

УДК 261.1:261.57

Долинский А.А.¹, Драганов Б.Х.², Шморгун В.В.¹

¹Институт технической теплофизики НАН Украины

²Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины

ЭНТРОПИЙНО-ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Викладено метод ентропійного аналізу дійсно протікаючих процесів у теплових установках, заснований на експериментальній статистичній інформації та методі ексергетичного дослідження нерівноважних теплоенергетичних процесів.

Изложен метод энтропийного анализа действительно протекающих процессов в тепловых установках, основанный на экспериментальной и статистической информации, а также методе эксергетического исследования неравновесных теплоэнергетических процессов.

The method of entropy analysis really running processes in the thermal plants based on experimental and statistical information, as well as the method exergy study of nonequilibrium heat and power processes is expounded.

E – эксергия;
 l – работа, работоспособность системы;
 p – давление;
 S – энтропия;
 T – температура;
 η – термодинамическая эффективность;
 μ – химический потенциал;

Индексы верхние:

ДИВЭ – дискретно-импульсный ввод энергии.

Индексы нижние:

D – деструкция;
 i – число компонент;
 k – компонента;
 L – потеря эксергии;
 r – показатель источника теплоты;
 0 – окружающая среда;
 обр – обратимый;
 сум – суммарный.

В тепловых двигателях имеют место потери работы, что сопряжено с производством энтропии. В процессе эксплуатации вследствие постепенного износа деталей и узлов, и ряда других причин, производство энтропии может увеличиться, что уменьшает реальную эффективность установки [1, 4]. Термин «энергетические потери» означает потери работы установки и работоспособности, вследствие чего имеет место генерация энтропии.

Необратимость процессов в реальных системах обусловлена, в значительной степени, разностью потенциалов при их взаимодействии с окружающей средой, а именно разницей давлений Δp , температур ΔT , химических потенциалов $\Delta \mu$ или неравновесных разностей концентрации ΔC .

В соответствии с принципами термодинамики величина потери работоспособности Δl определяется соотношением Гюи и Стодола [2, 3]:

$$\Delta l = T_0 \sum_{i=1}^n \Delta S_i, \quad (1)$$

где T_0 – температура окружающей среды;
 $\sum_{i=1}^n \Delta S_i$ – суммарное производство энтропии вследствие необратимости во всех элементах исследуемой установки.

Уравнение (1) может быть использовано для определения в первом приближении также действительных потерь работы и работоспособности теплосиловых установок. В [4] предложен метод определения действительных энергетических потерь в первом приближении по накопленной информации о реальных величинах среднестатистической степени совершенства установок, в которых работа генерируется при тех же температурах, что и производство энтропии в исследуемых установках.

Полученная статистическая информация позволяет более точно определить степень тер-

модинамического совершенства $\eta_{\text{терм}}$, которая равна отношению реально полученной работы к теоретически максимально возможной, при которой достигается максимальная степень термодинамического совершенства (η_T).

На рисунке приведена зависимость η_T от температуры источника теплоты T_r [4].

Заслуживает внимания степень производства энтропии при неравновесном теплообмене-передаче теплоты с уровня T_{r1} на уровень T_{r2} , где $T_{r1} > T_{r2}$. В этом случае величина производства энтропии составит:

$$\Delta S_{\text{теор}} = q \left(\frac{1}{T_{r1}} - \frac{1}{T_{r2}} \right) = \frac{q}{T_{r1}} \left(\frac{T_{r1} - T_0}{T_{r1}} - \frac{T_{r2} - T_0}{T_{r2}} \right). \quad (2)$$

Теоретическое значение потери работоспособности будет

$$\Delta I_{\text{теор}} = q \left(\frac{T_{r1} - T_0}{T_{r1}} - \frac{T_{r2} - T_0}{T_0} \right). \quad (3)$$

Это соотношение справедливо при условии, что теплосиловые установки осуществляются по циклу Карно в интервалах температур $T_{r1} - T_0$ и $T_{r2} - T_0$. В таком случае величина действительной потери работоспособности от неравновесного теплообмена можно в первом приближении выразить как

$$\Delta I_{\text{дейст}} = q \left(\frac{T_{r1} - T_0}{T_{r1}} \eta_{\text{терм}T_{r1}} - \frac{T_{r2} - T_0}{T_0} \eta_{\text{терм}T_{r2}} \right), \quad (4)$$

где $\eta_{\text{терм}T_{r1}}$ и $\eta_{\text{терм}T_{r2}}$ – среднестатистические величины степени термодинамического совершенства теплосиловых установок при соответственно T_{r1} и T_{r2} . В этом случае $\Delta I_{\text{дейст}}^{\text{т.о.}}$ будет меньше, чем $\Delta I_{\text{теор}}^{\text{т.о.}}$, о чем свидетельствуют тщательно выполненные расчеты [4].

На наш взгляд заслуживает внимания задача оценки эффективности теплосиловой установки при ее усовершенствовании путем автоматизации или повышения уровня технологических процессов, например при использовании принципа дискретно-импульсного ввода энергии (ДИВЭ) [5, 6].

В этом случае действительная величина потерь работоспособности может быть записана в виде

$$\Delta I_{\text{дейст}}^{\text{ДИВЭ}} = q_{\text{ДИВЭ}} \left\{ 1 - \frac{T_{\text{ДИВЭ}} - T_0}{T_{\text{ДИВЭ}}} \eta_{\text{теор}}^{\text{ДИВЭ}} \right\}, \quad (5)$$

где $\eta_{\text{теор}}^{\text{ДИВЭ}}$ – среднестатистическая величина степени термодинамического совершенства системы при использовании концепции ДИВЭ.

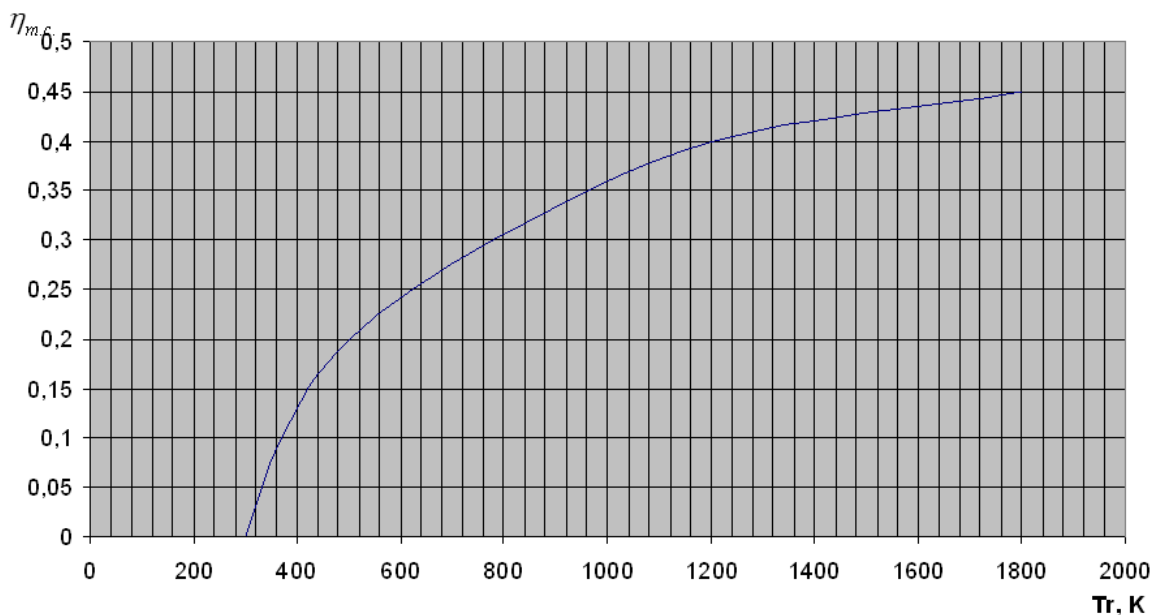


Рис. 1. Среднестатистические значения степени термодинамического совершенства от температуры источника теплоты.

Оценка степени совершенства исследуемой системы или объекта по величине изменения энтропии на основе статистической информации справедливо не только для анализа процессов в технических устройствах, но также и явлений в области биологии, в социальной среде и т.д. [7, 8].

В историческом плане большинство явлений могут рассматриваться как эволюционирующие, критерием которого служит иерархия синтеза информации. Ценностью синтеза информации назовем число Z_k , показывающее во сколько раз уменьшается количество информации при переходе к следующей ступени синтеза информации:

$$Z_k = S_{k+1} / S_k. \quad (6)$$

Эволюция, направленная в сторону более высокоорганизованных форм есть процесс иерархического увеличения суммарной энергии исследуемого явления или объекта.

В настоящее время, в связи с развитием неравновесной термодинамики, основным методом исследования энергетических систем стал эксергетический анализ. В соединении с экономическим анализом возникло новое направление в науке – эксергоэкономика, имеющая цель оптимизацию энергетических систем.

Введение понятия «эксергии» и «эксергоэкономики» позволяет выполнить анализ явлений необратимости и ее влияния на стоимость протекающих процессов.

Следует подчеркнуть, что эксергетический метод не может дать результатов, принципиально отличных от классических термодинамических. Это лишь новое средство проведения анализа.

Приведем наиболее полное и точное определение эксергии [9].

«Эксергия – это максимально возможная полезная работа (работоспособность) некоторого вещества, которое по химическому составу отличается от окружающей среды ($\mu \neq \mu_0$), находится при давлении и температуре, отличных от аналогичных характеристик окружающей среды ($p \neq p_0$ и $T \neq T_0$), если данное рабочее

вещество полностью обратимо перевести из начального состояния (μ, T и p) в конечное, находящееся в равновесии с окружающей средой (μ_0, T_0 и p_0).

Отношение отводимой от системы эксергии $E_{\text{вых}}$ к подводимой эксергии $E_{\text{вх}}$ определяет значение эксергетического КПД.

Примем, что система состоит из конечного количества элементов $i = 1, 2, \dots, n$, то при аддитивности энтропии [10]

$$\Delta S_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \Delta S_i, \quad (7)$$

тогда, аналогично

$$\Delta \Pi_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \Delta \Pi_i, \quad (8)$$

где Π – расход эксергии.

Выражение для ΔS_i может быть записано в самом общем виде как алгебраическая сумма потоков энтропии и суммы приведенных теплот, подводимых (или отводимых) k -му элементу в процессе взаимодействия системы с внешними телами (рис. 2) [10].

$$\Delta S_i = \sum_{l_i=1}^{L_i} m_{l_i} s_{l_i} - \sum_{k_i=1}^{K_i} m_{k_i} s_{k_i} + \sum_{r_i=1}^{R_i} \frac{Q_{r_i}}{T_{r_i}}, \quad (9)$$

где m_{l_i}, m_{k_i} – количество потоков, входящие (k_i) в i -й элемент и исходящие (l_i) из i -го элемента; $k_i = 1, 2, \dots, K_i$; $l_i = 1, 2, \dots, L_i$; в общем случае $k_i \neq l_i$; Q_{r_i} – количество тепловых потоков, отводимых от i -го элемента (или подводимых к нему); $r_i = 1, 2, \dots, R_i$; T_{r_i} – температурный уровень соответствующих тепловых потоков Q_{r_i} .

Определив ΔS_i , можно найти значения Π_i , а затем и действительную полученную (или израсходованную) работу

$$\left. \begin{aligned} L_{\text{д}} &= L_{\text{обр}} - \Pi_{\Sigma} - \text{для прямых циклов} \\ L_{\text{д}} &= L_{\text{обр}} + \Pi_{\Sigma} - \text{для обратных циклов} \end{aligned} \right\},$$

где $L_{\text{обр}}$ – работа (полученная или израсходованная) в обратимом цикле-образце.

Для учета влияния каждой отдельной необратимости, то есть влияния каждого конкретного элемента системы на общие потери в

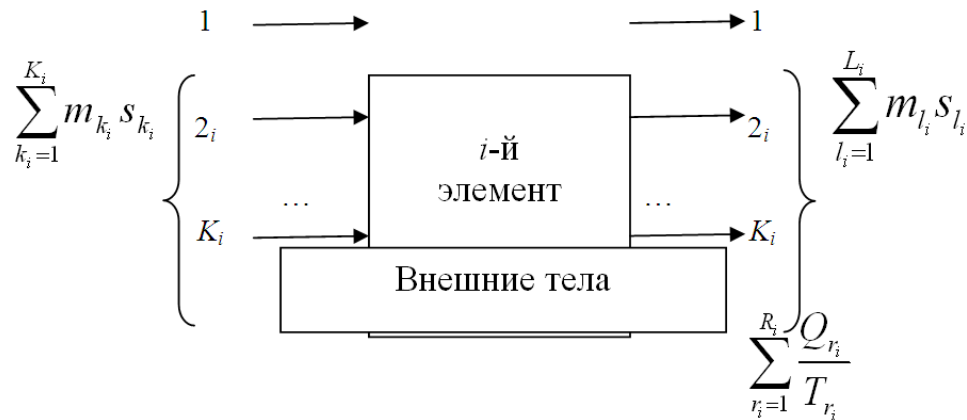


Рис. 2. Термодинамическая модель произвольного элемента энергопреобразующей системы.

системе, могут быть записаны выражения для относительных коэффициентов эксергетических потерь (для i -го элемента, где $i = 1, 2, \dots, n$):

$$\omega_i = \frac{\Pi_i}{\sum_{i=1}^n \Pi_i} = \frac{\Delta S_i}{\sum_{i=1}^n \Delta S_i}, \quad (10)$$

$$\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n = 1. \quad (11)$$

Для учета влияния каждой отдельной необратимости на общие потери эксергии, имеющие место в системе, запишем выражение для абсолютных коэффициентов эксергетических потерь

$$\Omega_i = \frac{\Pi_i}{E_{\text{вх}}}, \quad (12)$$

где Ω_i – абсолютный коэффициент эксергетических потерь i -го элемента системы; $E_{\text{вх}}$ – эксергия, которая вводится в систему (начальная энергия).

Полный абсолютный коэффициент эксергетических потерь

$$\Omega = \frac{\sum_{i=1}^n \Pi_i}{E_{\text{вх}}} = \Omega_1 + \Omega_2 + \dots + \Omega_n = \sum_{i=1}^n \Omega_i. \quad (13)$$

Эксергетический КПД рассмотренной энергетической системы равен

$$\eta_{\text{вх}} = \frac{E_{\text{вых}}}{E_{\text{вх}}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \Pi_i}{E_{\text{вх}}} = 1 - \Omega \quad (14)$$

Если известны ΔS_i , Π_i для каждого элемента, то можно определить ω_i , Ω_i и для действующей системы в целом.

Современный эксергетический анализ различает понятия «деструкции эксергии» (E_D) и «потери эксергии» (E_L) в k -м элементе системы, где $\Delta E_{\text{сум}} = E_D + E_L$. [11].

Деструкцией эксергии (англ. – exergy destruction) описывают необратимости, имеющие место в каждом элементе системы, не различая их, как ранее, на внутренние и внешние.

Потери эксергии (англ. – exergy loses) возникают при тепловом взаимодействии k -го элемента с окружающей средой. Потери эксергии зависят от типа и конструкции аппарата, а также от температурного уровня его работы.

Особого внимания заслуживает метод эксергоэкономической оптимизации, на основе которого можно определить энергетические и экономические показатели в их взаимозависимости [10, 11].

Выводы

Эффективное средство оценки реальных энергетических процессов основывается на энтропийном (включая энтропийно-статистический) анализе и принципах эксергоэкономической концепции. Эксергоэ-

кономика удобна для определения энергетических показателей неравновесных явлений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Драганов Б.Х., Долінський А.А., Міщенко А.В., Письменний Є.М. (за ред. Б.Х. Драганова). *Теплотехніка: Підручник*. – К.: «ІНКОС», 2005. – 504 с.
2. Буляндра О.Ф. *Технічна термодинаміка*. – К.: Вища школа, 2001. – 320 с.
3. *Теплотехника* / А.М. Архаров, С.И. Исаев, И.А. Кожин и др., Под общей ред. В.И. Крутова. – М.: Машиностроение, 1986. – 432 с.
4. Архаров А.М., Сычев В.В. Основы энтропийно-статистического анализа реальных энергетических потерь в низкотемпературных и высокотемпературных машинах и устройствах // *Холодильная техника*. – 2005. – №12. – С. 14–23.
5. Долінський А.А. Принцип дискретно-імпульсного вводу енергії та його використання в технічних процесах // *Вісник АН УССР*. – 1984. – №1. – С. 39–46.
6. Накорчевський А.И., Басок Б.И. Гидродинамика и тепломассоперенос в гетерогенных системах и пульсирующих потоках (под ред.

А.А. Долинского). – К.: Наукова думка, 2001. – 348 с.

7. *Николаас Дж.* Динамика иерархических систем: эволюционное представление. – М.: Мир, 1989. – 488 с.

8. Драганов Б.Х. Динамика синергетических и иерархических систем в эволюционных процессах // *Відновлювальна енергетика*. – 2009. – №2. – С. 5–7.

9. Морозюк Т.В. О корректном проведении эксергетического анализа // *Холодильная техника*. – 2006. – № 2. – С. 18–21.

10. *Morozuk T.V.* Metods entropijno-tyklowa w analizie termoeconomicznej absorpcyjnych przemiejmikov ciepla // *Chlodnictwo*. – 2000. – № 7. – Р. 6–10.

11. *Bejan A., Tsatsaronis G., Moran M.* *Thermal Design and Optimization*. – New York: J. Wiley, 1991.

12. *Тсатсаронис Д.* Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергопреобразующей системы / Под ред. и пер. с англ. Т.В. Морозюк. – Одесса: Студия «Негоциант», 2002. – 712 с.

Получено 04.01.2011 г.