УДК 621.1.016.7

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА ПРИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ ГАЗОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЕПЛОВЫХ МАШИНАХ

Ф.И. Абрамчук, профессор, д.т.н., А.И. Харченко, доцент, к.т.н., А.И. Воронков, доцент, к.т.н., И.Н. Никитченко, инженер, ХНАДУ

Аннотация. *Изложены теоретические положения, касающиеся понятий эксергии и анергии и их определения для открытой и закрытой термодинамических систем, а также определения эксергии и анергии теплоты, проводимой или отводимой от рабочего тела. На двух примерах показаны преимущества эксергетического метода в сравнении с энергетическим методом при выполнении термодинамического анализа взаимопревращений различных форм энергии.*

Ключевые слова: *энергия, эксергия, анергия, газовые процессы, термодинамический анализ.*

ВИКОРИСТАННЯ ЕКСЕРГЕТИЧНОГО МЕТОДУ ПРИ ТЕРМОДИНАМІЧНОМУ АНАЛІЗІ ГАЗОВИХ ПРОЦЕСІВ В ТЕПЛОВИХ МАШИНАХ

Ф.І. Абрамчук, професор, д.т.н., А.І. Харченко, доцент, к.т.н., О.І. Воронков, доцент, к.т.н., І.М. Нікітченко, інженер, ХНАДУ

Анотація. *Викладено теоретичні положення відносно понять ексергії й анергії та визначення для відкритої і закритої термодинамічних систем, а також визначення ексергії й анергії теплоти, що підводиться або відводиться від робочого тіла. На двох прикладах показано переваги ексергетичного методу порівняно з енергетичним методом при виконанні термодинамічного аналізу взаємоперетворювань різних форм енергії.*

Ключові слова: *енергія, ексергія, анергія, газові процеси, термодинамічний аналіз.*

ON UTILIZATION OF EXERGETIC METHOD IN THERMODYNAMIC ANALYSIS OF GAS PROCESSES IN HEAT ENGINES

F. Abramchyuk, Professor, Doctor of Technical Science, A. Kharchenko, Associate Professor, Candidate of Technical Science, A. Voronkov, Associate Professor, Candidate of Technical Science, I. Nikitchenko, engineer, KhNAHU

Abstract. *The theoretic outlines concerning the concepts of exergy and anergy and their definitions for opened and closed thermodynamic systems, as well as definitions of exergy and anergy of heat, linked to and from the working body. The advantages of exergetic method in comparison with energetic method at conduction of thermodynamic analysis of transmutation of different forms of energy are shown at two examples.*

Key words: *energy, exergy, anergy, gas process, thermodynamic analys.*

Введение

Опыт показывает, что для термодинамического анализа рабочего цикла поршневого пневмодвигателя и газовых процессов, из которых он состоит, использование традиционного энергетического метода, базирующегося на первом законе термодинамики, недостаточно. Для раскрытия физической картины энергетических превращений в от-

дельных процессах и рабочем цикле в целом требуется применение термодинамического метода, базирующегося на понятиях эксергии и анергии, т.е. эксергетического метода.

Этот метод, основывающийся на первом и втором законах термодинамики, позволяет проанализировать те энергопревращения в газовых процессах, которые с помощью одного первого начала термодинамики, т.е. применением одного энергетического метода, как будет показано ниже, в некоторых случаях невозможно даже обнаружить.

Цель и постановка задачи

Целью и задачами данной публикации является краткое изложение основных положений, касающиеся определения эксергии и анергии и на нескольких примерах показать аналитические возможности указанных выше двух методов термодинамического анализа.

Анализ публикаций

Понятие эксергии или работоспособности рабочего тела имеет достаточно давние исторические корни – с 80-х годов XIX в. [1, 2]. Правда, оно было знакомо тогда лишь немногим специалистам в области термодинамики, носило различные названия и сравнительно редко использовалось в технике. Широкие научные круги стали уяснять техническое значение эксергии лишь накануне второй мировой войны [3]. А уже начиная с 50-х годов XX в., в связи с необходимостью решать наиболее компактным и наглядным методом задачи, связанные с энергетическими превращениями в самых различных технических устройствах, в термодинамике выделился в самостоятельное направление специальный раздел, связанный с понятием эксергии. В сочетании с элементами системного подхода он образовал инженерный метод, получивший название эксергетического [1].

В период последних трех-четырех десятилетий в отечественной и зарубежной научной литературе было опубликовано большое количество работ по эксергетическому методу. Бóльшая их часть представляет собой статьи, посвященные решению отдельных задач как теоретического, так и прикладного характера. Элементы эксергетического метода рассматриваются и в некоторых учебниках и монографиях по термодинамике, например, М.П. Вукаловича и И.И. Новикова; В.А. Кириллина, В.В. Сычова и А.Е. Шейндлина; Г.Д. Бэра [4]; А.Н. Алабовского и И.А. Недужего [6], Д.П. Гохштейна [7], С.М. Константинова [8] и др.

В связи с расширением круга научных и инженерно-технических работников, использующих эксергетический метод, возникла необходимость в специальных книгах, где систематически и достаточно полно излагались бы как основы этого метода, так и его практические приложения. Впервые такое обобщение сделано в монографии Я. Шаргута и Р. Петели «Эксергия», переведенной с польского языка на русский и выпущенной в 1968 г. [9]. А наиболее полно теория и вопросы приложения эксергетического метода в различных областях техники изложены в монографии В.М. Бродянского, В. Фратшера и К. Михалека [1]. В этой книге изложен основывающийся на эксергетическом методе универсальный аппарат для анализа и оптимизации систем преобразования энергии и вещества, введены и обоснованы понятия транзитной эксергии, обобщенного коэффициента полезного действия и вторичных энергетических ресурсов, для многих веществ и смесей приведены диаграммы эксергия-энтальпия и эксергия-энтропия, рассмотрены полосовые диаграммы потоков эксергии ряда энергетических установок, подробно рассмотрена методика составления эксергетических балансов, а также обоснование и методы вычисления эксергетических КПД процессов; большое внимание уделено графическим методам решения задач, основанным на применении различных эксергетических диаграмм и номограмм.

Подводя итог обзора литературы, следует сказать, что теоретические основы эксергетического метода уже к середине 80-х годов XX столетия, т.е. примерно четверть века тому назад, представляются установившимися, достаточно ясными и имеющими весьма широкое распространение. Но и нельзя не отметить определенной инерции у части научных и инженерно-технических работников, продолжающими придерживаться традиционных «балансово-энергетических» представлений и методов, основывающихся лишь на положениях первого начала термодинамики. Тем не менее разработка практических приложений эксергетического метода в ми-

ровой науке и технике ведется одновременно в различных довольно многочисленных направлениях [1]. Наибольшее распространение эксергетический метод в настоящее время получил в областях науки и техники, связанных с криогеникой.

ХНАДУ располагает положительным опытом использования эксергетического метода: в прошлом десятилетии этот метод применялся кафедрой ДВС для термодинамического анализа теоретического рабочего цикла азотного криогенного двигателя автотранспортного назначения. Основные результаты выполненных работ изложены в ряде публикаций [10–14].

Эксергия и анергия сжатого воздуха: физическая сущность и методика определения

По второму закону термодинамики все формы энергии состоят из эксергии и анергии, причем каждая из этих составляющих может быть равной нулю. В общем случае

ЭНЕРГИЯ = ЭКСЕРГИЯ + АНЕРГИЯ*.

Эксергия – это та часть энергии, которая при участии заданной окружающей среды может быть преобразована в любую другую форму энергии. Существуют неограниченно превратимые формы энергии, состоящие целиком только из эксергии: полезная работа, кинетическая, потенциальная и электрическая энергия.

Анергия – это та часть энергии, которая не может быть преобразована в эксергию ни в какой мере. Существуют формы энергии, состоящие целиком из одной анергии, т.е. потерявшие полностью способность к превращениям: внутренняя энергия окружающей среды и накопленная в системах энергия, которая находится в состоянии равновесия с окружающей средой, а также теплота при температуре окружающей среды и работа по преодолению давления окружающей среды.

Существуют и формы энергии, которые лишь частично могут превращаться в другие формы энергии – это теплота и внутренняя энергия систем, имеющих температуру и давление, отличные от температуры и давления окружающей среды; превратимая часть этих форм энергии (эксергия) существенно ограничивается Вторым законом.

Поведение эксергии и анергии при обратимых и необратимых процессах позволяет, согласно Второму началу, сформулировать следующие закономерности:

1. Для эксергии не применим общий закон сохранения: во всех необратимых процессах эксергия превращается в анергию полностью или частично.

2. Во всех процессах сумма эксергии и анергии остается постоянной.

3. Эксергия остается постоянной только при обратимых процессах.

4. Анергию в эксергию превратить невозможно (невозможно создать вечный двигатель второго рода).

По Первому закону во всех обратимых и необратимых процессах энергия количественно остается неизменной. По Второму закону энергия в необратимых процессах хотя и остается неизменной, но она теряет способность к преобразованиям и, тем самым, обесценивается в той мере, которая определяется превращением эксергии в анергию.

По своей физической сути понятие эксергии имеет ряд различий. Перечислим те понятия эксергии, которые касаются условий и характера газовых процессов в поршневом пневмодвигателе.

а) Эксергия воздуха в потоке термомеханическая – относится к воздуху в потоке. Определяется максимальной полезной (технической) работой, которая может быть получена при взаимодействии воздуха с окружающей средой до установления равновесия с ней по температуре и давлению. Сокращенно называется «эксергией потока», а также «эксергией энтальпии». Подразделяется на эксергию термическую, связанную с выравниванием по температуре, и эксергию механическую, связанную с выравниванием по давлениям. Эксергия потока может определяться, естественно, только при рассмотрении открытой термодинамической системы.

* Эксергия и анергия вещества могут определяться, естественно, только для веществ, физическое состояние которых характеризуется энтропией.

б) Эксергия воздуха в объеме термомеханическая – относится к воздуху, заключенному в непроницаемой для массы, но неадиабатной и свободно деформируемой оболочке (цилиндр с подвижным поршнем и закрытыми клапанами). Определяется максимальной полезной работой, которая может быть получена при взаимодействии с окружающей средой до установления с последней равновесия по температуре и давлению. Сокращенно называется «эксергией внутренней энергии». Подразделяется на эксергию термическую и механическую. Эксергия внутренней энергии может определяться, естественно, только при рассмотрении закрытой термодинамической системы.

в) Эксергия теплового потока (эксергия теплоты) – определяется максимальной полезной работой, которая может быть получена в обратимой системе преобразования теплового потока в работу в интервале между температурой, его характеризующей, и температурой окружающей среды*.

Приведем известные из литературных источников [1, 2, 4] зависимости для определения удельных величин эксергии и анергии.

Удельные эксергия и анергия потока воздуха (эксергия и анергия энтальпии), открытая система

$$ex_i = i_1 - i_{\text{о.с}} - T_{\text{о.с}}(s_1 - s_{\text{о.с}}),\ \text{кДж/кг} \qquad (1)$$

или

$$ex_i = i_1 - a_i,\ \text{кДж/кг;} \qquad (2)$$

$$a_i = i_{\text{о.с}} + T_{\text{о.с}}(s_1 - s_{\text{о.с}}),\ \text{кДж/кг,} \qquad (3)$$

где ex_i, a_i – удельные эксергия и анергия потока воздуха, кДж/; i_1, $i_{\text{о.с}}$ – удельные энтальпии воздуха в заданном сечении потока с параметрами p_1 и T_1 и воздуха с параметрами окружающей среды $p_{\text{о.с}}$ и $T_{\text{о.с}}$, кДж/кг; s_1, $s_{\text{о.с}}$ – удельная энтропия воздуха при параметрах p_1, T_1 и при параметрах окружающей среды $p_{\text{о.с}}$, $T_{\text{о.с}}$, кДж/(кг·К).

Эксергия энтальпии ex_i имеет свое естественное нулевое значение в состоянии окружающей среды ($i = i_{\text{о.с}}$, $s = s_{\text{о.с}}$). Анергия энтальпии a_i (как и сама энтальпия i) определяется с точностью до произвольной постоянной, зависящей от произвольно принимаемого начала отсчета. При определении разности анергий двух состояний эти постоянные сокращаются. Эксергия энтальпии ex_i по ряду известных причин может быть больше самой энтальпии i. Анергия энтальпии a_i в этом случае будет иметь отрицательное значение, т.к. сумма $ex_i + a_i = i$.

На T, s-диаграмме эксергию энтальпии ex_i можно представить площадью, если выделить точку пересечения из энтальпии $i = i_{\text{о.с}}$ с изобарой $p_1 = \text{const}$ (рис. 1). Процесс обратимого перехода из исходного состояния (точка 1) в состояние окружающей среды (точка 0) во всех случаях состоит из двух обратимых процессов: адиабатного – до пересечения с изотермой $T_{\text{о.с}} = \text{const}$ и изотермического с подводом или отводом теплоты – до пересечения с изобарой $p_{\text{о.с}} = \text{const}$. На рис. 1 полученные таким образом площади, соответствующие величине ex_i, оконтурены жирной линией. Как видно из рис. 1, эксергия ex_i может быть меньше располагаемого изменения энтальпии в процессе ($i - i_{\text{о.с}}$) – в случае, если $s_{\text{о.с}} < s_1$, и больше этого изменения энтальпии – в случае, если $s_{\text{о.с}} > s_1$.

На p, v-диаграмме эксергия энтальпии ex_i, которая в открытой системе представляет собой техническую работу, изображается площадью проекции на вертикальную ось названных выше обратимых процессов перехода вещества из исходного состояния в состояние окружающей среды (рис. 2). Как видно из рис. 2, эксергия энтальпии при любом исходном состоянии вещества всегда больше располагаемой работы потока (полного адиабатного расширения)

$$l_{\text{распад}} = \frac{k}{k-1} RT_1 \left[1 - \left(\frac{p_{\text{о.с}}}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right],\ \text{кДж/кг,} \qquad (4)$$

выражаемой, как известно, площадью проекции адиабаты на вертикальную ось p, v-диаграммы.

* Существуют еще виды эксергий: химическая, реакционная, концентрационная, транзитная, которые для рабочего цикла поршневого пневмодвигателя принимаются неизменными и нулевыми.

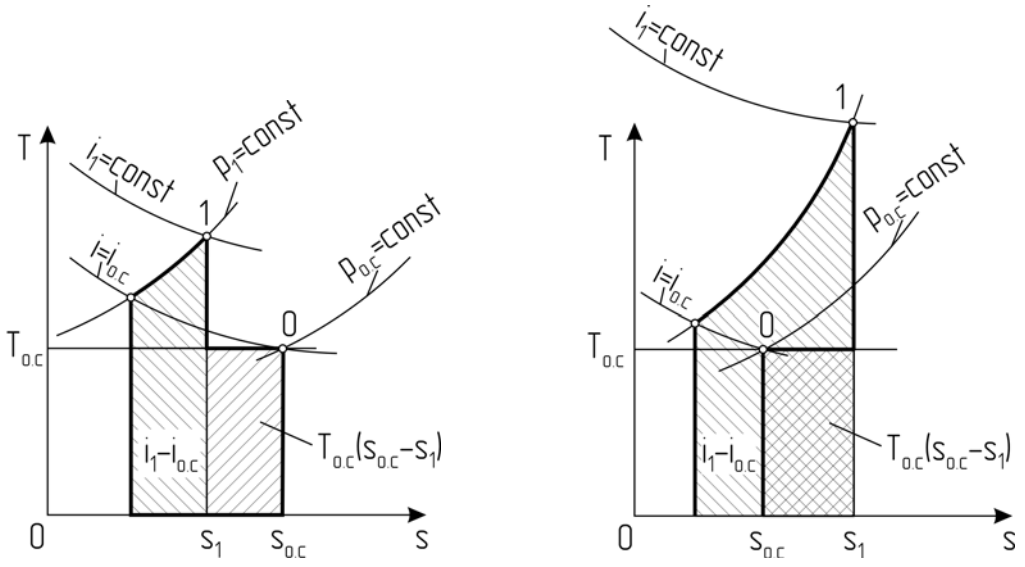


Рис. 1. Изображение в T, s-диаграмме удельной эксергии потока (эксергии энтальпии) ex_i – оконтуренная жирной линией площадь: а – при условии $s_{o.c} > s_1$; б – при условии $s_{o.c} < s_1$

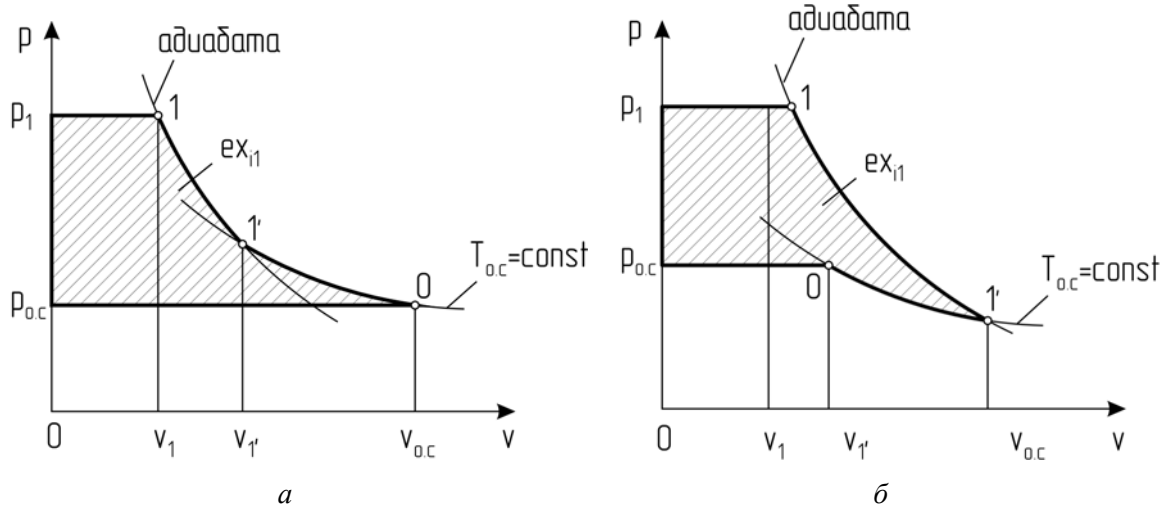


Рис. 2. Изображение в p, v-диаграмме удельной эксергии потока (эксергии энтальпии) ex_i – оконтуренная жирной линией площадь: *а* – при условии $v_{1'} < v_{o.c}$; *б* – при условии $v_{1'} > v_{o.c}$

Удельные эксергия и анергия в объеме (эксергия и анергия внутренней энергии), закрытая система

$$ex_u = u_1 - u_{o.c} - T_{o.c}(s_1 - s_{o.c}) + p_{o.c}(v_1 - v_{o.c}), \text{ кДж/кг} \quad (5)$$

или

$$ex_u = u_1 - a_u, \text{ кДж/кг;} \quad (6)$$

$$a_u = u_{o.c} + T_{o.c}(s_1 - s_{o.c}) - p_{o.c}(v_1 - v_{o.c}), \text{ кДж/кг,} \quad (7)$$

где ex_u, a_u – удельные эксергия и анергия воздуха в закрытой системе, кДж/кг; u_1, $u_{o.c}$ – удельная внутренняя энергия воздуха в исходном состоянии, характеризуемом параметрами p_1 и T_1 и в состоянии равновесия с окружающей средой, кДж/кг; v_1, $v_{o.c}$ – удельный объем воздуха в исходном состоянии и состоянии равновесия с окружающей средой, м^3/кг.

В закрытой термодинамической системе обратимый переход рабочего тела (в данном случае воздуха) из исходного состояния в состояние равновесия с окружающей средой, так же как и в открытой системе, всегда будет состоять из двух, следующих друг за другом, процессов – адиабатного расшире-

ния (или сжатия, если $p_1 < p_{o.c}$ и $T_1 < T_{o.c}$) до состояния термического равновесия с окружающей средой ($T = T_{o.c}$) и изотермического расширения (или сжатия) до состояния механического равновесия с окружающей средой ($p_1 = p_{o.c}$). Термическое взаимодействие рабочего тела с окружающей средой (подвод или отвод теплоты $q_{o.c}$) может происходить только при условии $T = T_{o.c} = \text{const}$, т.к. только при таком условии подводимая или отводимая теплота $q_{o.c}$ будет состоять из одной анергии.

На рис. 3 представлены изображения в *p*, *v*- и *T*, *s*-диаграммах процессов обратимого перехода рабочего тела из заданного исходного состояния в состояние термического и механического равновесия с заданными условиями окружающей среды для случаев, когда $v_{o.c} > v_1$ и когда $v_{o.c} < v_1$. Как видно из рис. 3, в первом случае после адиабатного расширения следует процесс изотермического расширения, который сопровождается подводом теплоты из окружающей среды ($q_{o.c} > 0$), а во втором случае после адиабатного расширения следует процесс изотермического сжатия, который сопровождается отводом теплоты от рабочего тела в окружающую среду ($q_{o.c} < 0$). В обоих случаях теплообмен происходит при температуре окружающей среды $T = T_{o.c}$, а поэтому и подведенная, и отведенная теплота состоит из одной анергии, неспособной превращаться в работу – работа в названных процессах в обоих случаях совершается не за счет окружающей среды, а обеспечивается термомеханической эксергией внутренней энергии рабочего тела при его исходных параметрах p_1, T_1.

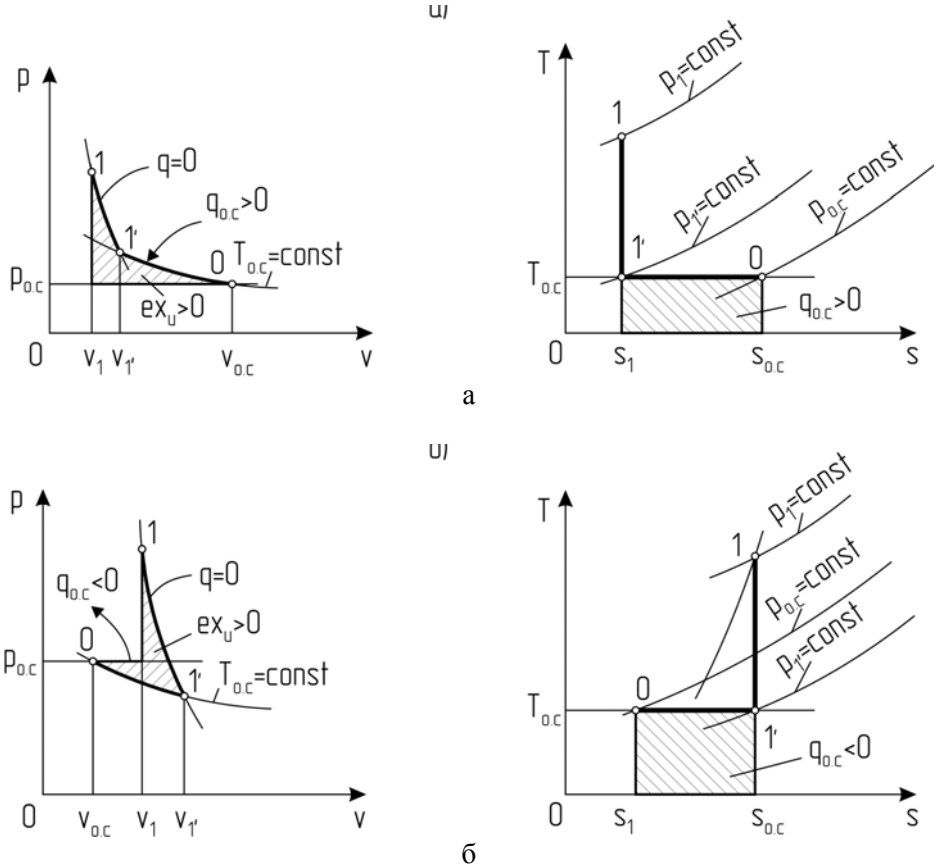


Рис. 3. Изображение в *p*,*v*- и *T*, *s*-диаграммах обратимого перехода рабочего тела из заданного состояния (p_1, T_1) в состояние равновесия с окружающей средой ($p_{o.c}$, $T_{o.c}$) в закрытой термодинамической системе при условии, что $p_1 > p_{o.c}$ и $T_1 > T_{o.c}$ для случаев, когда: а – $v_{o.c} > v_1$; б – $v_{o.c} < v_1$

Удельные эксергия и анергия теплоты *q*, подводимой или отводимой от рабочего тела в процессе 1–2

$$ex_q = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_{o.c}}{T}\right)\delta q = q - T_{o.c}\int_1^2 \frac{\delta q}{T} = q - T_{o.c}(s_2 - s_1), \text{ кДж/кг} \quad (8)$$

или

$$ex_q = q - a_q \text{, кДж/кг;} \qquad (9)$$

$$a_q = T_{\text{о.с}}(s_2 - s_1) \text{, кДж/кг,} \qquad (10)$$

где ex_q, a_q – удельные эксергия и анергия теплоты, кДж/кг; q – удельная теплота, подводимая ($q > 0$) или отводимая ($q < 0$) от рабочего тела, кДж/кг; s_1, s_2 – удельная энтропия рабочего тела (энергоносителя) в начале и в конце процесса, кДж/(кг·К).

На рис. 4 в T, s-диаграмме изображены удельные эксергия и анергия одного и того же количества удельной теплоты q, подводимой к рабочему телу в различных процесса: изохорном, изобарном и изотермическом. Как видно из рис. 4, эксергия и анергия определенного количества теплоты зависит от характера процесса, в котором эта теплота подводится к рабочему телу, от температуры окружающей среды и от параметров исходного состояния p_1 и T_1.

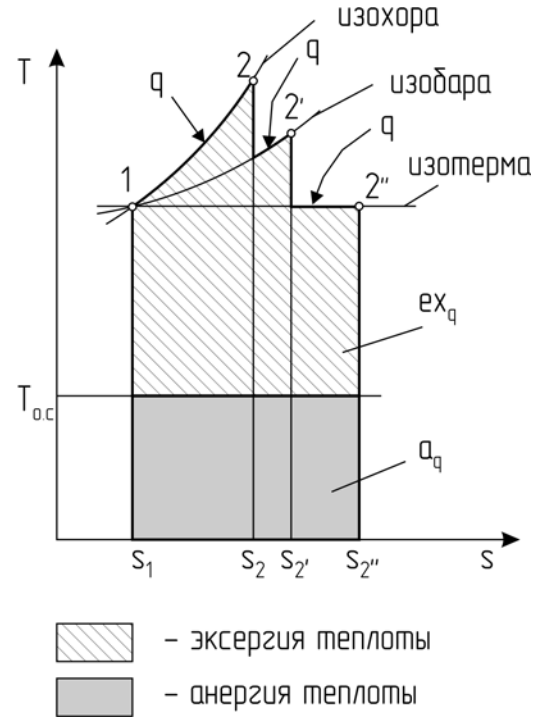


Рис. 4. Изображение в T, s-диаграмме удельных эксергии и анергии теплоты в различных термодинамических процессах при условии q = idem: 1–2 – изохорный процесс повышения давления; 1–2′ – изобарный процесс расширения; 1–2″ – изотермический процесс расширения

Примеры анализа энергопревращений в отдельных газовых процессах

Достоинства энергетического и эксергетического методов можно отчетливо оценить их сопоставлением при анализе энергопревращений прежде всего в отдельных газовых процессах. Рассмотрим несколько примеров такого анализа.

Пример 1. 1 кг воздуха как двухатомного идеального газа обратимо изотермически расширяется в открытой термодинамической системе при температуре $T_1 = \text{const}$, равной температуре окружающей среды $T_{\text{о.с}} = 293$ К от $p_1 = 1$ МПа до $p_2 = p_{\text{о.с}} = 0{,}1013$ МПа.

Для анализа энергопревращений в этом процессе используем вначале энергетический метод, опирающийся на существующую в природе количественную связь между формами энергии, участвующей в газовых процессах. Эта связь выражается в виде балансовых уравнений первого закона термодинамики – закона сохранения энергии. Для открытой термодинамической системы уравнение Первого закона имеет вид

$$q_{12} = i_2 - i_1 + l_{\text{техн}} \text{, кДж/кг,} \qquad (11)$$

где i_1, i_2 – удельные энтальпии рабочего тела в начале и в конце процесса, кДж/кг; для идеального газа равенство температур $T_1 = T_2$ и равенство $i_1 = i_2 = 294{,}3$ кДж/кг; q_{12} – теплота, подведенная к рабочему телу из окружающей среды при температуре окружающей среды, а следовательно, состоящая из одной анергии, кДж/кг; $l_{\text{техн}}$ – техническая работа расширения газа, состоящая только из полезной работы, т.е. из эксергии, кДж/кг.

Для заданных условий равенство $i_1 = i_2$ превращает уравнение (11) в равенство

$$q_{12} = l_{\text{техн}} \text{, кДж/кг.} \qquad (12)$$

Техническая работа

$$l_{\text{техн}} = RT \ln(p_1 / p_2) = 192{,}5 \text{, кДж/кг} \qquad (13)$$

в p, v-диаграмме изображается, как известно, площадью проекции линии процесса на вертикальную ось (рис. 5) и, как уже было сказано выше, имеет физический смысл полезной работы.

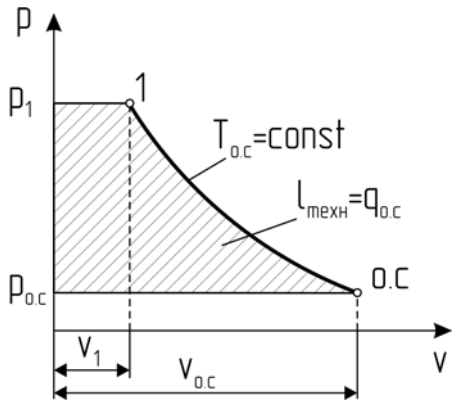


Рис. 5. Изображение технической работы $l_{техн}$ в p,v-диаграмме

В то же время теплота q_{12} изображается в T, s-диаграмме площадью под линией процесса $T_{o.c}$ = const, т.е. площадью, представляющей собой внутреннюю энергию окружающей среды, которая по Второму закону не может быть превращена в какую-либо иную форму энергии, в том числе и в работу.

Отсюда следует, что равенство (12) отражает только количественное соотношение между работой $l_{техн}$ и теплотой q_{12}, а не их возможную превратимость, о чем более подробно будет сказано ниже.

Наиболее удобно и наглядно выполнять анализ энергопревращений в каких-либо процессах, если потоки различных форм энергии изображать в виде полос, ширина которых в масштабе соответствует величине передаваемой энергии. Такие полосовые диаграммы энергопотоков называют диаграммами Сэнки, по имени ирландского инженера Г.Р. Сэнки, впервые в 1898 г. опубликовавшего такую диаграмму [1]. По полосовым диаграммам Сэнки легко зрительно проконтролировать энергобалансы по Первому закону. Однако Второй закон, как мы уже увидели из равенства (12), остается неучтенным.

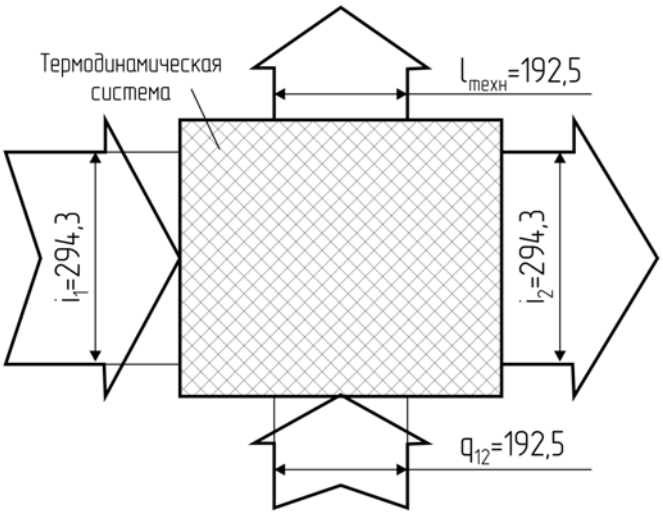
Чтобы отразить ограничиваемую Вторым законом способность различных форм энергии к преобразованиям и иметь возможность судить о термодинамическом совершенстве энергопреобразований, энергетические потоки диаграммы Сэнки следует разделить на две составляющие: потоки эксергии и анергии. В этом случае из простой диаграммы потоков энергии получается, как будет показано ниже, намного более выразительная диаграмма потоков эксергии и анергии*. На такой диаграмме потоков Первый закон находит свое отражение в том, что сумма потоков эксергии и анергии всегда остается постоянной. Второй закон термодинамики проявляется здесь в уменьшении потока эксергии, сужающегося на диаграмме при всякой необратимости. Диаграмма потоков эксергии и анергии объединяет, таким образом, содержание обоих основных законов термодинамики. Она, как будет показано на примерах, облегчает принципиальное понимание процессов преобразования энергии. Но вернемся к рассмотрению примера преобразования энергии в обратимом изотермическом процессе расширения газа при температуре окружающей среды.

На рис. 6, *а* представлена выполненная по условиям рассматриваемого примера диаграмма Сэнки. Из диаграммы видно, что через границы термодинамической системы подводится энергия в форме энтальпии i_1 и в форме теплоты q_{12} и отводится энергия в форме энтальпии i_2 и в форме технической работы $l_{техн}$. Все цифровые данные приведены в размерности кДж/кг. По этим цифровым данным нетрудно убедиться в наличии баланса: сумма энергий на входе равна сумме энергий на выходе из системы.

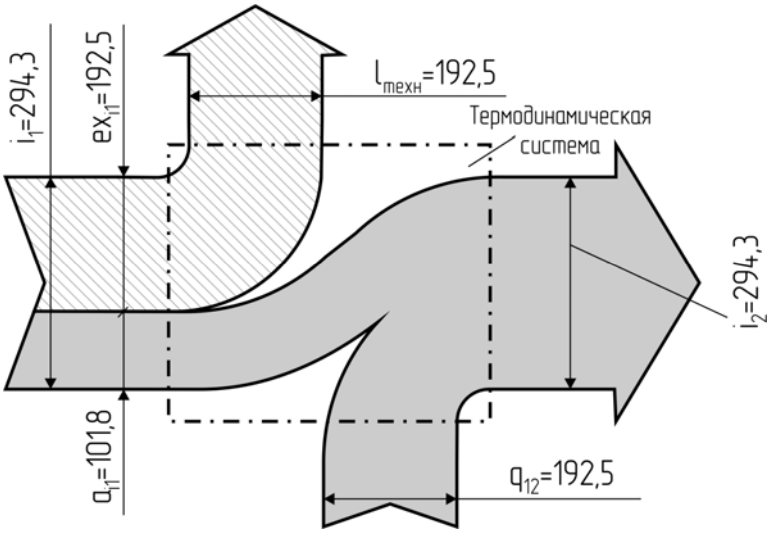
Из рассмотрения диаграммы рис. 6, *а* возникает два основных вопроса. Во-первых, диаграмма, построенная по параметрам уравнения Первого закона (11), не раскрывает, как качественно изменилась в процессе расширения рабочего тела его энтальпия – по диаграмме видно, что она количественно не изменилась. Но мы знаем, что, хотя количественно энтальпии i_1 и i_2 равны, но по потенциалу своей работоспособности они совершенно не равноценны: на входе рабочее тело находится при повышенном давлении p_1 = 1 МПа и, следовательно, обладает значительной механической потенциальной энергией, способной превратиться в работу, а на выходе из системы рабочее тело имеет

* Заметим, что приоритет в разработке эксергетических диаграмм потоков принадлежит известному швейцарскому ученому Грассману [1]. Поэтому полосовые диаграммы потоков эксергии и анергии называют диаграммами Грассмана.

давление $p_2 = p_{o.c}$, т.е. не обладает уже никакой механической потенциальной энергией, а поскольку и температура $T_2 = T_{o.c}$, то следовательно, на выходе из системы рабочее тело находится в полном термомеханическом равновесии с окружающей средой, и его потенциал работоспособности равен нулю.



а



б

Рис. 6. Схемы энергетических потоков, кДж/кг, в изотермическом процессе расширения 1 кг воздуха в открытой термодинамической системе при $T = T_{o.c} = 293$ К: а – при энергетическом методе анализа; б – при эксергетическом методе анализа

Во-вторых, из диаграммы Сэнки (рис. 6, а) не виден источник полезной работы $l_{техн}$: энергия в форме энтальпии осталась неизменной, а предположение, что подведенная из окружающей среды теплота q_{12} превратилась в полезную работу, противоречит положению Второго закона термодинамики о невозможности ни при каких обстоятельствах теплоту окружающей среды превратить в работу («невозможен вечный двигатель второго рода»).

Это кажущееся противоречие разрешить с помощью первого принципа термодинамики, т.е. с помощью энергетического метода невозможно. Его можно разрешить, как будет показано ниже, с помощью второго начала термодинамики.

Далее для сравнения выполним анализ энергопревращений в рассматриваемом процессе, используя эксергетический метод. Пользуясь формулами (1), (2) и (3), вычислим величины

эксергии ex_{i1} и ex_{i2} и анергии a_{i1} и a_{i2} на входе и выходе из системы и зная, что теплота q_{12}, подводимая при температуре окружающей среды, состоит целиком из анергии, построим полосовую анерго-эксергетическую диаграмму энергопревращений – диаграмму Грассмана (рис. 6, б).

Как видим из рис. 6, б, мы получили отчетливую и ясную картину всех энергопревращений в процессе. Эта картина дает ответы на все вопросы, возникшие при анализе энергетических преобразований традиционным энергетическим методом. Из диаграммы Грассмана видно, что энтальпия на входе i_1 состоит из эксергии и анергии, которые в сумме равны энтальпии i_1; эксергия ex_{i1}, как работоспособная часть энтальпии, превращается в полезную работу $l_{\text{техн}}$, т.е. в эксергию в форме технической работы; теплота q_{12}, хотя и равна по величине технической работе, но сама по себе в эту работу не превращается, а служит только для восполнения анергии рабочего тела в той мере, чтобы по Первому закону соблюдался энергетический баланс

$$i_2 = ex_{i2} + a_{i2} = ex_{i1} + a_{i1} = i_2 .$$

Таким образом, не окружающая среда, а находящееся при повышенном давлении рабочее тело является в данном случае источником эксергии, отводимой из системы в форме технической работы. Анергия же, воспринятая из окружающей среды в форме теплоты q_{12}, лишь переходит в анергию отработавшего и неспособного уже к каким-либо преобразованиям и уходящего из системы рабочего тела.

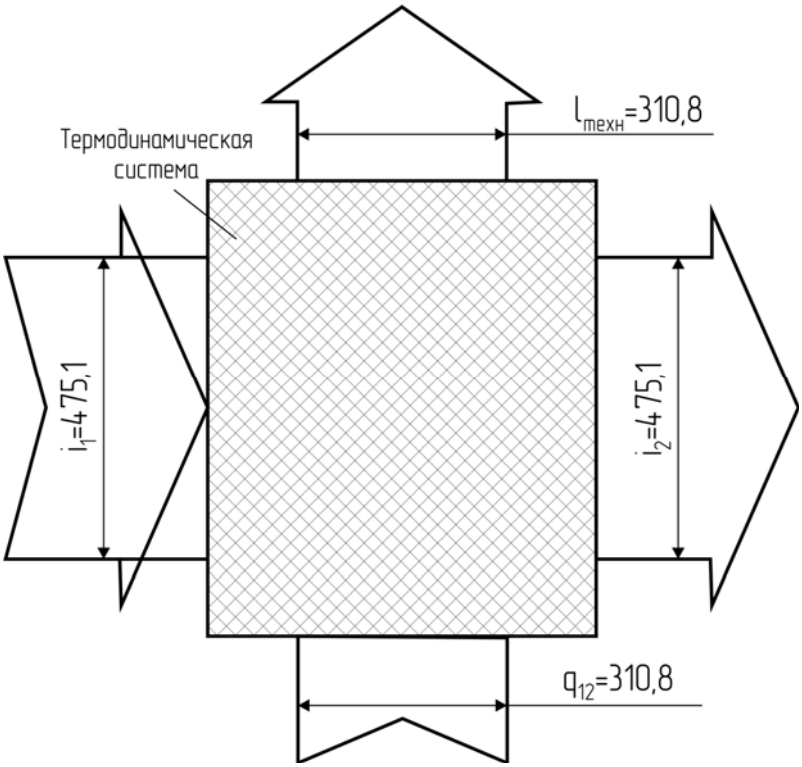
На этом примере особенно отчетливо видно, насколько просто и ясно выражается Второй закон через понятия эксергии и анергии. При этом удается избежать ошибочного толкования уравнения Первого закона, из которого в данном случае следует, что получаемая полезная работа равна подводимой из окружающей среды теплоте. Но только из эксергетического анализа становится понятным, что хотя $q_{12} = l_{\text{техн}}$, тем не менее это вовсе не обозначает, что теплота окружающей среды превратилась в работу.

Пример 2. Представляет интерес сделать анализ энергопревращений в изотермическом процессе расширения воздуха в том же диапазоне изменения давлений, но при более высокой температуре с тем, чтобы увидеть, как изменится картина превращения форм энергии, если теплота будет подводится уже не при температуре окружающей среды и энтальпия по содержанию эксергии и анергии будет иметь иную структуру. Формулируем условия протекания процесса: 1 кг воздуха как двухатомного идеального газа обратимо изотермически расширяется в открытой термодинамической системе при температуре $T_1 = T_2 = 273$ К (200 °С) от давления $p_1 = 1$ МПа до $p_2 = p_{\text{о.с}} = 0{,}1013$ МПа; $T_{\text{о.с}} = 293$ К.

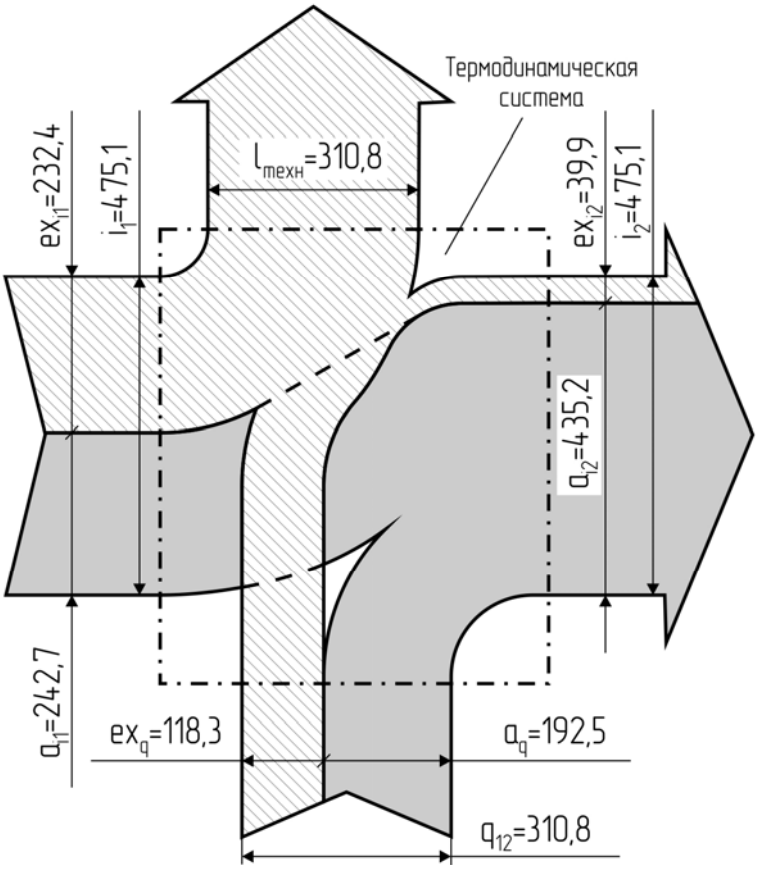
На рис. 7, *а* представлена диаграмма к энергетическому методу анализа энергопревращений в процессе (диаграмма Сэнки). На диаграмме изображены в масштабе входящие i_1 и q_{12} и выходящие i_2 и $l_{\text{техн}}$ из границ системы потоки энергии. Как и в первом примере, схема не дает представления об уровне работоспособности, а значит и об уровне ценности отдельных форм энергии. Остается непонятным, как взаимодействуют и преобразуются различные формы энергии внутри системы, т.е. термодинамическая система, как и в первом примере, представляется «черным ящиком».

И совершенно по другому выглядят выполненные в масштабе полосовые диаграммы, когда входящие и выходящие потоки различных форм энергии разделены на потоки эксергии и анергии (диаграмма Грассмана) – получается наглядная картина ценности энергопотоков, что определяется величиной их работоспособности (эксергии). Сравнивая данную диаграмму Грассмана с аналогичной диаграммой предыдущего примера, можно заметить, что при более высокой температуре рабочего тела повысилась его энтальпия на входе i_1, однако составляющие энтальпии (эксергия и анергия) выросли не пропорционально увеличению i_1: эксергия повысилась примерно на 20 %, а анергия возросла почти в 2,5 раза*.

* В задачу данной работы не входит рассмотрение причин возникших изменений в энергопотоках и энергопревращениях.



а



б

Рис. 7. Схемы к термодинамическому анализу удельных энергетических потоков, кДж/кг, в изотермическом процессе расширения 1 кг воздуха в открытой системе при $T = 473$ К (200 °С): а – энергетический метод анализа; б – эксергетический метод анализа

Во втором примере энтальпия рабочего тела на выходе их системы i_2 при температуре $T_2 > T_{\text{о.с}}$ состоит не из одной анергии, как в первом примере, когда $T_2 = T_{\text{о.с}}$, а уже содержит и эксергию ex_{i2} = 39,9 кДж/кг, представляющую собой, естественно, только термическую эксергию, поскольку $p_2 = p_{\text{о.с}}$. А подводимая к рабочему телу при температуре выше $T_{\text{о.с}}$ теплота q_{12} на 38 % состоит из эксергии, которая расходуется частично на получение технической работы и частично переходит в эксергию энтальпии отработавшего рабочего тела. Можно, конечно, отметить и ряд других особенностей энергопреобразований в рассматриваемом изотермическом процессе при температуре $T > T_{\text{о.с}}$, но в этом в данном случае нет необходимости. Изображением диаграммы Грассмана на рис. 7, *б*, преследовалась цель лишь показать, что такая выразительная и легко читаемая картина анергоэксергетических потоков и энергопревращений, изображение которой лежит в основе эксергетического метода термодинамического анализа, несомненно может давать достаточно обстоятельную информацию для оценки совершенства происходящих процессов в открытых и закрытых термодинамических системах.

Выводы

Изложенный в статье обзор публикаций по теме позволяет констатировать, что в настоящее время для термодинамического анализа рабочих циклов и отдельных газовых процессов в тепловых машинах применяются два метода: энергетический, базирующийся на Первом законе термодинамики, и эксергетический, базирующийся одновременно на Первом и Втором законах. Эксергетический метод, как более эффективный, дающий более полную и выразительную информацию о потоках энергии и о взаимопреобразованиях различных форм энергии, получает в мировой практике в последние полстолетия все большее распространение. Об этом свидетельствует все увеличивающийся поток публикаций по различным вопросам приложения этого метода для анализа технических процессов и систем преобразования энергии, а также для определения технико-экономических показателей энергетических установок и промышленных объектов.

В статье кратно и вместе с тем с достаточной полнотой изложены основные теоретические положения, касающиеся понятий эксергии и анергии вещества и теплоты. На конкретных примерах анализа энергопреобразований в отдельных газовых процессах со всей очевидностью показаны преимущества эксергетического метода перед энергетическим, проявляющиеся в наглядности и полноте информации об энергопотоках и энергопревращениях в термодинамических системах.

Литература

1. Бродянский В.М. Эксергетический метод и его приложения / В.М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек ; под ред. В.М. Бродянского. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
2. Бродянский В.М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В.М. Бродянский. – М.: Энергия, 1973. – 296 с.
3. Бошнякович Ф. Оценка теплотехнических процессов с помощью эксергии / Ф. Бошнякович // Энергия и эксергия : сб. статей (пер. с немец. Н.В. Калинина ; под ред. В.М. Бродянского). – М. : Мир, 1968. – 190 с.
4. Бэр Г.Д. Техническая термодинамика / Г.Д. Бэр. – М.: Мир, 1977. – 518 с.
5. Бродянский В.М. Эксергия потока вещества при изменении параметров окружающей среды / В.М. Бродянский, Н.В. Калинин // ИФЖ. – 1966. – Т. 10, № 5. – С. 596–599.
6. Алабовский А.Н. Техническая термодинамика и теплопередача : учеб. пособие / А.Н. Алабовский, И.А. Недужий. – К. : Вища школа, 1990. – 225 с.
7. Гохштейн Д.П. Современные методы термодинамического анализа энергетических установок / Д.П. Гохштейн. – М. : Энергия, 1969. – 190 с.
8. Константінов С.М. Технічна термодинаміка / С.М. Константінов. – К. : Політехніка, 2001. – 368 с.
9. Шаргут Я. Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела. – М. : Энергия, 1968. – 386 с.
10. Тимченко И.И. Особенности преобразований энергии в криогенном двигателе / И.И. Тимченко, А.И. Харченко, П.В. Жадан // Наука и социальные проблемы общества: человек, техника, технология, окружающая среда : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Харьков, 14–16 мая

2001 г. – В восьми частях. – Ч. 7. – Харьков : НТУ «ХПИ». – С. 227–238.
11. Тимченко И.И. Диаграммы Сэнки для криодвигателя, работающего по теоретическому циклу / И.И. Тимченко, А.И. Харченко, П.В. Жадан // Двигатели внутреннего сгорания : Всеукраинский н.-т. ж. – № 2. – Харьков: Госиздание, 2003. – С. 23–27.
12. Тимченко И.И. Диаграммы потоков эксергии и анергии в криогенном двигателе, работающем по теоретическому циклу / И.И. Тимченко, А.И. Харченко, П.В. Жадан // Вестник ХНАДУ : сб. научн. тр. – Харьков : ХНАДУ. – 2002. – Вып. 18. – С. 19–23.
13. Тимченко И.И. О выборе максимального давления рабочего цикла азотного криогенного двигателя / И.И. Тимченко, А.И. Харченко, П.В. Жадан // Автомобильный транспорт : сб. научн. тр. – Харьков : ХНАДУ. – 2001. – Вып. 7–8. – С. 184–187.
14. Тимченко И.И. Перспективы создания экологически чистого автомобильного транспорта с использованием азотной криогенной силовой установки / И.И. Тимченко, А.И. Харченко, П.В. Жадан // Авиационно-космическая техника и технология : сб. научн. тр. – Харьков : «ХАИ». – 2001. – Вып. 20. – С. 38–40.

Рецензент: А.Н. Пойда, профессор, д. т. н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 26 мая 2011 г.