.}$$

Реальная (полезная) удельная холодопроизводительность:

$$(q_x)_0 = (q_x)_{\text{ВХМ}} = (q_x)_T - q_{\text{о.с}} - q_{\text{нед}} = 19,79 \text{ кДж/кг сж. в.}$$

Соотношение полной и полезной холодопроизводительности:

$$y = (q_x)_T / (q_x)_0 = 26,29 / 19,79 = 1,328.$$

Затрачиваемая удельная работа:

при адиабатном сжатии:

$$(l_{\text{сж}})_{\text{ад}} = c_p T_{\text{о.с}} [(p_{\text{сж}}/p_{\text{вс}})^{(k-1)/k} - 1] = c_p T_{\text{о.с}} (\sigma^{(k-1)/k} - 1) = 1 \cdot 300 \cdot (1,5)^{(1,41-1)/1,41} - 1 = 37,54 \text{ кДж/кг сж. в.};$$

при изотермическом сжатии:

$$(l_{\text{сж}})_{\text{из}} = R T_{\text{о.с}} \ln(p_{\text{сж}}/p_{\text{вс}}) = 0,287 \cdot 300 \ln 1,5 = 34,91 \text{ кДж/кг сж. в.}$$

Действительная затрачиваемая удельная работа:

$$(l_{\text{сж}})_{\text{действ}} = (l_{\text{сж}})_{\text{ад}} / \eta_{\text{ад}} = 37,54 / 0,8 = 46,92 \text{ кДж/кг сж. в.},$$

$$\text{или } (l_{\text{сж}})_{\text{действ}} = (l_{\text{сж}})_{\text{из}} / \eta_{\text{из}} = 34,91 / 0,76 = 46,93 \text{ кДж/кг сж. в.}$$

Проверка по величинам энтальпий даст близкое значение:

$$(l_{\text{сж}})_{\text{действ,возд}} = i_2 - i_1 = 575,3 - 529,02 = 46,28 \text{ кДж/кг сж. в.}$$

Коэффициент удельных затрат изотермической работы сжатия при генерации полной холодопроизводительности $(q_x)_T$:

$$\phi_{\text{из}} = (l_{\text{из}} - l_{\text{расш}}) / (q_x)_T = (34,91 - 26,18) / 26,29 = 0,332,$$

$$\text{где } l_{\text{расш}} = i_4 - i_5 = 493,61 - 467,43 = 26,18 \text{ кДж/кг.}$$

Действительная величина коэффициента удельных затрат работы при генерации полезной холодопроизводительности с учетом работы расширения:

$$\phi = (l_{\text{сж}} - l_{\text{расш}}) / (q_x)_0 = (46,28 - 26,18) / 19,79 = 1,016.$$

Необходимый расход воздуха для охлаждения 1 кг льда в установившемся режиме накопления холода:

$$G_{\text{возд}} = q_{\text{охл.льда}} / (q_x)_{\text{ВХМ}} = 42,4 / 19,79 = 2,142 \text{ кг сж. в. / кг льда.}$$

Необходимая работа сжатия в ВХМ:

$$L_{\text{сж.ВХМ}} = G_{\text{возд}} l_{\text{сж}} = 2,142 \cdot 46,28 = 99,13 \text{ кДж/кг льда.}$$

Работа, отводимая от детандера ВХМ:

$$L_{\text{расш.ВХМ}} = G_{\text{возд}} l_{\text{расш}} = 2,142 \cdot 26,18 = 56,08 \text{ кДж/кг льда.}$$

Суммарные затраты работы в ВХМ:

$$L_{\text{ВХМ}} = L_{\text{сж.ВХМ}} - L_{\text{расш.ВХМ}} = 99,13 - 56,08 = 43,05 \text{ кДж/кг льда.}$$

Степень термодинамического совершенства низкотемпературной установки (НТУ) при генерации полезной холодопроизводительности q_x :

$$\eta_{\text{терм.НТУ}} = L_{\text{мин охл.льда}} / L_{\text{ВХМ}} = 7,903 / 43,05 = 0,184.$$

Энтропийно-статистический анализ распределения затрат энергии на компенсацию производства энтропии в основных процессах и узлах ВХМ

Минимально необходимая работа для охлаждения льда от 263 до 243 К:

$$l_{\text{мин}} = L_{\text{мин охл.льда}} / G_{\text{возд}} = 7,903 / 2,142 = 3,69 \text{ кДж/кг сж. в.}$$

Минимально необходимые удельные затраты энергии для компенсации производства энтропии в основном теплообменнике:

$$\Delta S'_{\text{т.о}} = (S_7 - S_6) - (S_3 - S_4) = (3,93396 - 3,80657) - (3,83418 - 3,70909) = 0,0023 \text{ кДж/(кг сж. в.} \cdot \text{К)}.$$

$$\Delta l'_{\text{т.о}} = T_{\text{о.с}} \Delta S'_{\text{т.о}} / y = 300 \cdot 0,0023 / 1,328 = 0,519 \text{ кДж/кг сж. в.}$$

Минимально необходимые затраты энергии для компенсации производства энтропии при расширении в детандере:

$$\Delta S'_{\text{дет}} = S_5 - S_4 = 3,72135 - 3,70909 = 0,01226 \text{ кДж/(кг сж. в.} \cdot \text{К)}.$$

$$\Delta l'_{\text{дет}} = T_{\text{о.с}} \Delta S'_{\text{дет}} / y = 300 \cdot 0,01226 / 1,328 = 2,769 \text{ кДж/кг сж. в.}$$

Минимально необходимые затраты энергии для компенсации производства энтропии в теплообменнике нагрузки H при передаче теплоты Q_x от охлаждаемого объекта рабочему телу цикла в процессе 5 – 6 (см. рис.2):

$$\Delta l'_{q_x} = \frac{T_{\text{о.с}} \Delta S'_{q_x}}{y} = \frac{T_{\text{о.с}} (q_x)_T}{y} \left[\frac{1}{T_{\text{ср.возд}}} - \frac{1}{T_{\text{ср.льда}}} \right] \text{ кДж/кг сж. в.};$$

$$T_{\text{ср.возд}} = (T_6 + T_5) / 2 = (260 + 238,94) / 2 = 249,47 \text{ К};$$

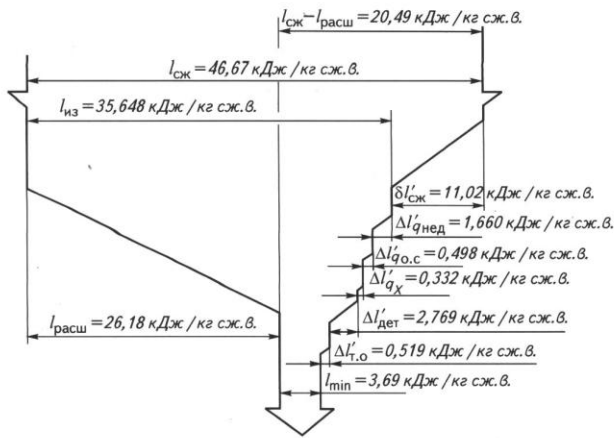


Рис. 3. Схематическое изображение распределения затрат энергии по элементам ВХМ

$$T_{\text{ср.льда}} = (T_{\text{хнач}} + T_{\text{хкон}}) / 2 = (263 + 243) / 2 = 253 \text{ К.}$$

Тогда:

$$\Delta l'_{q_{\text{о.с}}} = \frac{300 \cdot 26,29}{1,328} \cdot \left[\frac{1}{249,47} - \frac{1}{253} \right] = 0,332 \text{ кДж/кг сж.в.}$$

Затраты работы сжатия на компенсацию теплопритоков из окружающей среды:

$$\Delta l'_{q_{\text{о.с}}} = q_{\text{о.с}} \cdot \varphi_{\text{из}} = 1,5 \cdot 0,332 = 0,498 \text{ кДж/кг сж.в.}$$

Затраты работы сжатия на компенсацию недорекуперации:

$$\Delta l'_{q_{\text{нед}}} = q_{\text{нед}} \cdot \varphi_{\text{из}} = 5 \cdot 0,332 = 1,66 \text{ кДж/кг сж.в.}$$

В итоге общая работа сжатия:

$$l_{\text{из}} = l_{\text{мин}} + \Delta l'_{l_{\text{о.с}}} + \Delta l'_{\text{дет}} + \Delta l'_{q_{\text{о.с}}} + \Delta l'_{q_{\text{нед}}} + l_{\text{расш}} = 3,69 + 0,519 + 2,769 + 0,332 + 0,498 + 1,66 + 26,18 = 35,648 \text{ кДж/кг сж.в.}$$

Энергетические потери при сжатии:

$$\delta l'_{\text{сж}} = (l_{\text{сж}})_{\text{из}} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{\text{из}}} - 1 \right) = 34,91 \cdot \left(\frac{1}{0,76} - 1 \right) = 11,02 \text{ кДж/кг сж.в.}$$

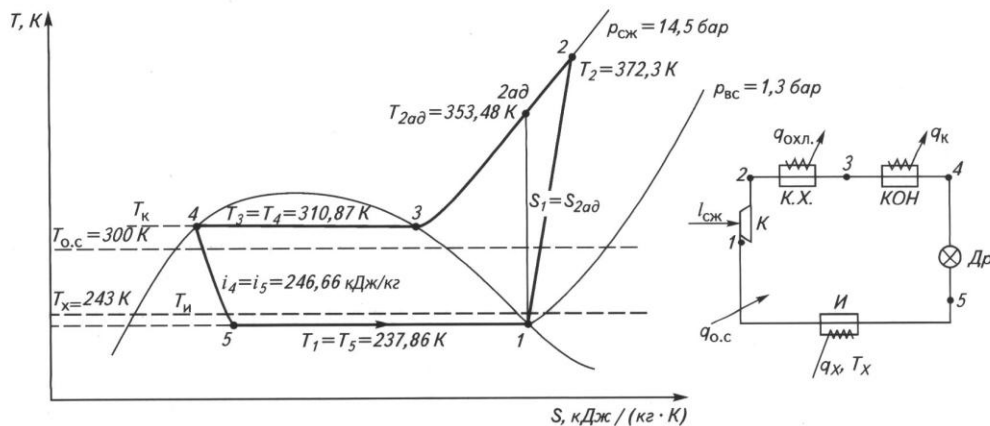


Рис. 4. Рабочие процессы холодильного фреонового (R22) цикла в координатах $T-S$ и схема пароконденсационной холодильной машины:

K – компрессор; $K.X.$ – конечный холодильный контур; KON – конденсатор; $Др$ – дроссель; $И$ – испаритель; 1 – 5 – точки цикла, параметры которых даны в табл. 2

Тогда действительная затрачиваемая удельная работа сжатия будет равна:

$$l_{\text{сж}} = l_{\text{из}} + \delta l'_{\text{сж}} = 35,648 + 11,02 = 46,67 \text{ кДж/кг сж.в.}$$

$$\text{Расчетное значение: } (l_{\text{сж}})_{\text{действ.возм}} = 46,28 \text{ кДж/кг сж.в.}$$

Расхождение результатов составляет 0,84%.

Схематически распределение затрат энергии по элементам ВХМ представлено на рис. 3.

Расчет ПКМ в режиме охлаждения льда от температуры

$$T_{\text{хнач}} = 263 \text{ К до } T_{\text{хкон}} = 243 \text{ К.}$$

Исходные данные:

$T_{\text{о.с}} = 300 \text{ К}$ – средняя температура окружающей среды.

Выбраны значения следующих величин:

$T_{\text{и}} = 237,86 \text{ К}$ – средняя температура рабочего тела (R22)

в испарителе (т.е. теплообменнике нагрузки) при давлении $\sim 1,3$ бар;

$T_{\text{к}} = 310,87 \text{ К}$ – средняя температура конденсации R22

при давлении сжатия $\sim 14,5$ бар;

$p_{\text{сж}}/p_{\text{вс}} = 14,5/1,3 = 11,15$ – степень повышения давления при сжатии;

$\eta_{\text{ад}} = 0,8$ – адиабатный КПД компрессора, выражающий степень термодинамического совершенства процесса адиабатного сжатия;

$q_{\text{о.с}} \approx 2 \text{ кДж/кг R22}$ – средняя величина удельных теплопритоков из окружающей среды к холодному блоку.

Цикл ПКМ и ее схема даны на рис. 4.

Определение основных параметров рабочих процессов и характеристик рефрижераторной установки

Теоретическая (полная) удельная холодопроизводительность цикла:

$$(q_{\text{хт}})_{\text{т}} = i_1 - i_4 = i_1 - i_5 = 390,77 - 246,66 = 144,11 \text{ кДж/кг R22.}$$

Реальная (полезная) холодопроизводительность:

Таблица 2
Параметры точек цикла ПКМ (см. рис. 4)

Точки	Энтальпия i , кДж/кг	Температура T , К	Энтропия S , кДж/(кг·К)
1	390,77	237,86	1,8145
2	468,93	372,3	1,85756
2ад	453,3	353,48	1,8145
3	416,17	310,87	1,70241
4	246,66	310,87	1,15715
5	246,66	237,86	1,209

$$(q_x)_0 \approx (q_x)_T - q_{o.c} = 144,11 - 2 = 142,11 \text{ кДж/кг R22.}$$

Соотношение полной и полезной холодопроизводительности:

$$y = (q_x)_T / (q_x)_0 = 144,11 / 142,11 = 1,014.$$

Адиабатная работа сжатия:

$$l_{ад} = i_{2ад} - i_1 = 453,3 - 390,77 = 62,53 \text{ кДж/кг R22.}$$

Действительная затрачиваемая удельная работа сжатия (с учетом $\eta_{ад} = 0,8$):

$$l_{сж} = q_{сж} - (q_x)_T = i_2 - i_4 - (i_1 - i_4) = 468,93 - 246,66 - 144,11 = 78,16 \text{ кДж/кг R22,}$$

$$\text{или } l_{сж} = l_{ад} / \eta_{ад} = 62,53 / 0,8 = 78,16 \text{ кДж/кг R22.}$$

Действительная величина холодильного коэффициента: $\epsilon_x = (q_x)_0 / l_{сж} = 142,11 / 78,16 = 1,82$ кДж(холода)/кДж(работы).

Действительная величина коэффициента удельных затрат мощности:

$$\phi = 1/\epsilon = 1/1,82 = 0,549 \text{ кДж(работы)/кДж(холода).}$$

Необходимый расход фреона для охлаждения 1 кг льда в установившемся режиме накопления холода:

$$G_{R22} = q_{охл.льда} / (q_x)_0 = 42,4 / 142,11 = 0,298 \text{ кг R22 / кг льда.}$$

Затраты работы в парокомпрессионной установке:

$$L_{ПКМ} = G_{R22} l_{сж} = 0,298 \cdot 78,16 = 23,29 \text{ кДж/кг льда.}$$

Степень термодинамического совершенства при генерации полезной холодопроизводительности $(q_x)_0$:

$$\eta_{терм.НТУ} = L_{мин охл.льда} / L_{ПКМ} = 7,903 / 23,29 = 0,339.$$

Энтропийно-статистический анализ затрат работы для компенсации производства энтропии в основных узлах и процессах ПКМ для стационарного режима работы.

Минимально необходимая работа для охлаждения льда от 263 до 243 К:

$$l_{мин} = L_{мин охл.льда} / G_{R22} = 7,903 / 0,298 = 26,52 \text{ кДж/кг R22.}$$

Энергетические потери в компрессоре определяются по формуле

$$\Delta l'_{компр} = l_{сж} - l_{ад} = l_{ад} (1/\eta_{ад} - 1) = 62,53 (1/0,8 - 1) = 62,53 \cdot 0,25 = 15,632 \text{ кДж/кг R22.}$$

Максимальная величина работы, которая могла бы быть возвращена при охлаждении R22 от температуры $T_{2ад} =$

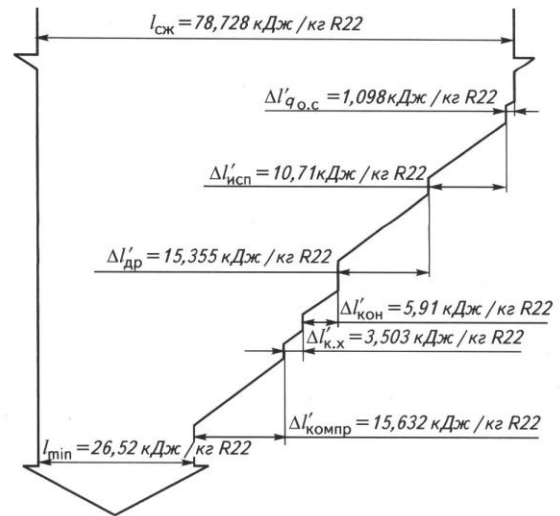


Рис. 5. Схематическое изображение распределения затрат энергии по элементам ПКМ

$= 353,48$ К до $T_3 = 310,87$ К и передаче этой теплоты $(i_{2ад} - i_3)$ в окружающую среду обратимым путем:

$$l_{макс} = (i_{2ад} - i_3) - T_{o.c} (S_{2ад} - S_3) = (453,3 - 416,17) - 300 \cdot (1,8145 - 1,70241) = 37,13 - 33,627 = 3,503 \text{ кДж/кг R22.}$$

Эта величина определяет минимально необходимую работу для компенсации производства энтропии в конденсаторе (КОН):

$$\Delta l'_{к.х} = l_{макс} = 3,503 \text{ кДж/кг R22.}$$

Необходимые минимальные удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии в конденсаторе (КОН):

$$\Delta S'_{кон} = q_k (1/T_{o.c} - 1/T_k) = (i_3 - i_4) (1/T_{o.c} - 1/T_k) = (416,17 - 246,66) (1/300 - 1/310,87) = 169,51 (0,003333 - 0,003217) = 0,0197 \text{ кДж/(кг R22·К);}$$

$$\Delta l'_{кон} = T_{o.c} \Delta S'_{кон} = 300 \cdot 0,0197 = 5,91 \text{ кДж/кг R22.}$$

Необходимые минимальные удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии при дросселировании:

$$\Delta S'_{др} = S_5 - S_4 = 1,209 - 1,15715 = 0,0519 \text{ кДж/(кг R22·К);}$$

$$\Delta l'_{др} = T_{o.c} \Delta S'_{др} / y = 300 \cdot 0,0519 / 1,014 = 15,355 \text{ кДж/кг R22.}$$

Необходимая минимальная работа сжатия для компенсации производства энтропии в теплообменнике нагрузки (т.е. в испарителе) при передаче теплоты q_x от охлаждаемого объекта рабочему телу цикла:

$$\Delta S'_{исп} = (q_x)_0 (1/T_{и} - 1/T_{ср.льда}) = 142,11 (1/237,86 - 1/253) = 0,0357 \text{ кДж/(кг R22·К);}$$

$$\Delta l'_{исп} = T_{o.c} \Delta S'_{исп} = 300 \cdot 0,0357 = 10,71 \text{ кДж/кг R22.}$$

Величина затрачиваемой работы на компенсацию теплотротоков:

$$\Delta l'_{q_{o.c}} = q_{o.c} / \epsilon_x = 2 / 1,82 = 1,098 \text{ кДж/кг R22.}$$

Сумма величин минимальных работ для компенсации производства энтропии в необратимых процессах во всех элементах холодильной машины должна определить величину работы сжатия:

$$l_{ад} = l_{мин} + \Delta l'_{компр} + \Delta l'_{к.л} + \Delta l'_{кон} + \Delta l'_{др} + \Delta l'_{исп} + \Delta l'_{q.o.c} = 26,52 + 15,632 + 3,503 + 5,91 + 15,355 + 10,71 + 1,098 = 78,728 \text{ кДж/кг R22.}$$

Расчетное значение: $l_{сж} = 78,16 \text{ кДж/кг R22.}$

Расхождение результатов составляет 0,7 %.

Распределение затрат энергии по элементам ПКМ приведено на рис. 5.

Учет дифференцированности тарифов на электроэнергию

Для примера был выбран дифференцированный по времени суток тариф для потребителей ОАО «Мосэнерго-сбыт» в 2008 г.

При круглосуточной работе установки средняя стоимость 1 кВт·ч электроэнергии будет равна $(69,81 \cdot 11 + 271,75 \cdot 6 + 82,87 \cdot 7) / 24 = 2978,5 / 24 = 124,1 \text{ коп./кВт·ч.}$

Следовательно, при круглосуточной работе установок стоимость охлаждения 1 кг льда в стационарном режиме составит:

для ВХМ

$$(S_{ВХМ})_{СТАЦ}^{КРУГЛ} = L_{ВХМ} \cdot 124,1 / 3600 = 43,05 \cdot 124,1 / 3600 = 1,484 \text{ коп./кг льда;}$$

для ПКМ

$$(S_{ПКМ})_{СТАЦ}^{КРУГЛ} = L_{ПКМ} \cdot 124,1 / 3600 = 23,29 \cdot 124,1 / 3600 = 0,803 \text{ коп./кг льда.}$$

Затраты при работе установок только в ночное время:

для ВХМ

$$(S_{ВХМ})_{СТАЦ}^{НОЧН} = L_{ВХМ} \cdot 69,81 / 3600 = 43,05 \cdot 69,81 / 3600 = 0,835 \text{ коп./кг льда;}$$

для ПКМ:

$$(S_{ПКМ})_{СТАЦ}^{НОЧН} = L_{ПКМ} \cdot 69,81 / 3600 = 23,29 \cdot 69,81 / 3600 = 0,452 \text{ коп./кг льда.}$$

Таким образом, при работе установок только в ночное время (с 21-00 до 8-00) затраты на 1 кВт·ч электроэнергии будут меньше в $124,1 / 69,81 = 1,778$ раза.

Таблица 3
Дифференцированный тариф на электроэнергию *

Период	Время суток	Длительность, ч	Тариф, коп/(кВт·ч)
Ночь	С 21-00 до 8-00	11	69,81
Пик нагрузки	С 8-00 до 11-00 С 18-00 до 21-00	6	271,75
П\пик нагрузки	С 11-00 до 18-00	7	82,87

* Источник: <http://www.mosenergoby.ru>

Зависимость стоимости охлаждения льда от температурного уровня и определение «пороговой» температуры для ВХМ, работающих в ночное время

Были построены кривые для затрат работы на охлаждение льда в стационарных режимах для ВХМ, ПКМ и каскадных ПКМ в зависимости от температуры в широком диапазоне (см. рис. 6). Для построения указанных зависимостей для ПКМ и каскадных ПКМ использовались характеристики современных серийно выпускаемых холодильных машин.

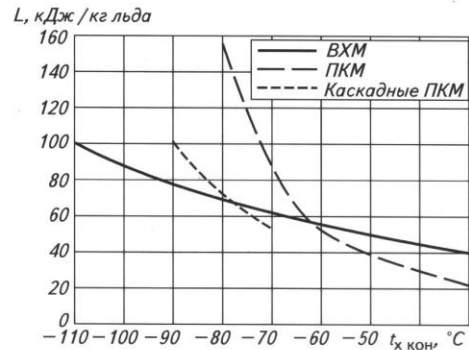


Рис. 6. Затраты работы на охлаждение льда в стационарном режиме в зависимости от конечной температуры льда

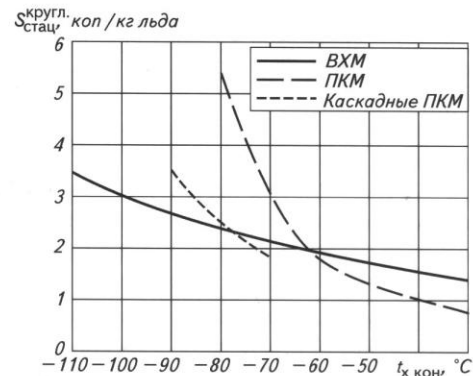


Рис. 7. Стоимость охлаждения льда в стационарном режиме при круглосуточной работе установок

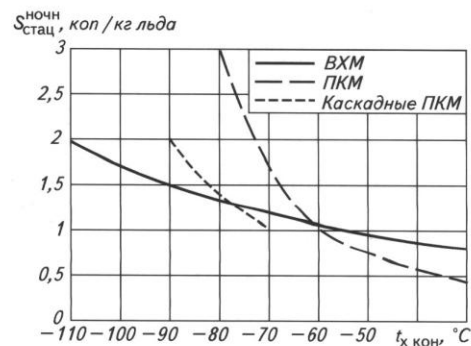


Рис. 8. Стоимость охлаждения льда в стационарном режиме при работе установок только в ночное время

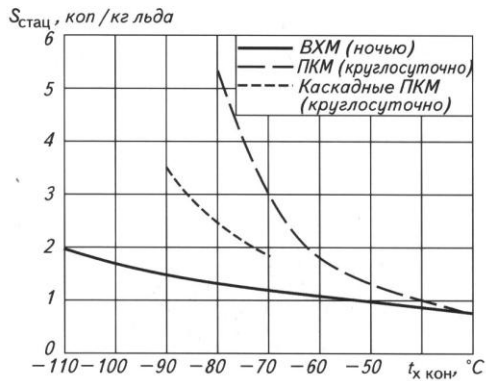


Рис. 9. Стоимость охлаждения льда в стационарном режиме при работе ПКМ круглосуточно, а ВХМ только в ночное время

С учетом данных о цене электроэнергии построены графики зависимости стоимости охлаждения 1 кг льда в стационарном режиме от температуры при круглосуточной работе установок (рис. 7), при работе установок только в ночное время (рис. 8) и при работе ПКМ круглосуточно, а ВХМ только в ночное время (рис. 9).

Основные выводы

1. Показано, что «пороговая» температура, определяющая целесообразный диапазон температур для применения воздушных холодильных машин при аккумулировании холода, составляет -60°C (см. рис. 6 – 8). При работе ВХМ только в ночное время, а ПКМ круглосуточно она

повышается до -30°C (см. рис. 9). Это существенно расширяет возможности практического использования ВХМ, что окончательно решается с учетом стоимости машин в каждом конкретном случае их применения.

2. При работе установок только в ночное время затраты на электроэнергию уменьшаются в 1,5 – 2 раза.

3. Энтропийно-статистический анализ дает достоверное определение распределения затрат энергии на компенсацию производства энтропии в необратимых процессах во всех элементах (узлах) низкотемпературных установок (генераторах холода). Показано, что расхождение величин действительной работы, определенных в результате энтропийно-статистического анализа и вычисленных непосредственно как характеристики низкотемпературных циклов, находится в пределах 0,7 – 0,85 %.

Список литературы

- Архаров А.М., Сычев В.В. Основы энтропийно-статистического анализа реальных энергетических потерь в низкотемпературных и высокотемпературных машинах и установках // Холодильная техника. 2005. № 12.
- Архаров А.М., Сычев В.В. И еще раз об энтропии и задаче определения реальных (действительных) величин энергетических потерь вследствие необратимости // Холодильная техника. 2007. № 4.
- Архаров А.М., Сычев В.В., Архаров И.А. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, спецвыпуск «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения», 2008.
- Мартыновский В., Мельцер Л. Температурные границы рационального использования воздушных холодильных машин // Холодильная техника. 1955. № 2.
- Холодильные машины и аппараты. Каталог-справочник / Под ред. Р.В. Павлова – М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1971.