

Анализ аккумуляции холода

А.Л. Синцов, старший научный сотрудник, канд. техн. наук

Научно-исследовательский институт энергетического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

e-mail: sintsov@bmstu.ru

Ключевые слова:

льдоаккумулятор,
переменная холодильная нагрузка,
ресурсосбережение,
сезонный аккумулятор холода,
холодильная установка.

С целью выявления возможности снижения затрат энергии при производстве холода проведен анализ процесса аккумуляции холода в холодильных агрегатах с переменной холодильной нагрузкой. Представлены схемы установок для производства ледяной воды и кондиционирования помещений, в которых используются льдоаккумуляторы. Рассмотрены варианты рабочего цикла льдоаккумулятора и даны результаты расчетов. Показано увеличение необратимых потерь энергии при двухступенчатом охлаждении по сравнению с одноступенчатым вариантом. Рассмотрена возможность заменить льдоаккумулятор сезонным аккумулятором холода. При этом мощность постоянно работающей холодильной машины может быть уменьшена на ~40%. Предложена одномерная математическая модель накопления льда в льдоаккумуляторе. Результаты расчетов сопоставлены с характеристиками реальных изделий. Экономия электроэнергии в случае замены льдоаккумуляторов сезонными аккумуляторами холода подтверждена расчетами.

1. Введение

Аккумуляция холода применяется в основном для выравнивания холодильной нагрузки в течение суток. Этот процесс реализуется в льдоаккумуляторах, которыми комплектуются холодильные машины (ХМ) [1]. Запасенная в аккумуляторе способность потреблять тепловую энергию (холодильная емкость) компенсирует возрастающий уровень потребления холода. Это позволяет уменьшить мощность установленных ХМ, что приводит к снижению капитальных вложений и эксплуатационных расходов. Простои в работе ХМ сводятся к минимуму.

Необходимость запасать холод имеет место в технологических процессах, где используется охлаждение. Подобные схемы применяются в сельском хозяйстве и пищевой промышленности, в частности при переработке молока. Ледяная вода потребляется в значительных объемах и в других отраслях промышленности. Зависимость стоимости электроэнергии от времени суток позволяет расширить сферу использования таких аккумуляторов. Они могут быть полезны в случае возможности снижения суммарных затрат на энергопотребление. Например, ночью, в часы низкой нагрузки на систему

кондиционирования, тариф на электроэнергию минимальный и наоборот — днем при максимальной потребности в охлаждении электроэнергия самая дорогая. Ночью льдоаккумулятор заряжается, а днем выполняет функцию холодильной машины, которая не нуждается в энергии. С другой стороны, наличие льдоаккумулятора увеличивает суммарное потребление электроэнергии по сравнению с традиционными холодильными установками, и вопрос эффективности их применения требует комплексного анализа.

2. Системы с аккумулятором холода

Льдоаккумулятор 1, схема которого представлена на рис. 1, запасает способность потреблять тепло в виде замороженной воды. Термин «льдоаккумулятор» отражает принцип работы данного устройства. Оно представляет собой заполненную водой теплоизолированную емкость 2, в которой размещены одна или несколько труб 4, имеющих форму змеевиков. Во время зарядки льдоаккумулятора змеевик подключается к парокompрессионной холодильной машине 5 и является испарителем хладагента. Замерзающая вода выделяет энергию для процесса испарения. При этом

на змеевике 4 образуется слой льда 6. Его толщина в зоне входа потока хладагента максимальна и равна ΔR (рис. 1, выноска I). Она уменьшается до минимума в направлении движения потока.

Установка 1 для производства ледяной воды показана на рис. 2. При падении холодильной нагрузки или при ее отсутствии ХМ 3 подключается к льдоаккумулятору 2, как это показано на рис 1. Когда толщина льда на змеевике достигает заданной максимальной величины, льдоаккумулятор 2 отсоединяется от ХМ 3. Дальнейшее намораживание льда становится нецелесообразным, так как тепловая мощность замерзающей воды недостаточна для полного испарения хладагента. В реальных конструкциях ΔR контролируется специальным датчиком.

В период роста потребления холода ХМ 3 подсоединяется к теплообменнику для охлаждения воды, выполненного в виде емкости 5. Поток хладагента направляется в испаритель, который имеет вид помещенного в емкость 5 змеевика 4. В льдоаккумуляторе 2, который переключается в режим охлаждения воды, происходит таяние льда 7.

Таким образом компенсируется часть холодильной нагрузки Q_0 . Нагретая до 40–60 °С вода подается через входной патрубок 8 в емкости 5 и 6, где охлаждается, выходит через патрубок 9 при температуре 0,5–5 °С. Для таяния запасенного объема льда V массой $m = \rho V$ необходима тепловая энергия $Q = \rho V / \Lambda$, где ρ — плотность льда, а Λ — теплота плавления льда. Средняя потребляемая тепловая мощность равна $Q = \rho V / \Lambda \tau^p$, где τ^p — время разрядки.

Льдоаккумулятор может применяться для повышения эффективности рабочего цикла парокompрессионной ХМ. Одна из возможных схем такой установки показана на рис. 3.

Выходящий из компрессора 1 холодильной машины 2 хладагент охлаждается потоком наружного

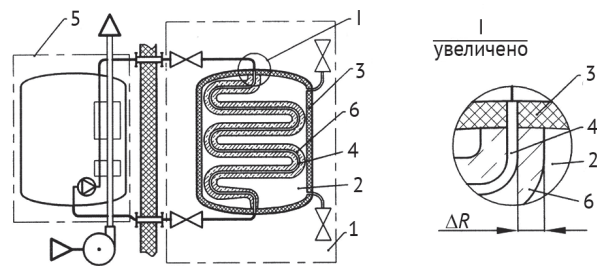


Рис. 1. Схема зарядки льдоаккумулятора
1 — льдоаккумулятор; 2 — емкость с водой; 3 — теплоизоляция; 4 — испаритель хладагента в виде змеевика; 5 — парокompрессионная холодильная машина; 6 — лед

воздуха 3. Перед входом в испаритель температура хладагента дополнительно уменьшается в теплообменнике 4. Для этого используется ледяная вода. Она поступает из льдоаккумулятора 5, который был заряжен в период снижения холодильной нагрузки по схеме, представленной на рис. 1.

Такие агрегаты, в частности, могут быть полезны в установках кондиционирования помещений, где потребителем холода выступают испарители, охлаждающие конвекторы 6. Результаты расчетов, приведенные в [2, 3], иллюстрируют результаты более глубокого снижения температуры хладагента перед испарением.

3. Рабочий цикл льдоаккумулятора

В качестве примера рассмотрим суточный цикл работы холодильной установки, предназначенной для кондиционирования офиса, в состав которой входит льдоаккумулятор. Одна из возможных зависимостей безразмерной холодильной нагрузки

$$k = \frac{Q}{Q_{\max}}$$

от времени суток приведена на рис. 4.

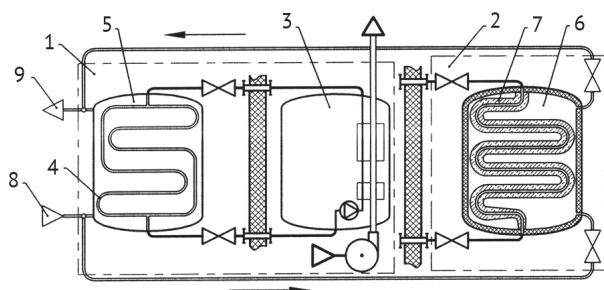


Рис. 2. Схема установки для производства ледяной воды
1 — установка для охлаждения воды — чиллер; 2 — льдоаккумулятор; 3 — парокompрессионная холодильная машина; 4 — испаритель хладагента в виде теплообменника; 5 — емкость для охлаждения воды; 6 — емкость льдоаккумулятора; 7 — лед; 8 — подвод горячей воды; 9 — отвод холодной воды.

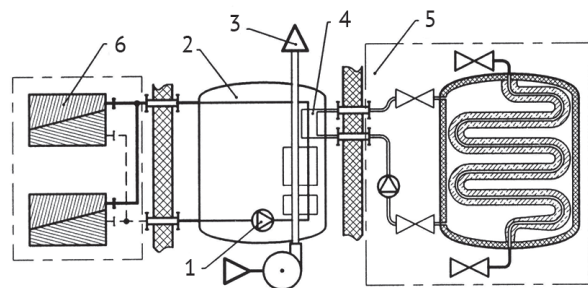


Рис. 3. Схема использования льдоаккумулятора в системе кондиционирования помещения
1 — компрессор; 2 — парокompрессионная холодильная машина; 3 — поток воздуха; 4 — теплообменник для переохлаждения хладагента ледяной водой; 5 — льдоаккумулятор; 6 — конвектор для охлаждения помещения

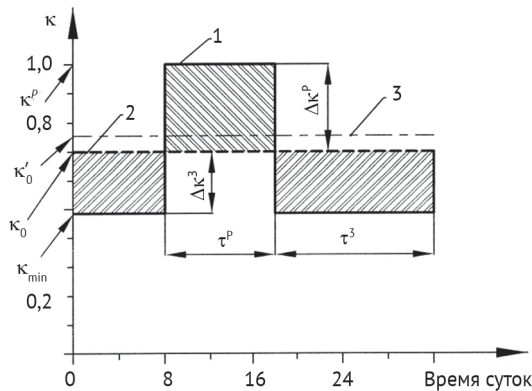


Рис. 4. Зависимость безразмерной холодильной нагрузки κ от времени суток, ч
1 – безразмерная холодильная нагрузка; 2 – холодильная мощность ХМ без учета потерь при зарядке льдоаккумулятора; 3 – холодильная мощность ХМ с учетом потерь при зарядке льдоаккумулятора; τ^3 – продолжительность зарядки льдоаккумулятора; τ^P – продолжительность разрядки льдоаккумулятора

ХМ производит постоянную относительную (безразмерную) холодильную мощность $\kappa_0 = \frac{\dot{Q}_0}{\dot{Q}_{\max}}$, равную 0,70 от максимальной холодильной нагрузки \dot{Q}_{\max} . В нерабочее время, начиная с 18 ч до 8 ч утра, относительная холодильная нагрузка $\kappa_{\min} = \frac{\dot{Q}_{\min}}{\dot{Q}_{\max}}$ снижается до наименьшего значения, равного $\sim 0,48$.

В этот период часть производимого холода \dot{Q}_0 компенсируется теплом, выделяемым замерзающей водой. На зарядку аккумулятора в течение времени τ^3 расходуется относительная холодильная мощность $\Delta\kappa^3 = \frac{(\dot{Q}_0 - \dot{Q}_{\min})}{\dot{Q}_{\max}}$, которая в данном случае равна $\sim 0,22$.

В это время имеется промежуток, когда стоимость электроэнергии минимальна.

Во время рабочего дня в период, равный τ^P , относительная холодильная нагрузка возрастает до 1,0. При этом $\sim 30\%$ ее компенсируется таянием льда в льдоаккумуляторе. Применительно к ситуации, представленной на рис. 3, хладагент переохлаждается в дополнительном теплообменнике до 1–5 °С. Это повышает относительную холодильную мощность ХМ на величину $\Delta\kappa^P = \frac{(\dot{Q}_{\max} - \dot{Q}_0)}{\dot{Q}_{\max}}$, а также увеличивает ее холодильный коэффициент ε . При этих параметрах заряженный льдоаккумулятор позволяет возмещать $\sim 18\%$ суточной нормы потребления холода.

Без учета потерь энергии в процессах зарядки и разрядки справедливы зависимости:

$$\begin{cases} \Delta\kappa^P - (1 - \kappa_0) = 0 \\ \Delta\kappa^P \tau^P - \Delta\kappa^3 \tau^3 = 0 \\ \Delta\kappa^3 - (\kappa_0 - \kappa_{\min}) = 0 \end{cases}$$

Решения этой системы уравнений представлены на рис. 5.

Графики показывают, что увеличение необходимой холодильной мощности ХМ обусловлено ростом минимальной холодильной нагрузки κ_{\min} . Уменьшение отношения σ , что эквивалентно снижению времени зарядки, также ведет к росту холодильной мощности. Эти результаты позволяют спроектировать, в первом приближении, холодильную установку с льдоаккумулятором. Относительная мощность ХМ вычисляется по формуле: $\kappa_0 = \frac{1 + \sigma \kappa_{\min}}{1 + \sigma}$, в которой

$\sigma = \frac{\tau^3}{\tau}$ — отношение времени зарядки и разрядки. Затраченную в течение суток на зарядку льдоаккумулятора электрическую энергию Q^3 при холодильной нагрузке $Q_{\max} = 100$ кВт для парокомпрессионной ХМ с холодильным коэффициентом ε можно вычислить по формуле $Q^3 = \frac{100 \cdot \Delta\kappa^3 \tau^3}{\varepsilon}$, где: $\tau^3 = \frac{24}{1 + \sigma^{-1}}$, определя-

ется изображенным на рис. 6 решением системы уравнений. Для 24-часового цикла работы она имеет вид:

$$\begin{cases} \tau^3 + \tau - 24 = 0 \\ \tau^3 - \sigma\tau = 0 \end{cases} \quad (1)$$

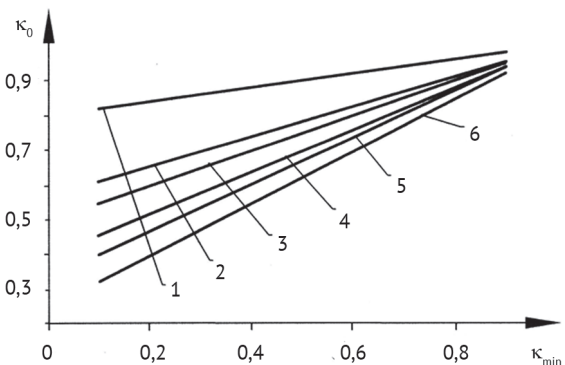


Рис. 5. Зависимость безразмерной холодильной мощности ХМ κ_0 от минимальной холодильной нагрузки κ_{\min} при значениях σ : 1 – 0,25; 2 – 0,50; 3 – 1,00; 4 – 1,50; 5 – 2,00; 6 – 3,00

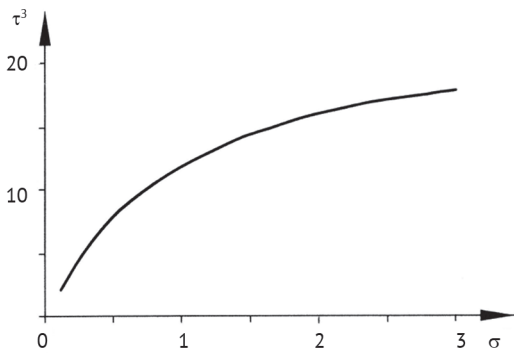


Рис. 6. Зависимость времени зарядки льдоаккумулятора τ^3 от отношения времени зарядки и разрядки σ , ч

4. Эксергический анализ работы льдоаккумулятора

Функционирование льдоаккумулятора эквивалентно двухступенчатой схеме теплообмена, в которой процессы разнесены по времени, как это показано на рис. 7.

На первом этапе при зарядке (поз. 1) хладагент, испаряясь при температуре $t_0 = t_{\text{исп}}$, охлаждает воду до уровня $t_{\text{OC}} = t_{\text{лд}} \approx -1^\circ\text{C}$, т.е. имеет место отводимый тепловой поток. При этом отводится тепловая мощность, равная аккумулированной холодильной мощности Q_A , а на змеевике растет ледяная корка. Вследствие разности температур, тепловая энергия, которая выделяется при замерзании воды, проникает через теплопроводную стенку внутрь змеевика. Это тепло поглощается испаряющимся хладагентом, т.е. является холодильной нагрузкой ХМ, которая равна ее холодильной мощности Q_0 . При отсутствии тепловых потерь в процессе зарядки соблюдается равенство $Q_A = Q_0$.

Эксергический холодильный коэффициент (ЭКХ) зарядки можно определить по формуле:

$$\varepsilon_5^3 = \frac{T_{\text{OC}}}{T_0} - 1, \quad (2)$$

где температура окружающей среды $t_{\text{OC}} = t_{\text{лд}}$, а температура испарителя t_0 варьирует от -5°C до -60°C .

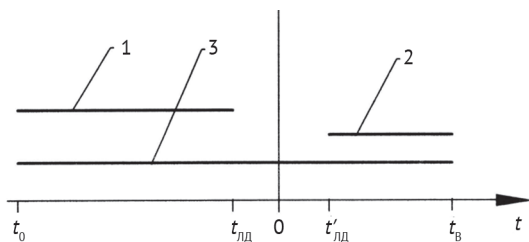


Рис. 7. Циклы охлаждения воды: 1, 2 – с использованием льдоаккумулятора (1 – зарядка, 2 – разрядка); 3 – непосредственно от холодильной машины

На втором этапе (поз. 2) функцию ХМ выполняет льдоаккумулятор, в котором тающий при температуре $t_0 = t'_{\text{лд}}$ лед охлаждает воду до температуры $t_{\text{OC}} = t_в$, т.е. имеет место процесс отвода тепла. В ходе разрядки льдоаккумулятора тепловой поток, поступающий с нагретой до температуры $20\text{--}60^\circ\text{C}$ водой, является холодильной нагрузкой. Тепловая энергия воды потребляется тающим при температуре $t'_{\text{лд}} \approx 1^\circ\text{C}$ льдом. На выходе температура воды $t_в$ равна $1,5\text{--}5^\circ\text{C}$. Когда весь лед растает, процесс разрядки прекращается. ЭКХ разрядки определяется по формуле (2), которая в этом

случае имеет вид $\varepsilon_5^p = \frac{273 + t_в}{273 + t'_{\text{лд}}}$. Общий эксергический

холодильный коэффициент цикла зарядка–разрядка равен произведению $\varepsilon_e^{\Sigma} = \varepsilon_e^3 \cdot \varepsilon_e^p$.

В схеме, когда ХМ (рис. 2, поз. 1) непосредственно охлаждает воду (поз. 3), ЭКХ ε_e определяется по формуле (2), где $t_{\text{OC}} = t_в$, а t_0 — температура в испарителе. Потери эксергического холодильного коэффициента при использовании льдоаккумулятора равны $\Delta\varepsilon_e = \varepsilon_e^{\Sigma} - \varepsilon_e$.

Результаты расчетов, представленные на рис. 8, показывают пониженную эффективность двухступенчатого цикла по сравнению с непосредственным охлаждением воды испаряющимся хладагентом.

Иными словами, применение промежуточного льдоаккумулятора заметно увеличивает необратимые энергетические потери при отборе тепла. Это обусловлено незначительными перепадами температур во время постоянно чередующихся циклов накопления льда на змеевике за счет испарения хладагента и его таяния при охлаждении воды. Реально уменьшение ЭКХ может достигать $5\text{--}15\%$.

5. Применение сезонного аккумулятора холода

Сезонный аккумулятор холода (САХ) [4] заряжается в зимний период, что повышает эффективность производства холода и утилизации низкотемпера-

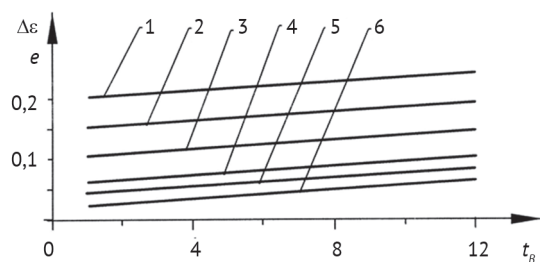


Рис. 8. Зависимость потерь эксергического холодильного коэффициента $\Delta\varepsilon_e$ при использовании льдоаккумулятора в установке для охлаждения воды от температуры охлаждаемой воды $t_в$ $^\circ\text{C}$ при температуре в испарителе $t_{\text{исп}}$: 1 – -45°C ; 2 – -35°C ; 3 – -30°C ; 4 – -25°C ; 5 – -10°C ; 6 – -5°C .

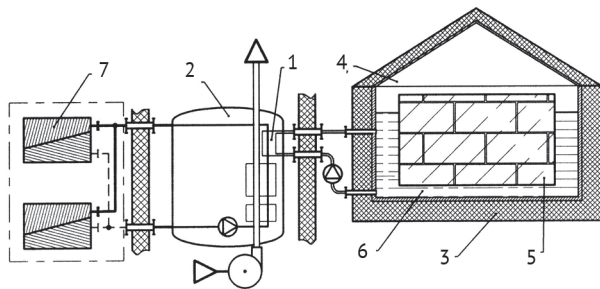


Рис. 9. Схема использования сезонного аккумулятора холода в системе кондиционирования помещения:
1 – теплообменник для переохлаждения хладагента; 2 – парокомпрессионная холодильная машина; 3 – сезонный аккумулятор холода; 4 – теплоизолированная емкость; 5 – лед; 6 – вода; 7 – конвектор для охлаждения помещения

турного тепла в летней сезон [2, 5]. Такое устройство может быть использовано для покрытия пиков холодильной нагрузки. При этом можно нейтрализовать возникающее при использовании льдоаккумулятора снижение ЭХК процесса охлаждения и уменьшить потребление энергии ХМ. Схема холодильной установки с САХ показана на рис. 9. Она функционально эквивалентна установке с льдоаккумулятором, которая представлена на рис. 3. Поток ледяной воды из САХ 3 направляется для переохлаждения хладагента в теплообменнике 1 парокомпрессионной ХМ 2. Сам аккумулятор холода представляет собой теплоизолированную емкость 4. Запасенный в зимний период за счет отрицательной температуры окружающей среды лед 5 тает и поддерживает температуру воды 6 на уровне $\sim 0^\circ\text{C}$. Очевидно, что затраты энергии при накоплении льда в таком аккумуляторе практически равны нулю, что дает реальную экономию по сравнению с льдоаккумулятором. Для определения величины этой экономии целесообразно вычислить затраты энергии на зарядку льдоаккумулятора.

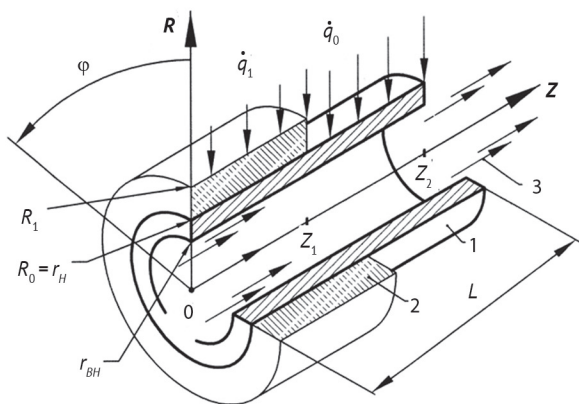


Рис. 10. Схема теплообмена в льдоаккумуляторе:
1 – труба; 2 – лед; 3 – поток хладагента

6. Математическая модель

В качестве расчетной схемы процесса зарядки льдоаккумулятора рассматривается длинная цилиндрическая труба 1 радиусом R_0 и длиной L ($L \gg R_0$), ось которой совпадает с осью Z в цилиндрических координатах, что видно на рис. 10. Хладагент 3 течет по трубе, а на ее наружной поверхности образуется ледяная корка 2. Температура на внутренней поверхности трубы и с внешней стороны предполагается постоянной $t_{\text{BH}} = t_{\text{ИСП}} + dt$, $t_{\text{H}} = -dt$. Перепад температур между средами dt , которые находятся внутри трубы и снаружи, и стенкой в расчетах принят равным 2°C с каждой стороны. В процессе зарядки аккумулятора выделяющаяся при замерзании воды тепловая мощность $\dot{Q}_l = \dot{q}_1 \Delta z_1 + \dot{q}_0 \Delta z_2$ проходит через цилиндрическую теплопроводящую стенку. На участке $[0; z_1]$ длиной Δz_1 данная стенка состоит из двух слоев: металлической трубы 1 и льда 2.

На участке $[z_1; z_2]$ длиной Δz_2 стенка является частью трубы 1. Тепловая энергия воспринимается кипящим при температуре $t_{\text{ИСП}}$ хладагентом 3. Вариации температуры t по длине трубы z и углу ϕ отсутствуют,

$$\text{т.е. } \frac{\partial t}{\partial z} = 0, \frac{\partial t}{\partial \phi} = 0. \text{ Другими словами, тепловые потоки}$$

имеются исключительно в радиальном направлении, а перенос тепловой энергии вдоль трубы осуществляется только потоком хладагента.

Такие допущения позволяют использовать одномерный вариант закона Фурье, $\dot{q} = -\lambda A_R \frac{\partial t}{\partial R}$, где

$A_R = 2\pi RL$ — площадь подводящей поверхности, λ — коэффициент теплопроводности стенки. Для граничных условий первого рода ($R = r_{\text{BH}}$, $t = t_{\text{BH}}$; $R = r_{\text{H}}$, $t = t_{\text{H}}$) потребляемая хладагентом тепловая мощность на участке $[z_1; z_2]$ определяется по формуле

$$\dot{Q}_0 = \dot{q}_0 \Delta z_2,$$

где $\dot{q}_0 = \frac{2\pi\lambda_{\text{TP}}}{\ln \frac{r_{\text{H}}}{r_{\text{BH}}}} \Delta t$ — удельный тепловой поток, λ_{TP} —

коэффициент теплопроводности материала трубы, $\Delta t = t_{\text{H}} - t_{\text{BH}}$. Для зоны с двухслойной цилиндрической стенкой $[0; z_1]$ передаваемая мощность равна

$$\dot{Q}_1 = \dot{q}_1 \Delta z_1,$$

где: $\dot{q}_1 = \frac{2\pi\Delta t}{C_0 + C_1}$, $C_0 = \frac{1}{\lambda_{\text{TP}}} \ln \frac{r_{\text{H}}}{r_{\text{BH}}}$ — термическое со-

противление стенки трубы; $C_1 = \frac{1}{\lambda_{\text{ЛД}}} \ln \frac{R_1}{R_0}$ — терми-

ческое сопротивление слоя льда; $\lambda_{\text{лд}}$ — коэффициент теплопроводности льда; $R_0 = r_{\text{H}}$.

В математической модели, схема которой дана на рис. 11, покрывающий трубу 1 ледяной слой 2 представлен как множество отрезков, длина которых в рассматриваемом процессе постоянна.

Стационарный теплообмен, в результате которого растет толщина ледяного слоя, моделируется на каждом отрезке. Повышение суммарного теплового сопротивления ледяного слоя 2 обуславливает рост его длины. Увеличение толщины слоя льда $\Delta R_{i,j}$, которое произошло на участке трубы $(z_{i-1}; z_i]$, длиной Δz_i за промежуток времени $\Delta \tau_i$, определяется из баланса энергии:

$$Q_{i,j} = \dot{q}_{i,j} \Delta z_i \Delta \tau_i, \quad (3)$$

где: $i + j = n$, $n = i_{\text{max}} = j_{\text{max}}$, $\dot{q}_{i,j} = 2\pi \Delta t (C_0 + C_{i-1,j+1})^{-1}$ —

удельный тепловой поток; $C_{i-1,j+1} = \frac{1}{\lambda_{\text{лд}}} \ln \frac{R_{i-1,j+1}}{R_0}$ —

термическое сопротивление слоя льда на участке $(z_{i-1}; z_i]$.

С другой стороны,

$$Q_{i,j} = \pi (R_{i,j}^2 - R_{i-1,j+1}^2) \rho \Delta z_i \Lambda. \quad (4)$$

Текущий радиус ледяного слоя $R_{i,j}$ определяется совместным решением уравнений (3), (4):

$$R_{i,j} = \left(R_{i-1,j+1}^2 + \frac{\dot{q}_{i,j} \Delta \tau_i}{\pi \rho \Lambda} \right)^{0.5}. \quad (5)$$

Далее вычисляется прирост толщины ледяного слоя $\Delta R_{i,j} = R_{i,j} - R_{i-1,j+1}$.

Рассмотрение формулы (5) показывает, что толщина ледяного слоя на каждом участке зависит от удельного теплового потока \dot{q} , который способна передать стенка, и является функцией времени, т.е. $dR = \varphi(\dot{q}) \cdot f(\tau) d\tau$, а $\Delta R = \varphi(\dot{q}) \cdot F(\Delta \tau)$. Таким обра-

зом, скорость роста толщины льда $\frac{dR}{dt}$ и толщина

ледяного слоя ΔR не зависят от подводимой к аккумулятору холодильной мощности \dot{Q}_0 . Для функции $\varphi(\dot{q})$ параметрами будут разность температур на стенке Δt и термическое сопротивление стенки, которое зависит от величины ΔR .

Одновременно за промежуток времени Δt_i длина участка трубы, на котором намораживается лед, увеличивается на величину Δz_i . Этот прирост можно определить из баланса тепловой мощности на

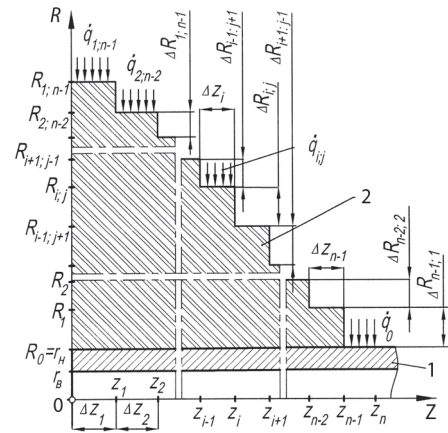


Рис. 11. Расчетная схема процесса образования льда на трубе льдоаккумулятора: 1 — труба; 2 — лед

всем теплопередающему участку трубы. Суммарная тепловая мощность, отданная образующимся льдом хладагенту на отрезке длиной $L = z_{i-1}$, равна:

$$\dot{Q}_{\text{лд}} = \dot{Q}_{i-1} = \sum_{i=1}^{i-1} \dot{q}_i \Delta z_i,$$

где: $\dot{q}_i = 2\pi \Delta t (C_0 + C_i)^{-1}$, $C_i = \frac{1}{\lambda_{\text{лд}}} \ln \frac{R_i}{R_0}$. На участке дли-

ной $L = z_i$ $\dot{Q}_i = \dot{Q}_{i-1} + \Delta z_i \dot{q}_0 = \dot{Q}_0$. Вычисляем:

$$\Delta z_i = (\dot{Q}_0 - \dot{Q}_{\text{лд}}) / \dot{q}_0, \quad (6)$$

$$z_i = z_{i-1} + \Delta z_i.$$

Анализ формулы (6) выявляет, что длина обледенелого отрезка трубы L возрастает с ростом подводимой холодильной мощности \dot{Q}_0 . Зависимость от времени зарядки τ^3 проявляется через влияние этого аргумента на толщину и длину ледяной корки, а значит, и на величину $\dot{Q}_{\text{лд}}$.

Погрешность вычислений по представленной методике можно определить при сравнении суммарного объема намерзшего льда, который вычислен по данной методике V^3 , и объема льда, определенного из баланса энергии:

$$V_{\text{э}} = Q_0 \tau^3 / \rho \Lambda. \quad (7)$$

Относительная ошибка результатов расчета в процентах равна: $dV = \left| \frac{V_{\text{э}} - V^3}{V_{\text{э}}} \right| \cdot 100 / V_{\text{э}}$, где объем на-

мерзшего льда равен сумме $V^3 = \sum_{i=1}^{n-1} \pi (R_i^2 - R_0^2) \Delta z_i$,

а d — символ относительной погрешности. Вычисления показывают, что величина dV зависит от числа интервалов $\Delta\tau_i$, на которые разбито время зарядки τ^3 и не превышает 2,5%. Таким образом, при предварительном вычислении объема запасенного льда допустимо использовать формулу (7).

7. Результаты расчета

В табл. 1 приведены расчетные значения толщины ледяного слоя и ΔR_p и его длины L_p по сравнению с этими характеристиками $\Delta R_{и}$, $L_{и}$, заявленными изготовителем [1].

Представлены данные для льдоаккумуляторов наименьшей и наибольшей емкостей. Под емкостью понимается тепловая энергия, которую способен принять заряженный льдоаккумулятор при внутренней температуре ~ 0 °С. Устройства с промежуточными значениями запаса холода имеют аналогичные расчетные и реальные характеристики, которые не дают дополнительной информации для анализа. При вычислениях принимались следующие значения параметров: температура кипения хладагента -10 °С, труба из нержавеющей стали ($\lambda_{тп} = 22,5$ Вт/м · К) наружным диаметром 20 мм и толщиной стенки 1 мм, что соответствует данным изготовителя. Запасаемая (аккумулятивная) холодильная мощность определялась по формуле $\dot{Q}_A = \frac{Q^3}{\tau^3}$, а КПД процесса зарядки

равен отношению $\eta^3 = \frac{\dot{Q}_A}{\dot{Q}_0}$. Как видно из таблицы,

значения η^3 меняются от 0,7 до 0,9 в зависимости от толщины слоя льда. Далее принималось среднее значение 0,8.

Расчеты показывают, что толщина ледяного слоя зависит только от времени зарядки, а его длина — от

холодильной мощности. Сопоставление расчетных и реальных параметров показывает, что относительная погрешность для радиуса ледяного слоя расположена в интервале 6–33%. Эта характеристика определялась по формуле:

$$d(\Delta R) = D(\Delta R) / R_{и},$$

где: $D(\Delta R) = |\Delta R_{и} - \Delta R_p|$; D — символ максимальной абсолютной погрешности. Длина обледенелого участка трубы L_p намного меньше ее длины в конструкции $L_{и}$ и составляет от 15 до 30%. Запас длины трубы позволяет, в случае необходимости, увеличить подводимую холодильную мощность и снизить время зарядки и, как следствие, время всего цикла работы. С учетом КПД процесса зарядки $\eta^3 = 0,8$ для реализации цикла холодильной нагрузки, представленного на рис. 4, потребуется увеличенная безразмерная холодильная мощность $\kappa'_0 = 0,75$, т.е. минимальная мощность ХМ за счет потерь при зарядке возрастет на $\sim 8\%$. Суточный расход электроэнергии увеличится на ту же величину.

8. Эффективность сезонного аккумулятора холода

Эффективность использования САХ для покрытия пиков холодильной нагрузки можно оценить при условии, что ХМ постоянно производит минимальную холодильную мощность κ_{\min} , а пики холодильной нагрузки компенсируются за счет САХ, как это представлено на рис. 12. На графике безразмерной холодильной нагрузки показано, что для компенсации пиков холодильной нагрузки потребуется ХМ с относительной мощностью $1 - \kappa_{\min}$, которая будет работать в течение τ^p . Для ситуации, изображенной на рис. 4, в составе холодильной установки можно использовать постоянно работающую холодильную

Таблица 1

Сравнение расчетных характеристик зарядки льдоаккумулятора с параметрами изготовителя

Реальное изделие				Расчет								
№	Длина труб $L_{и}$, мм	Запас холода, Q^3 , кВт·ч	Толщина льда $\Delta R_{и}$, мм	Время зарядки τ^3 , ч	Аккумулятивная холодильная мощность \dot{Q}_A , кВт	Потребляемая холодильная мощность \dot{Q}_0 , кВт	КПД η^3 , %	Толщина льда ΔR_p , мм	Абсолютная погрешность $D(\Delta R)$, мм	Относительная погрешность $d(\Delta R)$, %	Длина ледяного слоя L_p , м	Относительная длина ледяного слоя dL_p , %
1	240	164	40	4,5	29,3	40	73	29,3	5,7	16,3	74,5	31,0
				12	11	15	73	54,6	19,6	56,0	41,7	17,4
	800	525	40	4,5	36,4	40	91	29,3	10,7	26,1	92,6	38,6
				12	13,7	15	91	54,6	14,6	36,5	51,9	21,6
2	240	164	40	4,5	93,5	128	73	29,3	5,7	16,3	268,1	33,5
				12	35,1	48	73	54,6	19,6	56,0	133,6	16,6
	800	525	40	4,5	116,7	128	91	29,3	10,7	26,1	296,9	37,0
				12	43,8	48	91	54,6	14,6	36,5	166,5	20,1

машину минимальной мощности ($\kappa_{\min} = 0,48$). САХ компенсирует весь суточный пик нагрузки, а мощность установленной ХМ $\Delta\kappa = \kappa'_0 - \kappa_{\min}$ уменьшится на ~36%, как это показано на рис. 12.

Экономия электроэнергии в течение суток ΔP иллюстрируется результатами расчетов, которые проведены по формуле:

$$\Delta P = (1 - \kappa_{\min}) \frac{\dot{Q}_{\max}}{\varepsilon} \tau^p = (\kappa'_0 - \kappa_{\min}) \frac{\dot{Q}_{\max}}{\varepsilon} 24.$$

Графики снижения затрат энергии за счет отсутствия зарядки льдоаккумулятора при максимальной суточной холодильной нагрузке 100 кВт представлены на рис. 13.

При этом предполагалось, что холодильный коэффициент $\varepsilon = 2,25$. Величина $\tau^p = \frac{24}{1 + \sigma}$ является ре-

шением системы (1). Анализ показывает, что эффект от использования САХ возрастает с уменьшением минимальной холодильной нагрузки κ_{\min} и падает с ростом времени работы холодильной машины (времени зарядки t^3), что определяется увеличением отношения σ . Реальные результаты применения САХ для компенсации пиков суточной нагрузки можно оценить, используя приведенный в [3] пример.

В помещении площадью 1000 м² установлен кондиционер холодильной мощностью 50 кВт. Время его работы за год 442 ч (~18,5 сут.). При $\kappa_{\min} = 0,48$ и отношении $\sigma = 14/10$ общая экономия электроэнергии составит 2650 кВт·ч.

9. Заключение

Результаты расчетов позволяют сделать вывод, что использование льдоаккумулятора способно компенсировать колебания холодильной нагрузки в течение суток. При этом уменьшается установленная мощность ХМ, но за счет двухступенчатого цикла охлаждения с меньшими перепадами температур увеличиваются необратимые потери энергии.

Замена льдоаккумулятора САХ ведет к дополнительному, примерно на 40%, падению необходимой

Обозначения:

C – термическое сопротивление, м·К/Вт;

D – символ максимальной абсолютной погрешности;

d – символ максимальной относительной погрешности;

dt – перепад температур;

F, f – функция;

L – длина, м;

P – электрическая энергия, кВт·ч;

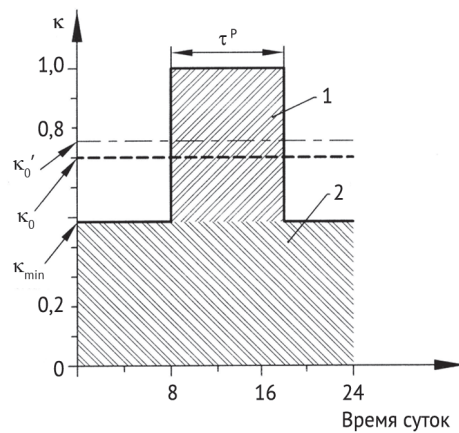


Рис. 12. Суточный график безразмерной холодильной нагрузки при кондиционировании рабочего помещения
1 – тепловая энергия, потребляемая САХ при компенсации пика холодильной нагрузки; 2 – тепловая энергия, которая потребляет постоянно работающей ХМ

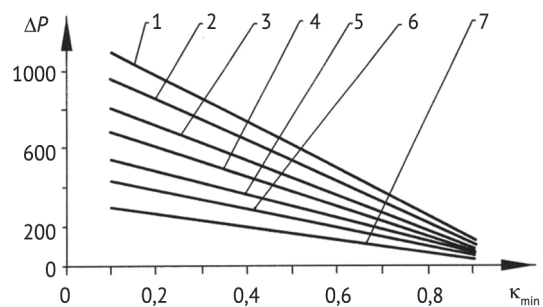


Рис. 13. Зависимость снижения затрат электроэнергии за счет использования сезонного аккумулятора холода ΔP , кВт·ч от минимальной холодильной нагрузки κ_{\min} , при максимальной суточной холодильной нагрузке 1000 кВт и значениях σ : 1 – 0,25; 2 – 0,50; 3 – 0,75; 4 – 1,00; 5 – 1,50; 6 – 2,00; 7 – 3,00

установленной мощности ХМ. Основным результатом может стать снижение потребления энергии на компенсацию пиков холодильной нагрузки практически до нуля. Как следствие, уменьшается тепловое загрязнение окружающей среды и выброс углекислого газа в атмосферу, что можно считать одним из решений актуальных экологических задач.

Q – тепловая энергия, Дж;

\dot{q} – удельный тепловой поток, Вт/м;

\dot{Q} – тепловая мощность, Вт;

\dot{Q}_0 – холодильная нагрузка, холодильная мощность, Вт;

R, r – радиус, м;

V – объем, м³;

T – температура, °К;

t – температура, °С;
 z – координата;
 φ – координата, функция;
 ε – холодильный коэффициент;
 ε_e – эксергический холодильный коэффициент;
 λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К;
 η – коэффициент полезного действия;
 σ – отношение времени;
 τ – время, с;
 $\Delta\tau$ – промежуток времени, с;
 ρ – плотность, кг/м³;
 k – безразмерная холодильная мощность;
 Λ – теплота плавления льда, Дж/кг.

Верхние индексы:

З – зарядка;

Р – разрядка.

Нижние индексы:

А – аккумулятор;
В – вода;
ВН – внутренний;
И – изготовитель;
ЛД – лед;
НР – наружный;
ОС – окружающая среда;
Р – расчет;
ТР – труба;
ХН – холодильная нагрузка;
Э – энергия;
0 – холодильная машина, испаритель, холодильная камера.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.phs-holod.ru/files/vactekh5.pdf>
2. Крылов В.И., Полянский А.Р., Синцов А.Л. Сезонный аккумулятор холода — энергосберегающая технология для России // Безопасность в техносфере. 2010. — №1(22). — С. 16–20.
3. Синцов А.Л. Энергосбережение и повышение безопасности при кондиционировании // Безопасность в техносфере. 2012. №3(36). — С. 66–72.
4. Синцов А.Л. Аккумулятор холода // Патент РФ № 2352875. — 2009.
5. Синцов А.Л. Повышение эффективности производства холода // Безопасность в техносфере. 2014. Т. 3. № 4. С. 45–50. DOI: 10.12737/5303.

REFERENCES

1. Available at: <http://www.phs-holod.ru/files/vactekh5.pdf>. (in Russian)
2. Krylov V.I., Polyanskiy A.R., Sintsov A.L. Sezonnnyy akkumulyator kholoda — energosberegayushchaya tekhnologiya dlya Rossii [Seasonal cold accumulator — energy-saving technology for Russia]. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in technosphere]. 2010, I. 1(22), pp. 16–20. (in Russian)
3. Sintsov A.L. Energoberezhenie i povyshenie bezopasnosti pri konditsionirovanii [Energy savings and increased security during conditioning]. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in technosphere]. 2012, I. 3(36), pp. 66–72. (in Russian)
4. Sintsov A.L. Akkumulyator kholoda [The cold accumulator]. Patent RF, no. РФ №2352875. — 2009. (in Russian)
5. Sintsov A. Improving the Efficiency of Cold Production. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in technosphere]. 2014. V. 3, I. 4: p. 45–50. DOI: 10.12737/5303. (in Russian)

Analyzes of Cold Accumulation

A.L. Sintsov, Senior Research Assistant, Candidate of Science (Engineering), Scientific Research Institute for Power Machine Building, Bauman Moscow State Technical University

The aim of this article is to identify opportunities of energy saving during the production of cold. Analysis of the cold accumulation in refrigeration units with variable refrigeration load was carried out in order to reduce energy consumption. Schemes of ice-water and air conditioning installations, which use ice accumulators, are presented. Varieties of ice accumulator cycles and calculation results are provided. Reduced cooling efficiency of the two-stage versus single-stage cooling is confirmed. The possibility of replacing ice accumulator with seasonal cold accumulator is considered. A one-dimensional mathematical model of ice buildup in ice accumulator is offered. The calculation results are compared with the characteristics of actual products. Energy saving by replacing ice accumulators with seasonal cold accumulators is confirmed by the results of calculations.

Keywords: refrigerator, variable cooling load, efficient use of resources, ice accumulator, seasonal cold accumulator.