

УДК 621.565.7

Оптимизация режимов работы холодильной установки с аккумулятором естественного холода с использованием метода термоэкономического анализа

Канд. техн. наук А. А. КРАЙНЕВ, С. А. СЕРИКОВ

ky4er87@mail.ru

Университет ИТМО

Институт холода и биотехнологий

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Представлена разработанная на базе термоэкономического анализа методика выбора оптимального режима работы холодильной установки с аккумулятором естественного холода, который используется для переохлаждения жидкого хладагента перед терморегулирующим вентилем. Приведена функциональная гидравлическая схема холодильной установки с аккумулятором естественного холода и соответствующая ей термоэкономическая модель. Даны системы уравнений, решение которых позволяет определить температурные параметры оптимального режима работы холодильной установки.

Ключевые слова: оптимизация режимов работы, аккумуляторы естественного холода, метод термоэкономического анализа, снижение энергопотребления.

Optimization of operation modes in a refrigerating unit with the accumulator of natural cold using the method of thermoeconomic analysis

Ph. D. A. A. KRAYNEV, S. A. SERIKOV

ky4er87@mail.ru

University ITMO

Institute of Refrigeration and Biotechnologies

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

The technique discussed was developed on the basis of thermoeconomic analysis. It is instrumental in choosing an optimal operating mode for a refrigerating unit with the accumulator of natural cold used to overcool a liquid refrigerant before the thermostatic expansion valve. The functional hydraulic circuit of a refrigerating unit with the accumulator of natural cold is shown, and a thermoeconomic model of such unit is demonstrated. The systems of equations are presented whose solving would help to identify temperature values for an optimal operation mode of such refrigerating unit.

Keywords: optimization of operation modes, accumulator of natural cold, method of thermoeconomic analysis, reduction of power consumption.

Применение искусственного холода и расширение областей его использования превращает современные установки в крупных потребителей энергии, при этом сооружение холодильных установок связано со значительными капитальными вложениями. При современных масштабах применения холодильной техники, даже относительно

небольшое повышение энергетической эффективности холодильных систем может дать существенный, по абсолютной величине, экономический эффект [1].

Во многом снижение энергопотребления определяется на этапе проектирования конкретного объекта путем выбора схемы, подбора оборудования и алгоритма работы. Поэтому, применение в составе холодильной установки аккумуляторов холода является одним из современных эффективных способов снижения энергозатрат на выработку холода.

В России значительная территория имеет продолжительный зимний период. Низкие зимние температуры и вечная мерзлота являются неиссякаемыми источниками естественного холода. При их использовании существенно сокращаются энергетические расходы на производство холода холодильными установками, что в конечном итоге повышает экологическую безопасность холодильных систем [2].

Переохлаждение жидкого хладагента после конденсатора — существенный способ увеличения холодопроизводительности холодильной установки. Понижение температуры переохлаждаемого хладагента на один градус соответствует повышению производительности холодильной установки примерно на 1%, при том же уровне энергопотребления [3–6].

В регенеративном цикле переохлаждение хладагента связано с увеличением работы цикла, поэтому степень переохлаждения имеет определенные ограничения.

Этого можно избежать, используя внешний источник отвода теплоты для переохлаждения жидкого хладагента до терморегулирующего вентиля (ТРВ). Одним из таких источников может стать естественный холод, аккумулированный в зимний период.

Предварительный анализ применения установки с использованием аккумулятора естественного холода для переохлаждения холодильного агента перед ТРВ,

в дальнейшем холодильной установки с аккумулятором естественного холода, показал, что при одинаковой холодопотребности применение аккумулятора естественного холода для переохлаждения холодильного агента перед ТРВ позволяет в среднем снизить энергопотребление на 27%, а приведенные затраты — на 7%. Функциональная схема холодильной установки с аккумулятором естественного холода показана на рис. 1 [2].

Повышение эффективности применения аккумулятора естественного холода может быть достигнуто как за счет совершенствования конструкции и условий протекания процессов в аккумуляторе естественного холода, так и за счет выбора наиболее рациональных режимных параметров, определяющих работу всей системы в целом. Второй путь исследования может привести к существенному экономическому эффекту. В качестве критерия для оценки эффективности работы холодильной установки с аккумулятором естественного холода может быть выбрана величина приведенных затрат, учитывающая как стоимость выбранного оборудования, так и эксплуатационные расходы, определяемые режимом работы системы.

Режим работы холодильной установки, при заданных температурах охлаждаемой и окружающей сред, зависит от перепадов температур в теплообменных аппаратах, определяющих выбор оборудования и условия его эксплуатации. Этому вопросу посвящен ряд исследований, в том числе анализ работы и оптимизация отдельных элементов и распространение (по существу — экстраполяция) полученных результатов для этих элементов на всю холодильную машину или установку. Однако, параметры работы отдельных элементов холодильной установки взаимосвязаны, поэтому выбор режима должен производиться при комплексной оптимизации всей системы в целом [1].

В связи с необходимостью рассмотрения работы системы в широком диапазоне изменения температур охлаждающей и окружающей сред, определение оптимального режима работы может быть произведено на базе математического моделирования процессов, протекающих в холодильной установке. Для корректного решения поставленной задачи математическая модель должна включать уравнения, учитывающие взаимное влияние независимых переменных, в качестве которых в рассматриваемом случае выбраны перепады температур в теплообменных аппаратах, а также величина переохлаждения холодильного агента перед ТРВ.

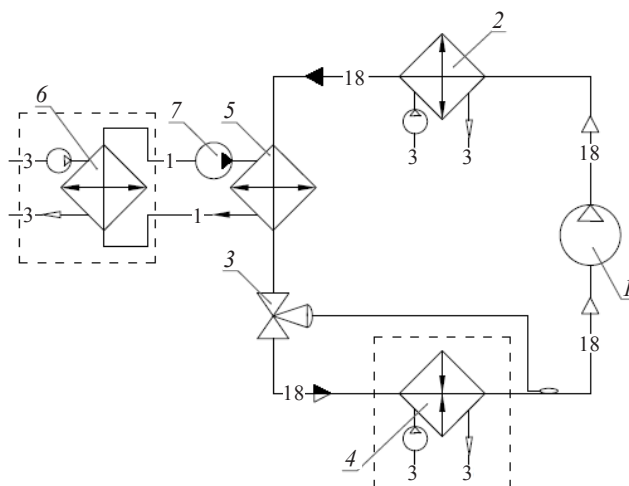


Рис. 1. Функциональные схемы холодильной установки с аккумулятором естественного холода: 1 — компрессор; 2 — конденсатор; 3 — ТРВ; 4 — охлаждаемый объект; 5 — теплообменник; 6 — аккумулятор естественного холода; 7 — насос

К различным элементам холодильной машины или установки подводится энергия. При этом работа и теплота рассматриваются как различные формы передачи энергии. Следует учесть, что теплота в теплообменных аппаратах и аккумуляторе естественного холода подводится при различных температурных потенциалах. Поэтому необходимо выбрать единую меру оценки различных форм передачи энергии. В качестве такой величины может быть выбрана эксергия. В связи с потерями в отдельных элементах холодильной установки, для получения полезного эффекта может быть использована только часть подведенной эксергии. Кроме того, отдельные элементы холодильной установки и вся система в целом характеризуются определенной величиной капитальных затрат. Это приводит к необходимости совместного учета влияния экономических и энергетических показателей. Такая задача может быть решена применением методов термoeкономического анализа [1].

В данной статье методика построения термoeкономической модели рассматривается на примере одноступенчатой холодильной установки с аккумулятором естественного холода с одной температурой кипения. Одноступенчатая холодильная установка с аккумулятором естественного холода представлена в виде последовательно включенных зон рис. 2.

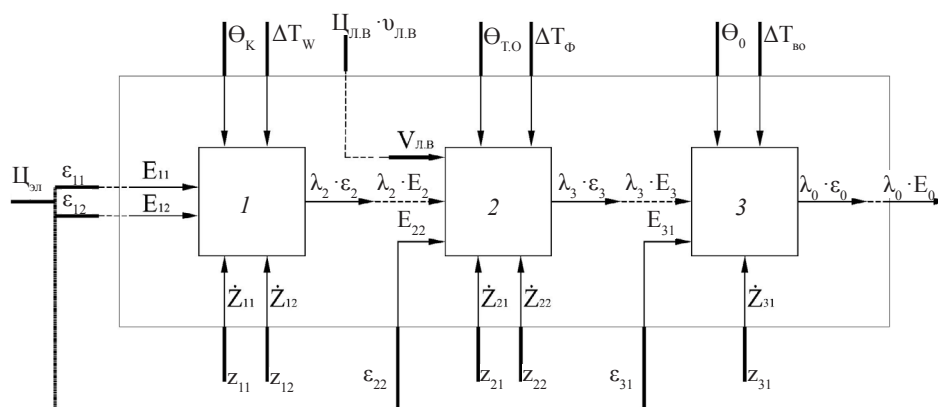


Рис. 2. Термoeкономическая схема одноступенчатой холодильной установки с аккумулятором естественного холода

Зона 1 включает в себя компрессор, конденсатор с воздушным охлаждением, терморегулирующий вентиль и насос вентилятора для подачи охлаждающей среды в конденсатор. Зона 2 объединяет бак аккумулятора, теплообменник для переохлаждения хладагента насос для транспортировки охлаждающей среды из бака аккумулятора в теплообменник. В зону 3 входят воздухоохладители и вентиляторы. В каждой из зон учитывается стоимость входящего в ее состав оборудования; при этом приняты следующие обозначения стоимости: z_{11} — компрессора; z_{12} — конденсатора; z_{21} — теплообменника; z_{22} — насоса (перекачивающего охлаждающую среду из бака аккумулятора в теплообменник); z_{31} — воздухоохладителя.

От внешнего источника вводится эксергия (энергия) с ценой $\Pi_{эл}$, руб/(кВт·ч). ϵ_{11} — для привода компрессора, ϵ_{12} — для вентилятора конденсатора, ϵ_{22} — насоса охлаждающей среды и ϵ_{31} — вентилятора воздухоохладителя.

От бака аккумулятора подводится ледяная вода, охлаждающая жидкий фреон после дросселя в количестве $v_{л.в}$, м³/ч, с ценой $\Pi_{л.в}$, руб/м³ в которую входит стоимость бака аккумулятора.

Внутри системы осуществляется передача эксергии: к зоне 2 от зоны 1 — E_2 , к зоне 3 от зоны 2 — E_3 . Приращение эксергии охлаждаемой среды равно E_0 . В качестве независимых переменных рассматриваются следующие разности температур и среднелогарифмические разности температур: θ_k — между рабочим телом и охлаждающей средой в конденсаторе; ΔT_w — воздуха, входящего в конденсатор и выходящего из конденсатора; ΔT_ϕ — фреона, входящего в теплообменник и выходящего из теплообменника; $\theta_{т.о}$ — между рабочим телом и охлаждающей средой в теплообменнике; ΔT_b — охлаждающей среды, входящей в теплообменник и выходящей из теплообменника; θ_0 — между рабочим телом и охлаждаемой средой в воздухоохладителе; $\Delta T_{в.о}$ — охлаждаемой среды, входящей в воздухоохладитель и выходящей из воздухоохладителя.

Критерии оптимизации (целевой функцией) выбраны приведенные затраты Π , которые для рассматриваемого случая могут быть описаны выражением.

$$\Pi = \{ \Pi_{эл}(\epsilon_{11} + \epsilon_{12} + \epsilon_{21} + \epsilon_{22} + \epsilon_{31}) + \Pi_{л.в} v_{л.в} + K_{а.м}(z_{11} + z_{12} + z_{21} + z_{22} + z_{31}) \} \tau_p,$$

где $\Pi_{эл}$ — цена электроэнергии, руб/(кВт·ч); τ_p — время работы установки с баком аккумулятором; ϵ_{11} , ϵ_{12} , ϵ_{22} , ϵ_{31} — количество эксергии (энергии), подводимой соответственно к электродвигателям компрессора, вентилятора конденсатора, насоса охлаждающей среды, вентилятора воздухоохладителя, кВт·ч; $K_{а.м}$ — нормативный коэффициент амортизационных отчислений.

Приведенные затраты являются функцией разностей температур в аппаратах. Поэтому минимум приведенных затрат будет достигаться при соблюдении условия

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \Delta \theta_k} = \frac{\partial \Pi}{\partial \Delta \theta_w} = \frac{\partial \Pi}{\partial \Delta \theta_{т.о}} = \frac{\partial \Pi}{\partial \Delta \theta_\phi} = \frac{\partial \Pi}{\partial \Delta \theta_{в.о}} = 0. \quad (2)$$

Для рассматриваемой термозкономической модели удельные амортизационные отчисления и затраты на текущий ремонт оборудования, так же как и подводимую извне эксергию и охлаждающую среду, в каждой зоне целесообразно представить в виде функции потока эксер-

гии, выходящей из данной зоны, и оптимизируемых переменных. В этом случае

$$\left. \begin{aligned} z_{11} &= \dot{Z}_{11}(\epsilon_2, \theta_k, \Delta T_w); & v_{л.в} &= V_{л.в}(\epsilon_3, \theta_{т.о}, \Delta T_\phi); \\ z_{12} &= \dot{Z}_{12}(\epsilon_2, \theta_k, \Delta T_w); & \epsilon_{11} &= E_{11}(\epsilon_2, \theta_k, \Delta T_w); \\ z_{21} &= \dot{Z}_{21}(\epsilon_3, \theta_{т.о}, \Delta T_\phi); & \epsilon_{12} &= E_{12}(\epsilon_2, \theta_k, \Delta T_w); \\ z_{22} &= \dot{Z}_{22}(\epsilon_3, \Delta T_\phi); & \epsilon_{22} &= E_{22}(\epsilon_3, \Delta T_\phi); \\ z_{31} &= \dot{Z}_{31}(E_0, \theta_0, \Delta T_{в.о}); & \epsilon_{31} &= E_{31}(\epsilon_0, \Delta T_{в.о}). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Величина потоков эксергии, связывающих отдельные зоны, также может быть представлена аналогично

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_2 &= E_2(\epsilon_3, \theta_{т.о}, \Delta T_\phi); \\ \epsilon_3 &= E_3(E_0, \theta_0, \Delta T_{в.о}); \\ \epsilon_0 &= E_0(Q_0, T_{ок}, T_{о.с}), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $T_{ок}$ — температура охлаждаемого объекта, °C;

$T_{о.с}$ — температура окружающей среды, °C.

Учитывая уравнения (2), (3) и (4), задача определения минимума приведенных затрат сводится к нахождению экстремума функции независимых переменных, при наличии условий связи между ними. Задачи такого типа могут быть решены с применением множителей Лагранжа. Лагранжиан для рассматриваемой функции имеет вид

$$\begin{aligned} L &= \{ \dot{Z}_{11}(\epsilon_2, \theta_k, \Delta T_w) + \dot{Z}_{12}(\epsilon_2, \theta_k, \Delta T_w) + \\ &+ \dot{Z}_{21}(\epsilon_3, \theta_{т.о}, \Delta T_\phi) + \dot{Z}_{22}(\epsilon_3, \Delta T_\phi) + \\ &+ \dot{Z}_{31}(E_0, \theta_0, \Delta T_{в.о}) + \Pi_{л.в} V_{л.в}(\epsilon_3, \theta_{т.о}, \Delta T_\phi) + \\ &+ \Pi_{эл} E_{11}(\epsilon_2, \theta_k, \Delta T_w) + \Pi_{эл} E_{12}(\epsilon_2, \theta_k, \Delta T_w) + \\ &+ \Pi_{эл} E_{22}(\epsilon_3, \Delta T_\phi) + \Pi_{эл} E_{31}(\epsilon_0, \Delta T_{в.о}) + \\ &+ \lambda_2 [E_2(\epsilon_3, \theta_{т.о}, \Delta T_\phi) - \epsilon_2] + \lambda_3 [E_3(E_0, \theta_0, \Delta T_{в.о}) - \epsilon_3] + \\ &+ \lambda_0 [E_0(Q_0, T_{ок}, T_{о.с}) - \epsilon_0] \} \tau_p, \end{aligned} \quad (5)$$

где L — лагранжиан; λ_2 , λ_3 , λ_0 — множители Лагранжа.

Условный минимум определяется из условия, в котором частные производные от лагранжиана по всем переменным, как оптимизируемым, так и введенным уравнением (5), которые рассматриваются в этом случае как независимые, равны нулю

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \theta_k} &= \frac{\partial L}{\partial \Delta T_w} = \frac{\partial L}{\partial \theta_{т.о}} = \frac{\partial L}{\partial \Delta T_\phi} = \frac{\partial L}{\partial \theta_0} = \\ &= \frac{\partial L}{\partial \Delta T_{в.о}} = \frac{\partial L}{\partial \epsilon_2} = \frac{\partial L}{\partial \epsilon_3} = \frac{\partial L}{\partial \epsilon_0} = 0. \end{aligned}$$

Из значений производных Лагранжа по ϵ_j определяются множители Лагранжа

$$\left. \begin{aligned} \lambda_2 &= \frac{\partial}{\partial \epsilon_2} (\Pi_{эл} E_{11} + \Pi_{эл} E_{12} + \dot{Z}_{11} + \dot{Z}_{12}); \\ \lambda_3 &= \frac{\partial}{\partial \epsilon_3} (\Pi_{эл} E_{22} + \Pi_{л.в} V_{л.в} + \dot{Z}_{21} + \dot{Z}_{22} + \lambda_2 E_2); \\ \lambda_0 &= \frac{\partial}{\partial \epsilon_0} (\Pi_{эл} E_{31} + \dot{Z}_{31} + \lambda_3 E_3). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Здесь E_{11} , E_{12} , $\dot{Z}_{11}$, $\dot{Z}_{12}$ являются линейными функциями ϵ_2 ; E_{22} , $V_{л.в}$, $\dot{Z}_{21}$, $\dot{Z}_{22}$; E_2 — линейной функцией ϵ_3 ; E_{31} , $\dot{Z}_{31}$, E_3 — линейной функцией ϵ_0 .

Соответственно множители Лагранжа, в рассматриваемом случае, определяют стоимость единицы потока эксергии, подводимой к каждой последующей зоне, с учетом диссипации энергии и амортизационных затрат в предыдущей зоне.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \theta_k} &= (\dot{Z}_{11} + \dot{Z}_{12} + \Pi_{эл} E_{11} + \Pi_{эл} E_{12}) = 0; \\ \frac{\partial}{\partial \Delta T_w} &= (\dot{Z}_{11} + \dot{Z}_{12} + \Pi_{эл} E_{11} + \Pi_{эл} E_{12}) = 0; \\ \frac{\partial}{\partial \theta_{т.о}} &= (\Pi_{л.в} V_{л.в} + \dot{Z}_{21} + \lambda_2 E_2) = 0; \\ \frac{\partial}{\partial T_{ф}} &= (V_{л.в} + \dot{Z}_{21} + \dot{Z}_{22} + \Pi_{эл} E_{22} + \lambda_2 E_2) = 0; \\ \frac{\partial}{\partial \theta_0} &= (\dot{Z}_{31} + \lambda_3 E_3) = 0; \\ \frac{\partial}{\partial T_{в.о}} &= (\dot{Z}_{31} + \Pi_{эл} E_{31} + \lambda_3 E_3) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Решение системы уравнений (7), с учетом выражений (6), позволяет определить значения переменных θ_k , ΔT_w , $\Delta T_{ф}$, $\theta_{т.о}$, $\Delta T_{в.о}$, соответствующих оптимальному режиму работы холодильной установки с аккумулятором естественного холода, который обеспечивает минимум приведенных затрат.

Список литературы

1. Анасовский В. В., Крайнев А. А. Выбор оптимального режима работы холодильных машин и установок с использованием метода термoeкономического анализа // Холодильная техника. 1978. № 5.
2. Крайнев А. А., Сериков С. А. Эффективность использования аккумуляторов естественного холода в составе холодильной установки. // Холодильная техника и кондиционирование. 2012. № 2. [Электронный ресурс] http://refrigeration.ihbt.ifmo.ru/ru/journal/5/journal_5.htm

3. Интернет ресурс: <http://www.mir-klimata.com/archive/mont/article/article02/>

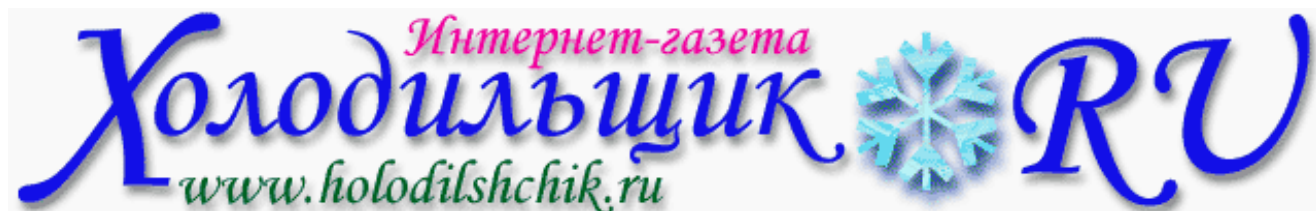
4. Холодильные машины: Учеб. для студентов вузов специальности «Техника и физика низких температур»/А. В. Бараненко, Н. Н. Бухарин, В. И. Пекарев, Л. С. Тимофеевский; Под общ. ред. Л. С. Тимофеевского. — СПб.: Политехника, 2006.

5. Лобанов И. Е., Бабакин Б. С., Айтеев Р. Б., Воронин М. И., Бабакин С. Б. Математическая модель процесса намораживания льда на сферической поверхности применительно для аккумуляторов холода // Вестник Международной академии холода. 2013. № 4.

6. Цветков О. Б., Лаптев Ю. А. Энергосбережение в холодильной технике и проблемы экологии — развитие и перспективы // Вестник Международной академии холода. 2011. № 2.

References

1. Anasovskij V. V., Krajnev A. A. *Holodil'naja tehnika*. 1978. No 5.
2. Krajnev A. A., Serikov S. A. *Holodil'naja tehnika i kondicionirovanie*. 2012. No 2. [Elektronnyj resurs] http://refrigeration.ihbt.ifmo.ru/ru/journal/5/journal_5.htm
3. Internet resurs: <http://www.mir-klimata.com/archive/mont/article/article02/>
4. *Holodil'nye mashiny: Ucheb. dlja studentov vuzov special'nosti «Tehnika i fizika nizkih temperatur»*/A. V. Baranenko, N. N. Buharin, V. I. Pekarev, L. S. Timofeevskij; Pod obshh. red. L. S. Timofeevskogo. — SPb.: Politehnika, 2006.
5. Lobanov I. E., Babakin B. S., Ajtikeev R. B., Voronin M. I., Babakin S. B. *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda*. 2013. No 4.
6. Cvetkov O. B., Laptev Ju. A. *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda*. 2011. No 2



Свидетельство о регистрации СМИ Эл № ФС 77-20452 от 22 марта 2005 года

<http://www.holodilshchik.ru> (<http://холодильщик.рф>)
e-mail: info@holodilshchik.ru

ПЕРВАЯ В РОССИИ ИНТЕРНЕТ-ГАЗЕТА ПО ХОЛОДИЛЬНОЙ И БЛИЗКОЙ ЕЙ ТЕМАТИКЕ

- холодильные новости;
- бытовое, торговое и промышленное холодильное оборудование;
- холодильники;
- охладители жидкости (чиллеры);
- оснащение и строительство супермаркетов;
- холодильный транспорт;
- кондиционирование и вентиляция;

- искусственные и природные хладагенты;
- холодильные масла;
- качество пищевых продуктов;
- сервис холодильных систем;
- литература по холодильной и близкой ей тематике;
- модульная, баннерная, видео- и аудиореклама;
- выставки, конференции, семинары;
- обучающие курсы для холодильщиков и многое другое...