

УДК 621.1.016

**Т.В. Морозюк**

Берлинский технический университет, Германия

**НОВЫЙ ЭТАП В РАЗВИТИИ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА**

*В последние десятилетия эксергетический метод термодинамического анализа стал неотъемлемой частью научных исследований, особенно проводимых в области холодильной техники. Известно, что информация, полученная при проведении эксергетического анализа недоступна при использовании других видов анализа, например, энергетического. Однако эксергетический анализ не лишен недостатков и ограничений. Преодолеть эти недостатки и расширить возможности эксергетического анализа возможно путем его углубления. Это будет также способствовать внедрению эксергетического анализа в практическую деятельность инженеров-проектировщиков.*

**Ключевые слова:** Эксергетический анализ – деструкция эксергии – углубленный эксергетический анализ.

**Т.В. Морозюк**

Берлінський технічний університет, Німеччина

**НОВИЙ ЕТАП У РОЗВИТКУ ЕКСЕРГЕТИЧНОГО АНАЛІЗУ**

*В останнє десятиліття методи термодинамічного аналізу станом невід'ємною частиною наукових досліджень, особливо в області холодильної техніки. Відомо, що інформація, яку отримано за эксергетичним аналізом, недоступна за іншими видами аналізу, наприклад, енергетичного. Подолати ці недоліки та розширити можливості эксергетичного аналізу можливо шляхом його поглиблення. Такий підхід сприяє втіленню эксергетичного аналізу в практичну діяльність інженерів-проектувальників.*

**Ключові слова:** эксергетичний аналіз – деструкція эксергії – поглиблений эксергетичний аналіз

**I. ВВЕДЕНИЕ**

Эксергетический анализ указывает на местоположение, величину и источники термодинамических необратимостей в энерго-преобразующей системе. Эта информация является необходимой и достаточной для повышения термодинамической эффективности системы, а также предназначена для сравнения различных энергопреобразующих систем по этим показателям.

Первые широко известные работы по внедрению эксергетического анализа были выполнены под руководством проф. Я. Шаргута (например, [1]) еще в 1960-е годы, значительно расширены и углублены в работах проф. В.С. Мартыновского (например, [2]) и В.М. Бродянского (например, [3]) и на сегодня составляют «золотой фонд» эксергетического анализа в мире. Многочисленные западные публикации, которые также следовали работам Я. Шаргута, не отличались новаторством (например, широко известная монография Т. Котаса [4]). Главным направлением развития эксергетического метода в то время были вопросы расчета эксергии потока, особенно химической эксергии для газов, жидкостей и твердых тел. Эксергетический анализ, как таковой, основывался на эксергетическом балансе (для отдельного элемента системы или для системы в целом), записанным в терминах входящей и выходящей эксергии

$$E_{\text{ex}} = E_{\text{вых}} + \Delta E, \quad (1)$$

с последующим определением эксергетического КПД

$$\varepsilon = \frac{E_{\text{вых}}}{E_{\text{ex}}}. \quad (2)$$

Основные выводы по усовершенствованию энергопреобразующей системы осуществлялись на основании анализа величин  $\Delta E$  (потерь эксергии в компоненте) и эксергетического КПД системы в целом.

Необходимо отметить, что этот метод эксергетического анализа используется до сих пор, так как является простым, а следовательно, легко применимым для любых энергопреобразующих и химико-технологических систем (например, [4,5]).

Первым существенным вкладом в развитие эксергетического анализа стало введение понятий «эксергия продукта» и «эксергия топлива» [6-8]. Таким образом эксергетический анализ получил логическое развитие. Каждый термодинамик согласится, что не все входящие эксергетические потоки представляют собой «топливо» и не все выходящие потоки могут ассоциироваться с «продуктом». Одновременно с этим, понятие «эксергетические потери» как единое слагаемое также претерпело изменения. Современный эксергетический анализ различает понятия «деструкция эксергии» ( $E_D$ ) и «потери эксергии» ( $E_L$ ) [7,8], где

$$\Delta E = E_D + E_L. \quad (3)$$

*Деструкцией эксергии* (англ. – *exergy destruction*) описывают необратимости, имеющие место в каждом элементе системы, не различая их, как ранее, на внутренние и внешние [1-5], что является достаточно неоднозначным и не всегда необходимым.

*Потери эксергии* (англ. – *exergy losses*) возникают при тепловом взаимодействии элемента системы с окружающей средой через кожух или сбросами (тепловыми и/или химическими) в окружающую среду. Потери эксергии зависят от типа и конструкции аппарата, а также от его температурного уровня работы. Для упрощения анализа термин  $E_L$  для элемента системы приравливают нулю ( $E_{L,k}=0$ ). Термин  $E_{L,tot}$  существует только для системы в целом [7,8].

Итак, в современном эксергетическом анализе, эксергетический баланс записывается в виде

$$E_{F,k} = E_{P,k} + E_{D,k} \quad (4a)$$

для  $k$ -го элемента системы и для системы в целом

$$E_{F,tot} = E_{P,tot} + E_{D,tot} + E_{L,tot} \quad (4b)$$

где  $E_{D,tot} = \sum_k E_{D,k}$ .

Далее рассчитываются эксергетические критерии:

- деструкция эксергии  $E_{D,k}$ ;
- потери эксергии,  $E_{L,tot}$ ;
- эксергетический КПД

$$\varepsilon_k = \frac{E_{P,k}}{E_{F,k}} = 1 - \frac{E_{D,k}}{E_{F,k}}; \quad (5a)$$

и

$$\varepsilon_{tot} = \frac{E_{P,tot}}{E_{F,tot}} = 1 - \frac{E_{D,tot} + E_{L,tot}}{E_{F,tot}}; \quad (5b)$$

- относительная деструкция эксергии

$$y_{D,k} = \frac{E_{D,k}}{E_{F,tot}}; \quad (6)$$

- относительные потери эксергии

$$y_L = \frac{E_{L,tot}}{E_{F,tot}}; \quad (7)$$

- доля деструкции эксергии в  $k$ -ом элементе системы к общей деструкции эксергии в системе

$$y_{D,k}^* = \frac{E_{D,k}}{\sum_k E_{D,k}}; \quad (8)$$

## II. СОВРЕМЕННЫЙ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

При рассмотрении эксергетических критериев, необходимо ответить на три вопроса:

1. Какой критерий лучше всего характеризует эффективность элемента с точки зрения термодинамики?
2. Какой критерий должен быть использован при сравнении эффективности подобных элементов в

пределах одной системы или в различных системах?

3. Какой критерий должен быть использован для сравнения эффективности различных (не подобных) элементов?

Деструкция эксергии представляет собой численное значение термодинамической необратимости. Эта величина может быть использована только для сравнения элементов в пределах одной энергопреобразующей системы. Дополнительный вопрос: «Всегда ли элемент системы с высоким значением  $E_{D,k}$  является «худшим» и требует усовершенствования? С точки зрения ранних версий эксергетического анализа, ответом будет «да», поскольку эксергетический КПД, рассчитанный по уравнению (2), не имеет логического смысла и лишь объединяет переменные эксергетического баланса.

Неоднократно доказано, что единственный критерий, который однозначно характеризует эффективность компонента с точки зрения термодинамики – это *эксергетический КПД*. Эксергетический КПД должен использоваться также для сравнения подобных компонентов, работающих в аналогичных условиях в пределах одной системы или в различных системах. Для сравнения неподобных компонентов единственный критерий – это *относительная деструкция эксергии*  $y_{D,k}$ . Снова вернемся к поставленному дополнительному вопросу. С точки зрения современного эксергетического анализа (уравнение (4)) для определения эксергетического КПД, ответ будет иным: «Возможно, но не всегда». Величина  $E_{D,k}$  всегда должна анализироваться в сочетании с  $\varepsilon_k$ . Рассмотрим два случая, предположив, что значение  $E_{D,k}$  велико: значение  $\varepsilon_k$  низкое и значение  $\varepsilon_k$  высокое. Если высокое значение  $E_{D,k}$  сочетается с низким значением  $\varepsilon_k$ , то, несомненно, этот элемент системы является «худшим» и требует усовершенствования. Однако сочетание высоких значений  $E_{D,k}$  и  $\varepsilon_k$  свидетельствует о том, что, несмотря на высокие абсолютные значения необратимостей в компоненте, этот компонент достаточно совершенен с термодинамической точки зрения, а высокое значение  $E_{D,k}$  может быть причиной, например, большого массового расхода рабочего вещества. На этом примере читатель может наблюдать различие в выводах, полученных при использовании эксергетического анализа основанного на концепции «входящих-выходящих потоков» и концепции «эксергия продукта – эксергия топлива».

Неправильным было бы констатировать, что величина  $E_{D,k}$  играет второстепенную роль. Именно снижение значения  $E_{D,k}$  в каждом элементе системы – главная задача термодинамического усовершенствования энергопреобразующей системы. Проблемная ситуация для ученого и инженера: «Величина  $E_{D,k}$  определена. Что необходимо сделать для ее уменьшения? Насколько можно уменьшить эту величину?». Напомним, что уменьшение величины  $E_{D,k}$  имеет смысл только то-

гда, когда  $E_{D,tot} = \sum_k E_{D,k}$  также становится меньше, а случай  $E_{D,k}=0$  невозможен.

Итак, мы столкнулись с ограничением выводов, полученных при проведении эксергетического анализа, а, следовательно, с ограничениями прикладного значения эксергетического анализа.

### III. УГЛУБЛЕННЫЙ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Углубление эксергетического анализа необходимо с точки зрения расширения его возможностей, прежде всего, связанных с прикладным значением.

В каждом элементе энергопреобразующей системы только часть термодинамических необратимостей может быть устранена. Этот факт обсуждался неоднократно, начиная с ранних версий эксергетического анализа [1-5]. Очевидно, что из-за технологических ограничений, связанных, например, с применяемыми материалами и/или стоимостью материалов и производственных процессов, значение эксергетического КПД  $k$ -го элемента системы достигает своего максимума и дальнейшие инвестиции в создание этого элемента уже не способны привести к его термодинамическому совершенствованию. Часть деструкции эксергии, которая независимо от совершенствования компонента все еще будет присутствовать, называется *неизбежной* (англ. – *unavoidable* – *UN*) будет присутствовать в компоненте. Остальная часть деструкции эксергии – *устраняемая* (англ. – *avoidable* – *AV*)

$$E_{D,k} = E_{D,k}^{AV} + E_{D,k}^{UN}. \quad (9)$$

Усилия исследователей и инженеров должны сосредоточиться именно на устранимой части. Как определить неизбежную часть деструкции эксергии? В практическом приложении это означает, что необходимо выбрать такие термодинамические параметры  $k$ -го элемента, чтобы получить максимальный эксергетический КПД. Подробная методология описана в [8]. Очевидно, что эта процедура связана с более или менее произвольными решениями и предположениями, однако такой подход оправдан, особенно для понимания путей совершенствования энергопреобразующей системы.

Величина деструкции эксергии в элементе зависит от двух факторов: необратимостей, вызванных несовершенством самого элемента и необратимостей, вызванных несовершенством других элементов, входящих в систему. Этот факт также упоминался в ранних публикациях, посвященных эксергетическому анализу [1-5], однако теория и методология разделения деструкции эксергии на внутренне зависимую (англ. – *endogenous* – *EN*) и внешне зависимую (англ. – *exogenous* – *EX*) части была разработана относительно недавно [9,10]

$$E_{D,k} = E_{D,k}^{EN} + E_{D,k}^{EX}, \quad (10)$$

где  $E_{D,k}^{EN}$  – часть деструкции, возникающая исключительно из-за необратимости в  $k$ -ом элементе

энергопреобразующей системы, в предположении, что остальные элементы функционируют идеально;  $E_{D,k}^{EX}$  – часть деструкции эксергии, возникающая в  $k$ -ом компоненте системы из-за присутствия необратимостей в других компонентах системы.

При использовании концепции внутренне-зависимой и внешне зависимой частей деструкции эксергии появляется возможность проанализировать влияние элементов энергопреобразующей системы друг на друга.

Величины внутренне зависимой и внешне-зависимой частей деструкции эксергии необходимо использовать для выработки стратегии усовершенствования системы следующим образом:

- при  $E_{D,k}^{EN} > E_{D,k}^{EX}$ , необходимо сделать акцент на усовершенствование отдельного компонента;
- при  $E_{D,k}^{EN} < E_{D,k}^{EX}$ , компонент может быть усовершенствован «автоматически» через усовершенствование других компонентов в составе системы.
- 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.

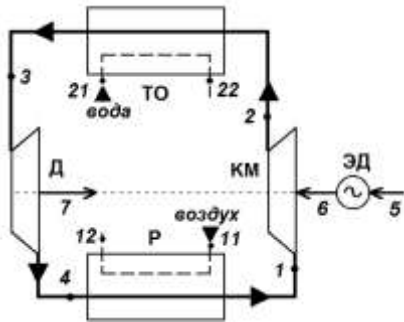
Расчет деструкции эксергии в элементах энергопреобразующих систем с разделением ее на внутренне и внешне зависимые части является весьма заманчивым для проведения проектного анализа и оптимизации и, на первый взгляд, чрезвычайно легким. Попытки авторов создать единую инженерную методику на основании теоретических разработок выявило сложности, которые встретятся на пути любого исследователя и инженера. Для холодильных машин методология детально изложена в [9,10]. В основу методологии положен «метод циклов», предложенный В.С. Мартыновским [2].

Очевидно, что оба направления в разделения деструкции эксергии, представляющие собой углубленный эксергетический анализ, должны быть объединены. В этом случае появляются четыре части деструкции эксергии: *внутренне зависимая неизбежная* ( $\dot{E}_{D,k}^{EN,UN}$ ) часть деструкции эксергии не может быть уменьшена в связи с существующими технологическими ограничениями  $k$ -го компонента системы; *внешне зависимая неизбежная* ( $\dot{E}_{D,k}^{EX,UN}$ ) часть деструкции эксергии не может быть уменьшена в связи с существующими технологическими ограничениями других компонентов энергопреобразующей системы и фиксированным схемным решением; *внутренне зависимая устранимая* ( $\dot{E}_{D,k}^{EN,AV}$ ) часть деструкции эксергии может быть уменьшена путем совершенствования  $k$ -го компонента системы; *внешне зависимая устранимая* ( $\dot{E}_{D,k}^{EX,AV}$ ) часть деструкции эксергии может быть уменьшена путем совершенствования

схемного решения и/или совершенствования других компонентов энергепреобразующей системы.

**IV. ПРИМЕР – ВОЗДУШНАЯ ХОЛОДИЛЬНАЯ МАШИНА**

Наиболее красочным примером демонстрации недостатков и ограничений эксергетического анализа в сравнении с углубленным анализом является анализ простейшей воздушной холодильной машины (рисунок 1, таблица 1).



**Рисунок 1** – Схема простейшей воздушной холодильной машины: ТО – теплообменник; Д – детандер; КМ – компрессор; ЭД – электродвигатель; Р - рефрижератор

Проанализируем полученные результаты. На основании эксергетического анализа (таблица 2) наиболее уязвимыми элементами являются компрессор и детандер (большие значения  $\dot{E}_{D,k}$ ), однако величины  $\varepsilon_k$  для этих элементов достаточно высоки. Низкие значения  $\varepsilon_k$  соответствуют теплообменнику и рефрижератору, но деструкция эксергии в этих элементах невелика, следовательно, не имеет смысла усовершенствовать эти элементы. Практика исследования воздушных холодильных машин в ОТИХП/ОГАХ показала, что наиболее важными элементами являются детандер и рефрижератор.

**Таблица 1** – Термодинамические параметры

Поток	$\dot{m}$ [кг/с]	$T$ [°C]	$p$ [бар]	$e$ [кДж/кг]
1	4.198	-30	1.00	5.82
2	4.198	154	5.25	163.87
3	4.198	35	5.00	137.85
4	4.198	-54	1.05	16.90
11	9.968	-10	1.00	2.24
12	9.968	-20	1.00	3.80
21	8.015	25	1.50	0.05
22	8.015	40	1.5	1.58

**Таблица 2** – Современный эксергетический анализ ( $\dot{E}_{Ltot} = 12$  кВт)

Элемент	$\dot{E}_{F,k}$ [кВт]	$\dot{E}_{P,k}$ [кВт]	$\dot{E}_{D,k}$ [кВт]	$\varepsilon_k$ [%]
КМ	801	688	113	86
ТО	109	12	97	11
Д	561	427	134	76
Р	47	15	31	33
Машина в целом	448	15	420	3

**Таблица 3** – Углубленный эксергетический анализ

Элемент	$\dot{E}_{D,k}^{EN}$ [кВт]	$\dot{E}_{D,k}^{EX}$ [кВт]	$\dot{E}_{D,k}^{UN}$ [кВт]	$\dot{E}_{D,k}^{AV}$ [кВт]	Разделение $\dot{E}_{D,k}^{real}$ [кВт]			
					$\dot{E}_{D,k}^{UN}$ [кВт]		$\dot{E}_{D,k}^{AV}$ [кВт]	
					$\dot{E}_{D,k}^{UN,EN}$ [кВт]	$\dot{E}_{D,k}^{UN,EX}$ [кВт]	$\dot{E}_{D,k}^{AV,EN}$ [кВт]	$\dot{E}_{D,k}^{AV,EX}$ [кВт]
СМ	35	78	25	88	8	17	27	61
ТО	32	65	74	23	24	49	7	16
Д	62	72	28	105	13	15	49	56
Р	31	0	18	13	18	0	13	0

Обратимся к результатам углубленного эксергетического анализа (Таблица 3). Для компрессора и теплообменника  $E_{D,k}^{EN} < E_{D,k}^{EX}$ , для детандера  $E_{D,k}^{EN} = E_{D,k}^{EX}$  и только для рефрижератора  $E_{D,k}^{EN} > E_{D,k}^{EX}$  ( $E_{D,k}^{EX} = 0$ ). Это означает, что внутри машины имеется строгая зависимость между необратимостями внутри всех элементов, и только совершенствование рефрижератора не зависит от других элементов системы. Только детандер и компрессор имеют большую перспективу быть

усовершенствованными (так как  $E_{D,k}^{UN} < E_{D,k}^{AV}$ ), возможности у теплообменника и, особенно, у рефрижератора невелики.

Сосредоточим внимание на величине  $\dot{E}_{D,k}^{AV}$ , а точнее на ее составляющих.  $\dot{E}_{D,k}^{AV,EX} = 0$  для рефрижератора. Как и ранее, мы подтверждаем факт, что этот элемент может быть усовершенствован сам по себе, и не испытывает влияния со стороны других элементов. Детандер может быть усовершенствован как самостоятельный элемент, так и в соединении с другими элементами. Реальное ус-

вершенствование компрессора и теплообменника возможно через понижение необратимостей в других элементах. Углубленный эксергетический анализ полностью подтвердил практику усовершенствования воздушных холодильных машин.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены недостатки ранних версий эксергетического анализа и ограничения современного эксергетического анализа, а также продемонстрированы преимущества и перспективы углубленного эксергетического анализа, целью которого является расширение информации, полученной исследователями и инженерами-проектировщиками при анализе энергопреобразующей системы, развитию креативности в разработке стратегий при термодинамическом совершенствовании энергопреобразующих систем, частным случаем которых являются холодильные машины и криогенные установки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шаргут Я., Петела Р. Эксергия.- М.: Энергия, 1968.- 278 с.
2. Мартыновский В.С. Циклы, схемы и характеристики термотрансформаторов / под ред. В.М.Бродянского, М.: Энергия, 1979.- 285с.
3. Бродянский В.М., Фратшер В., Михалец К. Эксергетический метод и его приложения.- М.:

*T.V. Morosuk*

Technical University of Berlin, Germany

## NEW STEP IN THE DEVELOPMENT OF EXERGY ANALYSIS

*During last decades, the exergetic method of the thermodynamic analysis became very popular among the researches, particularly working in the field of refrigeration. Well known, that the information obtained from the exergetic analysis cannot be provided by any other methods of thermodynamic analysis, for example, energy analysis. However, the conventional exergetic analysis has some limitations. In order to overcome these limitations, an advanced exergetic analysis has been proposed. The introduction of the advanced exergetic analysis should help engineers and designers in their practical work.*

**Keywords:** Exergetic analysis – Exergy destruction – Advanced exergetic analysis

## REFERENCES

1. Shargut Ya., Petela R. Eksgeriya.- М.: Energiya, 1968. – 278 s.
2. Martinovskiy V.S. – М.: Energiya, 1979. – 285.
3. Brodyanskiy V.M., Fratsher V., Mikhalek K. – М.: Energoatomizdat, 1988. – 288 s.
4. Kotas T.J. The Exergy Method of Thermal Plant Analysis, Florida, USA: Krieger Publishing Company, Malabar, 1985.
5. Eksergeticheskie raschety tekhnicheskikh sistem. Spravochnoe posobie. / Red. A.A. Dolinskiy, V.M. Brodyanskiy.- Kiev: Naukova dumka, 1991. – 360 s.
6. Tsatsaronis G. Combination of Exergetic and Economic Analysis in Energy-Conversion Processes / *Energy Economics and Management in Industry*, Proceedings of the European Congress, Algarve, Portu-

gal. Oxford: Pergamon Press. – 1984. – Vol. 1. – P. 151-157.

4. Kotas T.J. The Exergy Method of Thermal Plant Analysis, Florida, USA: Krieger Publishing Company, Malabar, 1985.

5. Эксергетические расчеты технических систем. Справочное пособие / Под ред. А.А. Долинского и В.М.Бродянского. – Киев: Наукова думка, 1991. – 360 с.

6. Tsatsaronis G. Combination of Exergetic and Economic Analysis in Energy-Conversion Processes / *Energy Economics and Management in Industry*, Proceedings of the European Congress, Algarve, Portugal. Oxford: Pergamon Press. – 1984. – Vol. 1. – P. 151-157.

7. Bejan A., Tsatsaronis G., Moran M. Thermal Design and Optimization.- New York: J.Wiley.- 1996.- 530 p.

8. Тсатсаронис Дж. Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергопреобразующей системы / Под ред. и пер. с англ. Т.В. Морозюк. — Одесса: Студия «Негоциант». – 2002. – 152 с.

9. Morosuk T., Tsatsaronis G. New approach to the exergy analysis of absorption refrigeration machines // *Energy – The International Journal*. – 2008. –Vol. 33 – P. 890-907.

10. Morosuk T., Tsatsaronis G. Advanced Exergetic Evaluation of Refrigeration Machines Using Different Working Fluids // *Energy – The International Journal*. – 2009. – Vol. 34– P. 2248-2258.

gal. Oxford: Pergamon Press. – 1984. – Vol. 1. – P. 151-157.

7. Bejan A., Tsatsaronis G., Moran M. Thermal Design and Optimization. – New York: J.Wiley. – 1996.- 530 p.

8. Tsatsaronis G. Vzaimodeistvie termodinamiki I ekonomiki dlya minimizatsii stoimosti energopreobrazuyuschei sistemy / Red. per. s angl. T.V. Morozjuk. – Одесса: Студия «Негоциант». – 2002. – 152 с.

9. Morosuk T., Tsatsaronis G. New approach to the exergy analysis of absorption refrigeration machines // *Energy – The International Journal*. – 2008. –Vol. 33 – P. 890-907.

10. Morosuk T., Tsatsaronis G. Advanced Exergetic Evaluation of Refrigeration Machines Using Different Working Fluids // *Energy – The International Journal*. – 2009. – Vol. 34 – P. 2248-2258.

Отримана в редакції 19.06.2014, прийнята до друку 23.06.2014