

УДК 533.6.011

Эксергия потока газа при подводе тепла и диссипации кинетической энергии

А.Ф. Латыпов

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

E-mail: latypov@itam.nsc.ru

Приводится формула для определения эксергии потока газа при подводе/отводе тепла без конкретизации процесса и диссипации кинетической энергии.

Ключевые слова: поток газа, подвод/отвод тепла, диссипация, эксергия.

Эксергия потока тепла Q , подводимого к потоку газа при постоянной температуре T , определяется соотношением $e = Q(1 - T_\infty/T)$ [1], при переменной температуре — соотношением $e = \int (1 - T_\infty/T) dQ$ [2]. Эти соотношения следуют из определения эксергии и выражения для коэффициента полезного действия цикла Карно. Диссипативные процессы в газе существенно зависят от подводимых (отводимых) потоков тепла. В работе [3] было сформулировано условие существования стационарного течения в канале переменного сечения при подводе тепла и диссипации кинетической энергии. В каждом сечении энтропия газа не должна превышать максимального значения, определяемого числом Маха набегающего потока, количеством подведенного тепла и относительной площадью сечения. Значение эксергии, определяемое вышеприведенными формулами, может не достигаться вследствие нарушения условий существования предполагаемого течения. При значении энтропии, близком к максимально допустимому в некотором сечении, могут быть реализованы два структурно различных течения. При этом эксергии потока тепла различаются также существенно при равных значениях эксергии газа в рассматриваемом сечении. Поэтому разделять тепловые и диссипативные процессы, имея в виду также зависимость теплофизических свойств газов от температуры, давления, состава веществ, нецелесообразно и затруднительно.

В настоящей работе приводится вывод формулы для вычисления эксергии потока газа при подводе или/и отводе тепла без конкретизации процесса и диссипации кинетической энергии.

Пусть в термодинамическую систему, функционирующую во внешней среде с параметрами p_∞, T_∞ , поступает определенное количество m_R какого-либо газообразного

вещества с параметрами p_1, T_1, V_1 , топливо в количестве m_f с теплотворной способностью Hu и выходят продукты реакции в количестве $m_P = (m_R + m_f)$ с параметрами p_2, T_2, V_2 .

В результате горения выделяется количество тепла $Q_f = m_f \psi Hu$. Системой совершается работа A и отводится количество тепла Q_{out} . Полнота сгорания ψ вводится как для определения количества подводимого тепла, так и для математического моделирования состава продуктов сгорания.

По определению эксергии входящего и выходящего газов относительно параметров внешней среды равны соответственно:

$$E_{R1}(p_1, T_1) = m_R \left[(h_{R01} - h_R^\infty) - T_\infty \Delta s_{R1}^\infty \right],$$

$$E_{P2}(p_2, T_2) = m_P \left[(h_{P02} - h_P^\infty) - T_\infty \Delta s_{P2}^\infty \right].$$

Используя закон сохранения энергии

$$m_P (h_{P02} - h_P^*) = m_R (h_{R01} - h_R^*) + m_f (h_{0f} - h_f^* + \psi Hu) - W,$$

где h_{0f} — энтальпия топлива, $W = A + Q_{out}$, можно записать выражение для разности эксергий следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta E &= E_{P2}(p_2, T_2) - E_{R1}(p_1, T_1) = \\ &= m_P (h_{P02} - h_P^*) + m_P (h_P^* - h_P^\infty) - m_P T_\infty \Delta s_{P2}^\infty - \\ &= m_R (h_{R01} - h_R^*) - m_R (h_R^* - h_R^\infty) + m_R T_\infty \Delta s_{R1}^\infty = \\ &= m_f (h_{0f} - h_f^* + \psi Hu) - W + m_P (h_P^* - h_P^\infty) - m_R (h_R^* - h_R^\infty) - \\ &= T_\infty \left[m_P (\Delta s_{P2}^\infty - \Delta s_{P1}^\infty + \Delta s_{P1}^\infty) - m_R \Delta s_{R1}^\infty \right]. \end{aligned}$$

После преобразований получим:

$$\begin{aligned} \Delta E &= m_f \left[(h_{0f} - h_f^*) - (h_P^\infty - h_P^*) - T_\infty \Delta s_{P1}^\infty \right] + m_f \psi Hu - W - m_P T_\infty \Delta s_P - \delta E, \\ \Delta s_P &= \Delta s_{P2}^\infty - \Delta s_{P1}^\infty = s_{P2}(p_2, T_2) - s_{P1}(p_1, T_1); \\ \delta E &= m_R \left[(h_P^\infty - h_P^*) - (h_R^\infty - h_R^*) + T_\infty (\Delta s_{P1}^\infty - \Delta s_{R1}^\infty) \right]. \end{aligned}$$

Приращение энтропии Δs_P обусловлено необратимыми процессами в системе и может быть вычислено при задании физических моделей этих процессов. Дефект эксергии δE связан с различием составов входящих и выходящих потоков. Используя удельные эксергии и нормировки

$$e = E/m, \quad \bar{e} = e/a_\infty^2, \quad \bar{Hu} = Hu/a_\infty^2, \quad \bar{W} = W/a_\infty^2, \quad \Delta \bar{s} = \Delta s/R_\infty, \quad \bar{m}_f = m_f/m_R,$$

получим формулу для вычисления удельной эксергии выходящего потока:

$$\begin{aligned} (1 + \bar{m}_f) \bar{e}_2 &= \bar{e}_1 + \bar{m}_f \psi \bar{Hu} - \bar{W} - \frac{1}{\gamma_\infty} \left[\Delta \bar{s}_P + \bar{m}_f (\Delta \bar{s}_P + \Delta \bar{s}_{P1}^\infty) \right] + \delta \bar{e}_f - \delta \bar{e}, \\ \delta \bar{e}_f &= \bar{m}_f \frac{(h_{0f} - h_f^*) - (h_P^\infty - h_P^*)}{a_\infty^2}, \quad \delta \bar{e} = \frac{(h_P^\infty - h_P^*) - (h_R^\infty - h_R^*)}{a_\infty^2} + \frac{\Delta \bar{s}_{P1}^\infty - \Delta \bar{s}_{R1}^\infty}{\gamma_\infty}. \end{aligned}$$

В большинстве случаев слагаемое $\delta \bar{e}$ может быть опущено в силу его малости.

Опыт применения приведенного способа определения эксергии потока газа приведен в работах [4–5].

Список обозначений

p — давление,	h — удельная энтальпия,
T — температура,	s — удельная энтропия,
V — скорость потока,	E — эксергия,
M — число Маха,	Hi — теплотворная способность топлива,
γ — показатель адиабаты,	T^*, p^* — опорные значения температуры и давления
R_∞ — газовая постоянная внешней среды,	для определения теплотворной способности топлива.
a — скорость звука,	

$$h_i = h(p_i, T_i), h_{R\vee P}^\infty = h_{R\vee P}(p_\infty, T_\infty), h_{R\vee P\vee f}^* = h_{R\vee P\vee f}(p^*, T^*),$$

$$S_i = s(p_i, T_i), s_i^\infty = s_i(p_\infty, T_\infty), \Delta s_i^\infty = s_i - s_i^\infty, \quad i = 1, 2, \quad \vee \text{ — означает "или"}.$$

Индексы

∞ — внешняя среда,	1 — вход,
f — топливо,	2 — выход,
P — продукты,	0 — параметры заторможенного потока.
R — реагенты,	

Список литературы

1. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейдлин А.Е. Техническая термодинамика // М.: Наука, 1979. 512 с.
2. Хейвуд Р. Термодинамика равновесных процессов // М.: Мир, 1983. 493 с.
3. Латыпов А.Ф. Условие существования стационарного течения в канале переменного сечения при подводе тепла и диссипации кинетической энергии // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38, № 22. С. 21–27.
4. Латыпов А.Ф. Эксергетический анализ прямоточного воздушно-реактивного двигателя // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т. 16, № 2. С. 319–330.
5. Латыпов А.Ф. Эксергетический метод оценки удельного импульса прямоточного воздушно-реактивного двигателя // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20, № 5. С. 547–560.

Статья поступила в редакцию 5 марта 2015 г.