

УДК 621.577.621.564

Э. Г. БРАТУГА, д-р техн. наук, проф.; проф. НТУ «ХПИ»;
Д. Х. ХАРЛАМПИДИ, д-р техн. наук; ведущий н.с. ИПМаш НАНУ, Харьков;
А. В. ШЕРСТЮК, аспирант НТУ «ХПИ»;
Е. Л. СНИХОВСКИЙ, аспирант НАКУ «ХАИ», Харьков

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ТЕРМОЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И ДИАГНОСТИКИ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН И ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

В статье показано, что ограниченность энергетических методов анализа эффективности процессов термотрансформации обусловила развитие современных, более универсальных эксэргоекономических подходов, позволивших учесть взаимосвязанное влияние структурно-геометрических и режимных характеристик холодильных машин и тепловых насосов на их экономичность. Анализируются два класса методов: алгебраический и численный с характеристикой их особенностей, достоинств и недостатков в зависимости от технологического назначения термотрансформаторов и условий их эксплуатации, определяющих степень реализации технического потенциала энергосбережения.

Ключевые слова: холодильные машины, тепловые насосы, эксэргоекономика, диагностика.

Введение. В настоящее время на теплоснабжение жилищно-коммунального сектора Украины расходуется свыше 70 млн. тонн условного топлива, что эквивалентно 40 % от общего потребления тепловой энергии в стране. При этом на обеспечение работы холодильных машин приходится до 8 % всей производимой электроэнергии.

Внедрение систем комплексного теплоснабжения на базе тепловых насосов с использованием низкопотенциальных источников теплоты является одним из перспективных решений общей проблемы энергосбережения. Исследования [1–3] показывают, что потенциал энергосбережения за счет реконструкции холодильных установок и внедрения теплонасосной техники составляет порядка 60 % от общего потребления энергии.

Вместе с тем, реализация этого потенциала требует, помимо прочих мероприятий, использования современных методов комплексного анализа и диагностики систем термотрансформации на основе которых возможно получить максимальный эффект энергосбережения при минимуме финансовых затрат.

Цель исследования. Целью исследования является обзор существующих современных термоэкономических методов анализа и диагностики систем термотрансформации с попыткой выделить достоинства и недостатки этих методов при разработке рациональной стратегии модернизации существующего и создания нового оборудования.

Основное содержание. К настоящему времени эффективность отдельных элементов холодильных машин (ХМ) и тепловых насосов (ТН) в ряде случаев достигла такого уровня, что совершенствование их конструкций уже не оказывает существенного влияния на повышение эффективности всей системы термотрансформации. И основным резервом энергосбережения является совершенствование общих структурно-параметрических характеристик с учетом взаимосвязи и взаимовлияния элементов схемы.

© Э.Г. Братуга, Д.Х. Харлампида, А.В. Шерстюк, Е.Л. Сниховский, 2014

При такой постановке классические методы термодинамического анализа, построенные на энергетическом подходе к оценке эффективности термотрансформаторов, не позволяют реализовать указанный резерв энергосбережения. Это связано с тем, что энергетический подход, в основе которого лежат классические понятия «теплота» и «работа», нейтрален относительно качественного различия этих величин. Имеется в виду та особенность, что работа в отличие от теплоты обладает свойством полного превращения.

С нашей точки зрения именно это фундаментальное различие определило перспективность так называемых эксергетических подходов к оценке экономичности циклов, в которых происходит трансформация теплоты и работы и, когда работоспособность (эксергия) выступает универсальной характеристикой эффективности термических изменений рабочего тела. При этом особо перспективным и стремительно развивающимся является так называемый термоэкономический метод анализа.

Идея создания термоэкономики появилась еще в 30-е годы XX века, когда Ж. Кинан (*Keenan*) использовал техническую работоспособность, впоследствии названную эксергией потока, вместе с экономическими показателями для оценки стоимости целевого продукта, произведенного когенерационной установкой. Между тем, формализованной и адаптированной для широкого понимания термоэкономика стала только в 1962 г. благодаря профессору М. Трайбус (*Tribus*). В 80-х гг. Р. Гаджиоли (*Gaggioli*) возродил интерес к этим исследованиям систематизировав накопленный за два десятилетия опыт. В 1992 г. Б. Эрлах (*Erlach*) с сотрудниками разработал основы математического аппарата эксергоэкономики, назвав предложенный подход структурной теорией термоэкономики. В период с 2000 по 2010 гг. этот подход был успешно развит в работах А. Валеро (*A. Valero*) и Ц. Торрес (*C. Torres*) [4, 5]. Параллельно шло развитие термоэкономики и в другом направлении. В 80–90 гг. XX века Эль Саид (*El-Saed*), А. Бенелем (*Benelem*) и М. Фейт (*Feidt*) предложили декомпозиционную стратегию, основанную на Втором законе термодинамики в качестве одного из инструментов, облегчающих процедуру оптимизации комплексных энергопреобразующих систем [6].

Сфера применения термоэкономического анализа распространяется на ряд вариантов: отдельный расчет стоимости каждого целевого продукта, генерируемого системой, в которой имеется более одного целевого продукта; рассмотрение механизма формирования стоимости процесса и стоимостей потоков эксергии в системе; оптимизацию параметров в отдельных элементах и оптимизацию всей системы с учетом технико-экономических показателей; диагностику энергопреобразующих систем.

Термоэкономические методы могут быть поделены на два класса – алгебраические методы и численные методы.

Эти методы основаны на эксергоэкономических моделях, которые, как правило, состоят из балансовых уравнений эксергии и определяют продукт каждого компонента системы.

К числу наиболее известных относятся такие алгебраические методы как: теория эксергетической стоимости (*TEC*) [7]; теория эксергетической несовокупной стоимости (*TECD*) [8]; теория средней стоимости (*ACT*) [9]; метод удельной эксергетической стоимости (*SPECO*) [10]; модифицированный продуктивный структурный анализ (*MOPSA*) [11]; принцип местных средних затрат (*LIFO*) [12, 13]. Среди численных

методов можно выделить: термозкономический функциональный анализ (*TFA*) [14]; инженерный функциональный анализ (*EFA*) [15]; структурный анализ (*SAA*) [16].

Развитие термозкономики в последние годы сосредоточено на определении стоимости потерь эксергии в элементах связи между отдельными блоками ХМ и ТН на основе определения уровня термогидравлической необратимости в указанных элементах [17]. В работах [18, 19] разработаны топологические модели процессов преобразования эксергии и распределения затрат по потокам эксергии. Анализ этих работ показал, что проблема распределения остаточной стоимости процесса в диссипаторе, каким является конденсатор, еще не получила окончательного решения. Речь идет о методике учета потерь эксергии в процессе воздушного охлаждения конденсатора ХМ.

Можно выделить два главных критерия, используемых в термозэкономике. Это распределение стоимости остатка затрат, связанных с диссепативным элементом схемы; и распределение стоимости этого остатка пропорционально величине приращения энтропии вследствие необратимости термодинамических процессов.

Одним из важных направлений развития термозэкономики является термозэкономическая оптимизация. Объектом термозэкономической оптимизации является минимизация стоимости целевого продукта с учетом издержек термодинамической неэффективности элементов системы. Здесь можно выделить два основных метода, опирающихся в оценке экономических показателей системы на концепцию эксергии.

Первый метод, разработанный М. Трайбус (*Tribus*) и Р. Эванс (*Evans*), можно назвать автономным, он основан на использовании локальной удельной стоимости входящих и выходящих из элементов потоков эксергии [20–22].

В наиболее общем виде целевая функция термозэкономической оптимизации имеет следующий вид

$$\min_{\{x\}} c_p = \frac{C_T}{E_p} = \frac{\sum c_{ei} E_i + \sum Z_k}{E_p}, \quad (1)$$

где c_{ei} – стоимость единицы поступающей эксергии; E_i – годовое потребление эксергии из внешних источников; Z_k – капитальная стоимость элемента; E_p – эксергия производимой продукции; $\{x\}$ – совокупность параметров, по которым проводится оптимизация.

Оптимизация системы проводится на основе использования множителей Лагранжа, связанных с относящимися к ним входящими потоками эксергии. Эти множители отражают стоимость единицы эксергии, поскольку фактически являются весовыми коэффициентами той части потока эксергии, которая должна диссипировать [23].

В работах отечественных ученых, посвященных термозэкономической оптимизации пароконпресссионных термотрансформаторов, такой подход нашел отражение в работах В.В. Оносовского [24–26], среди зарубежных авторов можно особо выделить работы Г. Уолла (*G. Wall*) [27, 28].

Второй метод, предложенный Ю. Байером (*Bayer*), предусматривает вычисление удельной стоимости эксергетических потерь и называется структурным. Преимущество этого метода заключается в том, что все элементы энергопреобразующей системы могут быть оптимизированы индивидуально с использованием технико-экономических показателей. Оптимизация каждого элемента позволяет найти оптимальную структуру

системы. Применительно к оптимизации холодильных машин этот метод получил развитие в работах Д. Боер (*D. Boer*) [29, 30], М. Д'Аккадия (*M. D. Accadia*) [31, 32], И. Денсер (*I. Dinsler*) [33].

Целью оптимизации отдельного элемента системы является определение капитальной стоимости, соответствующей минимуму ежегодных эксплуатационных затрат системы при заданной минимальной удельной стоимости продукта.

Эксергетические потери в установке, соответствующие минимуму приведенных затрат, определяются по уравнению [32]

$$\frac{\partial C_T}{\partial x_{k,i}} = \pi_{k,i} c_3 \tau_{\text{экс}} \left(\frac{\partial E_{D,k}}{\partial x_{k,i}} \right) + \sum_k \left(\frac{\partial Z_k}{\partial x_{k,i}} \right) + \xi_{k,i} \left(\frac{\partial E_{D,k}}{\partial x_{k,i}} \right) = 0, \quad (2)$$

где $\pi_{k,i}$ – структурный коэффициент $\pi_{k,i} = \left(\frac{\partial E_{D,\text{сум}}}{\partial x_{k,i}} \right) / \left(\frac{\partial E_{D,k}}{\partial x_{k,i}} \right)$; $E_{D,k}$ – эксергетические потери в элементе; $E_{D,\text{сум}}$ – эксергетические потери в системе; $x_{k,i}$ – параметр, влияющий на величину эксергетических потерь; c_3 – стоимость электроэнергии, подведенной к установке; Z_k – капитальная стоимость элемента; $\tau_{\text{экс}}$ – время эксплуатации установки в текущем году; $\xi_{k,i}$ – коэффициент влияния изменения стоимости j -ых элементов $\xi_{k,i} = \sum \partial Z_j / \partial E_{D,k}$.

В уравнении (2) величина $\partial E_{D,k} / \partial x_{k,i}$ устанавливает влияние варьируемого параметра установки на потери от необратимости в элементе системы, а величина $\partial Z_k / \partial x_{k,i}$ учитывает влияние изменения параметра $x_{k,i}$ на инвестиционную стоимость элемента. Коэффициентом $\xi_{k,i}$ пренебрегают тогда, когда изменение параметра $x_{k,i}$ не влияет на стоимость j -ых элементов, отличных от k -го.

Согласно принятой в настоящее время в мире методике экономической оценки энергопреобразующих систем, вклад капитальной составляющей в стоимость продукта системы определяется из тех соображений, чтобы за срок эксплуатации установки банку, выдавшему кредит на её сооружение, была возвращена ссуда с учетом банковского процента.

Сумма, возвращаемая банку, определяется как

$$Z_k = a_{\text{д}} K_k,$$

где K_k – исходная капитальная стоимость элемента; $a_{\text{д}}$ – коэффициент восстановительной стоимости, который находится по уравнению [34]

$$a_{\text{д}} = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1}, \quad (3)$$

где r – коэффициент дисконтирования (банковский процент); n – текущий год эксплуатации установки.

Вопросы формирования эксергетической стоимости целевого продукта термотрасформатора рассмотрены в работах [16, 35]. Для корректного определения стоимости используется глубокая декомпозиция системы, позволяющая выделить целевой продукт для каждого элемента с учетом топологии системы.

При термоэкономическом анализе, авторы [12] применяют целевой подход к определению эксергетического КПД элемента в виде

$$\eta_k^{\text{экс}} = \frac{E_{P,k}}{E_{F,k}}, \quad (4)$$

где $E_{F,k}$ и $E_{P,k}$ – эксергия «топлива» и эксергия «продукта» элемента.

В понятие эксергии «топлива» входят [12, 36]:

- эксергия всех потоков, которые входят в рассматриваемый элемент системы, включая при этом эксергию привода, потребляемую в этом элементе;
- любые увеличения эксергии между входящими и выходящими потоками, которые не соответствуют целевому назначению рассматриваемого элемента;
- любые уменьшения потока эксергии между входом и выходом из элемента.

Под эксергией «продукта» понимается [12, 36]:

- эксергию материальных потоков, выходящих из рассматриваемого элемента, а также эксергию энергетического потока, произведенную в этом элементе;
- увеличение эксергии потока между входом и выходом.

Относительное различие цен эксергии «продукта» и эксергии «топлива» для элемента системы определяется [36] как

$$r_k = \frac{1 - \eta_k^{\text{экс}}}{\eta_k^{\text{экс}}} + \frac{Z_k}{c_{F,k} E_{P,k}}, \quad (5)$$

где $c_{F,k}$ – стоимость эксергии «топлива» компонента; $E_{P,k}$ – эксергия «продукта» компонента.

Абсолютное изменение цены потока рабочего вещества при прохождении через элемент записывается в виде [36]

$$\Delta c_k = \frac{Z_k + c_{F,k} E_{D,k}}{E_{P,k}}. \quad (6)$$

Стоимость деструкции в элементе

$$C_{D,k} = c_{F,k} E_{D,k}. \quad (7)$$

Эксергоэкономический фактор [12, 34, 36]

$$f_k = \frac{Z_k}{Z_k + C_{D,k}}. \quad (8)$$

В последние годы получило развитие одно из направлений термозаконономики – термозаконономическая диагностика, целью которой является выявление причин аномальной работы энергопреобразующей системы на основе декомпозиционного стоимостного анализа деструкции эксергии в её элементах. Её основателями являются представители испанской школы прикладной термодинамики А. Валеро и Ц. Торрес [4].

Термозаконономическая диагностика является относительно новым разделом общей теории эксергетической стоимости [7]. Однако, несмотря на то, что это направление современной прикладной термодинамики в научном плане наименее оформлено и проработано, его практическая значимость не вызывает сомнений, поскольку в итоге позволяет оценить реальный потенциал энергосбережения термотрансформатора и указать пути к его реализации.

Концепция термозаконономической диагностики, согласно [4], может быть сформулирована в следующем виде: *«где, сколько и какую часть потребляемой энергии можно сберечь, сохраняя постоянным качественно и количественно целевой продукт установки».*

Термoeкономическая диагностика основывается на таких понятиях как «здоровый объект» и «реальный объект». Если диагностика выполняется на уровне термодинамических циклов, то под «здоровым объектом» понимается обратимый цикл, под «реальным объектом» – действительный цикл. Если диагностика проводится для существующих систем, то в этом случае сравниваются два режима работы установки: проектный (эталонный) и реальный, в котором имеют место аномалии в работе элементов, вызванные появлением в процессе их эксплуатации дополнительных необратимостей. Установление причин аномальной работы установки по признакам деградации энергии в элементах системы и оценка стоимости дополнительно подведенной эксергии, необходимой для компенсации потерь от необратимости в «реальном объекте», составляют предмет исследования термoeкономической диагностики.

В основе методологии термoeкономической диагностики лежит следующий принцип: не вся эксергия, сберегаемая за счет выбора рациональных термодинамических режимов работы установки, является практически полезной. Реальный потенциал энергосбережения в каждой установке ограничен техническими и экономическими причинами (стоимостью материалов и производственных процессов), а повышение эффективности элемента не может быть достигнуто без увеличения суммы инвестиций [12].

Технически возможный потенциал энергосбережения в системе может быть определен как $\Delta I_T \equiv I - I^0$, где I, I^0 – суммарные потери от необратимости в реальном и эталонном режимах, соответственно.

Термoeкономическая диагностика рассматривает потери эксергии в элементах системы с учетом их неэквивалентности. Для выявления взаимосвязей между потерями используется разделение эксергетических потоков по качественному признаку «топливо» и «продукт».

Изменение потребления топлива ΔF_T , или иными словами, подведенной к системе эксергии в случае появления дополнительной необратимости в одном из элементов может быть выражено при помощи уравнения [4, 5]

$$\Delta F_T = \Delta I_T = k_1 \dots k_{i-1} \Delta k_i k_{i+1} \dots k_n P_T = k_{Fi}^* \Delta k_i P_i, \quad (9)$$

где P_T – целевой продукт установки; P_i – «продукт» i -го элемента; k_{Fi}^* – эксергетическая стоимость «топлива», подведенного к элементу; Δk_i – изменение потребления эксергии в элементе.

Эксергетический баланс i -го компонента системы может быть записан как $I_i = F_i - P_i = (k_i - 1)P_i$. Если изменяются условия эксплуатации установки, меняется её эффективность и произведенный продукт. Таким образом, технически возможный потенциал энергосбережения для системы может быть определен по уравнению

$$\Delta I_i = P_i^0 \Delta k_i + (k_i - 1) \Delta P_i. \quad (10)$$

В уравнении (10) первое слагаемое характеризует влияние на ΔI_i потерь от необратимости в i -ом элементе, непосредственно связанных с его техническим несовершенством, а второе слагаемое определяет потери эксергии в том же i -ом элементе, однако зависящие от несовершенства остальных элементов.

Выводы

1) Представленные методы термoeкономической диагностики ХМ и ТН позволяют выявить в их технологических схемах термодинамически неэффективные

элементы оборудования и участки на линиях из трубной обвязки, а также выбрать на основе технико-экономического анализа наиболее рациональные режимно-конструктивные характеристики как проектируемых, так и модифицируемых установок.

2) Одной из принципиальных и отличительных особенностей эксергоэкономического подхода явилась возможность выявить взаимосвязанное влияние отдельных элементов схемы вплоть до обнаружения того, что изменение деструкции эксергии в отдельных элементах схемы не всегда приводит к повышению термодинамической эффективности и снижению экономических затрат для всей системы.

Список литературы: 1. Коробко, Б. П. Энергетика України на базі альтернативних і відновлювальних джерел енергії. Стан і перспективи розвитку [Текст] / Б. П. Коробко, М. М. Жовнір // Ринок інсталяційний. – 2001. – № 3. – С. 7–9. 2. Родионов, Л. М. О перспективах развития и применения нетрадиционных возобновляемых источников энергии [Текст] / Л. М. Родионов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2000. – № 10. – С. 30–31. 3. Сторонський, Б. Н. Перспективи масштабного застосування теплопомпових установок [Текст] / Б. Н. Сторонський // Ринок інсталяційний. – 2002. – № 5. – С. 12–14. 4. Torres, C. Structural Theory and Thermo-economic Diagnosis. Part 1. On Malfunction and Dysfunction Analysis / C. Torres, A. Valero, L. Serra, J. Royo / Energy Conversion and Management. – 2002. – Vol. 43, № 9. – P. 1503–1518. 5. On the Thermo-economic Approach to the Diagnosis of Energy System Malfunctions. Part 2. Malfunction Definitions and Assessment [Text] / A. Valero, L. Correas, A. Zaleta, A. Lazzaretto, V. Verda, M. Reini, V. Rangel // Energy Int. J. – 2004. – № 29. – P. 1889–1907. 6. Dubey, M. Thermo-economic Optimization: Deviation in Procedures Followed as a Primitive Approach to Rankine Powered Vapour Compression Refrigeration System Using R 245 CA [Text] / M. Dubey, S. P. S. Rajput // Journal of Environmental Research And Development. – 2008. – Vol. 3, № 2. – P. 548–568. 7. Lozano, M. A. Theory of Exergetic Cost [Text] / M. A. Lozano, A. Valero // Energy. – 1993. – № 18(9). – P. 939–960. 8. Erlach, B. Structural Theory as Standard for Thermo-economics [Text] / B. Erlach, L. Serra, A. Valero // Energy Conversion and Management. – 1999. – № 40(15–16). – P. 1627–1649. 9. Bejan, A. Thermal Design and Optimization [Text] / A. Bejan, G. Tsatsaronis, M. Moran // John Wiley and Sons Inc. – 1996. – P. 113–162. 10. Lazzaretto, A. On the Calculation of Efficiencies and Costs in Thermal Systems [Text] / A. Lazzaretto, G. Tsatsaronis // Proceeding of ASME advanced energy systems division. AES-39. – New York. – 1999. – P. 421–430. 11. Kim, S. M. Exergoeconomic Analysis of Thermal Systems [Text] / S. M. Kim, S. D. Oh, Y. H. Kwon, H. Y. Kwak // Energy. – 1998. – № 23(5). – P. 393–406. 12. Тсатсаронис, Дж. Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергопреобразующей системы [Текст] / Дж. Тсатсаронис. – Одесса: Негоциант. – 2002. – 152 с. 13. Tsatsaronis, G. Exergy Costing in Exergoeconomics [Text] / G. Tsatsaronis, L. Lin, J. Pisa // Journal Energy Resource ASME. – 1993. – № 115. – P. 9–1. 14. Frangopoulos, C. A. Thermo-economic Functional Analysis and Optimization [Text] / C. A. Frangopoulos // Energy. – 1987. – № 12(7). – P. 563–571. 15. Von Spakovsky M.R. Application of Engineering Functional Analysis to the Analysis and Optimization of the CGAM Problem [Text] / M. R. Von Spakovsky // Energy. – 1994. – № 19(3). – P. 343–36. 16. 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. Seyyedi, H. Ajam, S. Farahat // Energy Conversion and Management. – 2010. – № 51. – P. 2202–2211. 17. Бродянский, В. М. Эксергетический метод и перспективы его развития [Текст] / В. М. Бродянский // Теплоэнергетика. – 1988. – № 2. – С. 14–17. 18. Филаткин, В. Н. Новое в методе термоэкономического анализа хладдоэнергетических систем [Текст] / В. Н. Филаткин, В. Т. Плотников // Холодильная техника. – 1981. – № 5. – С. 25–29. 19. Torres, C. On the Cost Formation Process of Residues [Text] / C. Torres, A. Valero, V. Rangel, A. Zaleta // Energy. – 2008. – № 33. – P. 144–152. 20. Харлампи́ди, Д. Х. Термодинамический анализ сверхкритических циклов холодильных машин и тепловых насосов [Текст] / Д. Х. Харлампи́ди, А. В. Шерстюк, Э. Г. Братута // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2011. – № 8(90). – С. 43–48. 21. Братута, Э. Г. Оптимальные условия реализации сверхкритических циклов холодильных машин и тепловых насосов [Текст] / Э. Г. Братута, А. В. Шерстюк, Д. Х. Харлампи́ди // Технические газы. – 2011. – № 6. – С. 9–14. 22. Liao, S. M. A Correlation of Optimal Heat Rejection Pressures in Transcritical Carbon Dioxide Cycles [Text] / S. M. Liao, T. S. Zhao, A. Jakobsen // Applied Thermal Engineering. – 2000. – Vol. 20. – P. 831–841. 23. Эль Саид И. М. Применение термоэкономического подхода для анализа и оптимизации испарительно-компрессионной системы опреснения [Текст] / И. М. Эль Саид, А. Апленик // Труды американского общества инженеров

механиков. Энергетические машины. – 1970. – № 1. – С. 32–42. **24.** *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. **25.** *Оносовский, В. В.* Оптимизация холодильных установок с учетом сезонных колебаний температуры окружающей среды [Текст] / В. В. Оносовский // Холодильная техника. – 1981. – № 5. – С. 19–24. **26.** *Оносовский, В. В.* Проектирование холодильных установок на основе динамической оптимизации [Текст] / В. В. Оносовский, В. Ф. Лещенко // Холодильная техника. – 1987. – № 5. – С. 35–40. **27.** *Wall, G.* Optimization of Refrigeration Machinery [Text] / G. Wall // International Journal of Refrigeration. – 1991. – Vol. 14. – P. 336–340. **28.** *Wall, G.* Thermoeconomic Optimization of a Heat pump System [Text] / G. Wall // Energy Journal. – 1986. – Vol. 11, № 11(10). – P. 957–967. **29.** *Boer, D.* Exergy and Structural Analysis of an Absorption Cooling Cycle and the Effect of Efficiency Parameters [Text] / D. Boer // International Journal of Thermodynamics. – Vol. 8(4). – 2005. – P. 191–198. **30.** Effect of Internal Heat Recovery in Ammonia-Water Absorption Cooling Cycles: Exergy and Structural Analysis [Text] / D. Boer, B. H. Gebreslassie, M. Medrino, M. Noguees / International Journal of Thermodynamics. – 2009. – Vol. 12(1). – P. 17–27. **31.** *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. **32.** *D'Accadia, M. D.* Thermoeconomic Optimization of the Condenser in Vapor Compression Heat pump [Text] / M. D. D'Accadia, L. Vanoli // Int. Journal of Refrigeration. – 2004. – № 27. – P. 433–441. **33.** *Dincer, I.* Thermodynamic, exergy an environmental impact [Text] / I. Dincer // Energy Sour. – 2000. – № 22. – P. 723–732. **34.** *Морозюк, Т. В.* Теория холодильных машин и тепловых насосов [Текст] / Т. В. Морозюк. – Одесса: Негоциант, 2006. – 721 с. **35.** Эксергоэкономический анализ систем [Текст] / Ф. Чеджне, В. Ф. Флорес, Дж. К. Ордонес, Е. А. Ботеро // Теплоэнергетика. – 2001. – № 1. – С. 74–79. **36.** *Морозюк, Т. В.* О корректном проведении эксергетического анализа [Текст] / Т. В. Морозюк // Холодильная техника. – 2006. – № 2. – С. 18–21.

Bibliography (transliterated): **1.** Korobko, B. P., and M. M. Zhovnrir. "Energetyka Ukraïny na bazi al'ternatyvnyh i vidnovljuval'nyh dzherel energii". Stan i perspektyvy rozvytku." *Rynok instaljacijnyj* 3 (2001): 7–9. Print. **2.** Rodionov, L. M. "O perspektivah razvitija i primenenija netradicionnyh vozobnovljaemyh istochnikov jenerгии." *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tehnologi XXI veka* 10 (2000): 30–31. Print. **3.** Storons'kyj, B. N. "Perspektyvy masshtabnogo zastosuvannja teplopompovyh ustanovok." *Rynok instaljacijnyj* 5 (2002): 12–14. Print. **4.** Torres, C. et al. "Structural Theory and Thermoeconomic Diagnosis. Part 1. On Malfunction and Dysfunction Analysis." *Energy Conversion and Management* 43.9 (2002): 1503–1518. Print. **5.** Valero A., et al. "On the Thermoeconomic Approach to the Diagnosis of Energy System Malfunctions. Part 2. Malfunction Definitions and Assessment." *Energy Int. J.* 29 (2004) 1889–1907. Print. **6.** Dubey, M., and S. P. S. Rajput. "Thermoeconomic Optimization: Deviation in Procedures Followed as a Primitive Approach to Rankine Powered Vapoure Compression Refrigeration System Using R 245 CA." *Journal of Environmental Research And Development* 3.2 (2008): 548–568. **7.** Lozano, M. A., and A. Valero. "Theory of Exergetic Cost." *Energy* 18 (9) (1993): 939–960. Print. **8.** Erlach, B., L. Serra and A. Valero. "Structural Theory as Standard for Thermoeconomics." *Energy Conversion and Management* 40 (15-16) (1999): 1627–1649. Print. **9.** Bejan, A., G. Tsatsaronis and M. Moran. "Thermal Design and Optimization." *John Wiley and Sons Inc.* (1996): 113–162. Print. **10.** Lazzaretto, A., and G. Tsatsaronis. "On the Calculation of Efficiencies and Costs in Thermal Systems." *Proceeding of ASME advanced energy systems division. AES-39* (1999): 421–430. Print. **11.** Kim, S. M., et al. "Exergoeconomic Analysis of Thermal Systems." *Energy* 23 (5) (1998) 393–406. Print. **12.** Tsatsaronis, Dzh. *Vzaimodejstvie termodinamiki i jekonomiki dlja minimizacii stoimosti jenergopreobrazujushhej sistemy.* Odessa: Negociant, 2002. Print. **13.** Tsatsaronis, G., L. Lin and J. Pisa. "Exergy Costing in Exergoeconomics." *Journal Energy Resource ASME* 115 (1993): 9–1. Print. **14.** Frangopoulos, C. A. "Thermo-economic Functional Analysis and Optimization." *Energy* 12 (7) (1987): 563–571. Print. **15.** Von Spakovsky, M.R. "Application of Engineering Functional Analysis to the Analysis and Optimization of the CGAM Problem." *Energy* 19 (3) 1994: 343–36. Print. **16.** Seyydi, S. M., H. Ajam and S. Farahat. "A New Approach for Optimization of Thermal Power Based on Exergoeconomic Analysis and Structural Optimization Method: Application to the CGAM Problem." *Energy Conversion and Management* 51 (2010): 2202–2211. Print. **17.** Brodjanskij, V. M. "Jeksergeticheskij metod i perspektyvy ego razvitija." *Teplojenergetika* 2 (1988): 14–17. Print. **18.** Filatkin, V. N., and V. T. Plotnikov. "Novoe v metode termoekonomicheskogo analiza hladojenergeticheskikh system." *Holodil'naja tehnika* 5 (1981): 25–29. Print. **19.** Torres, C., et al. "On the Cost Formation Process of Residues." *Energy* 33 (2008): 144–152. Print. **20.** Harlampidi, D. H., A. V. Sherstjuk and Je. G. Bratuta. "Termodinamicheskij analiz sverhkriticheskikh ciklov holodil'nyh mashin i teplovyh nasosov." *Jenergosberezenie. Jenergetika. Jenergoaudit* 8 (90) (2011): 43–48. Print. **21.** Bratuta, Je. G., A. V. Sherstjuk and D. H. Harlampidi "Optimal'nye uslovija realizacii sverhkriticheskikh ciklov holodil'nyh mashin i teplovyh nasosov." *Tehnicheskie gazy* 6 (2011): 9–14. Print. **22.** Liao, S. M., T. S. Zhao and A. Jakobsen. "A Correlation of Optimal Heat Rejection Pressures in

Transcritical Carbon Dioxide Cycles." *Applied Thermal Engineering* 20 (2000): 831–841. Print.

23. Jel' Said, I. M., and A. Aplenk. "Primenenie termoeconomicheskogo podhoda dlja analiza i optimizacii isparitel'no-kompressionoj sistemy opresnenija." *Trudy amerikanskogo obshhestva inzhenerov mehanikov. Jenergeticheskie mashiny* 1 (1970): 32–42. Print.

24. Onosovskij, V. V., and A. A. Krajnev. "Vybor optimal'nogo rezhima raboty holodil'nyh mashin i ustanovok s ispol'zovaniem metoda termoeconomicheskogo analiza." *Holodil'naja tehnika* 5 (1978): 15–20. Print.

25. Onosovskij, V. V. "Optimizacija holodil'nyh ustanovok s uchedom sezonnyh kolebanij temperatury okruzhajushhej sredy." *Holodil'naja tehnika* 5 (1981): 19–24. Print.

26. Onosovskij, V. V., and V. F. Leshhenko. "Proektirovanie holodil'nyh ustanovok na osnove dinamicheskoy optimizacii." *Holodil'naja tehnika* 5 (1987): 35–40. Print.

27. Wall, G. "Optimization of Refrigeration Machinery." *International Journal of Refrigeration* 14 (1991): 336–340. Print.

28. Wall, G. "Thermoeconomic Optimization of a Heat pump System." *Energy Journal* 11.11 (10) (1986): 957–967. Print.

29. Boer, D. "Exergy and Structural Analysis of an Absorption Cooling Cycle and the Effect of Efficiency Parameters." *International Journal of Thermodynamics* 8 (4) (2005): 191–198. Print.

30. Boer, D., et al. "Effect of Internal Heat Recovery in Ammonia-Water Absorption Cooling Cycles: Exergy and Structural Analysis." *International Journal of Thermodynamics* 12 (1) (2009): 17–27. Print.

31. D'Accadia, M. D., and F. De Rossi. "Thermoeconomic Optimization of Refrigeration Plant." *Int. Journal of Refrigeration* 21 (1998): 42–54. Print.

32. D'Accadia, M. D. and L. Vanoli. "Thermoeconomic Optimization of the Condenser in Vapor Compression Heat pump." *Int. Journal of Refrigeration* 27 (2004): 433–441. Print.

33. Dincer, I. "Thermodynamic, exergy an environmental impact." *Energy Sour* 22 (2000): 723–732. Print.

34. Morozjuk, T. V. *Teorija holodil'nyh mashin i teplovyh nasosov*. Odessa: Negociant, 2006. Print.

35. Chedzhne, F., et al. "Jeksergojekonomicheskij analiz system." *Teplojenergitika* 1 (2001): 74–79. Print.

36. Morozjuk, T. V. "O korrektnom provedenii jeksergeticheskogo analiza." *Holodil'naja tehnika* 2 (2006): 18–21. Print.

Поступила (received) 11.02.2014