

УДК 697.94

Бройда В.А. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: broida@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Целесообразность системы кондиционирования воздуха с аккумулярованием холода

Аннотация

Выполнена оценка целесообразности аккумулярования холода в системах кондиционирования воздуха. В рамках исследованных моделей (с простым баком-аккумулятором, использующим явную теплоту, и с активным аккумулятором, использующим теплоту фазовых преобразований, а также с вариантами режимных и ценовых параметров) установлено, что с учетом стоимости присоединения к сетям электроснабжения аккумулярование холода может привести к значительному снижению затрат денежных средств. Наибольший экономический эффект достигается при доле использования аккумулярованного холода ~0,4, тогда снижение приведенных затрат, учитывающих уменьшение инвестиций и годовых эксплуатационных затрат может достигать 40÷45 %.

Ключевые слова: аккумулярование холода, потребление, ночной тариф, чиллер, стоимость.

Введение

Потребление холода системами кондиционирования воздуха (СКВ) в течение суток характеризуется существенной неравномерностью. В СКВ с промежуточным теплоносителем подобная неравномерность создает предпосылки для аккумулярования холода в периоды, когда потребление низкое или отсутствует и использования аккумулярованного холода в периоды максимального потребления. Такая мера позволяет значительно снизить установочную мощность водоохлаждающей холодильной машины – чиллера, и питающих его силовых коммуникаций, что ведет к снижению инвестиций в СКВ. Существенную часть затрат составляет стоимость подключения к сетям электроснабжения, которая также зависит от установочной мощности оборудования, различается для различных регионов и видов потребителей и может быть кратно больше стоимости чиллера.

Компрессоры чиллера являются основными потребителями электроэнергии, затрачиваемой на выработку холода. Обычно основное потребление холода приходится на дневное время суток, а аккумулярование можно выполнять в ночное время, когда действует значительно более низкий тариф на электроэнергию, тем самым снижая эксплуатационные затраты. Существуют двойной (ночной, дневной), тройной тариф на электроэнергию (ночной, пиковый, полупиковый) и разрабатываются более сложные тарифы. Для различных регионов и видов потребителей электроэнергии ставки тарифов различаются, но, в настоящее время, например, соотношение ставок дневного и ночного тарифа составляет 1 к 0,4.

Чаще применяются искусственные аккумуляторы холода. Накапливаться может охлажденная вода или незамерзающий раствор, циркулирующий в системе холодоснабжения СКВ, для этого требуются баки-аккумуляторы очень большого объема. Более компактны активные аккумулярующие устройства, использующие теплоту фазового преобразования: аккумуляторы различных конструкций, накапливающие холодную жидкость со льдом; аккумуляторы на основе капсул со специально подобранным материалом, который при изменении температуры затрачивает и выделяет энергию преобразования структуры вещества. Разумеется, единица объема такого аккумулятора холода существенно дороже единицы объема простого бака-аккумулятора. Включение простых объемных баков аккумуляторов, или активных, компактных, но сложных и дорогих фазовых аккумуляторов существенно повышает инвестиции в

систему холодоснабжения. Конструкции баков-аккумуляторов, СКВ с аккумуляцией холода, некоторые оценки их эффективности рассматриваются в работах, [1 – 8 и др.].

Целью данной работы является технико-экономическая оценка целесообразности аккумулирования холода для систем СКВ.

Основная часть

Пусть холодильная нагрузка системы СКВ в расчетные сутки Q_x , кВт, описывается функцией:

$$Q_x = f(z), \quad (1)$$

где z – время, ч.

Потребление холода происходит в период времени суток от z_1 до z_2 , а расход холода в расчетные сутки Q_{xc} , кВт·ч, определяется формулой:

$$Q_{xc} = \int_{z_1}^{z_2} Q_x dz. \quad (2)$$

Время действия ночного тарифа на электроэнергию начинается в z_{1H} и заканчивается в z_{2H} , его продолжительность составляет $\Delta z_H = z_{2H} - z_{1H}$.

Без применения аккумулирования холода установочная мощность охлаждения чиллера равна максимальной потребности в холоде в расчетные сутки $Q_q = Q_{x\max}$.

При использовании аккумулирования холода установочная мощность чиллера меньше, она зависит от планируемой продолжительности работы чиллера в течение суток, Δz , ч.

$$Q_q = Q_{xc} / \Delta z. \quad (3)$$

Величина аккумулированного холода Q_{AKK} , кВт·ч, равна:

$$Q_{AKK} = Q_q \Delta z_{AKK}. \quad (4)$$

Продолжительность периода аккумулирования холода Δz_{AKK} в общем случае может быть больше, меньше или равна продолжительности действия ночного тарифа Δz_H .

Потребление электроэнергии на выработку холода в расчетные сутки составляет:

$$\Delta l = Q_q \Delta z_H / EER_H + (Q_{xc} - Q_q \Delta z_H) / EER_D, \quad (5)$$

где EER_H , EER_D – соответственно, коэффициенты преобразования энергии, характерные для ночного и дневного температурного режима работы чиллера.

Стоимость затраченной электроэнергии для расчетных суток, $С_{мэл}$, руб./сут., определяется выражением:

$$С_{мэл} = c_H \cdot Q_q \Delta z_H / EER_H + c_D \cdot (Q_{xc} - Q_q \Delta z_H) / EER_D, \quad (6)$$

где c_H , c_D – соответственно, цена электроэнергии по ночному и дневному тарифу, руб./(кВт·ч).

Стоимость электроэнергии – это главная составляющая эксплуатационных затрат. Необходимо оценить инвестиции в основное оборудование источника холода для СКВ – это чиллер и бак-аккумулятор.

Можно считать, что стоимость чиллера, $С_{mq}$, руб., пропорциональна его установочной мощности охлаждения. Кроме того, приблизительно пропорциональны мощности чиллера другие дополнительные затраты, в первую очередь стоимость подключения к электрическим сетям. Все дополнительные затраты учитываются с помощью коэффициента дополнительных затрат m , тогда:

$$С_{mq} = c_q \cdot Q_q (1 + m), \quad (7)$$

здесь c_q – цена 1 кВт охлаждающей мощности чиллера, руб./кВт.

Рассматриваются два варианта бака-аккумулятора: простой и активный, в котором используется теплота фазового преобразования (таяния-замерзания льда или изменения структуры материала). В первом случае необходимый объем бака-аккумулятора, V_1 , м³, определяется формулой:

$$V_1 = 3600 \cdot Q_{AKK} / (\Delta t_{ж} \cdot c_{ж}), \quad (8)$$

где $c_{ж}$, $\Delta t_{ж}$ – соответственно, теплоемкость рабочей жидкости (вода или незамерзающая жидкость) и разность температур рабочей жидкости, при которой происходит аккумуляция холода, кДж/(кг·°С) и °С.

Стоимость такого бака-аккумулятора, $С_{мБ-А}$, руб.:

$$С_{мБ-А} = c_{Б-А1} \cdot V_1, \quad (9)$$

где $c_{Б-А1}$ – цена 1 м³ простого бака-аккумулятора, руб./м³.

Во втором случае необходимый объем бака-аккумулятора, V_2 , м³, определяется выражением:

$$V_2 = Q_{AKK}/q, \quad (10)$$

где q – удельная аккумулирующая способность активного бака-аккумулятора, (кВт·ч)/м³.

Стоимость активного бака-аккумулятора, руб.:

$$C_{m_{B-A}} = c_{B-A2} \cdot V_2, \quad (11)$$

где c_{B-A2} – цена 1 м³ активного бака-аккумулятора, руб./м³.

Инвестиции в основное оборудование источника холода с баком-аккумулятором, $I_{И}$, руб, составляют:

$$I_{И} = C_{m_{ч}} + C_{m_{B-A}}. \quad (12)$$

Основные годовые эксплуатационные затраты связаны с расходом средств на электроэнергию $C_{m_{ЭЛ}}$. Если принять, что период эксплуатации СКВ в течение года длится τ суток, среднее потребление холода за этот период составляет долю δ от потребления холода в расчетные сутки, можно рассчитать приведенные затраты источника холода, $Пр$, руб./год:

$$Пр = C_{m_{ЭЛ}} \cdot \tau \cdot \delta + k_{ПР} \cdot I_{И}, \quad (13)$$

здесь $k_{ПР}$ – коэффициент приведения, коэффициент отнесения инвестиций к годовому периоду эксплуатации, 1/год.

Следует отметить, что в условиях плановой экономики $k_{ПР}$ был величиной нормируемой, его значения для систем обеспечения климата было равно $k_{ПР} = 0,12$ 1/год. В условиях рыночной экономики под периодом, к которому следует относить инвестиции, по-видимому, следует понимать срок окупаемости T . В работе [9] показано, что для мероприятий по энергосбережению в системах отопления вентиляции и кондиционирования при норме дисконта $r = 0,1$ с учетом накопления поступающего дохода оправданный срок окупаемости составляет $T = 8 \div 8,5$ лет. Тогда $k_{ПР} = 1/T \approx 0,12$ 1/год.

При выполнении вычислений изменение холодильной нагрузки в течение расчетных суток моделировалось гармонической функцией:

$$Q_{х} = Q + A \cdot \cos(2\pi/24(z - z_M)), \quad (14)$$

где Q , A – параметры, характеризующие изменение холодильной нагрузки, кВт; z_M – время максимальной нагрузки, ч.

Потребляемый за сутки холод $Q_{ХС}$, вычисляется следующим образом:

$$Q_{ХС} = \int_{z_1}^{z_2} Q_{х} dz = Q \cdot (z_2 - z_1) + A \cdot \frac{24}{2\pi} \left(\sin\left(\frac{2\pi}{24}(z_2 - z_M)\right) - \sin\left(\frac{2\pi}{24}(z_1 - z_M)\right) \right). \quad (15)$$

При выполнении расчетов были заданы значения $Q = 60$ кВт, $A = 40$ кВт, тогда $Q_{ХМАКС} = Q + A = 100$ кВт.

Принимались следующие значения временных параметров: $z_M = 15$ ч, $z_1 = 8$ ч, $z_2 = 22$ ч, $z_{1H} = 23$ ч, $z_{2H} = 7$ ч, $\Delta z_H = 8$ ч.

Ценовые характеристики:

- чиллера $c_{ч} = 23000$ руб./(кВт·ч);
- простого бака-аккумулятора $c_{B-A1} = 30 \div 60$ тыс. руб./м³, активного аккумулятора $c_{B-A2} = 80 \div 120$ тыс. руб./м³;
- электроэнергии по дневному тарифу $c_{д} = 5$ руб./(кВт·ч), – по ночному тарифу $c_{H} = 2$ руб./(кВт·ч).

Характеристики эффективности выработки холода зависят от типа чиллера, хладагента, температурного режима.

Перепад температур холодной воды в системе холодоснабжения обычно составляет $5 \div 6$ °С. Для заправки простого бака-аккумулятора можно принять перепад температур воды на $2 \div 3$ градуса больше, при этом можно приближенно считать, что коэффициент преобразования энергии EER практически не изменится. С одной стороны понижение температуры холодной воды на 1 °С ведет к снижению EER на $1,3 \div 1,5$ %, с другой стороны выработка холода в ночное время происходит при более низкой температуре окружающего воздуха, что у чиллера с воздушным охлаждением конденсатора повышает EER . Летний перепад дневной и ночной температур наружного воздуха для средней полосы России достигает $8 \div 10$ °С [10]. Учитывая все сказанное, можно принять в расчет значение $\Delta t_{жк} = 8$ °С. Расчеты выполнены при величине $EER_{д} = EER_{H} = 3,5$.

Для активного бака-аккумулятора с накоплением льда температура холодной жидкости при заправке значительно ниже – порядка $-5..-10$ °С. При этих условиях заметно снижается мощность охлаждения чиллера и его EER . Поэтому для такого случая мощность охлаждения чиллера принимается с повышающим коэффициентом 1,4, а для расчета режима аккумуляции используется значение EER с понижающим коэффициентом 0,85, $EER_{AKK}=3,0$, а для остального периода работы чиллера $EER=3,5$. По данным работ [1, 2] удельная аккумулирующая способность активного бака-аккумулятора достигает $q=70$ (кВт·ч)/м³.

В расчете принята продолжительность периода потребления холода $\tau=100$ суток в год, а средняя доля потребления холода за этот период $\delta=0,4$ от потребления холода в расчетные сутки.

Результаты расчетов представлены в виде графических зависимостей относительных приведенных затрат $Pr^*=Pr/Pr_0$ от величины замещения $Zам$, доли аккумулированного холода по отношению к всему его суточному потреблению, $Zам=Q_{AKK}/Q_{ХС}$.

Величина Pr_0 – приведенные затраты при тех же ценовых и режимных условиях, но без аккумуляции холода, руб./год.

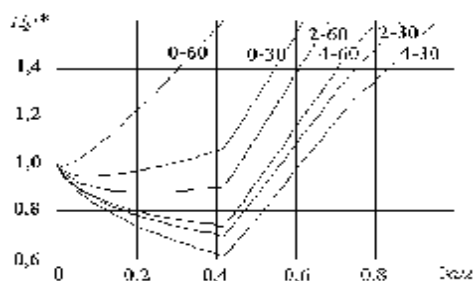


Рис.1. Зависимость относительных приведенных затрат Pr^* от величины замещения $Zам$ для системы с простым баком-аккумулятором.

Обозначение линий: первое число – параметр m , второе число – цена $c_{Б-А1}$, тыс. руб. за 1 м³

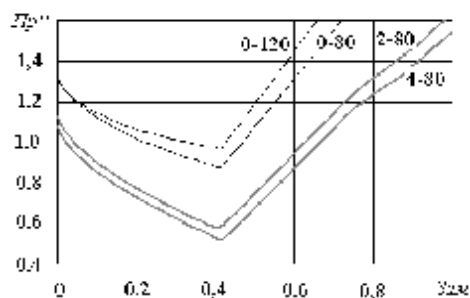


Рис. 2. Зависимость относительных приведенных затрат Pr^* от величины замещения $Zам$ для системы с активным баком-аккумулятором.

Обозначение линий: первое число – параметр m , второе число – цена $c_{Б-А2}$, тыс. руб. за 1 м³ (линии с параметрами 2-120 и 4-120 практически сливаются с показанными линиями 2-80 и 4-80)

Из результатов расчета следует, что наиболее существенным фактором, влияющим на целесообразность применения аккумулирования холода, является суммарная стоимость чиллера и подключения к сетям электроснабжения.

Для системы с простым баком-аккумулятором без учета стоимости подключения ($m=0$) при относительно невысокой цене $c_{Б-А1}=30$ тыс. руб. за 1 м³ объема бака, снижение приведенных затрат составляет менее 10 %. При цене бака $c_{Б-А1}=60$ тыс. руб. за 1 м³ приведенные затраты только возрастают при использовании аккумулирования холода. При учете стоимости подключения к электросетям ($m=2$ или $m=4$) уменьшение приведенных затрат значительно и максимальный эффект достигается при величине замещения $Zам \approx 0,4$, что соответствует минимальной установочной мощности чиллера при его 24-часовой работе в расчетные сутки.

По сути, результаты для системы с активным баком-аккумулятором аналогичны. Без учета стоимости подключения ($m=0$) снижение относительных приведенных затрат при использовании условно недорогого бака-аккумулятора $c_{Б-А2}=80$ тыс. руб. за 1 м^3 составляет около 10 % относительно $Pr^*=1$, а при использовании бака с ценой $c_{Б-А2}=120$ тыс. руб. за 1 м^3 снижение приведенных затрат незначительно. С учетом затрат на подключение к электросетям относительные приведенные затраты снижаются приблизительно на 40÷45 % при величине $Z_{ам} \approx 0,4$.

Использование ночного тарифа ограничено по времени. Увеличение доли холода, выработанного при действии ночного тарифа более $Z_{ам} \approx 0,4$, приводит к возрастанию мощности chillera, объема бака-аккумулятора и не компенсирует удорожание системы.

Заключение

В результате исследования выполнена численная оценка целесообразности использования аккумуляции холода в системах СКВ. В рамках исследованной модели (вариантов бака-аккумулятора, режимных и ценовых параметров) установлено, что с учетом стоимости присоединения к сетям электроснабжения использование баков-аккумуляторов может привести к значительному снижению затрат денежных средств. Наибольший экономический эффект достигается при доле использования аккумулятированного холода $\sim 0,4$ тогда снижение приведенных затрат, учитывающих уменьшение инвестиций и годовых эксплуатационных затрат (стоимость электроэнергии, затрачиваемой на выработку холода) может достигать 40÷45 %.

Список библиографических ссылок

1. Наумов А.Л., Селиверстов Ю.М., Ефремов В.В., Протасов Г.В. Системы кондиционирования воздуха с аккумулятором холода // АВОК, 2012, № 3. – С. 52-56.
2. Селиверстов Ю.М., Ефремов В.В. Экономика систем кондиционирования воздуха с аккумулятором холода // АВОК, 2013, № 1. – С. 30-33.
3. Бондарь Е.С., Калугин П.В. Энергосберегающие системы кондиционирования воздуха с аккумуляцией холода // СОК, 2006, № 3. – С. 44-48.
4. Сотников А.Г. Связь принципиальных решений центральных СХС с холодильной нагрузкой СКВ зданий // ИС, 2012, № 1. – С. 38-41.
5. Abduljalil A. Al-Abidin, Sohif Bin Mat, Sopian K., Sulaiman M.Y., Lim C.H., Abdulrahman Th. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, № 16. – P. 5802-5819.
6. De Falco M., Dose G., Zaccagnini A. Pcm-cold storage system: an innovative technology for air conditioning energy saving. Chemical Engineering Transactions, 2015, vol. 43. – P. 1981-1986.
7. Аккумуляторы холода «ООО Эйркул». <http://aircool.ru/> (дата обращения: 22.03.2016).
8. Табунщиков Ю.А., Шилкин Н.В. Оценка экономической эффективности инвестиций в энергосберегающие мероприятия // АВОК, 2005, № 7. – С.10-16.
9. СП. 131.13330.2012. Строительная климатология. Актуализированная версия СНиП 23-01-99*/Минрегион России. – М.: ФАУ «ФЦС», 2012. – 108 с.

Broyda V.A. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: broida@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

The expediency of the air conditioning system with cold accumulation

Resume

Consumption of cold air-conditioning systems is unequally throughout the day. This makes it possible to accumulate cold during small consumption and to use it during the

maximum consumption. This measure significantly reduces installed power of the chiller and its power of communication, which leads to a significant reduction in investment.

It needs a simple (collecting sensible heat) or active (using the heat of phase transformations) storage tank for cold accumulation, which requires additional investment.

Accumulation of cold can be done at night, with a more economical power rate, thus reducing operating costs.

This article focuses on the technical and economic evaluation of the cold accumulation for air-conditioning systems. Within of these models (simple and active storage tanks, operating and cost parameters) it is found that, usage of accumulation can lead to a significant reduction in money resources taking into account the cost of connection to the grid power.

The greatest economic effect is achieved when the share of the cold accumulation is about 0,4 of the daily cold's requirement. The decrease of resulted expenses, taking into account the reduction of investment and annual operating costs are up to 40÷45 %.

Keywords: accumulation of cold, consumption, night tariff, chiller, cost.

Reference list

1. Naumov A.L., Seliverstov Y.M., Efremov V.V., Protasov G.V. Air conditioning systems with cold accumulators // AVOK, 2012, № 3. – P. 52-56.
2. Seliverstov Y.M., Efremov V.V. Economics of air conditioning systems with cold accumulators // AVOK, 2013, № 1. – P. 30-33.
3. Bondar E.S., Kalugin P.V. Energy-saving air-conditioning system with cold accumulation // SOK, 2006, № 3. – P. 44-48.
4. Sotnikov A.G. Communication principal decisions of central CS with refrigeration load ACS buildings // IC, 2012, № 1. – P. 38-41.
5. Abduljalil A. Al-Abidin, Sohif Bin Mat, Sopian K., Sulaiman M.Y., Lim C.H., Abdulrahman Th. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, № 16. – P. 5802-5819.
6. De Falco M., Dose G., Zaccagnini A. Pcm-cold storage system: an innovative technology for air conditioning energy saving. Chemical Engineering Transactions, 2015, vol. 43. – P. 1981-1986.
7. Cold accumulators «LLC Aircool». <http://aircool.ru/> (reference date: 22.03.2016).
8. Tabunschikov Y.A., Shilkin N.V. Estimation of economic efficiency of investments in energy saving measures // AVOK, 2005, № 7. – P. 10-16.
9. SP.131.13330.2012. Building's Climatology. The updated version of SNIP 23-01-99*/Ministry of Regional Development of Russia. – M.: FAA «DSF», 2012. – 108 p.