

УДК 621.577

Э.Г. Братута<sup>1</sup>, В.А. Тарасова<sup>2</sup>, Д.Х. Харлампи́ди<sup>2</sup>, А.В. Шерстюк<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НТУ «Харьковский политехнический институт», ул. Фрунзе, 21, г. Харьков

<sup>2</sup> Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, ул. Дм. Пожарского, 2/10, г. Харьков, 61046

## ТЕРМОЭКОНОМИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ДИАГНОСТИКЕ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН И ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

*Предложена методика декомпозиции эксергетических потоков по целевому признаку «топливо» и «продукт» элемента для проведения термoeкономической диагностики холодильной машины и теплового насоса. Представлены результаты углубленного термодинамического анализа теплового насоса с выделением эндогенной и экзогенной составляющих деструкции эксергии в ее элементах.*

**Ключевые слова:** Термoeкономическая диагностика – Декомпозиция – Деструкция эксергии

Э.Г. Братута<sup>1</sup>, В.А. Тарасова<sup>2</sup>, Д.Х. Харлампи́ди<sup>2</sup>, А.В. Шерстюк<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НТУ «Харківський політехнічний інститут», вул. Фрунзе, 21, м. Харків

<sup>2</sup> Інститут проблем машинобудування ім. А. Н. Подгорного НАН України, вул. Дм. Пожарського, 2/10, м. Харків, 61046

## ТЕРМОЕКОНОМІЧНИЙ ПІДХІД ДО ДІАГНОСТИКИ ХОЛОДИЛЬНИХ МАШИН ТА ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ

*Запропоновано методику декомпозиції ексергетичних потоків за цільовою ознакою «паливо» та «продукт» елемента для проведення термoeкономічної діагностики холодильної машини та теплового насоса. Наведені результати поглибленого термодинамічного аналізу теплового насосу з виділенням ендогенної та екзогенної складових деструкції ексергії в її елементах.*

**Ключові слова:** Термoeкономічна діагностика – Декомпозиція – Деструкція ексергії.

E.G. Bratuta<sup>1</sup>, V.A. Tarasova<sup>2</sup>, D.Kh. Kharlampyidi<sup>2</sup>, A.V. Sherstyuk<sup>1</sup>

<sup>1</sup> NTU «Kharkiv Polytechnic Institute», 21 Frunze str., Kharkiv

<sup>2</sup> A.N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2/10 Dm. Pozharsky St. Kharkiv, 61046

## THERMO-ECONOMIC APPROACH TO DIAGNOSTICS OF REFRIGERATING MACHINES AND HEAT PUMPS

*The technique of decomposition of exergetic flow on the "fuel" and "product" of element for the thermo-economic diagnosis chiller and heat pump. The results of an in-depth analysis of the thermodynamic heat pump with the release of endogenous and exogenous components of exergy destruction in its elements.*

**Keywords:** Thermo-economic diagnosis – Decomposition – Exergy destruction.

### I. ВВЕДЕНИЕ

Современный подход к анализу, диагностике, синтезу и оптимизации энергопреобразующих систем базируется на термoeкономике [1]. Термoeкономическая диагностика позволяет системно подойти к решению практически важных вопросов, таких как формирование эксергетической стоимости продукта энергопреобразующей системы, нахождение «слабых мест» в ее технологической схеме, определение технически возможного предела повышения эффективности каждого элемента.

Потенциал термoeкономической диагностики очень высок, главным образом благодаря тому, что она позволяет: 1. Анализировать любые отклонения от реальных условий эксплуатации, выявить возможные неисправности, оценить «вину» каждого компонента в дополнительном потреблении приводной энергии всей системы; 2. Разработать систему экспертного мониторинга, которая будет предупреждать о появлении какой-либо проблемы, вызывающей снижение ее производительности относительно ее расчетного уровня. 3. Выработать единые правила и критерии, позволяющие идентифицировать «проблемный элемент».

Несмотря на столь высокий теоретический потенциал метода термоэкономической диагностики он крайне редко применялся для холодильных машин (ХМ), установок кондиционирования, и тем более для тепловых насосов (ТН). Известны немногочисленные работы отечественных и зарубежных авторов [2, 3]. Строгое применение метода для пароконденсационных ХМ и ТН достаточно сложно ввиду наличия существенно нелинейной связи между параметрами цикла. В связи с чем, эффект от аномальной работы одного элемента будет распространяться на всю установку и установить причину неэффективности бывает непросто.

## II. СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПОДХОДЫ К ПРОВЕДЕНИЮ ТЕРМОЭКОНОМИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Для корректного проведения термоэкономической диагностики необходим углубленный эксергетический анализ, учитывающий влияние в технологической схеме экзогенной и эндогенной деструкции эксергии [1, 4].

Эндогенная деструкция эксергии  $E_{D,k}^{EN}$  связана исключительно с несовершенством  $k$ -го элемента схемы. При расчете  $E_{D,k}^{EN}$  предполагается, что все остальные взаимосвязанные с ним элементы являются «идеальными», т. е. в них отсутствуют потери от необратимости. Экзогенная часть деструкции эксергии  $E_{D,k}^{EX}$ , возникающая в том же  $k$ -ом компоненте, зависит от наличия необратимостей в других компонентах схемы. Так, к примеру, при анализе процесса сжатия в холодильном компрессоре следует учитывать, что деструкция эксергии в нем зависит не только от индикаторного КПД компрессора, определяющего только эндогенную часть  $E_{D,k}^{EN}$ , но и от величины минимальных температурных напоров в испарителе и конденсаторе, а также уровня потерь давления в гидравлическом контуре хладагента, которые по отношению к компрессору определяют экзогенную составляющую деструкции  $E_{D,k}^{EX}$ . Или другой пример, чем более необратимым будет процесс сжатия в компрессоре, тем больше будет деструкция эксергии в конденсаторе. В этом случае минимальный температурный напор и гидравлические сопротивления в конденсаторе будут определять эндогенную часть  $E_{D,k}^{EN}$ , а индикаторный КПД компрессора – экзогенную  $E_{D,k}^{EX}$ .

В работе [4] предложен метод построения так называемых гибридных циклов. При построении гибридных циклов все процессы, кроме рассматриваемого процесса, должны быть идеализированы. Анализ потерь в реальном, гибридном и теоретическом цикле позволяет найти долю потерь эксергии каждого элемента схемы в потерях эксергии одного рассматриваемого элемента. Число гибридных циклов должно быть равно числу элементов в схеме ХМ. Недостатком метода построения гибридных циклов является игнорирование структуры схемы при идеализации процессов. Для

элементов имеющих собственные потери некорректно строить идеальный процесс. Для усложненных схем, включающих регенеративный теплообменник, многократное дросселирование, промежуточные сосуды, построение гибридных циклов проблематично.

Существует и другой подход к определению эндогенной и экзогенной составляющей деструкции эксергии в элементах термотрансформаторов, авторами работы [4] он назван инженерным. По результатам нескольких натуральных экспериментов или многовариантных расчетов при варьировании некоего определяющего параметра в элементе строится графическая зависимость, которая показывает, как изменение эксергетических потерь в других элементах  $E_{D,ост.}$  схемы сказывается на суммарных потерях в системе  $E_D^{cym}$ . Предполагается, что полученная зависимость  $E_D^{cym} = f(E_{D,ост.})$  линейная и описывается регрессионным уравнением  $y = bx + c$ , где  $c \equiv E_{D,k}^{EN}$ . При этом задается постоянным эксергетический КПД рассматриваемого элемента  $\eta_k^{экс} = const$ , т. е.  $E_{D,k}^{EN}$  является функцией  $\eta_k^{экс}$ . В действительности величина  $\eta_k^{экс}$  зависит от изменения потерь эксергии в других элементах, обусловленных влиянием гидравлических сопротивлений, конечной разностью теплообмена, а  $\eta_k^{экс}$  элементов связаны между собой сложными нелинейными зависимостями. Таким образом, использование инженерного подхода к вычислению  $E_{D,k}^{EN}$  и  $E_{D,k}^{EX}$  требует проведения многовариантных расчетов при постоянном эксергетическом КПД  $k$ -го компонента, когда все остальные параметры изменяются. При этом каждый раз должен варьироваться параметр, определяющий процесс в рассматриваемом компоненте. В случае ограниченной исходной информации относительно степени влияния КПД каждого процесса на эффективность всей системы нами в работе [5] предложена упрощенная схема расчета  $E_{D,k}^{EN}$  и  $E_{D,k}^{EX}$ . Недостатком инженерного подхода является отсутствие связи с термодинамическим циклом. Для усовершенствования системы важно знать, влияние какой именно необратимости в элементе больше сказывается на эндогенной, а какой на экзогенной составляющей деструкции эксергии, что можно определить только путем анализа термодинамического цикла.

Один из наиболее эффективных подходов к термоэкономической диагностике основан на представлении структуры энергопреобразующей системы в виде функциональной схемы, в которой потоки эксергии на входе и выходе из элемента подразделяются по качественному признаку «топливо» и «продукт». Определяя ресурс, потребляемый элементом (его «топливо»), и выделяя его «продукт», выражаемый через эксергию связанных материальных или энергетических потоков, можно выявить дополнительный расход «топлива», связанный с аномальной работой конкретного элемента технологической схемы. Подход, в основе которого лежит теория эксергетической стоимости

А. Валеро [6, 7], позволяет выделить в величине  $E_{D,k}^{EX}$  долю потерь эксергии, обусловленных неэффективностью смежных элементов, а также оценить затраты эксергии «топлива» всей системы связанные с  $E_{D,k}^{EN}$  в каждом элементе. В связи с этим величины  $E_{D,k}^{EN}$  и  $E_{D,k}^{EX}$  определяются по их вкладу в суммарное потребление «топлива» в системе. Авторы при этом используют несколько другую, отличную от работ [1, 4], терминологию, выделяя в элементах так называемые аномалии и дисфункции, однако по сути своей, это тот же анализ деструкции эксергии. Для определения аномалий и дисфункций, а также эксергетических стоимостей используется сравнительный анализ двух режимов эксплуатации установки: эталонного и реального, в котором имеют место аномалии в работе элементов, вызванные появлением дополнительных необратимостей в процессе эксплуатации установки.

Эндогенная деструкция (аномалия) связана с увеличением удельного потребления «топлива» в рассматриваемом элементе по сравнению с эталонным режимом. Экзогенная деструкция (дисфункция) связана с аномалиями других элементов, которые вызвали изменение в производстве «продукта» в рассматриваемом элементе. Подход предусматривает матричную форму записи эксергетических балансов и использование метода графов.

Одним из недостатков данного подхода является то, что результаты диагностики здесь целиком зависят от корректной процедуры декомпозиции эксергетических потоков. Однако не всегда однозначно можно обозначить выходящий из элемента поток как «продукт». Анализ известных методик [3, 8] декомпозиции эксергетических потоков в ХМ и ТН показал, что среди авторов имеют место противоречивые представления относительно понятий «топливо» и «продукт» элемента применительно к ХМ и ТН.

В связи с этим в настоящей работе предпринята попытка создания методики декомпозиции эксергетических потоков в ХМ и ТН на основе теории эксергетической стоимости. Проведена термоэкономическая диагностика ТН, позволившая выявить причины неэффективности основных элементов по сравнению с эталонным режимом работы установки, идентифицировать долю эндогенной и экзогенной составляющей деструкции эксергии в них и определить связанные с ними дополнительные затраты эксергии «топлива» всей системы.

### III. ДЕКОМПОЗИЦИЯ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТОКОВ

Дополнительное потребление «топлива» установкой  $\Delta F_T$ , вызванное наличием аномалий в работе ее элементов определяется по уравнению [6, 7]

$$\Delta F_T = \Delta P_{yem} + \sum_{k=1}^n \Delta E_{D,k} + \sum_{k=1}^n \Delta R_k, \quad (1)$$

где  $\Delta P_{yem}$  – изменение эксергии «продукта» установки;  $\Delta E_{D,k}$  – изменение деструкция эксергии;  $\Delta R_k$  – изменение эксергии остатков, т. е. потоков отводимых от диссипативных элемента в окружающую среду.

Выявление целевого назначения каждого потока требует записи уравнений баланса эксергии для  $k$ -го элемента

$$F_k - P_k = E_{D,k} + R_k, \quad (2)$$

где  $F_k$  – «топливо» элемента;  $P_k$  – «продукт» элемента;  $E_{D,k}$  – деструкция эксергии в элементе;  $R_k$  – остаток.

Таким образом, выражение для топлива можно представить в виде:

$$F_k = E_{0k} + \sum_i E_{ik} \quad (3)$$

где  $E_{0k}$  – потоки эксергии от внешних источников;  $E_{ik}$ , – потоки эксергии, являющиеся «продуктами» других элементов и поступающие в  $k$ -ый элемент в виде «топлива». Поток с индексом  $i$  будет положительный, если он поступает из  $i$ -го элемента в  $k$ -ый и отрицательный, если поток выходит из  $k$ -го элемента и поступает в  $i$ -ый элемент.

«Продукт» элемента равен

$$P_k = E_{k0} + \sum_k E_{ki}, \quad (4)$$

где  $E_{k0}$  – потоки эксергии, являющиеся «продуктом» для окружающей среды;  $E_{ki}$  – потоки эксергии, выходящие из  $k$ -го элемента в качестве «продукта» и входящие в  $i$ -ый элемент как «топливо».

Удельное потребление эксергии определяется как отношение «топлива» к «продукту» элемента

$$\kappa_k = \sum_{i=0}^n \kappa_{ik} = F_k / P_k, \quad (5)$$

где  $\kappa_{ik} = E_{ik} / P_k$ .

В соответствии с рекомендациями работ [6, 7] эксергетическую стоимость потока  $E_{ik}^*$  можно представить в виде

$$E_{ik}^* = \kappa_{ik}^* \cdot E_{ik}, \quad (6)$$

где  $\kappa_{ik}^*$  – удельная эксергетическая стоимость, которая равна эксергии, потребленной элементом для производства 1 кВт его «продукта», кВт/кВт.

Если поток  $E_{ik}$  относится к «продукту»  $i$ -го элемента, то по правилу эксергетической стоимости [6]  $\kappa_{ik}^* = \kappa_{P,i}^*$ . Удельная эксергетическая стоимость «продукта»  $k$ -го элемента определяется с учетом потерь в других элементах по формуле:

$$\kappa_{P,k}^* = \kappa_{0k} + \sum_{i=0}^n \kappa_{ik} \kappa_{P,i}^*. \quad (7)$$

Стоимость остатков, распределяемых между элементами, определяется как

$$R_{ki}^* = \kappa_{P,k}^* \rho_{ki} P_i, \quad (8)$$

где  $\rho_{ik}$  определяет долю остатков  $i$ -го диссипативного элемента в стоимости  $k$ -го элемента [9].

Аномалия в элементе определяется по формуле

$$MF_k = \sum_{i=0}^n MF_{ik} = \sum_{i=0}^n \Delta k_{ik} P_k^0 \quad (9)$$

где  $\Delta k_{ik}$  – изменение удельного потребления эксергии в элементе по сравнению с эталонным режимом;  $P_k^0$  – продукт элемента в эталонном режиме.

Дисфункция определяется как:

$$DF_k = \sum_{i=0}^n (k_{P,i}^* - 1) \Delta k_{ik} P_k^0. \quad (10)$$

Дополнительное потребление «топлива» установкой  $\Delta F_T$  можно выразить через  $MF$  и  $DF$

$$\Delta F_T = \sum_{k=1}^n \Delta I_k = \sum_{k=1}^n \left( MF_k + \sum_{i=1}^n DF_{ki} \right) = \sum_{k=1}^n MF_k^*, \quad (11)$$

где  $MF_k^*$  – стоимость аномалии в элементе (затраты «топлива» системы на устранение  $E_{D,k}^{EN}$ ;  $\Delta I_k$  – изменение потерь эксергии в элементе.

Для корректного составления функциональной схемы «топливо-продукт» эксергетический поток следует разделять на термическую и механическую части. Для определения термической  $E_i^T$  и механической  $E_i^M$  составляющей потока полной эксергии  $E_i$  используются рекомендации работы [10].

#### IV. ТЕРМОЭКОНОМИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ТН

С целью апробации представленной выше методики нами была произведена термоэкономическая диагностика сплит-кондиционера, работающего в режиме ТН, хладагент R134a. Теплопроизводительность ТН в эталонном режиме составляла 1,834 кВт, а потребляемая мощность компрессора 0,33 кВт. Температура воздуха на входе в конденсатор 18°C. Температура и давление окружающей среды принимались равными  $T_{oc} = 12$  °C и  $P_{oc} = 101$  кПа.

На рисунке 1 представлена функциональная схема одноступенчатого парокомпрессионного термотрансформатора, на которой в рамках указана нумерация входящих и выходящих из элементов эксергетических потоков, а цифры без рамок – характерные точки цикла ТН.

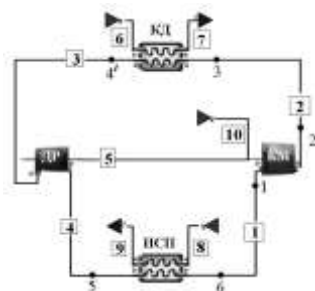


Рисунок 1 – Функциональная схема парокомпрессионного термотрансформатора

Разделение потоков на «топливо» и «продукт» для ТН представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Разделение эксергетических потоков на «топливо» и «продукт» для ТН

Поток	$E$ , кВт	Эталонный режим	Реальный режим	Выход	Т/П	Вход	Т/П
1	$E_1^T$	0,0013	0,0017	ИСП	Т	КМ	П
2	$E_2$	0,4649	0,4288	КМ	П	КД	Т
3	$E_4^I$	0,3365	0,3131	КД	Т	ДР	Т
4	$E_5^T$	0,0597	0,0677	ДР	Т	ИСП	Т
5	$E_5^M$	0,2529	0,2212	ДР	П	О.С.	Т
6	$E_6$	0,0110	0,0110	О.С.	П	КД	Т
7	$E_7$	0,1100	0,1013	КД	П	О.С.	Т
8	$E_8$	0,0000	0,0000	О.С.	П	ИСП	Т
9	$E_9$	0,0097	0,0095	ИСП	П	О.С.	Т
10	$E_1^{N+M}$	0,5892	0,5517	О.С.	П	КМ	Т

В таблице 1 Т – «топливо»; П – «продукт»;  $E_6, E_7$  – эксергия воздуха на входе и выходе из испарителя;  $E_8, E_9$  – эксергия воздуха на входе и выходе из конденсатора;  $N$  – мощность электропривода; КМ – компрессор; КД – конденсатор; ДР – дроссель; ИСП – испаритель; О.С. – окружающая среда.

Существующие методы декомпозиции эксергетических потоков представляют дроссельный вентиль либо как диссипативный элемент ввиду того, что после дросселя увеличивается энтропия хладагента [1], либо как элемент производящий термическую эксергию [3]. В рассматриваемом подходе введение в функциональную схему окружающей среды в качестве виртуального элемента позволило механическую эксергию после дросселя представить его «продуктом» и одновременно «топливом» для окружающей среды. Это требует пояснения. Механическая эксергия, которая возникает после процесса расширения в дросселе, зависит только от параметров данного процесса и  $P_{oc}$ . Следующим элементом, в котором происходит существенное изменение механической эксергии, является компрессор. Испаритель не является потребителем механической эксергии, в нем происходит изменение только термической части эксергии. Поэтому механическая эксергия поступает в компрессор через виртуальный элемент О.С. минуя испаритель.

Для представления эксергетических балансов в матричной форме и решения задачи методом графов был использован универсальный решатель «TAESS-irce».

Результаты диагностики ТН приведены на рисунках 2 - 4. Повышение удельной эксергетической стоимости в реальном режиме связано с аномалиями в работе испарителя, при этом в стоимости его «продукта» также возрастает доля эксергетической стоимости компрессора (рисунок 2).

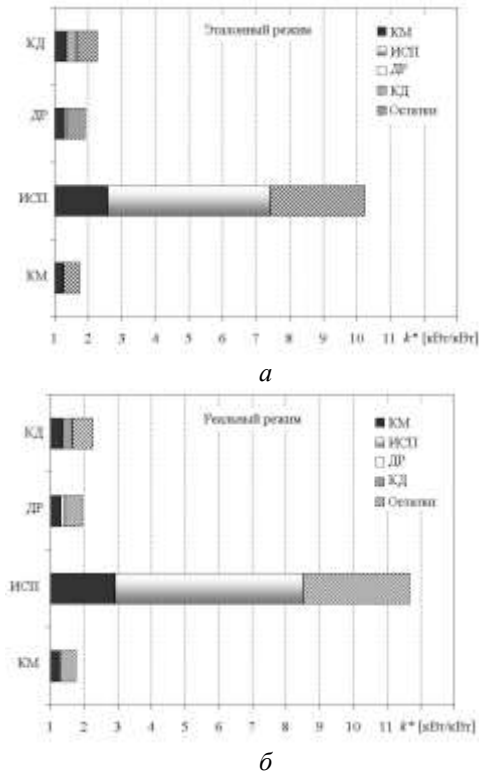


Рисунок 2 – Удельная эксергетическая стоимость в эталонном а) и реальном б) режимах работы ТН

Характер распределения составляющих эксергетических потерь в элементах ТН по сравнению с эталонным режимом представлен на рис. 3. Как можно видеть величина аномалии  $MF$  увеличилась в КМ, ИСП и ДР, а в КД произошло уменьшение  $MF$ , что связано со снижением тепловой мощности КД и снижения температуры конденсации. В величине дисфункции КМ и ДР уменьшилась доля продукта, связанного с отбором теплоты от низкопотенциального источника, что свидетельствует о снижении холодопроизводительности. Доля продукта в величине дисфункции КМ уменьшилась в реальном режиме, однако при этом возросла доля необратимости связанная с испарителем.

Установлено, что несмотря на уменьшение мощности привода компрессора и холодопроизводительности в реальном режиме, затраты на устранение аномалий в элементах возросли по сравнению с эталонным режимом (рисунок 4). В эталонном режиме потребление топлива расходуется в основном на производство «продукта». Стоимость  $MF^*$  для испарителя имеет самое большое значение, что говорит о том, что он является «проблемным элементом» диагностируемого ТН.

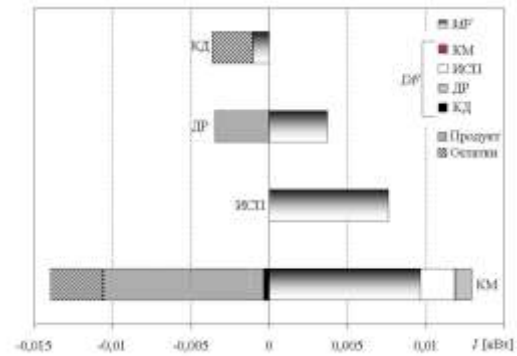


Рисунок 3 – Распределение потерь эксергии в элементах ТН

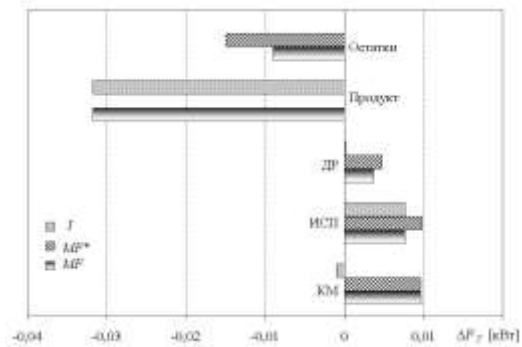


Рисунок 4 – Изменение потребления «топлива» в ТН

## V. ВЫВОДЫ

Предложенная методика декомпозиции эксергетических потоков по целевому признаку позволила представить дроссельный вентиль как элемент производящий механическую эксергию в виде «продукта» для окружающей среды, а термическую часть эксергии как «топливо» для испарителя. Это дало возможность корректно оценить взаимовлияние эксергетических потерь в элементах ТН и выявить «проблемный элемент».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тсатсаронис Дж. Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергопреобразующей системы. – Одесса: Негоциант. – 2002. – 152 с.
2. Ломцов П.Б. Диагностика энергетичної ефективності холодильних і тепло насосних систем: Автореф. на здоб. канд. тех. наук. 05.05.14, Одеса 2003. –19 с.
3. D'Accadia M. D., De Rossi F. Thermoeconomic analysis and diagnosis of a refrigeration plant// Energy Conversion and Management. – 1998.– № 39. – P. 1223 – 1232.
4. Kelly S., Tsatsaronis G., Morosuk T. Advanced Exergetic Analysis: Approaches for Splitting the Exergy Destruction into Endogenous and Exogenous Parts//Energy. – 2009. – №. 34. – P. 384 -391.

5. Харлампи́ди Д.Х., Тарасова В.А., Харлампи́ди Х.Э. Вопросы структурного термодинамического анализа парокompрессионных термотрансформаторов// Вестник КТУ, 2013.– С. 82-88.
6. Torres C., Valero A., Serra L., Royo J. Structural Theory and Thermoeconomic Diagnosis Part 1. On Malfunction and Dysfunction Analysis // Energy Conversion and Management. – 2002. - Vol. 43, № 9. – P. 1503-1518.
7. Valero A., Correas L., Zaleta A., Lazzaretto A., Verda V., Reini M., Rangel V. On the Thermoeconomic Approach to the Diagnosis of Energy System Malfunctions. Part 2. Malfunction Definitions and Assessment// Energy Int. J. – 2004. – № 29. – P. 1889 -1907.
8. Santos J., Nascimento M., Lora E., Reyes A. M. On the Negentropy Application in Thermoeconomics: A Fictitious or an Exergy Component Flow // International Journal of Thermodynamics. – 2009. – Vol. 12, № 4. – P. 163 – 176.
9. Torres C. On the Cost Formation Pprocess of the Residues// In Proceedings of the 19<sup>th</sup> International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Enviromental Impact of Energy Systems. Crete, Greece, July 12-14, 2006, p. 415-424.
10. Харлампи́ди Д.Х., Тарасова В.А. Термоэкономическая диагностика парокompрессорной холодильной машины// Технические газы. – 2013. – №. 1. – С. 30- 39

## REFERENCES

1. Tsatsaronis D. Vzaimodeistvie termodinamiki i ekonomiki dlya minimizatsii stoimosti energopreobrazuyuschei sistemy. – Odessa: Negotsiant. – 2002. – 152 s.
2. Lomtsov P.B. Diagnostika energetichnoi effektivnosti kholodilnikh i teplonasosnikh sistem: Avtoreferat na zdob. kand. tekhn. nauk 05.05.14, Odessa 2003. –19 s.

3. D'Accadia M. D., De Rossi F. Thermoeconomic analysis and diagnosis of a refrigeration plant// Energy Conversion and Management. – 1998.– № 39. – P. 1223 – 1232.
4. Kelly S., Tsatsaronis G., Morosuk T. Advanced Exergetic Analysis: Approaches for Splitting the Exergy Destruction into Endogenous and Exogenous Parts//Energy. – 2009. – №. 34. – P. 384 -391.
5. Kharlampydi D.Kh., Tarasova V.A., Kharlampydi Kh.E. Вопросы структурного термодинамического анализа парокompрессионных термотрансформаторов// Вестник КТУ, 2013.– С. 82-88.
6. Torres C., Valero A., Serra L., Royo J. Structural Theory and Thermoeconomic Diagnosis Part 1. On Malfunction and Dysfunction Analysis // Energy Conversion and Management. – 2002. - Vol. 43, № 9. – P. 1503-1518.
7. Valero A., Correas L., Zaleta A., Lazzaretto A., Verda V., Reini M., Rangel V. On the Thermoeconomic Approach to the Diagnosis of Energy System Malfunctions. Part 2. Malfunction Definitions and Assessment// Energy Int. J. – 2004. – № 29. – P. 1889 -1907.
8. Santos J., Nascimento M., Lora E., Reyes A. M. On the Negentropy Application in Thermoeconomics: A Fictitious or an Exergy Component Flow // International Journal of Thermodynamics. – 2009. – Vol. 12, № 4. – P. 163 – 176.
9. Torres C. On the Cost Formation Pprocess of the Residues// In Proceedings of the 19<sup>th</sup> International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Enviromental Impact of Energy Systems. Crete, Greece, July 12-14, 2006, p. 415-424.
10. Kharlampydi D.Kh., Tarasova V.A. Termoeconomicheskaya diagnostika Parokomppressornoi kholodilnoi mashini // Tekhnicheskiye gazi. – 2013. – №. 1. – S. 30-39

---

Получена в редакции 07.10.2013, принята к печати 14.10.2013