

УДК 621.564; 621.577

А.В. ШЕРСТЮК, аспирант НТУ «ХПИ»;

Д.Х. ХАРЛАМПИДИ, канд. техн. наук; с.н.с. ИПМаш НАН України, Харків;

В.А. ТАРАСОВА, канд. техн. наук; н.с. ИПМаш НАН України, Харків

МОДЕРНИЗАЦИЯ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ НА ОСНОВЕ ТЕРМОЭКОНОМИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Предложена методика структурно-вариантной термоэкономической оптимизации холодильной машины. Рассмотрены вопросы выбора экономического типа испарителя для действующей установки при ее модернизации.

Ключевые слова: термоэкономика, эксергия, холодильная машина, коэффициент структурных связей, оптимизация.

Введение. В условиях длительной эксплуатации холодильной машины (ХМ) происходит естественный износ её оборудования, приводящий к снижению энергетической эффективности ХМ. Причинами этого является множество факторов, таких как отложение солей жесткости на поверхности теплообменников, увеличение гидравлических сопротивлений в результате износа деталей элементов ХМ и деформации соединительных трубопроводов, замасливание и засорение внутритрубной поверхности теплообменного оборудования и ряд других причин. Единственно возможным способом для повышения эффективности установки остается только ее модернизация, заключающаяся в замене отдельных элементов схемы.

Комплексно оценить экономическую целесообразность возможных вариантов замены оборудования при модернизации ХМ с позиции стоимости выработанного холода можно с помощью термоэкономического подхода [1]. При указанном подходе анализируется изменение технико-экономических показателей установки совместно с показателями термодинамической эффективности и оценивается вклад каждой необратимости в стоимость конечного продукта.

Анализ основных достижений и литературы. Термоэкономический подход к анализу и оптимизации ХМ нашел отражение в работах В.В. Оносовского [2]. Среди работ зарубежных авторов можно выделить работы *G. Wall* [3]. Для описания взаимосвязей между термодинамическими и экономическими параметрами в элементах используются множители Лагранжа. В предложенных термоэкономических моделях принято допущение о независимости друг от друга минимальных температурных напоров в испарителе и конденсаторе ХМ, что допустимо только в предпроектном анализе.

В более поздних работах [4, 5] получила развитие методика структурно-вариантной термоэкономической оптимизации энергопреобразующих систем, которая позволяет учесть комплексную взаимосвязь термодинамических, гидравлических и теплообменных процессов в элементах схемы совместно с технико-экономическими показателями установки. Методика является универсальной и может быть адаптирована к любой схеме термотрансформатора, поскольку основана на вычислении коэффициентов структурных связей, которые, как известно, обладают свойством инвариантности для заданной технологической схемы.

Цель исследования. Целью настоящей работы является определение минимума приведенных затрат на реконструкцию действующей ХМ при возможных вариантах

© А.В. Шерстюк, Д.Х. Харлампиди, В.А. Тарасова, 2013

замены ее неэффективного оборудования.

Методика термoeкономической оптимизации термотрансформаторов. В работах [6, 7] нами была предложена методика расчета термогидравлических режимов ХМ. Для реализации поставленной цели она была дополнена блоком расчета экономических показателей установки. Ниже приведены основные уравнения методики.

Эксергетический баланс всей системы может быть записан как [4, 5]

$$E_D^{cym}(x_i) = E_{bx}(x_i) - E_{вых}, \quad (1)$$

где x_i – варьируемый параметр элемента; E_D^{cym} – суммарные эксергетические потери системы; E_{bx} – первичный поток эксергии, входящий в систему.

Стоимость эксплуатации системы приведенная к каждому году [4]

$$\Xi_{уст}(x_i) = \tau_{экс} \cdot c_{эл} E_{bx}(x_i) + a \sum_{k=1}^n Z_k(x_i) + b, \quad (2)$$

где $c_{эл}$ – удельная стоимость входящего в систему первичного потока (привода компрессора), грн/(кВт·ч); a – коэффициент амортизации (при сроке эксплуатации 10 лет $a = 0,1$); b – стоимость технического обслуживания, которая не влияет на оптимизацию; Z_k – капитальная стоимость k -го компонента системы состоящей из n компонентов; $\tau_{экс}$ – время эксплуатации установки в году.

Дифференцируя по x_i уравнения (1) и (2), учитывая, что $\frac{\partial E_{bx}}{\partial x_i} = \frac{\partial E_D^{cym}}{\partial x_i}$, получим

выражение следующего вида

$$\frac{\partial \Xi_{уст}}{\partial x_i} = \tau_{экс} \cdot c_{k,i} \frac{\partial E_{Dk}}{\partial x_i} + a \frac{\partial Z_k}{\partial x_i}, \quad (3)$$

где E_{Dk} – эксергетические потери в элементе схемы; $c_{k,i}$ – удельная стоимость локальной эксергетической потери, которая определяется как

$$c_{k,i} = c_{эл} \pi_{k,i} + \frac{a}{\tau_{экс}} \zeta_{k,i}; \quad (4)$$

$\pi_{k,i}$ – коэффициент структурных связей $\pi_{k,i} = \left(\frac{\partial E_D^{cym}}{\partial x_i} \right) / \left(\frac{\partial E_{Dk}}{\partial x_i} \right)$; $\zeta_{k,i}$ – коэффициент капитальной стоимости, определяемый как

$$\zeta_{k,i} = \sum_{l=1}^m \left(\frac{\partial Z_l}{\partial E_{Dk}} \right)_{x_i = \text{var}_{l \neq k}}, \quad (5)$$

где $l \neq k$. Индекс l относится к другим элементам системы, за исключением того элемента, который оптимизируется. Коэффициентом $\zeta_{k,i}$ можно пренебречь, если

изменение варьируемого параметра x_i не оказывает влияние на изменение капитальной стоимости остальных элементов установки.

В уравнении (3) величина $\frac{\partial E_{Dk}}{\partial x_i}$ устанавливает влияние варьируемого параметра

в процессе на потери от необратимости в элементе системы, а величина $\frac{\partial Z_k}{\partial x_i}$ учитывает влияние изменения параметра x_i на стоимость элемента.

Приравнявая к нулю уравнение (3) определим эксергетические потери в установке, соответствующие минимуму приведенных затрат Ξ

$$\left(\frac{\partial E_{Dk}}{\partial x_i} \right)_{\text{опт}} = - \frac{a}{\tau_{\text{экс}} c_{k,i}} \cdot \left(\frac{\partial Z_k}{\partial x_i} \right). \quad (6)$$

Для термоэкономической оптимизации ХМ перепишем уравнение (6) в виде следующих параметров

$$f_1 = \tau_{\text{экс}} c_{k,i} \left(\frac{E_{Dk(x_{i+1})} - E_{Dk(x_i)}}{\Delta x_i} \right), \quad f_2 = -a \left(\frac{Z_{k(x_{i+1})} - Z_{k(x_i)}}{\Delta x_i} \right), \quad (7)$$

Если выполняется условие $f \cong f_1 - f_2 = 0$, то данное соотношение капитальных затрат и стоимости деструкции эксергии является оптимальным для ХМ.

Выбор экономичного типа испарителя для действующей установки. С помощью предложенной методики термоэкономической оптимизации ХМ рассмотрен вопрос выбора испарителя для действующей водоохлаждающей машины при ее модернизации. Номинальная холодопроизводительность $Q_0 = 15,9$ кВт. Потребляемая мощность компрессора $N_{\text{км}} = 4,59$ кВт. Установка включает в себя пластинчатый испаритель, ребристотрубный конденсатор с воздушным охлаждением (площадь поверхности 64 м^2), поршневой компрессор (объем цилиндра 100 см^3 ; число оборотов $48,3 \text{ с}^{-1}$). Хладагент R22. Расход воздуха через конденсатор 2 кг/с , расход воды через испаритель $0,9 \text{ кг/с}$. Температура хладоносителя на входе в испаритель равна $12 \text{ }^\circ\text{C}$. Температура охлаждающего конденсатор воздуха $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Необходимость замены испарителя возникла вследствие отложения солей жесткости на поверхности испарителя после 20000 часов ее эксплуатации. Следует отметить, что испаритель, равно как и конденсатор, нельзя рассматривать изолированно от всей холодильной машины. Изменение интенсивности теплопередачи при постоянной температуре хладоносителя на входе приводит к изменению температурного режима работы компрессора и, соответственно, его потребляемой мощности на единицу выработанного холода. Таким образом, выбор экономичного типа испарителя путем «слепого» перебора возможных вариантов делает эту задачу достаточно трудоемкой, поскольку накладывает дополнительные ограничения, связанные с изменением параметров другого оборудования. Структурно-вариантный подход позволяет значительно сократить поиск наилучших конструктивных решений оборудования за счет совместного расчета термодинамических и экономических показателей.

Применительно к задаче поиска экономичного типа испарителя в качестве варьируемого параметра x_i нами выбран коэффициент теплотехнической

эффektivности $\bar{\eta}_{\text{исп}} = 1 - \exp(-NTU)$. Это позволило при оптимизации воспользоваться функцией капитальной стоимости в зависимости от его эффективности [3]

$$Z_{\text{исп}} = k_{\text{исп}} m_s \sqrt{\frac{\bar{\eta}_{\text{исп}}}{1 - \bar{\eta}_{\text{исп}}}}, \quad (8)$$

где $k_{\text{исп}}$ – стоимость единицы массового потока хладоносителя, грн/(кг/с); m_s – массовый расход хладоносителя, (кг/с).

Результаты исследования. В табл. приведены расчетные характеристики модернизируемой ХМ при изменении коэффициента теплотехнической эффективности испарителя. Расчет произведен по методикам [6, 7].

Таблица

Расчетные характеристики ХМ при изменении $\eta_{\text{исп}}$

$\bar{\eta}_{\text{исп}}$	0,44	0,36	0,28	0,22	0,178
Q_0 , кВт	15,92	14,98	13,9	12,84	11,82
$N_{\text{км}}$, кВт	4,59	4,5	4,41	4,32	4,27
$E_D^{\text{сум}}$, кВт	3,091	3,103	3,143	3,168	3,229
$E_{D\text{исп}}$, кВт	0,481	0,556	0,643	0,713	0,766
$Z_{\text{исп}}$, грн	4270	3540	2960	2540	2227

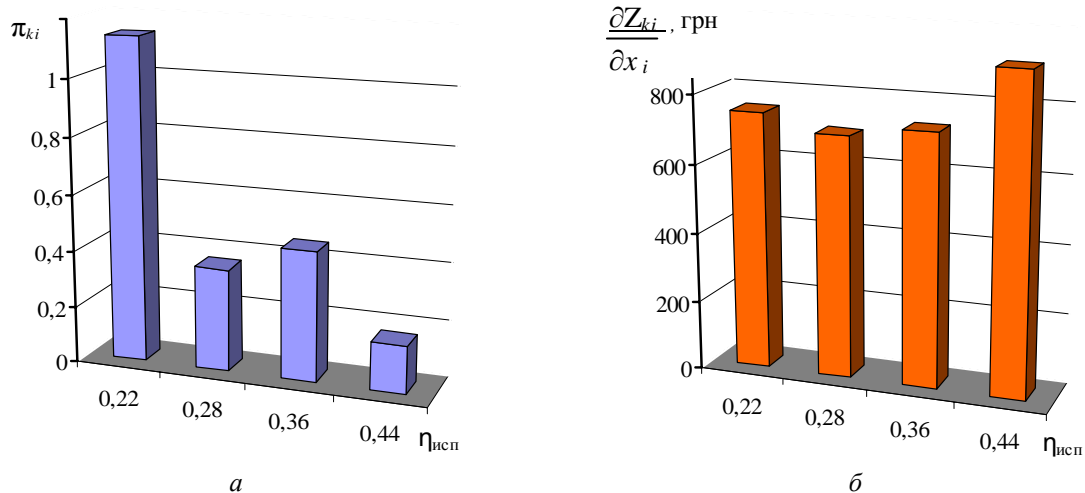


Рис. 1 – Анализ термoeкономических показателей чувствительности структурной схемы ХМ при варьировании $\bar{\eta}_{\text{исп}}$:

a – коэффициент структурных связей; *б* – изменение капитальных затрат испарителя

На рис. 1 представлено изменение коэффициента структурных связей $\pi_{k,i}$ и величины капитальных затрат при варьировании теплотехнической эффективностью испарителя.

При высокой эффективности испарителя $\bar{\eta}_{\text{исп}} = 0,44$ жесткость структурных связей в схеме ХМ высока ($\pi_{k,i} = 0,18$), в этом случае имеет место меньшее влияние деструкции эксерии в испарителе на суммарную деструкцию эксерии в ХМ (рис. 1а). С

термодинамических позиций этот вариант безусловно предпочтителен, однако по капитальным затратам он является наиболее затратным (рис. 1б).

Для возможных сроков эксплуатации $\tau_{\text{экс}}$ модернизируемой ХМ и стоимости электроэнергии c_3 определены оптимальные значения $\eta_{\text{исп}}$ (рис. 2). Точка пересечения кривых f_1 и f_2 характеризует минимум приведенных затрат на реконструкцию ХМ.

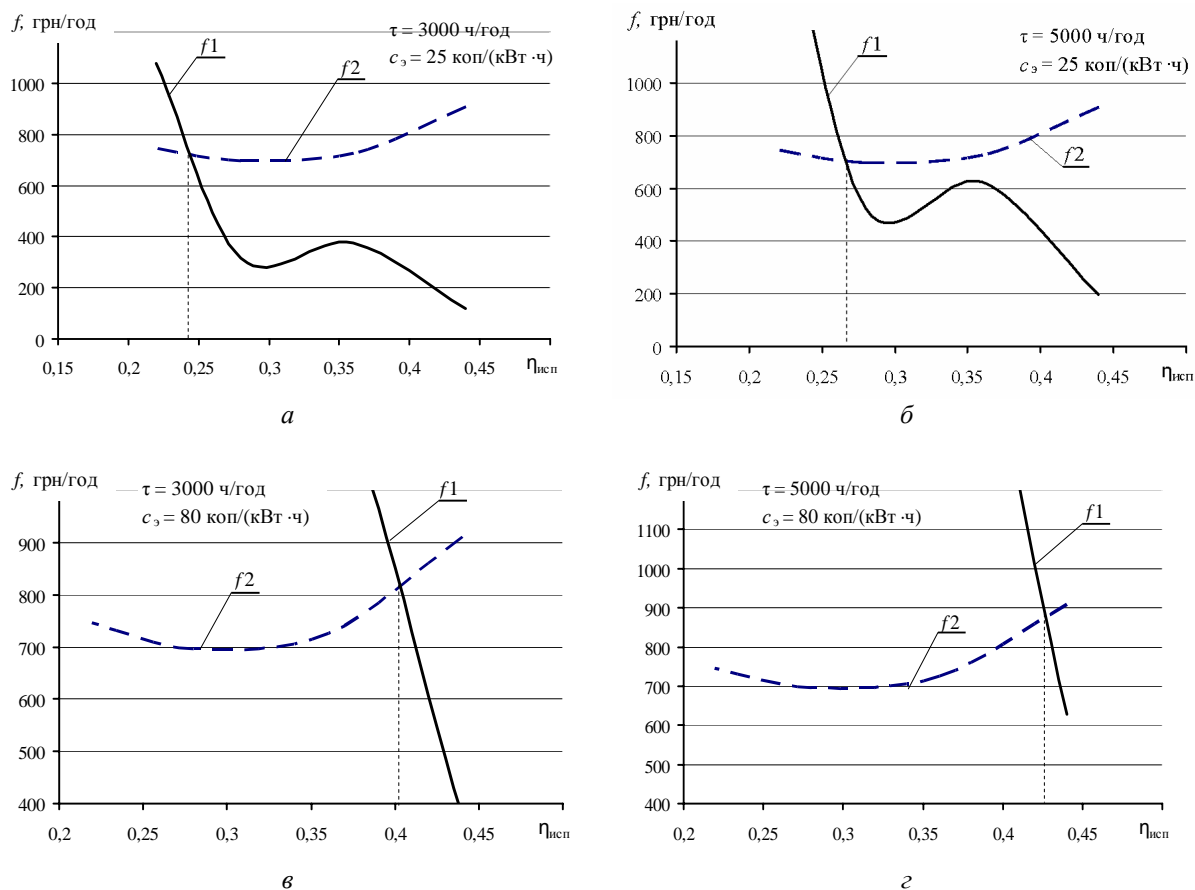


Рис. 2 – Оптимальные значения теплотехнической эффективности испарителя при:
 а – время эксплуатации в году $\tau_{\text{экс}} = 3000$ ч и $c_3 = 25$ коп/(кВт·ч); б – $\tau_{\text{экс}} = 5000$ ч и $c_3 = 25$ коп/(кВт·ч);
 в – время эксплуатации в году $\tau_{\text{экс}} = 3000$ ч и $c_3 = 80$ коп/(кВт·ч); г – $\tau_{\text{экс}} = 5000$ ч и $c_3 = 80$ коп/(кВт·ч)

Как видно из рис. 2 при дешевой электроэнергии минимум приведенных затрат смещается в сторону более низкой эффективности. Это объясняется тем, что капитальные затраты в этом случае будут преобладать над эксплуатационными. При повышении цены на электроэнергию стоимость эксеретических потерь становится определяющей, что обуславливает выбор более эффективного и дорогого испарителя.

Выводы. По результатам структурно-вариантной термоэкономической оптимизации НПП «Холод» была произведена модернизация водоохлаждающей ХМ на базе компрессора *Copeland*. Для условий эксплуатации $\tau_{\text{экс}} = 5000$ ч и $c_3 = 80$ коп/(кВт·ч) был выбран пластинчатый испаритель с площадью теплообменной поверхности $2,03 \text{ м}^2$, коэффициент теплопередачи $7000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, число единиц теплопереноса $NTU = 0,563$.

Список литературы: 1. Бродянский, В.М. Эксергетический метод и его приложения [Текст] / В.М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с. 2. Оносовский, В.В. Выбор оптимального режима работы холодильных машин и установок с использованием метода термoeкономического анализа [Текст] / В.В. Оносовский, А.А. Крайнев // Холодильная техника. – 1978. – № 5. – С. 15-20. 3. Wall, G. Optimization of Refrigeration Machinery [Text] // International Journal of Refrigeration. – 1991. – Vol. 14. – P. 336-340. 4. Seyyedi, S.M. A New Approach for Optimization of Thermal Power Based on Exergoeconomic Analysis and Structural Optimization Method: Application to the CGAM Problem [Text] / S.M. Seyyedy, H. Ajam, S. Farahat // Energy Conversion and Management. – 2010. – № 51. – P. 2202-2211. – ISSN 0196-8904. 5. D'Accadia, M.D. Thermoeconomic Optimization of Refrigeration Plant [Text] / M.D. D'Accadia, F. De Rossi // Int. Journal of Refrigeration. – 1998. – № 21. – P. 42-54. 6. Харлампи́ди, Д.Х. Расчет реверсивного кондиционера-теплового насоса при переводе его на альтернативные хладагенты [Текст] / Д.Х. Харлампи́ди, Э.Г. Братута, А.В. Шерстюк // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2012. – № 3. – С. 78-83. – ISSN 2078-5364. 7. Харлампи́ди, Д.Х. Структурный термодинамический анализ парокompрессорной холодильной машины [Текст] / Д.Х. Харлампи́ди, В.А. Тарасова // Технические газы. – 2012. – № 5. – С. 57-66. – ISSN 1682-0355.

Поступила в редакцию 15.01.13

УДК 621.564; 621.577

Модернизация холодильной машины на основе термoeкономического подхода [Текст] / А.В. Шерстюк, Д.Х. Харлампи́ди, В.А. Тарасова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 12(986). – С. 145-150. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2078-774X.

Запропоновано методику структурно-варіантної термoeкономічної оптимізації холодильної машини. Розглянуто питання вибору економічного типу випарника для діючої установки при її модернізації.

Ключові слова: термoeкономіка, термотрансформатори, ексергія, холодопродуктивність, оптимізація.

The methods of structural-variant and thermo-economic optimization of the refrigerator is proposed. The problem of the choice economical type evaporator of the real installation in modernization is considered.

Keywords: thermoeconomic, exergy, refrigerating machine, coefficient of structural bonds, optimization.