УДК 620.9: 697(075.3) DOI: 10.18324/2077-5415-2018-2-63-69

Методы определения эксергии теплоты для исследования низкотемпературных и криогенных процессов

В.С. Степанов[a], Т.Б. Степанова[b], Н.В. Старикова[c]

Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова 83, Иркутск, Россия
[a,b]stepanov@istu.edu, [c]natalia-starikova@yandex.ru
[a] https://orcid.org/0000-0001-8331-8337, [b]https://orcid.org/0000-0002-1546-8816,
[c] https://orcid.org/0000-0002-2649-5318
Статья поступила 19.03.2018, принята 23.04.2018

В настоящее время метод эксергетического анализа для исследования различных технических систем разработан достаточно хорошо. Исключение составляют низкотемпературные и криогенные процессы, протекающие при температурах ниже температуры окружающей среды (установки для обеспечения микроклимата в зданиях различного назначения, системы разделения воздуха и других газовых смесей и т. п.). Часто результаты исследований таких технических систем выглядят неубедительными, либо даже противоречащими здравому смыслу. Причины кроются как в формальном перенесении в эту область приемов эксергетического анализа, хорошо работающих при исследовании высокотемпературных процессов, так и в трактовке самого понятия «эксергия» без учета особенностей функционирования низкотемпературных процессов. На основе анализа публикаций авторы статьи предложили новый метод определения эксергии теплоты для процессов, протекающих при любой температуре, в том числе и низкотемпературных. Для этого вводится понятие совокупной изолированной системы, включающей исследуемую техническую систему и окружающую среду. Процесс установления равновесия в такой системе зависит от соотношения температур источника и приемника. Если температура рассматриваемой системы выше температуры окружающей среды, равновесие в совокупной системе устанавливается за счет передачи теплоты от этой системы окружающей среде. Часть передаваемой теплоты при этом может быть преобразована в работу. При противоположном соотношении температур равновесие в совокупной системе может быть установлено только за счет теплоты окружающей среды. В этом случае окружающая среда выступает источником теплоты, а техническая система становится ее приемником. Такое представление процессов, происходящих в совокупной изолированной неравновесной системе, состоящей из технической системы и окружающей среды, позволяет правильно определить значение эксергии при любой температуре.

Ключевые слова: низкотемпературные процессы; эксергетический анализ; эксергия теплоты; методы определения.

Methods for determining heat exergy for the study of low-temperature and cryogenic processes

V.S. Stepanov[a], T.B.Stepanova[b], N.V.Starikova[c]

Irkutsk State Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia
[a,b]stepanov@istu.edu, [c]natalia-starikova@yandex.ru
[a] https://orcid.org/0000-0001-8331-8337, [b]https://orcid.org/0000-0002-1546-8816,
[c] https://orcid.org/0000-0002-2649-5318
Received 19.03.2018, accepted 23.04.2018

At present, the method of exergic analysis for the study of various technical systems has been developed quite well. The exception is low-temperature and cryogenic processes occurring at temperatures below ambient temperature (installations for providing microclimate in buildings for various purposes, air separation systems and other gas mixtures, etc.). The results of studies of such technical systems often look unconvincing, or even contrary to common sense. The reasons lie both in the formal transfer to this area of the methods of exergetic analysis, which work well in the study of high-temperature processes, and in the interpretation of the term "exergy", without taking into account the features of the functioning of low-temperature processes. Based on the analysis of publications, the authors of the article proposed a new method for determining the exergy of heat for processes occurring at any temperature, including low one. For this purpose, the concept of a cumulative isolated system, including the technical system and the environment under consideration, is introduced. The process of establishing an equilibrium in such a system depends on the ratio of the source and receiver temperatures. If the temperature of the considered system is higher than the ambient temperature, the equilibrium in the cumulative system is established due to the transfer of heat from this system to the environment. Part of the transferred heat can be converted into work. With the opposite temperature relationship, equilibrium in the cumulative system can be established only at the expense of the heat of the environment. In this case, the environment acts as a source of heat, and the technical system becomes its receiver. Such a representation of the processes occurring in the cumulative isolated non-equilibrium system consisting of a technical system and the environment allows us to correctly determine the exergy value at any temperature.

Key words: low-temperature processes; exergy analysis; thermal exergy; estimating methods.

Введение

Метод эксергетического анализа различных технических систем в настоящее время находит широкое применение. При этом для установок, в которых осуществляются процессы при температурах выше температуры окружающей среды (ОС), он достаточно хорошо разработан и апробирован на многочисленных примерах [1–5]. Результаты приложения метода в рассмотренных примерах не противоречат здравому смыслу и не являются абсурдными или труднообъяснимыми. Этого нельзя сказать об опыте использования эксергетического метода применительно к техническим системам**,** в которых процессы реализуются при температурах ниже температуры окружающей среды (установки для обеспечения микроклимата в зданиях различного назначения, системы разделения воздуха и других газовых смесей и т. п.).

Такие процессы и установки широко используются в промышленности, строительстве, жилищно-коммунальном секторе, и, соответственно, энергопотребление в этой сфере растет с каждым годом. Поэтому важно обратить внимание на разработку показателей и методов оценки энергоэффективности низкотемпературных процессов, которые имеют фундаментальное значение.

Существует значительное число работ как отечественных, так и зарубежных авторов [6–8], посвященных эксергетическому анализу технических объектов, реализуемых в области таких температур. Авторы этих публикаций, как правило, не уделяют должного внимания специфическим особенностям приложений эксергетического метода в подобного рода случаях. Даже трактовка самого понятия «эксергия» применительно к таким установкам ими, как правило, даже не обсуждается, делается лишь ссылка на классиков эксергетического метода. При этом надо отметить, что и у самих классиков нет единого взгляда на понятие эксергии применительно к теплоте с температурами ниже температуры окружающей среды.

Каким образом трактовать понятие «эксергия» при исследовании подобного рода процессов и как определять ее численное значение — это, на наш взгляд, основные вопросы, требующие уточнения. Чтобы ответить на них, необходимо вспомнить об истоках происхождения понятия «эксергия».

В соответствии с 2-м законом термодинамики, для того, чтобы преобразовать количество теплоты Q_1 с температурой T_1 в работу, необходимо иметь не только источник теплоты, но и теплоприемник, куда бы сбрасывалась теплота Q_2 с температурой $T_2 < T_1$, не способная совершать работу.

В случае, когда приемником теплоты является ОС с параметрами p_0, T_0, максимальная работа, которая может быть получена из теплоты Q_1, $A_{\max} = Q_1 - Q_0$ (где Q_0 — теплота, переданная окружающей среде), была названа З. Рантом *эксергией* — E_q. Теплоту Q_0, неспособную производить работу, он предложил назвать *анергией* — B_q [9]. Иначе говоря, в работу может быть преобразована лишь часть подведенной к тепловой машине теплоты Q_1, равная $A = Q_1 - Q_2$ (рис. 1).

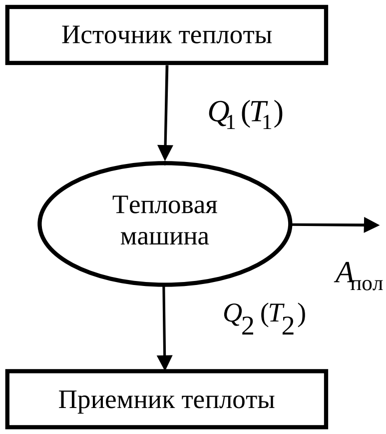

Рис. 1. Схема преобразования теплоты в работу

Как известно, КПД тепловой машины С. Карно определяется соотношениями:

$$\eta_t = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \qquad (1)$$

откуда следует, что значение КПД показывает, как изменяется ценность (работоспособность) подведенной к машине теплоты при изменении ее температуры и постоянстве температуры теплоприемника.

Таким образом, если процессы взаимодействия технической системы с окружающей средой осуществлены обратимо, тогда $A_{\max} = E_q$ и $E_q = \eta_t \cdot Q_1$. Откуда следует, что эксергия характеризует работоспособность подводимого к тепловой машине Карно тепла в том случае, когда $T_1 > T_2$. При этом нет указания, где и каким образом оно было получено, т. е. процессы, происходящие в источнике тепла, не рассматриваются.

В эксергетическом методе анализа различных процессов большое внимание уделяется учету особой роли окружающей среды. Из самого определения эксергии следует, что в качестве уровня ее отсчета должна быть принята совокупность параметров равновесной окружающей среды. Но, поскольку почти все параметры реальной окружающей среды изменяются во времени и пространстве (причем, в достаточно широком диапазоне), такая система отсчета оказывается неравновесной, т. е. непригодной для решения практических задач.

Поэтому для энергетического анализа вводится и практически применяется лишь некая модель окружающей среды с параметрами $T_0^* = \text{const}$, $p_0^* = \text{const}$, которая в той или иной мере может отражать характер и условия взаимодействия исследуемой технической системы с реальной природной средой.

Важнейшим следствием 2-го закона термодинамики является то обстоятельство, что существующие формы энергии обладают разной способностью преобразовываться в работу. Есть формы энергии, неограниченно преобразуемые в работу, которые не характеризуются энтропией (механическая, электрическая). Наряду с ними существуют формы энергии, ограниченно преобразуемые в работу (тепловая, химическая).

Поэтому неудивительно, что З. Рант предложил теплоту и все другие формы энергии представлять в виде суммы двух составляющих — эксергии и анергии, т. е. $I_j = E_j + B_j$, где I_j — рассматриваемая форма энергии; E_j и B_j — работоспособная и неработоспособная ее части.

Представление всех форм энергии, предложенное З. Рантом, очень просто и способствует распространению понятия «эксергия». Однако, как показывает более глубокий анализ, такое представление теплоты не является достаточно точным, что и вызвало критику ряда специалистов в этой области науки [10–13].

Во-первых, как справедливо заметил Грассман [10], максимальная работа может быть получена путем взаимодействия рассматриваемой энергии с окружающей средой. Следовательно, эксергия определяется не только видом этой энергии и поэтому не может рассматриваться как часть ее.

Во-вторых, отмечает Грассман, такое представление приводит к противоречию при рассмотрении теплоты с более низкой температурой, чем температура окружающей среды. Однако он не предложил, как определить эксергию в этих случаях.

Формула для определения эксергии теплоты при температурах ниже температуры окружающей среды предложена в [11; 13].

Пытаясь опровергнуть предложение Ранта на примере процесса, осуществляемого при температурах ниже T_0, авторы [11] как-то не заметили, что пошли на подмену общепринятого понятия эксергии.

При этом эксергией теплоты Q с температурой T они называют не максимальную внешнюю работу, которая может быть получена при обратимом взаимодействии теплоты технической системы с окружающей средой при $T < T_0$, а изменение эксергии источника теплоты при передаче им этой теплоты окружающей среде. Это изменение, как они полагают, равно величине работы, которую совершила бы тепловая машина С. Карно при подводе к ней этого количества теплоты, используя в качестве теплоприемника окружающую среду с температурой $T_0 > T$. Очевидно, что такое допущение с точки зрения термодинамики невозможно. Тем не менее, ими предлагается следующее выражение для определения эксергии теплоты в таких случаях:

$$\Delta E = -Q \cdot \frac{T - T_0}{T}. \qquad (2)$$

Как следует из этой формулы, отдача тепла приводит к снижению эксергии теплоотдатчика, температура которого выше температуры окружающей среды, и увеличению эксергии теплоотдатчика, температура которого ниже температуры окружающей среды. Однако величину $\left|\frac{T - T_0}{T}\right|$ авторы [11] назвали коэффициентом ценности тепла, поскольку эта величина выражает эксергию, отнесенную к единице тепла.[1]

Постановка задачи и методы ее решения. На рис. 2, приведенном в [11], показано изменение этого коэффициента в зависимости от абсолютной температуры рассматриваемого теплоисточника.

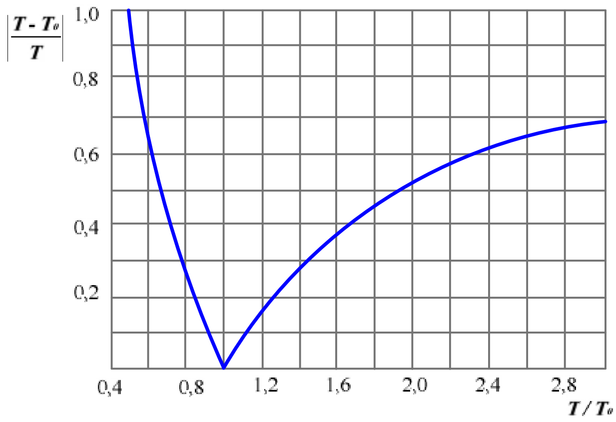

Рис. 2. Коэффициент ценности тепла [4]

Здесь показано, что при приближении температуры T теплоисточника к абсолютному нулю значение коэффициента τ_e стремится к бесконечности. С учетом того, что τ_e есть не что иное, как КПД тепловой машины, — этого, по определению, быть не может. И, следовательно, аргументы авторов [11] нельзя признать убедительными и обоснованными.

Попытку объяснить, как определяется и изменяется эксергия тепла в области температур ниже температуры окружающей среды, делает и автор [13]. С одной стороны, он соглашается с Рантом, что эксергия теплоты равна $E = \tau_e \cdot Q$, где коэффициент τ_e есть величина, равная термическому КПД цикла Карно между температурами T и T_0, и в то же время показывает зависимость τ_e от температуры T в виде гиперболы, описываемой формулой $\tau_e = 1 - \frac{293{,}15}{T}$, которая пересекает ось абсцисс $\tau_e = 0$ в точке $T = T_0$ (рис. 3).

Нетрудно заметить (рис. 3), что при температуре, стремящейся к бесконечности ($T \to \infty$), коэффициент τ_e стремится к единице ($\tau_e \to 1$), а при температуре теплоисточника, приближающейся к абсолютному нулю, коэффициент стремится к бесконечности ($\tau_e \to \infty$). Автор утверждает, что величина τ_e может принимать все рациональные значения в интервале от $-\infty$ до +1. Область положительных значений τ_e соответствует абсолютным температурам от $T = T_0$ до $T \to \infty$, а об-

[1] В отечественной литературе эта величина называется коэффициентом работоспособности (тепла) или эксергетической температурной функцией и обозначается τ_e или ω_e [6].

ласть отрицательных значений τ_e относится к температурам T менее T_0 вплоть до абсолютного нуля.

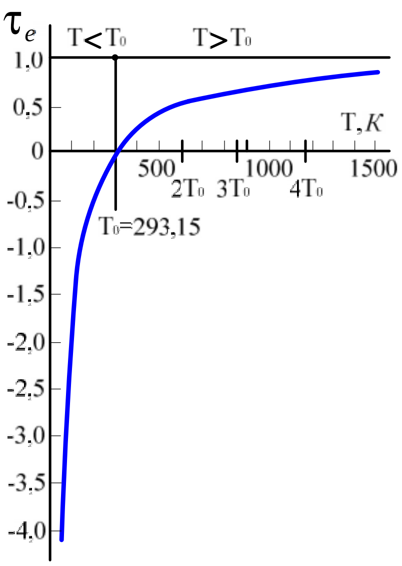

Рис. 3. Зависимость τ_e от T_0 [5]

Изменение знака τ_e при переходе через T_0 приводит, по мнению автора [13], к соответствующему изменению и знака эксергии теплового потока. При температурах выше T_0 знаки E_q и Q одинаковы. Это означает, что направление потока эксергии совпадает с направлением теплового потока. При отводе от системы энергии в форме теплоты отводится и эксергия. При температуре ниже T_0 знаки потоков теплоты и эксергии противоположны. Если $Q < 0$, то $E_q > 0$ и наоборот. В этих условиях, считает автор [13], при отводе тепла от системы происходит подвод к ней эксергии. Чем ниже температура T тела по отношению к окружающей среде, тем большее количество работы может быть получено при использовании теплового потока между телом и окружающей средой (или затрачено на создание этого теплового потока).

По мере приближения к абсолютному нулю при конечном значении Q абсолютная величина E_q вместе с τ_e стремятся к бесконечности.

Таким образом, и этот автор приходит к абсурдному выводу о том, что КПД тепловой машины может быть отрицательным, а его модуль при приближении температуры технической системы к абсолютному нулю стремится к бесконечности.

Полученные результаты. Казалось бы, подобные утверждения должны были обратить на себя внимание многочисленных специалистов, использующих эксергетический метод анализа различных систем, побудить желание высказать свое мнение по этому вопросу. Однако этого не произошло, и, следовательно, точка зрения авторов [11; 13], их заблуждения до сих пор не получили аргументированного опровержения. Такую задачу поставили перед собой авторы настоящей статьи.

Суть проблемы состоит в том, что в приведенных выше рассуждениях авторов [11] и [13] как-то исчез такой нюанс, что понятие эксергии относится не к исследуемой технической системе, а к совокупной изолированной неравновесной системе, состоящей из рассматриваемой системы и окружающей среды. Максимальная внешняя работа, которая может быть получена приемником в результате обратимых процессов установления термодинамического равновесия в этой совокупной системе, и есть ***эксергия***. Получить эту работу, которая всегда положительна, можно, в частности, с помощью тепловой машины С. Карно.

Таким образом, при определении эксергии теплоты рассматривается совокупная изолированная система, которая включает техническую систему, способную генерировать теплоту $Q_{тс}$ с температурой, изменяемой от $T = T_1$ до $T = 0$ K, а также окружающую среду с условно бесконечной мощностью $Q_{ос}$ и постоянными параметрами p_0^*, T_0^*, т. е. $Q_{ос} >> Q_{тс}$. При этом в совокупной неравновесной системе будут происходить следующие процессы, направленные на установление в ней термодинамического равновесия (рис. 4).

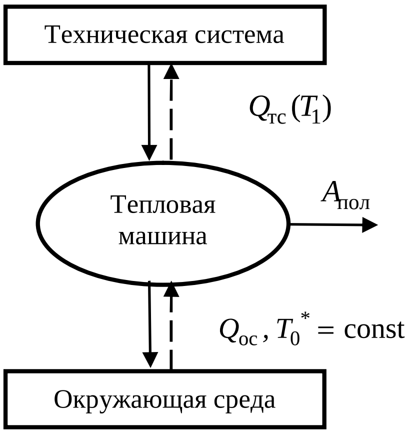

Рис. 4. Схема преобразования теплоты при взаимодействии технической системы с окружающей средой

В зоне изменения температуры теплоты от T_1 до T_0^* внешняя работа (эксергия) совокупной системы определяется по общепринятому соотношению:

$$E_q = Q_{тс} \cdot \frac{T_1 - T_0^*}{T_1} . \quad (3)$$

Из соотношения (3) следует, что при снижении температуры T_1 величины эксергии и коэффициента работоспособности тепла τ_e будут уменьшаться и при $T_1 = T_0^*$ станут равными нулю, в системе установится равновесие. При подводе теплоты от технической системы в том же количестве $Q_{тс}$ и при дальнейшем снижении ее температуры $T_1 < T_0^*$ в совокупной системе вновь появится перепад температур, равный $T_0^* - T_1$.

В этом случае равновесие в системе будет достигаться за счет теплоты окружающей среды, поскольку ее температура выше температуры теплоты, подводимой технической системой, которая будет выполнять функцию приемника теплоты (холодильника). При переходе изолированной системы в равновесное состояние в этом случае может быть получена положительная внешняя работа, равная:

$$E_q = Q_{\text{ос}} \cdot \frac{T_0^* - T_1}{T_0^*}. \qquad (4)$$

Количество теплоты, поступающее из окружающей среды, очевидно, не может быть больше количества тепла, подводимого технической системой, т. е. $Q_{\text{ос}} = Q_{\text{тс}}$.

Отсюда следует, что при понижении температуры тепла, генерируемого технической системой, от $T_1 = T_0^*$ до абсолютного нуля величина работы, получаемой от совокупной системы, возрастает. Возрастает при этом и коэффициент работоспособности тепла, достигая максимального значения, равного $\tau_e = 1$.

Сказанное выше позволяет сделать следующий вывод. Процесс установления термодинамического равновесия в изолированной системе, включающей техническую систему, позволяющую генерировать теплоту с температурой, изменяемой в диапазоне от T_1 до абсолютного нуля, и окружающую среду с условно заданными постоянными параметрами ($p_0^* = \text{const}$, $T_0^* = \text{const}$), разбивается на два этапа.

На первом из них, когда от технической в совокупную систему поступает тепло с температурой $T_1 > T_0^*$, с помощью тепловой машины С. Карно может быть получена положительная внешняя работа (эксергия). Теплота, поступающая от технической системы на этом этапе, характеризуется положительным значением коэффициента работоспособности $\tau_e > 0$. Если от технической в совокупную систему поступает теплота с температурой $T_1 = T_0^*$, равновесие в ней не нарушается, и, следовательно, внешняя работа при этом будет равна нулю, как и коэффициент работоспособности этой теплоты.

На втором этапе от технической системы в совокупную поступает теплота с температурой $T_1 < T_0^*$. Следовательно, равновесие в совокупной изолированной системе в этом случае может достигаться только за счет тепла окружающей среды $Q_{\text{ос}}$. В процессе установления равновесия в ней также может быть получена положительная внешняя работа E_q. Однако важно подчеркнуть, что положительное значение коэффициента τ_e в этом случае характеризует работоспособность тепла окружающей среды, а не теплоты, поступающей в совокупную изолированную систему от технической системы.

Отсюда как будто напрашивается вывод о том, что величина эксергии, получаемая на этом этапе, никак не характеризует теплоту, подводимую технической системой. На самом деле это не так, если принять во внимание понятия максимальной ($A_{\max}$) и минимальной ($A_{\min}$) работы, используемые в термодинамике. Максимальная работа характеризует предельное значение работы, которую можно получить от системы в результате совершения ею обратимого прямого процесса при переходе из состояния T_0 в состояние T_1. Минимальная работа, в свою очередь, показывает предельные затраты внешней работы, которые необходимы для того, чтобы совершить обратный процесс, т. е. перевести систему из состояния T_1 в состояние T_0.

Известно, что если прямой и обратный процесс осуществить обратимо, то величины $A_{\max}$ и $A_{\min}$ будут равны. Это обстоятельство является чрезвычайно важным, поскольку позволяет определять значения эксергии для тепла, подводимого в некую изолированную систему с температурой ниже температуры окружающей среды. При этом следует пояснить, что коэффициент работоспособности τ_e, найденный на этом этапе в соответствии с (4), характеризует не теплоту, подведенную технической системой $Q_{\text{тс}}$, а эксергию, которую можно получить в этом случае от совокупной системы при установлении в ней термодинамического равновесия.

Характер изменения коэффициента τ_e в совокупной изолированной системе при изменении температуры теплоты, поступающей от технической системы, при заданных параметрах окружающей среды показан на рис. 5. Нетрудно заметить, что он существенно отличается от тех, которые приведены на рис. 2 и 3.

Первое отличие заключается в том, что значения коэффициента работоспособности на всем диапазоне температур имеют положительный знак. При этом зависимость изменения коэффициента работоспособности от температуры теплоты, генерируемой технической системой, делится на два участка: первый — от произвольного T_1 до $T_1 = T_0^*$, второй — от температуры T_0^* до 0 K. При снижении температуры теплоты, поступающей от технической системы, на первом участке τ_e уменьшается от значения, равного $\tau_e = \dfrac{T_1 - T_0^*}{T_1}$, до нуля. Снижение температуры T_1 ниже T_0^* приводит к возрастанию коэффициента работоспособности, который при приближении T_1 к 0 K стремится к величине $\tau_e = 1$.

Важно подчеркнуть, что на первом участке коэффициент τ_e показывает работоспособность теплоты, генерируемой технической системой $Q_{\text{тс}}$, а на втором участке он характеризует работоспособность теплоты окружающей среды $Q_{\text{ос}}$.

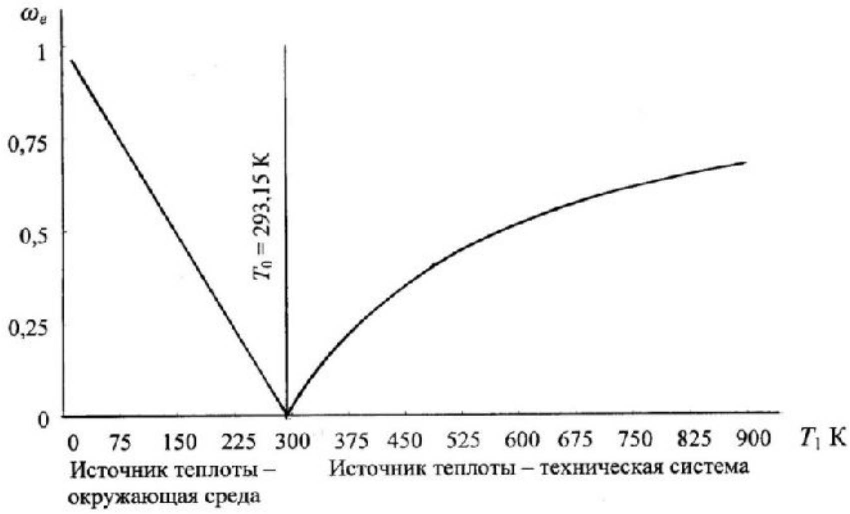

Рис. 5. Зависимость коэффициента τ_e в совокупной изолированной системе от температуры

Таким образом, строго говоря, предложение 3. Ранта представлять теплоту как сумму работоспособной части (эксергии) и неспособной совершать работу части (анергии) не всегда корректно. В частности, эксергия, получаемая от совокупной изолированной системы, включающей техническую систему и окружающую среду, в интервале температур от 0 К до $T_1 = T_0^*$ характеризует работоспособность теплоты окружающей среды. Поэтому в данном случае получаемая эксергия не может быть частью теплоты, генерируемой технической системой.

$$E_q = Q_{\text{ос}} \cdot \frac{T_0^* - T_1}{T_0^*} .$$

Отсюда следует, что с понижением температуры теплоты, подводимой технической системой, от $T_1 = T_0^*$ до абсолютного нуля, величина эксергии возрастает. При этом возрастает и коэффициент работоспособности теплоты, который в пределе при $T_1 = 0$ К стремится к максимальному значению, равному $\tau_e = 1$.

Выводы

В настоящее время эксергетический анализ широко используется в исследованиях высокотемпературных процессов в энергетике, металлургии и других отраслях экономики и дает убедительные, исчерпывающие результаты. В то же время удивительно, что в приложении к процессам, протекающим при температурах ниже температуры окружающей среды, те же методы дают труднообъяснимые результаты, противоречащие здравому смыслу. Авторы статьи проанализировали существующие методы для определения эксергии теплоты, и все они были признаны некорректными. Проведенный анализ позволил выявить суть следующих ошибок, допущенных при их разработке:

1. Формальный перенос приемов эксергетического анализа, хорошо работающих при исследовании высокотемпературных процессов, в область низкотемпературных процессов без учета особенностей их функционирования.

2. Не учитывалось, что эксергия теплоты определяется не только ее собственной температурой, но и взаимодействием с окружающей средой.

По этой причине все попытки применить эксергетический метод для исследования установок, обеспечивающих микроклимат зданий различного назначения, низкотемпературного разделения газовых смесей, других низкотемпературных и криогенных процессов оказались неубедительными. Результаты этих исследований не показали преимуществ использования эксергетического метода для анализа таких процессов.

На основе анализа публикаций в отечественной и зарубежной литературе авторы статьи предложили новый метод определения эксергии теплоты для процессов, протекающих при любой температуре, в том числе и низкотемпературных. Для этого вводится понятие совокупной неравновесной изолированной системы, включающей исследуемую техническую систему и окружающую среду. Процесс установления равновесия в такой системе зависит от соотношения температур источника и приемника.

Если температура рассматриваемой системы выше температуры окружающей среды, равновесие в совокупной системе устанавливается за счет передачи теплоты от этой системы окружающей среде. Часть передаваемой теплоты при этом может быть преобразована в работу. При противоположном соотношении температур равновесие в совокупной системе может быть установлено только за счет теплоты окружающей среды. В этом случае окружающая среда выступает источником теплоты, а техническая система становится ее приемником. Такое представление процессов, происходящих в совокупной системе, позволяет правильно описать процесс установления в ней равновесия, однозначно определить величины тепловых потоков и их эксергии, а значит, рассчитать энергетический и эксергетический балансы.

Литература

1. Андрющенко А.И. Термодинамические расчеты оптимальных параметровтепловых электростанций. М.: Высш. Школа,1963. 230 с.

2. Stepanov V.S. Analysis of energy efficiency of industrial processes. Heidelberg: Springer-Verlag, 1992. 186 p.

3. Степанов В.С., Степанов С.В. Термодинамические исследования металлургических процессов: энергетические балансы, эксергетический анализ. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. 380 с.

4. Степанов В.С., Степанова Т.Б., Старикова Н.В. Эксергетический анализ систем генерирования, транспорта и потребления энергии. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. 278 с.

5. Эксергетические расчеты технических систем: справ. пособие / под ред. А.А. Долинского, В.М. Бродянского. Киев: Наукова думка,1991. 360 с.

6. Галимова Л.В., Камнев А.А., Лазаренко О.О., Гуиди-Тоньон К. Моделирование и эксергетический анализ одноступенчатой аммиачной экспериментальной холодильной машины // Вестн. АГТУ. 2008. № 2 (43). С.114–121.

7. Суходуб И.О., Дешко В.И. Эксергетический анализ систем вентиляции с утилизацией полной теплоты // Инж.-строительный журн. 2014. № 2. С. 36–46.

8. Бэр Г.Д. Техническая термодинамика. М.: Мир, 1977. 518 с.

9. RantZ.Exergie, einneuesWortfür "technischeArbeitsfähigkeit"// Forsch. Ing. Wes. 1956. Bd. 22, № 1. P. 36–37.

10. Grassmann P. Energie und Exergie // BWK. 1965. Bd. 13, № 11. P. 482–486.

11. Шаргут Я., Петела Р. Эксергия. М.: Энергия, 1968. 279 с.

12. Соколов Е.Я., Бродянский В.М. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения. М.: Энергия, 1967. 296 с.

13. Бродянский В.М. Эксергетический метод термодинамического анализа. М.: Энергия,1973. 247 с.

References

1. Andryushchenko A.I. Thermodynamics calculations of optimal parameters of steam power plants. M.: Vyssh. SHkola,1963. 230 p.

2. Stepanov V.S. Analysis of energy efficiency of industrial processes. Heidelberg: Springer-Verlag, 1992. 186 p.

3. Stepanov V.S., Stepanov S.V. Thermodynamics investigations of metallurgical processes: energy balances, exergy analysis. Irkutsk: Izd-vo IrGTU, 2006. 380 p.

4. Stepanov V.S., Stepanova T.B., Starikova N.V. Exergy analysis of systems generating, transportation and consuming energy. Irkutsk: Izd-vo IRNITU, 2016. 278 p.

5. Exergy calculations of technical systems: sprav. posobie / pod red. A.A. Dolinskogo, V.M. Brodyanskogo. Kiev: Naukova dumka, 1991. 360 p.

6. Galimova L.V., Kamnev A.A., Lazarenko O.O., Guidi-Ton’on K. Modelling and exergy analysis of experimental single-stage ammonia refrigerating machine // Vestnik of Astrakhan State Technical University. 2008. № 2 (43). P. 114-121.

7. Suhodub I.O., Deshko V.I. Exergy analysis of ventilation systems with recovery of total heat //Magazine of Civil Engineering. 2014. № 2. P. 36-46.

8. Behr G.D. Technical thermodynamics. M.: Mir, 1977. 518 p.

9. Rant Z. Exergie, ein neues Wort für "technische Arbeitsfähigkeit" // Forsch. Ing. Wes. 1956. Bd. 22, № 1. P. 36-37.

10. Grassmann P. Energie und Exergie // BWK. 1965. Bd. 13, № 11. P. 482-486.

11. Shargut YA., Petela R. Exergy. M.: Energiya, 1968. 279 p.

12. Sokolov E.YA., Brodyanskij V.M. Energy basics transformation heat and cooling processes. M.: EHnergiya, 1967. 296 p.

13. Brodyanskij V.M. Exergy method of thermodynamics analysis. M.: EHnergiya, 1973. 247 p.