

УДК 621.1.016

МОРОЗЮК Т.В.¹, ТСАТСАРОНИС ДЖ.²

¹Морская академия Щецина, Польша

²Берлинский технический университет

ТЕОРИЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ДЕСТРУКЦИИ ЭКСЕРГИИ НА ВНУТРЕННЕ- И ВНЕШНЕ-ЗАВИСИМЫЕ ЧАСТИ

У статті подано концепцію визначення внутрішньо- та зовнішньо-залежних частин деструкції ексергії та перспективи її використання для ексергоекономічного аналізу та оптимізації.

В статье представлены концепция определения внутренне- и внешне-зависимых частей деструкции эксергии и перспективы ее использования для эксергоэкономического анализа и оптимизации.

The paper presents the general concept of endogenous and exogenous parts of the exergy destruction and possibilities of this approach for the future application in exergoeconomic analysis and optimization.

E – эксергия потока;
 e – удельная эксергия;
 M – массовый расход рабочего вещества;
 S – энтропия;
 s – удельная энтропия;
 T – температура;
 ε – эксергетическая эффективность.

Индексы
 D – деструкция;
 EN – внутренне зависимая часть;
 EX – внешне зависимая часть;
 F – топливо;
 gen – производство энтропии;
 k – произвольный элемент системы;
 P – продукт;
 tot – общий.

Эксергетический анализ указывает на местоположение, величину и источники термодинамической неэффективности в энергопреобразующей системе. Эта информация является необходимой и достаточной для повышения эффективности системы, а также предназначена для сравнения различных систем по этим показателям. Информация, полученная из эксергетического анализа, и особенно с применением современного углубленного эксергетического анализа, недоступна при выполнении энергетического анализа.

Для энергопреобразующей системы, работающей в устойчивом режиме, имеется некоторое число входящих и выходящих потоков, таких как теплота и работа при взаимодействии с окружающей средой. Связанная с этим передача вещества и энергии есть эксергия, передаваемая системе или выходящая из нее, и деструкция эксергии, вызванная необратимостями в пределах системы.

Для k -го компонента системы в эксергетическом анализе должно быть рассчитано достаточно много критериев (подробно описано в [1,2]), основу которых составляют следующие:

- ♦ абсолютная деструкция эксергии

$$E_{D,k} = T_o S_{gen,k}; \quad (1)$$

- ♦ ε_k – эксергетическая эффективность

$$\varepsilon_k = \frac{E_{P,k}}{E_{F,k}} = 1 - \frac{E_{D,k}}{E_{F,k}}. \quad (2)$$

Эксергетический баланс k -го компонента записывается в виде

$$E_{F,k} = E_{P,k} + E_{D,k}.$$

Углубление эксергетического анализа необходимо с точки зрения расширения его возможностей, прежде всего, связанных с прикладным значением для совершенствования методик эксергоэкономического анализа и оптимизации,

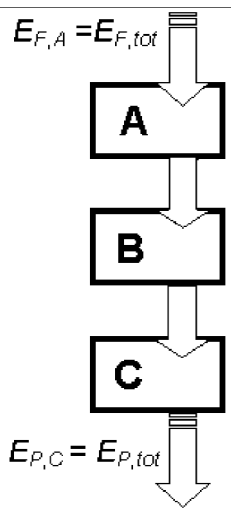


Рис. 1. Последовательное соединение элементов.

что, в конечном счете, преследует совершенствование экономических характеристик функционирования энергопреобразующих систем.

Система уравнений для эксергетического анализа и далее эксергоэкономического анализа и оптимизации традиционно записывается для k -го компонента системы, при этом взаимосвязью и взаимозависимостью между элементами пренебрегают [1,2].

Разработанная авторами теория разделения деструкции эксергии на внутренне-зависимую (англ. – *endogenous* – EN) и внешне-зависимую (англ. – *exogenous* – EX) части позволяет описывать необратимость (деструкцию) в каждом элементе энергопреобразующей системы как сумму

$$E_{D,k} = E_{D,k}^{EN} + E_{D,k}^{EX}, \quad (3)$$

где

$E_{D,k}^{EN}$ – часть деструкции, возникающая исключительно из-за необратимости в k -ом элементе энергопреобразующей системы, когда остальные элементы функционируют как идеальные;

$E_{D,k}^{EX}$ – часть деструкции эксергии, возникающая в k -ом компоненте системы из-за присутствия необратимостей в других компонентах системы.

Таким образом, впервые в эксергетическом анализе будет рассмотрено влияние элементов энергопреобразующей системы друг на друга, что даст возможность выявить элементы, на уменьшение необратимости в которых в первую оче-

редь должно быть направлено внимание инженера-проектировщика.

В действительных энергопреобразующих системах имеет место 3 варианта соединений элементов между собой: последовательное, параллельно-последовательное и параллельное. Рассмотрим эти варианты на предмет определения наличия внутренне- и внешне-зависимой частей деструкции эксергии в каждом элементе.

Открытая энергопреобразующая система, состоящая из трех последовательно расположенных элементов **A**, **B** и **C**, представлена на рис. 1. Топливо элемента **A** ($E_{F,A}$) является топливом всей системы ($E_{F,tot}$). Продукт элемента **A** ($E_{P,A}$) является топливом для элемента **B** ($E_{F,B}$), продукт элемента **B** ($E_{P,B}$) является топливом для элемента **C** ($E_{F,C}$). Продукт элемента **C** ($E_{P,C}$) является продуктом всей системы ($E_{P,tot}$). Величина $E_{P,tot}$ на протяжении всего анализа сохраняется постоянной.

На основании (2) деструкция эксергии в элементе **C** определяется как

$$E_{D,C} = E_{P,C} \left(\frac{1}{\varepsilon_C} - 1 \right) = E_{P,tot} \left(\frac{1}{\varepsilon_C} - 1 \right).$$

Деструкция эксергии в элементе **B** определяется аналогично

$$E_{D,B} = E_{P,B} \left(\frac{1}{\varepsilon_B} - 1 \right),$$

однако величина $E_{P,B}$ представляет внутренний поток энергопреобразующей системы, поэтому необходимо ее выразить через $E_{P,tot}$. На основа-

нии (2) $\varepsilon_C = \frac{E_{P,C}}{E_{F,C}}$ и $E_{P,B} = E_{F,C} = \frac{E_{P,C}}{\varepsilon_C}$, следовательно,

$$E_{D,B} = \frac{E_{P,tot}}{\varepsilon_C} \left(\frac{1}{\varepsilon_B} - 1 \right). \quad (4)$$

Тогда $E_{D,B}^{EN} = E_{P,tot} \left(\frac{1}{\varepsilon_B} - 1 \right)$ и

$$E_{D,B}^{EX} = E_{P,tot} \left(\frac{1}{\varepsilon_C} - 1 \right) \left(\frac{1}{\varepsilon_B} - 1 \right).$$

Из (4) следует, что абсолютная деструкция эксергии в элементе **B** зависит не только от эксер-

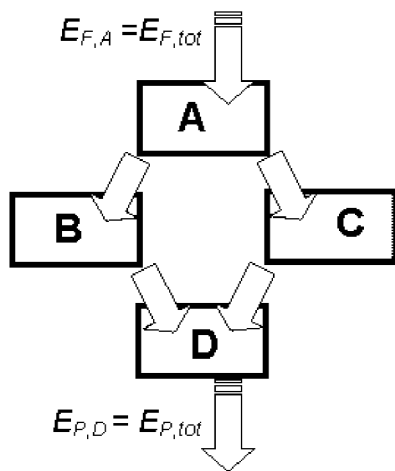


Рис. 2. Параллельно-последовательное соединение элементов

гетической эффективности этого элемента (ε_B), но также и от эксергетической эффективности элемента **C** (ε_C).

Путем аналогичных преобразований получаем выражение для элемента **A**:

$$E_{D,A} = \frac{E_{P,tot}}{\varepsilon_C \varepsilon_B} \left(\frac{1}{\varepsilon_A} - 1 \right).$$

где $E_{D,A}^{EN} = E_{P,tot} \left(\frac{1}{\varepsilon_A} - 1 \right)$ и

$$E_{D,A}^{EX} = E_{P,tot} \left(\frac{1}{\varepsilon_B \varepsilon_C} - 1 \right) \left(\frac{1}{\varepsilon_A} - 1 \right).$$

На рис. 2 представлена открытая энергопреобразующая система, состоящая из элементов **A**, **B**, **C** и **D**, в которой элементы **B** и **C** расположены параллельно. Продукт элемента **D** ($E_{P,C}$) является продуктом всей системы ($E_{P,D} = E_{P,tot}$). Топливо элемента **A** является топливом всей системы ($E_{F,A} = E_{F,tot}$). Эксергию продукта элемента **A** разделяем на две части, пропорционально массовому расходу рабочего вещества. Для этого представим полную эксергию потока в виде произведения удельной эксергии и массы потока

$$E_k = M \cdot e_k. \quad (5)$$

Тогда для определения эксергии топлива элемента **A** будет справедливо уравнение

$$E_{P,A} = (1-x) M e_{P,A} + x M e_{P,A} = (1-x) E_{P,A} + x E_{P,A} \quad (6)$$

и

$$(1-x) E_{P,A} = E_{F,B}, \quad (7)$$

$$x E_{P,A} = E_{P,C}, \quad (8)$$

далее

$$E_{P,B} = (1-x) E_{F,D}, \quad (9)$$

$$E_{P,C} = x E_{F,D}.$$

На основании (5–9) и предыдущего анализа запишем

$$E_{D,D} = E_{P,tot} \left(\frac{1}{\varepsilon_D} - 1 \right) = E_{D,D}^{EN},$$

$$E_{D,B} = \frac{(1-x) E_{P,tot}}{\varepsilon_D} \left(\frac{1}{\varepsilon_B} - 1 \right),$$

$$E_{D,C} = \frac{x E_{P,tot}}{\varepsilon_D} \left(\frac{1}{\varepsilon_C} - 1 \right),$$

следовательно, $E_{D,B}^{EN} = (1-x) E_{P,tot} \left(\frac{1}{\varepsilon_B} - 1 \right)$ и

$$E_{D,C}^{EN} = x E_{P,tot} \left(\frac{1}{\varepsilon_C} - 1 \right),$$

$$E_{D,A} = \frac{E_{P,tot}}{\varepsilon_D} \left(\frac{1-x}{\varepsilon_B} + \frac{x}{\varepsilon_C} \right) \left(\frac{1}{\varepsilon_A} - 1 \right),$$

тогда $E_{D,A}^{EN} = E_{P,tot} \left(\frac{1}{\varepsilon_A} - 1 \right)$.

На рис. 3 представлена открытая энергопреобразующая система, состоящая из элементов **A**, **B** и **C**, в которой элементы **B** и **C** расположены параллельно. Топливо элемента **A** является топливом всей системы ($E_{F,A} = E_{F,tot}$). Продуктами системы являются продукт элемента **B** ($E_{P,B}$) и продукт элемента **C** ($E_{P,C}$).

Деструкцию в элементах **B** и **C** определяем независимо друг от друга, так как независимыми являются продукты, произведенные в этих эле-

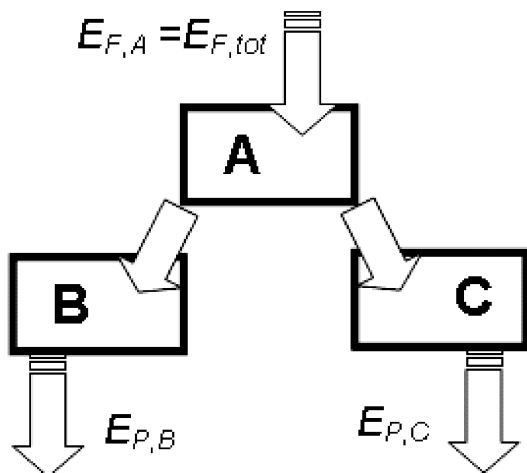


Рис. 3. Последовательное соединение элементов.

ментах

$$E_{D,B} = E_{P,B} \left(\frac{1}{\varepsilon_B} - 1 \right) = E_{D,B}^{EN},$$

$$E_{D,C} = E_{P,C} \left(\frac{1}{\varepsilon_C} - 1 \right) = E_{D,C}^{EN}.$$

Аналогично записываем выражение для элемента А

$$E_{D,A} = E_{P,A} \left(\frac{1}{\varepsilon_A} - 1 \right).$$

Однако поскольку $E_{P,A}$ не является продуктом системы, то необходимо выразить эту величину через $E_{P,B}$ и $E_{P,C}$, тогда

$$\begin{aligned} E_{P,A} &= E_{P,B} + E_{D,B} + E_{P,C} + E_{D,C} = \\ &= E_{P,B} \left(\frac{1}{\varepsilon_B} - 1 \right) + E_{P,B} + E_{P,C} \left(\frac{1}{\varepsilon_C} - 1 \right) + \\ &+ E_{P,C} = \frac{E_{P,B}}{\varepsilon_B} + \frac{E_{P,C}}{\varepsilon_C}. \end{aligned}$$

Окончательно

$$E_{D,A} = \left(\frac{E_{P,B}}{\varepsilon_B} + \frac{E_{P,C}}{\varepsilon_C} \right) \left(\frac{1}{\varepsilon_A} - 1 \right),$$

$$\text{где } E_{D,A}^{EN} = (E_{P,B} + E_{P,C}) \left(\frac{1}{\varepsilon_A} - 1 \right).$$

Анализ всех возможных вариантов соединения элементов в различных энергопреобразующих системах показал, что в открытых системах $E_{D,k} = E_{D,k}^{EN}$ только в том компоненте, где $E_{P,tot} = E_{P,k}$ (при условии $E_{P,tot} = const$). Очевидно, что для анализа открытой системы при условии $E_{F,tot} = const$ вывод $E_{D,k} = E_{D,k}^{EN}$ будет справедлив для компонента, в котором $E_{F,tot} = E_{F,k}$. Для других элементов всегда будут иметь место как внутренне-зависимые, так и внешне-зависимые части деструкции эксергии.

Выражения для определения эксергии топлива и продукта в элементах энергопреобразующих систем представлено в таблице. На основании анализа данных таблицы видно, что теоретическое условие $E_{P,k-1} = E_{F,k}$ практически никогда не встречается в действительных системах, кроме того, большинство энергопреобразующих систем представляет закрытые системы, таким образом для каждого компонента будет справедливо уравнение (3).

Величины внутренне-зависимой и внешне-зависимой частей деструкции эксергии необходимо использовать для проведения проектного анализа и оптимизации следующим образом:

- ◆ при $E_{D,k}^{EN} < E_{D,k}^{EX}$ анализируемый элемент (выбранная конструкции и связанная с ней необратимость, т.е. значение ε_k) должен быть признан достаточно совершенным с точки зрения эксергетического анализа, следовательно, можно перейти к анализу других элементов;

- ◆ при $E_{D,k}^{EN} > E_{D,k}^{EX}$ анализируемый элемент признается несовершенным и требуется повысить его эффективность (например, выбрать другую конструкцию, что, естественно, повлияет на величину необратимости и значение ε_k);

- ◆ при $E_{D,k}^{EN} = E_{D,k}^{EX}$ следует перейти к рассмотрению других элементов системы, так как совершенствование одного из элементов обязательно окажет влияние на величину деструкции эксергии в рассматриваемом элементе, т.е. приведет к первым двум случаям анализа.

Расчет деструкции эксергии в элементах энергопреобразующих систем с разделением ее на

Таблица. Эксергетическая эффективность $\varepsilon_k = \frac{E_{P,k}}{E_{F,k}}$ элементов энергопреобразующих систем

Турбина (детандер)	Компрессор (насос)	Теплообменный аппарат	Смеситель с теплообменом, камера сгорания топлива
$\varepsilon = \frac{W_T}{E_1 - E_2}$	$\varepsilon = \frac{E_2 - E_1}{W_{KM}}$	$\varepsilon = \frac{E_2 - E_1}{E_3 - E_4} \text{ для } T > T_0$ $\varepsilon = \frac{E_4 - E_3}{E_1 - E_2} \text{ для } T < T_0$	$\varepsilon = \frac{E_3}{E_1 + E_2}$

внутренне- и внешне-зависимые части является весьма заманчивым для проведения проектного анализа и оптимизации и, на первый взгляд, чрезвычайно легким. Попытки авторов создать единую инженерную методику на основании теоретических разработок выявило сложности, которые встретятся на пути любого исследователя и инженера. Соответственно, должна быть разработана вспомогательная теория, позволяющая преодолеть эти преграды.

Прежде всего, необходимо определить, что такое “идеальный элемент”, т.е. как должны быть сформулированы условия анализа, чтобы для “идеального элемента” соблюдались условия $E_{D,k} = 1$, т.е. $E_{F,k} = E_{P,k}$, следовательно, $\varepsilon_k = 1$. Для компрессора и турбины (детандера) это понятие соответствует изоэнтропному процессу сжатия. Формулировка понятий “идеальный элемент” для других элементов, рассмотренных в таблице, находится в стадии разработки.

На основании уравнение (1) величину деструкции эксергии можно представить в виде $E_{D,k} = T_0 s_{gen,k} M$, где M – массовый расход рабочего вещества в энергопреобразующей системе. Такой подход дает возможность проанализировать изменение величины $E_{D,k}$ через:

- ◆ изменение только $s_{gen,k}$ (при $M = const$);
- ◆ изменение только M (при $s_{gen,k} = const$);
- ◆ изменение $s_{gen,k} M$.
- ◆ Практика показывает, что третий случай является наиболее сложным, однако и наиболее распространенным, так как в действительной энергопреобразующей системе введение любой необратимости влияет на изменение массового расхода рабочего вещества.

Имеются две формулировки для определения влияния необратимости на эффективность системы в целом:

- ◆ любая необратимость способствует уменьшению полезного эффекта энергопреобразующей системы при сохранении неизменным

величины начальной энергии (теорема Гюи-Стодолы);

◆ любая необратимость способствует увеличению начальной энергии, вводимой в энергопреобразующую систему при сохранении неизменным величины полезного эффекта (развитие Ф.Бошняковичем [3] теоремы Гюи-Стодолы).

Таким образом, формирование инженерной методики для определения внутренне- и внешне-зависимых частей деструкции эксергии должно осуществляться в соответствии с одной из вышеприведенных формулировок в зависимости от условий задачи $E_{F,tot} = const$ или $E_{P,tot} = const$. Введение необратимости только в один процесс и расчет деструкции эксергии в соответствующем элементе и будет соответствовать величине внутренне-зависимой части деструкции эксергии в этом элементе.

Выводы

В настоящей статье впервые широко сформулировано понятие внутренне- зависимых и внешне- зависимых частей деструкции эксергии как еще одного метода углубления эксергетического анализа [4]. Рассмотрены также необходимость такого разделения деструкции эксергии и перспективы для создания инженерного инстру-

ментария, для дальнейшего использования в эксергоэкономическом анализе и оптимизации.

Авторы с благодарностью подтверждают финансирование со стороны Alexander von Humboldt Stiftung (Германия) для выполнения этой работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Bejan A., Tsatsaronis G., Moran M.* Thermal Design and Optimization. – New York: J. Wiley, 1996, С. 529.
2. *Тсатсаронис Д.* Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергопреобразующей системы / Под ред. и пер. с англ. Т.В. Морозюк. – Одесса: Студия “Негоциант”. – 2002. – С. 152.
3. *Бошнякович Ф.* Техническая термодинамика. Часть вторая. – Л. – М.: Госэнергоиздат, 1956. – С. 256.
4. *Морозюк Т.В., Тсатсаронис Д.* Углубленный эксергетический анализ – современная потребность оптимизации энергопреобразующих систем // Промышленная теплотехника. – 2005. – Т. 27, № 2. – С. 88–92.

Получено 15.03.2006 г.