

В. А. Тарасова, канд. техн. наук
Д. Х. Харлампи,
д-р техн. наук

Институт проблем
машиностроения
им. А. Н. Подгорного
НАН Украины,
Харьков,
e-mail:

kharlampidi@ipmach.kharkov.ua,
tarasova@ipmach.kharkov.ua

УДК 621.577

ТЕРМОЭКОНОМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОНАСОСНОЙ УСТАНОВКИ НА ОС- НОВЕ НЕГЭНТРОПИЙНОГО ПОДХОДА К ФОРМИРОВАНИЮ СТОИМОСТИ ЦЕ- ЛЕВОГО ПРОДУКТА

Сучасний підхід до визначення ціни цільового продукту енергоперетворюючої системи ґрунтується на використанні апарату термoeкономiки, що розглядає потоки ексергiї як носiї вартостi, а цiну кiнцевого продукту пов'язує з кожним етапом перетворення ексергiї. На основi використання поняття про негентропiю потоку запропоновано нову термoeкономiчну модель теплонасосної установки, що дозволяє проводити її термoeкономiчний функцiональний аналіз з визначенням вартостi деструкцiї ексергiї в кожному елементi.

Ключові слова: негентропія, термoeкономiчна модель, теплонасосна установка.

1. Введение

Отечественными и зарубежными учеными с конца 70 гг. прошлого века развивается и популяризируется метод термoeкономического анализа, который позволяет глубоко раскрыть причины неэффективной работы систем термотрансформации, оценить затраты, связанные с потреблением ресурсов и термодинамической необратимостью, выявить пути более эффективного использования первичной энергии [1, 2]. Для этого используется совместный анализ термодинамических превращений и экономических показателей. Основой для назначения затрат в термoeкономике служит эксергия. Денежные затраты, в частности, являются выражением неэффективности процессов, а информация о формировании затрат может быть использована для оптимизации установки.

Термoeкономика предоставляет инженеру инструментарий, используя который можно определить для любого материального и энергетического потока системы размер общих затрат на получение данного термодинамического состояния и в итоге выйти на стоимость целевого продукта термотрансформатора. В отличие от холодильной машины (ХМ), которой, как известно, нет альтернативы в производстве холода, выработка тепла теплонасосной установкой (ТНУ) всегда будет являться альтернативой по сравнению с традиционным способом, основанном на сжигании органического топлива. В связи с этим при выборе нетрадиционного способа отопления задача определения стоимости тепла с учетом термодинамической эффективности ТНУ приобретает особую значимость, поскольку от стоимости тепла, выработанного установкой, напрямую зависят масштабы внедрения ТНУ в Украине.

2. Основные подходы к решению задачи о формировании стоимости тепла и холода

В термoeкономике для графического отображения распределения эксергетических потоков в установке при производстве целевого продукта используется функциональная схема. Ее основное преимущество заключается в том, что она четко показывает взаимосвязи между потоками эксергии в установке и дает возможность проследить, как «продукт» одной подсистемы распределяется для использования в качестве входных данных для другой или же в качестве конечного «продукта» установки [3]. На функциональной схеме показывается как фактическое оборудование системы, в котором происходит обмен веществом, так и фиктивные элементы, через которые проходят искусственные (фиктивные) потоки. Функциональная схема дает в некотором смысле интуитивное представление о связях между элементами системы, в связи с чем субъективная оценка целевого продукта элемента неизбежна. От того, как производится декомпозиция эксергетических потоков на функциональной схеме, зависят результаты термoeкономического анализа. Чем глубже концептуальное разукрупнение системы на компоненты и потоки, тем точнее описывается процесс формирования эксергетической стоимости ее целевого продукта.

Например, в работе [4] на функциональной схеме термотрансформатора физическая эксергия разделяется на энтальпийную и энтропийную части. При этом любое увеличение энтропии в процессе относят к «топливу» элемента, а уменьшение, соответственно, – к «продукту». В других работах [5 – 7] фиктивные потоки позволяют рассматривать энергетические взаимодействия между элементами только в термомеханических пределах (изменение термической и механической составляющих эксергии). Общим, на наш взгляд, недостатком рассмотренных термоэкономических моделей является то, что стоимость деструкции не участвует в стоимостном балансе, а назначается директивно по стоимости «топлива» элемента. Нам представляется, что для описания процесса формирования стоимости целевого продукта ХМ или ТНУ стоимости деструкции эксергии должна определяться из решения уравнений стоимостных балансов, так же, как и стоимость энергетических потоков.

Недостаток всех субъективных подходов к распределению затрат заключается в самой возможности двусмысленной оценки целевого продукта элемента и, в первую очередь, продукта диссипативного, каким является конденсатор. Конденсатор нельзя рассматривать в отрыве от остальной части установки, поскольку в противном случае его целевой продукт не может быть идентифицирован, а соответственно, невозможно корректно определить его КПД. Для диссипативного элемента вообще неочевиден его эксергетический продукт, т. к. он отводит в окружающую среду остаточные потоки с фактически нулевым содержанием эксергии без получения какого-либо термодинамически полезного продукта. Под остаточным потоком в термоэкономике понимается неиспользуемый сток эксергии, который для завершения термодинамического цикла рассеивается в окружающую среду [6, 7]. Затраты на осуществление этого стока приравниваются к дополнительным затратам диссипативного элемента. Поясним назначение конденсатора ХМ с позиций термоэкономического функционального анализа. В парокомпрессионных холодильных циклах функциональное назначение конденсатора заключается в «закрытии» цикла, т. е. обеспечении наименьшего значения энтропии рабочего тела в цикле путем отвода тепла в окружающую среду. Конденсатор также выполняет функцию «очистки системы», заключающуюся в отводе в окружающую среду теплоты трения, генерируемой при температуре ниже температуры окружающей среды. Процесс передачи теплоты от хладагента к окружающей среде (наружный воздух) сопряжен с энергетическими и неэнергетическими затратами. Поскольку нагретый в конденсаторе ХМ воздух не является полезным продуктом, то затраты на его нагрев должны быть распределены между остальными элементами системы пропорционально изменению эксергии потока хладагента в конденсаторе. В этой связи важным является вопрос: что служит критерием для распределения затрат, связанных с остаточным потоком для циклов термотрансформаторов?

Обзор методов термоэкономики, применяемых для решения задачи формирования эксергетической стоимости тепла и холода, показал, что в настоящее время существует дискуссия относительно того, насколько эксергия, как главный критерий качества энергии, является необходимой и достаточной основой для распределения затрат, или же наряду с эксергией в термоэкономической модели возможно использование других критериев.

Введение в термоэкономике в 1987 г. Х. Франгопулосом понятия о негэнтропии потока послужило основой для создания в дальнейшем метода термоэкономического функционального анализа энергопреобразующих систем (ТФА), в котором наряду с эксергией в качестве критерия распределения затрат, связанных с остаточным потоком, выступает негэнтропия [8]. Математически негэнтропия может быть записана в виде изменения энтропии в процессе со знаком « \leftarrow », умноженным на температуру окружающей среды T_{oc} и массовый расход хладагента $m_{хл.}$. Обоснованием для использования негэнтропии $S^{нег} = -m_{хл.}T_{oc}\Delta s_i$ в качестве критерия для распределения остатков может быть следующее. По определению, уменьшить энтропию рабочего тела значит произвести негэнтропию, которая может рассматриваться как «топливо» для тех элементов, в которых термодинамический процесс сопровождается увеличением энтропии.

В настоящей работе представилось целесообразным разработать новую термоэкономическую модель ТНУ, основанную на использовании понятия о негэнтропии потока. В предлагаемой модели в дальнейшем будем называть ее $E-S$, при составлении функциональной схемы наравне с эксергией (превратимая часть энергии) рассматривается и негэнтропия в виде потоков, участвующих в процессе формирования стоимости целевого продукта системы.

3. Процедура составления функциональной схемы и математическое описание термозкономической модели ТНУ

При формировании стоимости целевого продукта термотрансформатора непревратимая часть энергии нами рассматривается в качестве присоединяемого к потоку эксергии фиктивного потока, входящего в элемент как «топливо» или исходящего из него как «продукт» в зависимости от функционального назначения элемента в системе. Как известно, превратимая часть энергии совершает в цикле полезную работу, а непревратимая (потери, характеризуемые повышением энтропии) «вливаются» в качестве балласта в продукт системы и отводится из цикла через диссипативный элемент (конденсатор) к потребителю в случае ТНУ или же в окружающую среду в случае ХМ.

Уравнение эксергетического баланса для каждого элемента установки записывается как

$$\sum E_k^{BX} - \sum E_k^{BЫX} = E_{Dk} + E_{Lk}, \quad (1)$$

где $\sum E_k^{BX}$, $\sum E_k^{BЫX}$ – эксергетические потоки на входе в элемент и на выходе из него; E_{Dk} – деструкция эксергии; E_{Lk} – потери эксергии в окружающую среду.

В терминах ТФА уравнение (1) следует записывать в виде

$$F_k - P_k = L_k, \quad (2)$$

где F_k – «топливо» элемента; P_k – «продукт» элемента; L_k – поток энергии, уходящий из системы в окружающую среду.

Для диссипативных элементов, таких, как конденсатор ХМ, $L_k \neq 0$. Однако этот поток уходит из системы и в дальнейшем не участвует в процессе формирования стоимости целевого продукта, поэтому его стоимость приравнивается нулю. Для всех остальных элементов системы $L_k = 0$. Из (2) следует, что «топливом» и «продуктом» элемента могут быть как эксергетические, так и фиктивные потоки. При разделении эксергетических потоков на «топливо» и «продукт» используются известные правила эксергоэкономического анализа (F и P) [9], согласно которым любое уменьшение эксергии является «топливом», а увеличение – «продуктом» элемента. Для фиктивных потоков элемент, в котором происходит уменьшение энтропии рабочего тела, является производителем негэнтропии, а элементы, в которых происходит уменьшение энтропии, – потребителями негэнтропии. Следует отметить, что с точки зрения реальной эксплуатации установки ХМ и ТНУ поток негэнтропии не имеет никакого физического смысла, однако он представляется важной величиной для определения затрат на устранение деструкции в элементах.

Применительно к анализу ХМ использование негэнтропийного подхода не вызывает затруднений, поскольку ее целевой продукт (холод) отводится к потребителю через испаритель, который не является диссипативным элементом [10]. В отличие от ХМ, целевым продуктом ТНУ, который идет к потребителю, является отводимая от диссипативного элемента теплота. Это несколько затрудняет процедуру разделения потоков эксергии и негэнтропии на «топливо» и «продукт», так как конденсатор в данном случае имеет два «продукта» (эксергию теплоты и негэнтропию), а испаритель – ни одного. Во избежание ошибок при составлении функциональной схемы ТНУ целевым продуктом ТНУ следует считать отбор тепла от низкопотенциального источника в испарителе. В целом это возможно

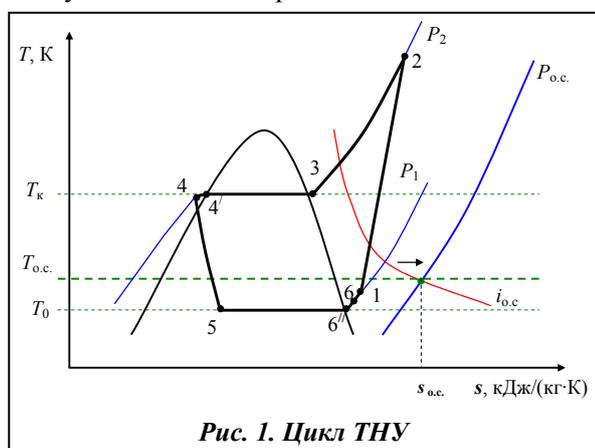


Рис. 1. Цикл ТНУ

по причине того, что для ТНУ важно обеспечить эффективный как в энергетическом, так и в экономическом отношении отбор тепла от низкопотенциального источника, а отвод тепла к приемнику (потребителю) уже обусловлен самим ходом осуществления термодинамического цикла.

На рис. 1 показан цикл ТНУ в T - S диаграмме, а на рис. 2 представлена функциональная схема ТНУ с выделением на ней потоков эксергии и негэнтропии с учетом стоимостных показателей. На рис. 1 индекс о. с. обозначает параметры окружающей среды, T , P , i – температура, давление и энтальпия хладагента.

На рис. 2 приняты следующие обозначения:

КМ – компрессор; КД – конденсатор; ДР – дроссель; ИСП – испаритель; Q_0 – холодопроизводительность; Q_k – теплопроизводительность; N_{KM} – мощность привода компрессора; N_B – мощность вентилятора; τ – время работы установки за год; S^{HEG} – поток негэнтропии; Z_k – капитальная стоимость k -го элемента; c_3 – стоимость электроэнергии по тарифу; c_k – удельная стоимость потока эксергии; c_{sk} – удельная стоимость потока негэнтропии. Знак (+) здесь обозначает, что все потоки (энергетические и неэнергетические затраты), связанные с дросселем, присоединяются к испарителю.

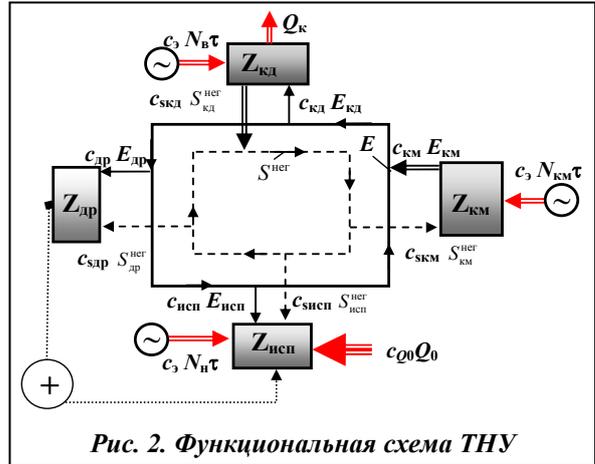


Рис. 2. Функциональная схема ТНУ

Потоки E и S^{HEG} на рис. 2 направлены в противоположных направлениях в сторону уменьшения эксергии и негэнтропии хладагента от элемента к элементу ТНУ. Все исходящие из элементов потоки эксергии и негэнтропии относятся к «продукту», а входящие являются «топливом» элемента.

Разделение потоков эксергии и негэнтропии на «топливо» и «продукт» для теплонасосной установки представлено в таблице.

Эксергетические балансы и разделение на «топливо» и «продукт» потоков эксергии и негэнтропии для элементов ТНУ

Элемент ТНУ	Уравнение эксергетического баланса	«Топливо» и «продукт» элемента ТНУ
компрессор	$E_{DKM} = N_{KM} + E_1 - E_2$, где $E_{DKM} = T_{o.c.} m_{xл} (s_2 - s_1)$	$F_{KM} = (N_{KM} + T_{o.c.} m_{xл} (s_1 - s_2)) = N_{KM} + S_{KM}^{HEG}$ $P_{KM} = (E_2 - E_1) = E_{KM}$
		$F_{KD} = (E_2 - E_4) = E_{KD}$ $P_{KD} = T_{o.c.} m_{xл} (s_4 - s_2) = S_{KD}^{HEG}$ $L_{KD} = Q_k$
конденсатор	$E_{DKD} = E_2 - E_4 - E_{Qk}$, где $E_{DKD} = Q_k (1 - \theta_k) - T_{o.c.} m_{xл} (s_2 - s_4)$	
дроссель	$E_{DDR} = E_4 - E_5$, где $E_{DDR} = T_{o.c.} m_{xл} (s_5 - s_4)$	$F_{DR} = (E_4 - E_5) + T_{o.c.} m_{xл} (s_4 - s_5) = E_{DR} + S_{DR}^{HEG}$
испаритель	$E_{DISP} = E_5 - E_6 + E_{Q0}$, где $E_{DISP} = T_{o.c.} m_{xл} (s_6 - s_5) - Q_0 (1 - \theta_i)$	$F_{ISP} = E_5 - E_6 + T_{o.c.} m_{xл} (s_5 - s_6) = E_{ISP} + S_{ISP}^{HEG}$ $P_{ISP} = [-Q_0]$

В таблице приняты следующие обозначения: θ_i, θ_k – температурный фактор Карно для испарителя и конденсатора; E_{Q_0}, E_{Q_k} – эксергия холода и тепла соответственно.

Поскольку «топливом» и «продуктом» элемента в ТФА не всегда является поток эксергии, то эксергетический КПД элемента следует определять по зависимости

$$\eta_k = 1 - \frac{E_{Dk}}{E_{Fk}}$$

где E_{Fk} – потоки эксергии, отнесенные к «топливу» элемента.

Стоимостной баланс можно записать в следующем виде [11]:

$$c_{Pk} P_k = c_{Fk} F_k + Z_k, \tag{3}$$

где c_{Pk}, c_{Fk} – удельные стоимости «продукта» и «топлива» в k -м элементе системы соответственно.

Ниже приведен алгоритм определения стоимости потоков эксергии и негэнтропии в ТНУ. Согласно (3), с учетом правила P [9], определяем удельную стоимость эксергетического «продукта» компрессора

$$c_{KM} = \frac{c_3 \tau N_{KM} + c_{SKM} S_{KM}^{HEG} + Z_{KM}}{E_{KM}},$$

где $c_{s_{км}}$ – удельная стоимость негэнтропии компрессора. В первом приближении стоимость негэнтропии принимается равной 1, в дальнейшем уточняется в ходе итераций.

Эксергетические стоимости остальных элементов ТНУ определяются как

$$c_{кд} = c_{др} = c_{исп} = \left(\frac{c_{км} E_{км}}{E_{кд} + E_{др} + E_{исп}} \right).$$

Для конденсатора стоимость негэнтропии записывается как стоимость «продукта» элемента

$$c_{скд} S_{кд}^{нег} = c_{кд} E_{кд} + c_{э} \tau N_{в} + Z_{кд}.$$

Удельная стоимость потоков негэнтропии находится по выражению

$$c_{s_{км}} = c_{s_{др}} = c_{s_{исп}} = \left(\frac{c_{скд} S_{кд}^{нег}}{S_{км}^{нег} + S_{др}^{нег} + S_{исп}^{нег}} \right).$$

При определении стоимости целевого продукта установки (холод) стоимостные потоки эксергии и негэнтропии, а также капитальные затраты, связанные с дросселем, рассматриваются в качестве «топлива» испарителя

$$C_{ЦП} = c_{Q_0} Q_0 = c_{исп} E_{исп} + c_{др} E_{др} + c_{э} \tau N_{н} + c_{s_{исп}} S_{исп}^{нег} + c_{s_{др}} S_{др}^{нег} + Z_{исп} + Z_{др}.$$

Стоимость деструкции эксергии в k -м элементе записывается как

$$C_{Dk} = c_{sk} E_{Dk}.$$

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 ее сооружение, была возвращена ссуда с учетом банковского процента.

Сумма, возвращаемая банку, определяется как

$$Z_k = a_{д} \bar{Z}_k,$$

где \bar{Z}_k – базовая капитальная стоимость элемента; $a_{д}$ – коэффициент восстановительной стоимости, который находится по уравнению [12]

$$a_{д} = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1}, \quad (4)$$

где r – коэффициент дисконтирования; n – годы эксплуатации установки.

4. Результаты исследования

Для численной реализации предложенной модели нами проведен расчет статических характеристик ТНУ типа «вода–воздух» по методике [13]. Проектные характеристики ТНУ следующие: холодопроизводительность в расчетном режиме составляет 16,8 кВт, теплопроизводительность – 21,6 кВт; температура испарения равна 6,2 °С; температура конденсации 45,9 °С; расход воды через испаритель – 1 л/с; расход воздуха через конденсатор – 2,88 м³/с; Температура воды на входе в испаритель равна 12 °С; температура воздуха на входе в конденсатор 32 °С, относительная влажность воздуха – 37,2%. Рабочее вещество – R22. Компрессор «Maneurop MT 64». Конденсатор воздушный с пластинчатым оребрением, площадью поверхности 56 м², диаметр труб конденсатора – 12 мм, число рядов труб – 3, количество труб в ряду – 18. Длина одной трубки равна 1400 мм. Размеры соединительных трубопроводов: длина линии всасывания – 20 м, диаметр – 28 мм; длина линия нагнетания – 4 м, диаметр – 12 мм; длина жидкостной линии – 20 м, диаметр – 12 мм. Испаритель – кожухотрубный с внутритрубным кипением хладагента. Длина трубки – 1500 мм, диаметр кожуха – 127 мм. Время работы ТНУ в отопительный период τ принято равным 5000 ч. Базовые капитальные стоимости элементов ТНУ $\bar{Z}_{км} = 8390$, $\bar{Z}_{кд} = 23380$ и $\bar{Z}_{исп} = 16400$ грн. Стоимость электроэнергии задавалась $c_{э} = 0,25$ грн/(кВт ч).

Проиллюстрируем влияние капитальной стоимости элементов ТНУ на стоимость деструкции эксергии в компрессоре. На рис. 3 представлены зависимости эксергетических КПД компрессора и конденсатора от температуры воды на входе в испаритель $T_{нп1}$, определенные по E – S модели, а на

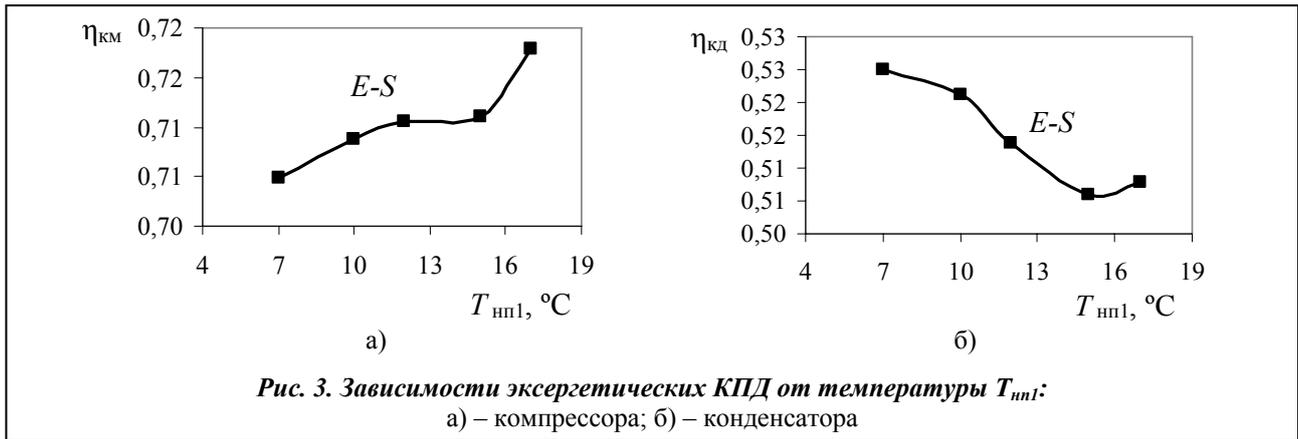


рис. 4 – стоимость деструкции эксергии в компрессоре $C_{Dкм}$ при разном значении n , определяющим коэффициент восстановительной стоимости в (4).

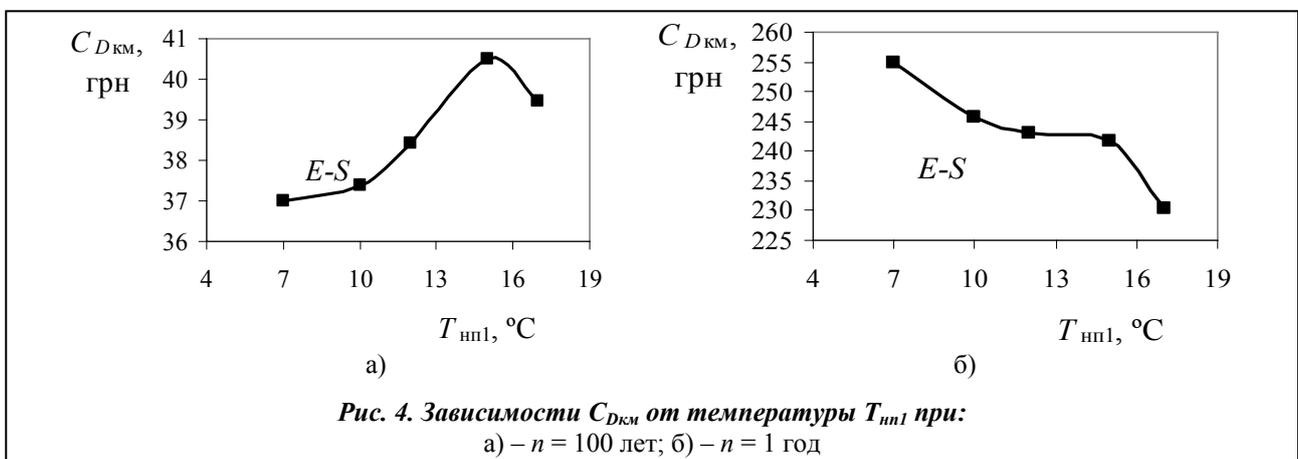
Анализ рис. 3 и 4 позволил интерпретировать полученные результаты следующим образом. Капитальная составляющая Z_k оказывает существенное влияние на характер изменения $C_{Dкм}$. Так, искусственно задавая срок возврата кредита банку $n = 100$ лет, капитальная стоимость практически исключается из рассмотрения (рис. 4, а). Стоимость деструкции эксергии компрессора увеличивается, несмотря на то, что его эксергетический КПД возрастает (рис. 3, а). Это можно объяснить значительным влиянием на $C_{Dкм}$ термодинамического совершенства конденсатора (рис. 3, б). Напротив, если резко увеличить капитальные затраты, задав $n = 1$ год (рис. 4, б), то влияние конденсатора снижается и $C_{Dкм}$ уменьшается с ростом эффективности компрессора.

Стоимости деструкции эксергии в элементах ТНУ чувствительны к изменению соотношения эксплуатационных затрат $C_{экс} = c_э N_{км} \tau$ к капитальным $C_{кап} = a_d \sum \bar{Z}_k = \sum Z_k$ в зависимости от коэффициента восстановительной стоимости a_d , который варьировался путем изменения срока возврата кредита банку n в (4), при $r = 0,06$

$$K = C_{экс}/C_{кап}.$$

На рис. 5 представлена зависимость капитальных затрат от количества лет эксплуатации установки n в сравнении с эксплуатационными затратами за год. На рис. 6 показано изменение стоимости деструкции эксергии $C_{Dк}$ в элементах ТНУ в зависимости от K . Видно, что $C_{Dк}$ существенно снижается при $K < 0,5$ (рис. 6), т.е. уменьшается влияние капитальной составляющей на $C_{Dк}$. В дальнейшем с ростом K значение $C_{Dк}$ практически не меняется, поскольку преобладает влияние эксплуатационной составляющей при формировании стоимости потоков эксергии и негэнтропии.

Наименее чувствительна стоимость деструкции испарителя к изменению коэффициента K , поскольку она, как известно [14], является эндогенной и поэтому не зависит от потерь в других элементах, а определяется только термодинамическим совершенством самого испарителя.



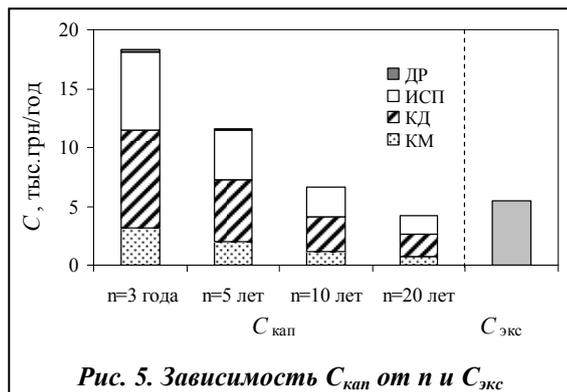


Рис. 5. Зависимость $C_{\text{кап}}$ от n и $C_{\text{экс}}$

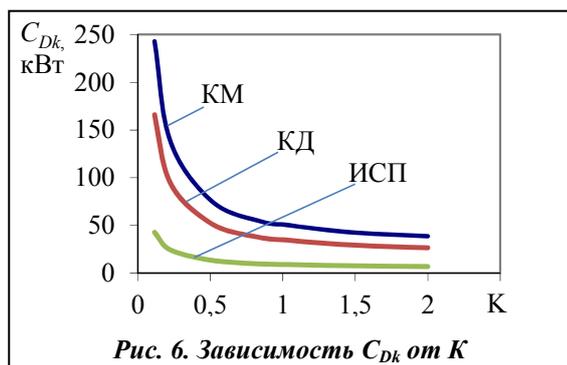


Рис. 6. Зависимость C_{Dk} от K

5. Заключение

На основе использования понятия негэнтропии предложена термoeкономическая модель ТНУ, позволяющая определить стоимость деструкции эксергии в элементах из уравнений стоимостных балансов, а не путем назначения ее по стоимости «топлива» элемента. В этом авторы усматривают элементы универсальности предложенной термoeкономической модели ТНУ.

Предложенная модель позволяет впервые оценить влияние соотношения капитальных и эксплуатационных затрат на стоимость деструкции эксергии в каждом элементе установки. Следовательно, можно проследить, на каком этапе эксплуатации установки устранение деструкции эксергии экономически целесообразно за счет капитальных, а на каком – за счет эксплуатационных затрат.

Литература

1. Эль Саид, И. М. Термoeкономика и проектирование тепловых систем / И. М. Эль Саид, Р. Б. Эванс // Тр. Америк. о-ва инж.-мех. Энерг. машины. – 1970. – № 1. – С. 22–31.
2. Бродянский, В. М. Доступная энергия Земли и устойчивое развитие систем жизнеобеспечения. 2. Ресурсы Земли / В. М. Бродянский // Техн. газы. – 2011. – № 3. – С. 48–63.
3. Lozano, M. Theory of Exergetic Cost / M. Lozano, A. Valero // Energy. – 1993. – № 18 (9). – P. 939–960.
4. On the Negentropy Application in Thermoeconomics: A Fictitious or an Exergy Component Flow? / J. Santos, M. Nascimento, E. Lora, A. M. Reyes // Int. J. Thermodynamics. – 2009. – Vol. 12, № 4. – P. 163–176.
5. D'Accadia, M. D. Thermoeconomic analysis and diagnosis of a refrigeration plant / M. D. D'Accadia, F. De Rossi // Energy Conversion and Management. – 1998. – № 39. – P. 1223–1232.
6. D'Accadia, M. D. Thermoeconomic Optimization of Refrigeration Plant / M. D. D'Accadia, F. De Rossi // Int. J. Refrigeration. – 1998. – № 21. – P. 42–54.
7. Piacentino, A. Scope-Oriented Thermoeconomical Analysis of Energy Systems. P. I. Looking for a Non-Postulated Cost Accounting for the Dissipative Devices of a Vapour Compression Chiller. Is it Feasible? / A. Piacentino, F. Cardona // Appl. Energy. – 2010. – Vol. 87. – P. 943–956.
8. Frangopoulos, C. A. Thermo-economic Functional Analysis and Optimization / C. A. Frangopoulos // Energy. – 1987. – № 12 (7). – P. 563–571.
9. Тсатсаронис, Дж. Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергопреобразующей системы / Дж. Тсатсаронис. – Одесса: Негоциант, 2002. – 152 с.
10. Тарасова, В. А. Сравнительный анализ термoeкономических моделей формирования эксергетической стоимости холода / В. А. Тарасова, Д. Х. Харлампида // Техн. газы. – 2013. – № 6. – С. 55–63.
11. Morosuk, T. Advanced exergoeconomic analysis of refrigeration machine: Part 1. Methodology and first evaluation / T. Morosuk, G. Tsatsaronis // Proc. 2011 Int. Mech. Eng. Congress at Denver (USA). – 2011. – P. 1–10.
12. Wall, G. Thermoeconomic Optimization of a Heat pump System / G. Wall // Energy J. – 1986. – Vol. 11, № 11 (10). – P. 957–967.
13. Харлампида, Д. Х. Расчет реверсивного кондиционера-теплового насоса при переводе его на альтернативные хладагенты / Д. Х. Харлампида, Э. Г. Братута, А. В. Шерстюк // Интегровані технології та енергозбереження. – 2012. – № 3. – С. 78–83.
14. Системно-структурный анализ парокomppressorных термотрансформаторов / Ю. М. Мацевитый, Э. Г. Братута, Д. Х. Харлампида, В. А. Тарасова. – Харьков: ИПМаш им. А.Н. Подгорного НАН Украины, 2014. – 269 с.

Поступила в редакцию 21.10.14