

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА
И ТЕРМОХИМИЯ

УДК 541.11

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОПТИМАЛЬНОГО
РЕЖИМА ТЕПЛОВОЙ МАШИНЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕХАНИЗМАХ
ПЕРЕНОСА ТЕПЛОТЫ

© 2020 г. Л. И. Хейфец^{а,*}, В. Л. Зеленко^{а,**}

^аМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Химический факультет,
119991, Москва, Россия

*e-mail: heifets@tech.chem.msu.ru

**e-mail: zel_07@mail.ru

Поступила в редакцию 03.06.2019 г.

После доработки 24.06.2019 г.

Принята к публикации 03.09.2019 г.

На основе принципа максимальной мощности Алиханова–Новикова проведена оценка эксергетической эффективности и получено выражение для к.п.д. тепловой машины в зависимости от механизма переноса теплоты от источника теплоты к генератору. Проведено сравнение потерь эксергии для нескольких описанных в литературе промышленных тепловых электростанций.

Ключевые слова: квалифицированная энергия, неквалифицированная энергия, к.п.д., эффективность, тепловая машина, максимальная мощность, генерация энтропии, число Нуссельта

DOI: 10.31857/S0044453720060138

К.П.Д. ЭНЕРГОПРЕОБРАЗУЮЩЕГО
УСТРОЙСТВА

Энергопреобразующим устройством ЭПУ назовем устройство, преобразующее поток энергии \dot{E}_1 , состоящий в общем случае из потоков квалифицированной и неквалифицированной энергии, в поток квалифицированной энергии \dot{W}_2 . В отличие от потока квалифицированной энергии поток неквалифицированной энергии, например, теплота, энтальпия, излучение, всегда сопряжен с потоком энтропии [1]. С термодинамической точки зрения ЭПУ представляет собой открытую систему (рис. 1). Здесь обозначены: поток энтальпии \dot{H} , поток теплоты \dot{Q} , излучение \dot{J} , поток энтропии \dot{S} , поток квалифицированной энергии \dot{W} , мощность источника энтропии, характеризующая неидеальность ЭПУ, $\dot{\sigma}$. Верхние индексы (m) и (r) характеризуют потоки энтропии, переносимые веществом и излучением, нижние индексы: 1 – вход в ЭПУ; 2 – выход из ЭПУ. В частности, \dot{W}_1 – потребляемый поток квалифицированной энергии, используемый для обеспечения функционирования ЭПУ (электромоторы, насосы, компрессоры), \dot{W}_2 – переданный внешнему потребителю поток произведенной квалифицированной энергии. Далее будем рассматривать только стационарные ЭПУ.

Запишем стационарные уравнения баланса энергии и энтропии для ЭПУ (рис. 1)

$$\begin{aligned} \Delta \dot{H} + \Delta \dot{J} + \dot{W}_1 + \dot{Q}_1 &= \dot{W}_2 + \dot{Q}_2, \\ \Delta \dot{S}^{(m)} + \Delta \dot{S}^{(r)} + \dot{Q}_1/T_1 + \dot{\sigma} &= \dot{Q}_2/T_2, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\Delta \dot{H} = \dot{H}_1 - \dot{H}_2$, $\Delta \dot{S}^{(m)} = \dot{S}_1^{(m)} - \dot{S}_2^{(m)}$, $\Delta \dot{J} = \dot{J}_1 - \dot{J}_2$, $\Delta \dot{S}^{(r)} = \dot{S}_1^{(r)} - \dot{S}_2^{(r)}$.

В теплоэнергетике потоком преобразуемой энергии является поток теплоты сгорания топ-

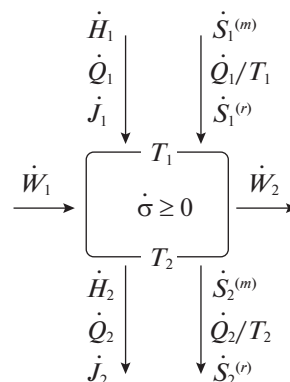


Рис. 1. Принципиальная схема энергопреобразующего устройства. Стрелки – входящие (нижний индекс 1) и выходящие (нижний индекс 2) потоки энергии и энтропии.

ливной смеси, т.е. разность потоков энтальпии топливной смеси и энтальпии продуктов сгорания, $\Delta\dot{H} = \dot{H}_1 - \dot{H}_2$. В общем случае определим поток преобразуемой энергии \dot{E}^* и сопряженный этому потоку поток энтропии \dot{S}^* как

$$\begin{aligned}\dot{E}^* &= \Delta\dot{H} + \Delta\dot{J} + \dot{W}_1 + \dot{Q}_1, \\ \dot{S}^* &= \Delta\dot{S}^{(m)} + \Delta\dot{S}^{(r)} + \dot{Q}_1/T_1.\end{aligned}\quad (2)$$

Определения (2) позволяют представить уравнения баланса энергии и энтропии (1) в виде соотношений между потоком преобразуемой энергией \dot{E}^* , сопряженным потоком энтропии \dot{S}^* , неравенством Клаузиуса, потоком произведенной полезной работы \dot{W}_2 и потоком рассеянной теплоты \dot{Q}_2

$$\begin{aligned}\dot{E}^* - \dot{W}_2 - \dot{Q}_2 &= 0, \\ \dot{S}^* + \dot{\sigma} - \dot{Q}_2/T_2 &= 0, \\ \dot{\sigma} &\geq 0.\end{aligned}\quad (3)$$

Определяя к.п.д. ЭПУ обычным образом в виде отношения потока полученной квалифицированной энергии к потоку преобразуемой энергии, получаем формулу для расчета к.п.д. реального стационарного ЭПУ

$$\eta_{\text{real}} = \frac{\dot{W}_2}{\dot{E}^*} = \left(1 - \frac{T_2\dot{S}^*}{\dot{E}^*}\right) - \frac{T_2\dot{\sigma}}{\dot{E}^*}.\quad (4)$$

При $\dot{\sigma} \rightarrow 0$ выражение (4) переходит в к.п.д. идеального стационарного ЭПУ $\eta_{\text{id}} = \left(1 - \frac{T_2\dot{S}^*}{\dot{E}^*}\right)$ [1].

Реальное ЭПУ представляет собой суперпозицию многих локальных процессов, неидеальность которых характеризуется мощностью локального источника энтропии $\dot{\sigma}_i \geq 0$. С термодинамической точки зрения идеальным образом реального устройства является устройство, в котором все процессы в соответствии с условием Гиббса реализованы “при помощи механических и термодинамических устройств, теоретически предполагаемых идеальными” [2]. Следовательно, условие идеальности ЭПУ преобразуется в систему локальных условий идеальности $\dot{\sigma}_i = 0$, при этом интегральное условие $\dot{\sigma} = \sum_i \dot{\sigma}_i = 0$ будет выполняться автоматически. Очевидно, при фиксированных внешних условиях (поток преобразуемой энергии, температура), величины \dot{S}^* , \dot{E}^* при $\dot{\sigma}_i \rightarrow 0$, вообще говоря, отличаются от наблюдаемых в реальном устройстве.

Рассмотрим несколько примеров, подтверждающих корректность формулы (4).

а) Преобразование потока теплоты \dot{Q}_1 в поток квалифицированной энергии при помощи идеального цикла Карно. Для идеального цикла имеем $\dot{\sigma} = 0$, определения (2) принимают вид $\dot{E}^* = \dot{Q}_1$,

$\dot{S}^* = \dot{Q}_1/T_1$ и формула (4) преобразуется в формулу Карно [3]

$$\eta_c = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

б) Преобразование потока квалифицированной энергии \dot{W}_1 в поток квалифицированной энергии (электромотор, электрогенератор). Определения (2) принимают вид $\dot{E}^* = \dot{W}_1$, $\dot{S}^* = 0$ (квалифицированная энергия вклад в энтропию не вносит), и формула (4) преобразуется в

$$\eta_{\text{real}} = 1 - \frac{T_2\dot{\sigma}}{\dot{W}_1}.$$

В идеальном случае (отсутствие трения и других устранимых потерь, вызывающих тепловые эффекты) имеем $\dot{\sigma} = 0$, следовательно, квалифицированную энергию в принципе можно полностью преобразовать в квалифицированную энергию.

в) Преобразование потока химической энергии в поток квалифицированной (электрической) энергии в идеальном топливном элементе. Для идеального топливного элемента $\dot{\sigma} = 0$, определения (2) при заданной конверсии принимают вид $\dot{E}^* = \Delta\dot{H}$, $\dot{S}^* = \Delta\dot{S}^{(m)}$ и формула (4) преобразуется в

$$\eta_{\text{id}} = 1 - \frac{T_2\Delta\dot{S}^{(m)}}{\Delta\dot{H}}.$$

Используя термодинамические таблицы, с помощью этой формулы нетрудно рассчитать к.п.д. обратимого топливного элемента для любой пары окислитель–топливо. Например, для водородо-воздушного топливного элемента, работающего при температуре $T_2 = 298$ К, получаем $\eta = 0.945$.

г) Преобразование излучения в поток квалифицированной (электрической) энергии в идеальном фотоэлектрическом преобразователе. Для идеального фотоэлектрического преобразователя $\dot{\sigma} = 0$, определения (2) принимают вид $\dot{E}^* = \Delta\dot{J}$, $\dot{S}^* = \Delta\dot{S}^{(r)}$ и при температуре фотоэлемента T_2 формула (4) преобразуется в

$$\eta_{\text{id}} = 1 - \frac{T_2\Delta\dot{S}^{(r)}}{\Delta\dot{J}},$$

которая после подстановки известных формул $\Delta\dot{J} = \alpha(T_1^4 - T_2^4)$, $\Delta\dot{S}^{(r)} = \frac{4}{3}\alpha(T_1^3 - T_2^3)$, где $\alpha = 5.67 \times 10^{-8}$ Дж/(с К⁴) – постоянная Стефана–Больцмана, преобразуется при $T_1 > T_2$ в формулу академика М.А. Леонтовича [4]

$$\eta_{\text{id}} = 1 - \frac{4T_2}{3T_1}.$$

Для идеального фотоэлектрического преобразователя, поглощающего солнечное излучение $T_1 = 5800$ К и работающего при температуре окружающей среды $T_2 = T_0 = 298$ К, $\eta_{id} = 93\%$ [4]. В то же время в этих условиях к.п.д. цикла Карно $\eta_C = 95\%$, что объясняется отличием сопряженных потоков энтропии.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛОВОЙ МАШИНЫ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ

Тепловая машина представляет собой частный случай ЭПУ, преобразующего поступающий от источника теплоты (нагревателя) тепловой поток \dot{Q}_1 с температурным потенциалом T_1 в передаваемый внешнему потребителю поток квалифицированной энергии \dot{W}_2 и передаваемый в холодильник тепловой поток \dot{Q}_2 с температурным потенциалом $T_2 < T_1$.

Реальная тепловая машина состоит из генератора квалифицированной энергии (полезной работы) и комплекса вспомогательных устройств, обеспечивающих обмен энергией генератора с устройствами. К вспомогательным устройствам относятся, в частности, резервуары теплоты (“горячий”, или нагреватель, и “холодный”, или холодильник), теплообменные устройства, дроссели. Многолетние усилия инженеров и конструкторов способствовали созданию эффективных генераторов квалифицированной энергии (газовые и паровые турбины) для тепловых электростанций. Поэтому можно принять, что генератор квалифицированной энергии в сравнении с остальными элементами тепловой машины генерирует минимальное количество энтропии и может рассматриваться как идеальное устройство, например, как идеальный цикл Карно. Это позволяет представить структуру реальной тепловой машины двумя взаимосвязанными генераторами – идеальным генератором квалифицированной энергии (цикл Карно) и генератором энтропии (комплекс вспомогательных устройств).

При таком представлении мощность и к.п.д. тепловой машины совпадает с мощностью и к.п.д. цикла Карно, а неидеальность тепловой машины характеризуется мощностью источника энтропии комплекса вспомогательных устройств. Это позволяет применить для определения оптимального режима функционирования тепловой машины вариационный принцип максимальной мощности, сформулированный в 1955 г. академиком А.И. Алихановым [5] и обобщенный в 1957 г. академиком И.И. Новиковым [6]. Принцип Алиханова–Новикова утверждает, что при заданных внешних условиях оптимальному режиму функционирования тепловой машины соответствует его максимальная мощность. Математически задача сводится к решению вариационной задачи

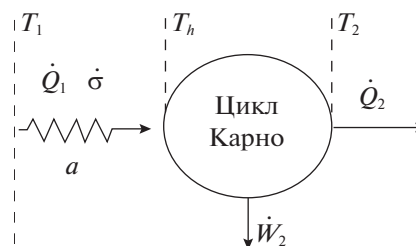


Рис. 2. Адекватная модель тепловой машины, состоящей из одного теплопередающего устройства a и цикла Карно. Схема из работы [8].

на границе между идеальным генератором и генератором энтропии при фиксированных внешних условиях. Заметим, что в литературе при рассмотрении тепловой машины конечной мощности с генератором полезной работы в виде идеального цикла Карно употребляют термины “endoreversible converter” и “endoreversible heat engine” [7].

Для упрощения дальнейших выкладок в качестве резервуаров теплоты будем рассматривать идеальные термостаты (температура “горячего” термостата T_1 , температура “холодного” термостата $T_2 < T_1$), предполагая идеальность процесса теплообмена цикла Карно с “холодным” резервуаром. Тогда в первом приближении в качестве адекватной модели реальной тепловой машины можно рассмотреть суперпозицию идеального цикла Карно и генератора энтропии, составленного из единственного теплообменного устройства a , передающего тепловой поток \dot{Q}_1 от горячего термостата с температурой T_1 к циклу Карно при температуре T_h на изотермической стадии получения теплоты циклом Карно (рис. 2) [8]. В этом случае неидеальность тепловой машины характеризуется мощностью источника энтропии $\dot{\sigma}$ единственного теплообменного устройства.

Следуя схеме тепловой машины на рис. 2 и используя принцип Алиханова–Новикова была рассчитана безразмерная температуры $\theta = \frac{T_h}{T_1}$ изотермической стадии получения теплоты циклом Карно [8]

$$\theta(n) = \frac{n}{2(n+1)}\chi + \sqrt{\frac{n^2}{4(n+1)^2}\chi^2 + \frac{\chi}{(n+1)}} \quad (5)$$

Здесь $\chi = T_2/T_1$ – параметр, характеризующий внешние условия функционирования рассматриваемой тепловой машины, n – параметр Нуссельта, характеризующий механизм переноса теплоты в теплообменном устройстве. К.п.д. адекватной

тепловой машины максимальной мощности η_{real} тождественен к.п.д. цикла Карно $\eta_C = 1 - \frac{T_2}{T_h}$ и в переменных θ и χ имеет вид

$$\eta_{\text{real}} = 1 - \frac{\chi}{\theta}. \quad (6)$$

Подставив выражение (5) в формулу (6), получим общее выражение для к.п.д. адекватной тепловой машины максимальной мощности в зависимости от определяющих параметров тепловой машины n и χ

$$\eta_{\text{real}} = 1 - \frac{2(n+1)}{n} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4(n+1)}{n^2\chi}} \right)^{-1}. \quad (7)$$

Нетрудно видеть, что при фиксированном отношении температур холодильника и нагревателя χ к.п.д. тепловой машины максимальной мощности уменьшается с увеличением параметра Нуссельта n . В частности, при $n \rightarrow \infty$ имеем $\theta \rightarrow \chi$, $\eta_{\text{real}} \rightarrow 0$; при $n \rightarrow -1$ (при условии $n > -1$) имеем $\theta \rightarrow 1$ и $\eta_{\text{real}} \rightarrow 1 - \chi$. При $n = 0$ (линейная зависимость потока теплоты \dot{Q}_1 от движущей силы теплопередачи $(T_1 - T_h)$) выражение (7) преобразуется в формулу

$$\eta_N = 1 - \sqrt{\chi} = 1 - \sqrt{T_2/T_1}, \quad (8)$$

которую, исходя из публикаций [6, 9, 10], называют формулой Шамбадала–Новикова (Chambadal–Novikov efficiency). В работе [11] аналогичное формуле (8) выражение получено для тепловой машины, максимальной мощности, состоящей из цикла Карно и двух теплообменных устройств, характеризуемых линейной зависимостью потока теплоты от движущей силы.

Эффективность ЭПУ можно охарактеризовать скоростью потерь эксергии, равной скорости генерации энтропии $\dot{\sigma}$, умноженной на температуру универсального термостата T_0 , за которую обычно принимают величину $T_0 = 298 \text{ K}$ [1]. Заметим, что в известной монографии [10] вместо понятия “эксергия” используется термодинамически эквивалентное понятие “полезная энергия”. Определим удельные потери эксергии тепловой машины на единицу мощности тепловой машины как

$$\dot{e} = \frac{\dot{\sigma} T_0}{\dot{W}_2}. \quad (9)$$

Мощность тепловой машины \dot{W}_2 и поток преобразуемой теплоты \dot{Q}_1 связаны общим определением к.п.д. реального ЭПУ

$$\eta_{\text{real}} = \frac{\dot{W}_2}{\dot{Q}_1}. \quad (10)$$

В рамках принятой модели (рис. 2) мощность тепловой машины тождественна мощности цикла

Карно, функционирующего между температурами T_1 и T_h , а скорость генерации энтропии тепловой машины тождественна скорости генерации энтропии в теплообменном устройстве. Из баланса энтропии стационарного теплообменного устройства a

$$\dot{\sigma} = \dot{Q}_1 \left(\frac{1}{T_h} - \frac{1}{T_1} \right)$$

и соотношений (8) и (10) следует формула для оценки удельных потерь эксергии на единицу мощности тепловой машины

$$\dot{e} = \frac{T_0}{T_1} \frac{1 - \theta}{\eta_{\text{real}} \theta}. \quad (11)$$

Из баланса эксергии стационарного энергопреобразующего устройства следует, что максимальная работа \dot{W}_{max} , которую в принципе может совершить тепловая машина, равна произведенной реальной работе $\dot{W}_2 = \dot{Q}_1 \eta_{\text{real}}$ плюс работа, которую можно получить из сбрасываемой в холодильник с температурой T_2 теплоты \dot{Q}_2 , плюс потери эксергии $\dot{\sigma} T_0$ [1]

$$\dot{W}_{\text{max}} = \dot{W}_2 + \dot{Q}_2 \left(1 - \frac{T_0}{T_2} \right) + T_0 \dot{\sigma}. \quad (12)$$

Работа идеальной тепловой машины совпадает с работой цикла Карно \dot{W}_C и является по определению максимальной работой $\dot{W}_{\text{max}} = \dot{W}_C$, поэтому в случае равенства температур холодильника T_2 и окружающей среды T_0 формулу (12) можно представить в виде

$$1 - \frac{\dot{\sigma} T_0}{\dot{W}_C} = \frac{\dot{W}_2}{\dot{W}_C}. \quad (13)$$

Если ввести коэффициент эксергетической эффективности ЭПУ

$$\lambda_e = 1 - \dot{\sigma} T_0 / \dot{W}_C, \quad (14)$$

то, комбинируя формулы (13) и (14), получим

$$\lambda_e = \eta_{\text{real}} / \eta_C. \quad (15)$$

При переносе тепла по механизму теплопроводности к.п.д. реальной машины вычисляется по формуле Шамбадала–Новикова $\eta_{\text{real}} = \eta_N = 1 - \sqrt{T_2/T_1}$ и поскольку $\eta_C = 1 - T_2/T_1$, то из (15) следует, что коэффициент эксергетической эффективности реальной тепловой машины с переносом тепла по механизму теплопроводности принимает значение

$$\lambda_e = \left(1 + \sqrt{T_2/T_1} \right)^{-1}.$$

В случае других механизмов переноса тепла в формулу для расчета коэффициента эксергетической эффективности тепловой машины будет входить параметр Нуссельта n .

Таблица 1. Реальные и расчетные значения параметров

| Источник теплоты | $\chi = T_2/T_1$ | η_{real} | η_{C} | η_{N} | n | θ | $\dot{\epsilon}$ | λ_e |
|------------------|------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-------|----------|------------------|-------------|
| A, $T_1 = 573$ K | 0.52 | 0.30 | 0.48 | 0.28 | -0.20 | 0.74 | 0.61 | 0.625 |
| B, $T_1 = 838$ K | 0.36 | 0.36 | 0.64 | 0.4 | 0.35 | 0.56 | 0.76 | 0.562 |
| C, $T_1 = 523$ K | 0.67 | 0.16 | 0.33 | 0.18 | 0.33 | 0.8 | 0.89 | 0.485 |

В качестве примера рассмотрим имеющиеся в литературе данные о некоторых тепловых электростанциях, использующих различные источники теплоты – горение угля, атомный реактор и геотермальное тепло [11]. Будем исходить из предположения, что эти электростанции функционируют в оптимальных условиях, что является следствием заведомо тщательной проработки всех инженерных и технологических решений при проектировании этих электростанций. Тогда в соответствии с принципом Алиханова–Новикова эти электростанции генерируют максимальную мощность при заданных внешних условиях – температуры нагревателя T_1 и холодильника T_2 .

Реальные значения параметров трех промышленных электростанций, отличающихся источниками теплоты, реальными к.п.д. η , к.п.д. цикла Карно η_{C} и к.п.д. Новикова η_{N} , приведены в первых пяти столбцах Таблицы 1 (все данные из работы [11]), А – атомная электростанция, В – угольная электростанция, С – геотермальная электростанция, $\chi = T_2/T_1$). Используя реальные значения η_{real} и χ , из формулы (6) вычислим для каждой электростанции значения безразмерной температуры θ , а из формулы (5) рассчитаем для каждой электростанции параметр Нуссельта n . Из соотношения (11) определим потери эксергии $\dot{\epsilon}$ на единицу мощности для каждой электростанции при условии ее максимальной мощности. Коэффициент эксергетической эффективности тепловой машины λ_e рассчитан по формуле (15). Расчетные значения приведены в четырех последних столбцах таблицы 1.

Из результатов расчета следует, что среди рассмотренных в статье [11] трех промышленных электростанций при условии максимальной мощности наименьшие удельные потери эксергии и наибольший коэффициент эксергетической эффективности демонстрирует атомная электростанция, а наибольшие удельные потери эксергии и наименьший коэффициент эксергетической эффективности – геотермальная электростанция. Интересно отметить, что рассчитанное значение $n = -0.20$ близко к параметру Нуссельта при переносе теплоты конденсацией пара, а рассчитанные значения $n = 0.35$ и $n = 0.33$ близки к известным параметрам Нуссельта, относящимся к конвективному теплопереносу [12]. К сожалению, типы теплообменных устройств в статье [11] не обсуждаются.

ВЫВОДЫ

1. Предложено выражение для оценки к.п.д. устройства, преобразующего в квалифицированную энергию различные потоки неквалифицированной энергии.

2. Получена формула для расчета к.п.д. тепловой машины максимальной мощности, учитывающая параметр Нуссельта, характеризующий механизм переноса тепла в теплообменном устройстве.

3. Конкретизировано выражение коэффициента эксергетической эффективности тепловой машины максимальной мощности как отношение к.п.д. реального энергопреобразующего устройства к к.п.д. цикла Карно, функционирующего в тех же условиях.

4. Из анализа литературных данных следует, что по сравнению с угольной и геотермальной станциями атомная электростанция максимальной мощности имеет наибольшее значение коэффициента эксергетической эффективности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хейфец Л.И., Зеленко В.Л. Химическая технология. Теоретические основы. М.: Академия, 2015. 462 с.
2. Гиббс Дж.У. Термодинамика. Статистическая механика. М.: Наука, 1982. 584 с.
3. Пригожин И., Конденуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. М.: Мир, 2002. 461 с.
4. Леонтович М.А. // Успехи физ. наук. 1974. Т. 114. Вып. 3. С. 555.
5. Алиханов А.И., Владимирский В.В., Петров П.А., Христенко П.М. // Атомная энергия. 1956. № 1. С. 5.
6. Новиков И.И. // Атомная энергия. 1957. № 11. С. 409.
7. Dong Y., El-Bakkali A., Descombes G. et al. // Entropy. 2012. V. 14. P. 642.
8. Зеленко В.Л., Хейфец Л.И. // Журн. физ. химии. 2019. Т. 93. № 7. С. 971.
9. Feidt M. // Entropy. 2017. V. 19. P. 369.
10. Шамбадаль П. Развитие и приложения понятия энтропии. М.: Наука, 1967. 279 с.
11. Curson F.L., Ahlborn B. // Am. J. Physics. 1975. V. 43. P. 22.
12. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344 с.