

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ПАВЛОДАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. С.ТОРАЙГЫРОВА



3'2007

НАУКА И ТЕХНИКА
КАЗАХСТАНАКАЗАХСТАН
ҒЫЛЫМЫ МЕН ТЕХНИКАСЫ

МАЗМҰНЫ

С. Торайғыров

академик С. Бәйсембаев

С.И. Ахметов, В.В. Рындин	
Ішкі жылыту двигательдерін проекциялауда Mathcad және Turbo Pascal жүйесін программалауды қолданылуы туралы.....	5
А.О. Байтемирова, Б.Б. Өтегұлов, Ж.А. Юсупов	
Электрэнергетикалық жүйенің құрылған режимінің техникалық және математикалық қойылым талабының есептелуі.....	10
Ж.С. Батырханова, Б.Ч. Құдрышова, В.Т. Станевич	
Көмір алу қалдықтарының негізінде алынған керамикалық плиталардың құрлымының зерттелуі.....	16
В.А. Бороденко	
Рейлі қорғаудың өңделген құрылғысының функционалды және аппаратты беріктілігінің бағасының байланысы туралы.....	21
М.А. Газалиева, С.К. Сапарғалиева, Л.Р. Пак, А.Б. Гайсин, Б.К. Жұмабекова, Н.А. Полторанина	
Берилді өндірісте жұмыс істейтіндердің ауыру сараптамасы.....	26
М.А. Газалиева, А.Б. Гайсин, С.К. Сапарғалиева, Л.Р. Пак, Е.Н. Сұраубаев, Б.К. Жұмабекова	
Берилді өндірістің технологиялық процесі.....	32
Г.Б. Елдонгина	
Алматы қаласы атмосфералық ауасының ластануына байланысты балалар арасындағы өкпе туберкулезі бойынша аурушандық.....	37

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Кадысова Р.Ж., к.и.н., доц. (*главный редактор*)
 Утегұлов Б.Б., д.т.н., проф. (*зам. гл. редактора*)
 Ельмуратова А.Ф., к.т.н., доц. (*отв. секретарь*)
 Члены редакционной коллегии:
 Бойко Ф.К., д.т.н., проф.
 Газалиев А.М., д.х.н., проф., член-корр. НАН РК
 Гамарник Г.Н., д.т.н., проф.
 Глазырин А.И., д.т.н., проф.
 Даукеев Г.Ж., к.т.н., проф.
 Ергожин Е.Е., д.х.н., проф., академик НАН РК
 Кислов А.П., к.т.н., доц.
 Клецель М.Я., д.т.н., проф.
 Кудерин М.К., к.т.н., доц.
 Мансуров З.А., д.х.н., проф.
 Мурзагулова К.Б., д.х.н., проф.
 Пивень Г.Г., д.т.н., проф.
 Сапаров К.Т., к.г.н., доц.
 Сагинов А.С., д.т.н., проф., академик НАН РК
 Сулеев Д.К., к.т.н., проф.
 Сейтахметова Г.Н. (*тех. редактор*)

Адрес редакции:
 140008, г. Павлодар,
 ул. Ломова, 64.
 Тел.: (3182) 45-11-43
 (3182) 45-38-60
 Факс: (3182) 45-11-23
 E-mail: publish@psu.kz

УДК 536.53

ВЫВОД УРАВНЕНИЯ ПЕРВОГО ЗАКОНА ТЕРМОДИНАМИКИ ИЗ ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ СИСТЕМЫ ТЕЛ

В.В. Рындин

Павлодарский государственный университет

им. С. Торайгырова

Оқшауланған жүйеге жазылған энергияның сақталу жалпы заңы негізінде термодинамиканың бірінші заңының теңдеуінің қорытындысы беріледі. Жылулық және жұмыс ұғымдары өту энергиялар немесе жұмыс істеу және жылуалмасу процесстерінде энергия жүйесінің дербес өсімішелері ретінде еңгізіледі.

Дается вывод уравнения первого закона термодинамики, исходя из всеобщего закона сохранения энергии, записываемого для изолированной системы. Понятия теплоты и работы вводятся как энергии перехода или частичные приращения энергии системы в процессах теплообмена и совершения работы.

The conclusion of the equation of the first law of thermodynamics is given, proceeding from the general law of the conservation of energy which are written down for isolated system. Concepts of heat and work are entered as energy of transition or partial increments of energy of system during heat exchange and fulfillment of work.

Термодинамика считается феноменологической (изучающей внешние стороны феноменов – явлений) наукой, которая, с одной стороны, не затрагивает внутреннее строение вещества, а с другой стороны, базируется на некоторых эмпирических законах, не сводимых к основным законам механики Ньютона. Одним из таких законов считается первый закон термодинамики (ПЗТ), согласно которому теплота идёт на изменение внутренней энергии (ВЭ) и на совершение работы. Уравнение ПЗТ было получено Р. Клаузиусом в 1850 г., исходя из закона эквивалентности теплоты и работы Р. Майера и Д. Джоуля, в таком виде:

$$\delta Q = dU + \delta W. \quad (1)$$

При таком изложении термодинамики, когда понятия теплоты и работы вводятся в историческом аспекте – до рассмотрения первого закона термодинамики, а понятие внутренней энергии вводится как разность между теплотой и работой

$$dU = \delta Q - \delta W,$$

авторы учебников прилагают большие усилия для проведения различия как между энергией (изменением энергии) и теплотой или работой, так и между теплотой и работой. В результате энергия определяется через понятие работы, ВЭ как сумма (разность) теплоты и работы, а теплота как «способ, форма передачи энергии» (т. е. теплота определяется не как физическая величина, а как другое понятие, именуемое формой передачи энергии) [1].

В работе [2] полутора вековая традиция введения уравнения ПЗТ (1) нарушена: на основе законов механики Ньютона и статистической физики дан вывод уравнения ПЗТ в общем виде. Ниже даётся ещё один метод получения уравнения ПЗТ, но уже как частного выражения общего закона сохранения энергии (ЗСЭ), записываемого в виде балансового уравнения изменения энергии для совокупности взаимодействующих термодинамических систем (тел), содержащих большое число частиц (для отдельных частиц этот закон неприменим). При таком изложении термодинамики теплота и работа вводятся в процессе получения уравнения ПЗТ (1), где эти понятия являются вторичными по отношению к понятию энергии.

Для вывода уравнения изменения энергии какой-либо системы в самом общем виде рассмотрим вначале изолированную систему, состоящую только из трёх взаимодействующих тел (рис. 1) и применим к ней закон сохранения энергии. Пусть рабочее тело (РТ) 1 (например, газ в цилиндре с подвижным поршнем и теплопроводными стенками) получает движение в процессе (путём) теплообмена (микроскопическим неупорядоченным путём) от источника тепла (ИТ) 2 (например, от нагревателя с открытым пламенем или от электроспирали) и в процессе совершения работы (макроскопическим упорядоченным путём) от источ-

ника работы – тела 3 (например, от гири, пружины, штока или от жидкой среды, оказывающей давление на поршень с внешней стороны).

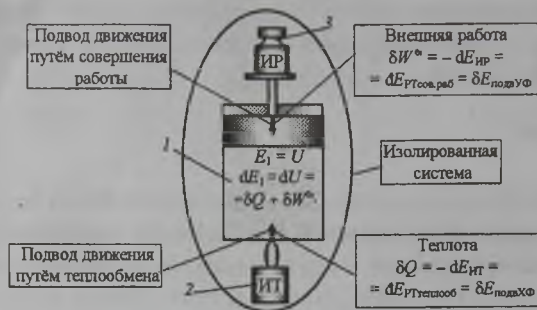


Рисунок 1

Согласно ЗСЭ для этих трёх тел, образующих изолированную систему, можно записать следующее равенство:

$$E_{\text{ИС}} = \sum E_i = E_1 + E_2 + E_3 = E + E_{\text{ИТ}} + E_{\text{ИР}} = \text{const}. \quad (2)$$

Продифференцируем это уравнение и перепишем его так

$$dE \equiv dE_1 = -dE_2 - dE_3 \equiv -dE_{\text{ИТ}} - dE_{\text{ИР}} = -dE_{\text{ОС}}. \quad (3)$$

Из соотношения (3), полученного из ЗСЭ путём тождественных математических преобразований, следует физическое утверждение: приращение энергии системы (первого тела) равно убыли энергии окружающей среды, состоящей из источников тепла 2 и источников работы 3.

В работе [3] проведена аналогия между водой, поступившей в резервуар в виде капель дождя и по трубам, и движением, переданным в процессах теплообмена и совершения работы, а также между объёмом и энергией. Подобно тому, как элементарные изменения объёма воды в резервуаре за счёт дождя и по трубам можно рассматривать как элементарные объёмы воды (δV), так и убыли энергий тел ($-dE_2 = -dE_{\text{ИТ}}$) и ($-dE_3 = -dE_{\text{ИР}}$) можно рассматривать как элементарные энергии δE (алгебраические величины) движения, переданного (подведённого в данном случае) через границы рабочего тела 1 соответственно в хаотической и упорядоченной формах

$$dE_1 = \delta E_{X\Phi} + \delta E_{Y\Phi}. \quad (4)$$

Здесь для обозначения элементарных энергий, характеризующих переданное движение через границы системы, используется символ элементарности δ .

С другой стороны, полное изменение энергии первого тела можно разбить на два частичных (парциальных) приращения в процессах теплообмена и совершения работы

$$dE_1 = p E_{1\text{теплооб}} + + p E_{1\text{сов.раб}}. \quad (5)$$

Здесь для обозначения частичных (парциальных) приращений используется символ p , который в отличие от символов полного d и частного ∂ дифференциалов, подчёркивает, что в общем случае данное приращение не может быть вычислено через параметры состояния системы.

С учётом сделанных замечаний (опуская индекс первого тела) уравнения (4) и (5) можно записать в общем виде:

$$dE = p E_{\text{теплооб}} + p E_{\text{сов.раб}} = \delta E_{\text{перед}X\Phi} + \delta E_{\text{перед}Y\Phi}. \quad (6)$$

Согласно этому балансовому уравнению энергии (здесь все величины энергии и изменения энергии) *полное приращение (изменение) энергии тела (системы) равно сумме двух частичных приращений энергии, или равно сумме элементарных энергий*, характеризующих движение, переданное через границу системы в процессах теплообмена (в XΦ) и совершения работы (в YΦ) (при этом число тел, участвующих в процессах теплообмена и совершения работы, может быть любым).

Наступило время введения новых физических величин – *теплоты и работы*. Может показаться странным, что в таком изложении термодинамики (которая часто определяется как учение о превращении теплоты в работу), понятия «теплота» и «работа» в качестве физических величин вводятся одновременно с рассмотрением уравнения ПЗТ. Однако в логически чётком построении термодинамики эти понятия по сравнению с энергией вообще, или внутренней энергией в частности, для которой записывается балансовое соотношение (1), имеют подчинённое значение.

Процессы переноса движения, которые можно охарактеризовать макроскопическими силами (макроскопическими потоками импульса) и перемещениями, назовём процессами совершения работы, а *энергию движения, переданного* в упорядоченной макроскопической форме, или частичное изменение энергии системы в процессе совершения работы – *работой*

$$\delta W' = \delta E_{\text{передУФ}} = p E_{\text{сов.раб}} = (\vec{F} d\vec{s})_{\text{макро}} \quad (7)$$

Процессы переноса движения, которые можно охарактеризовать только микроскопическими силами (микроскопическими потоками импульса от одной микрочастицы к другой) и микроперемещениями, назовём процессами теплообмена, а *энергию движения, переданного* в хаотической (неупорядоченной) микроскопии-ческой форме, или частичное приращение энергии системы в процессе теплообмена – *теплотой*

$$\delta Q = \delta E_{\text{передХФ}} = p E_{\text{теплооб}} = \Sigma(\vec{F} d\vec{s})_{\text{микро}} \quad (8)$$

Теплоту как изменение энергии системы в соответствующем процессе принято рассчитывать через теплоёмкость или энтропию, а как переданную энергию в процессах теплообмена – через тепловые потоки, определяемые из соответствующих уравнений теории теплообмена (Фурье, Ньютона-Рихмана и др.).

Следует заметить, что физическая величина теплота используется не только для количественной характеристики движения, переданного в процессе теплообмена, но и для оценки количества диссипированного (то есть превращенного в хаотическое движение) упорядоченного макроскопического движения, что обусловлено необходимостью учёта роста энтропии в таких процессах. Следовательно, при диссипации упорядоченного движения теплота диссипации определяется, как и работа, через макроскопические силы и перемещения (например, работа трения)

$$\delta Q = \delta Q_{\text{дисс}} = \delta E_{\text{диссипУД}} = (\vec{F} d\vec{s})_{\text{макро}} \cdot$$

Итак, теплота и работа – это энергии движения, переданного соответственно в процессах теплообмена и совершения работы (в связи с

этим их иногда называют энергиями перехода, или энергиями в процессе перехода).

Как следует из (7) и (8), теплоту и работу можно также трактовать и как частичные приращения энергии системы в процессах теплообмена и совершения работы:

$$\delta Q = p E_{\text{теплооб}}, \quad \delta W = p E_{\text{совер.раб}}.$$

Это имеет определённые методические преимущества. Поскольку теплота и работа являются приращениями, то значит – и алгебраическими величинами. В то же время в соответствии с общей теорией переноса составные части полного изменения энергии системы логичнее рассматривать в качестве энергий перехода.

С учётом введённых понятий работы (7) и теплоты (8) уравнение энергии (6) может быть записано в таком виде:

$$dE = \delta Q + \delta W'. \quad (9)$$

Осталось ввести понятие внутренней энергии и установить правила выбора знака теплоты и работы. Как уже отмечалось, уравнение (1) было получено Р. Клаузиусом из закона эквивалентности теплоты и работы, для чего ему пришлось ввести понятие внутренней энергии под термином «полная теплота тела». Термин «внутренняя энергия» предложил В. Ренкин.

Внутренняя энергия (ВЭ) какого-либо тела (системы) – это энергия хаотического движения (движения в хаотической форме) собственных микро- и субмикрочастиц, из которых состоит данное тело. Хаотическая форма движения присуща только большому числу частиц, совершающих в своей совокупности ненаправленное перемещение в пространстве, поэтому понятие внутренней энергии неприменимо для отдельных частей, а только для их большой совокупности.

Внутренняя энергия (её принято обозначать $U \equiv E_{\text{внутр}}$) складывается из КЭ беспорядочного поступательного и вращательного движения молекул, кинетической и потенциальной энергий колебательного движения атомов в молекулах, потенциальной энергии взаимодействия молекул на расстоянии и внутримолекулярной энергии (её часто называют нулевой энергией), представляющей собой энергию взаимодействия электронов

с ядрами (химическую энергию) и внутриядерную энергию (энергию взаимодействия нуклонов в атомных ядрах).

В термодинамические формулы обычно входит не сама ВЭ, а её изменение, либо производная по какому-нибудь параметру. Поэтому ВЭ можно определить с точностью до произвольной аддитивной постоянной, выбирая её так, чтобы выражение для энергии было предельно простым. В частности, обычно изучаются процессы, при которых внутримолекулярная (нулевая) энергия остаётся постоянной, в связи с чем эту энергию можно не учитывать (условно принять её равной нулю), а под ВЭ – понимать суммарную кинетическую и потенциальную энергии всех атомов и молекул системы. Именно так и следует вводить понятие внутренней энергии в курсах термодинамики и физики, а не через теплоту и работу.

В физических величинах: внутренней энергии U , теплоте Q и работе W есть сходство и различие. Сходство (близость, родство) всех этих величин заключается в том, что все они – родственные величины (определяемые как произведение силы на перемещение), характеризующие запас движения в системе или переданного через границы системы. Все они входят в виде слагаемых в балансовые уравнения энергии (6) и (9). Поэтому в качестве единицы¹ теплоты и работы используется единица энергии – джоуль.

Различие этих величин заключается в следующем:

а) внутренняя энергия U – энергия ХД всех микрочастиц системы, определяемая в данный момент времени через собственные величины (параметры состояния);

теплота же $\delta Q \equiv \delta E_{\text{передХФ}}$ и работа $\delta W \equiv \delta E_{\text{передУФ}}$ – энергии переданного движения за некоторый промежуток времени, определяемые уже не только через параметры состояния (внутренние величины), но и через внешние (граничные) величины, характеризующие особенности взаимодействия системы с окружающей средой, т. е. характеризующие термодинамический процесс;

¹ До 1961 г., когда была введена Международная система единиц (СИ), в качестве единицы теплоты использовались калория (от лат. *calor* – тепло, жар) и килокалория, а работы – эрг и килограмм-метр. Потребовались значительные усилия многих учёных (Джоуля, Майера и др.), чтобы доказать эквивалентность (сходство) величин “теплота” и “работа” и установить переводной коэффициент для единиц теплоты и работы – механический эквивалент теплоты, – равный 427 кгс·см/ккал (1 ккал = 4,1868 кДж).

б) изменение (приращение) ВЭ $dU = f(T, V)$ – полное изменение энергии (полный дифференциал), однозначно определяемое через параметры системы, например, температуру и объём;

элементарные же величины теплота $\delta Q = p E_{\text{тепллооб}}$ и работа $\delta W = p E_{\text{совер.раб}}$ – частичные (парциальные) приращения энергии системы, которые в отличие от полных (dU) и частных (∂U) приращений не могут быть однозначно определены через параметры системы, т. е. не являются функциями аргументов.

Иначе, отличие теплоты и работы, как частичных приращений энергии, от полного приращения энергии (полного дифференциала) состоит в том, что полное изменение (приращение) энергии зависит только от начального и конечного состояния системы (значений энергии в начальном и конечном состояниях), а частичные приращения энергии (теплота и работа) зависят уже не только от начального и конечного состояния системы, но и от соотношения (относительной доли) этих величин в полном изменении энергии, т. е. от процесса. Однако если процесс задан (доля теплоты и работы в полном изменении ВЭ системы известна и уже не является переменной величиной, определяющей процесс), то теплота и работа будут так же функциями параметров состояния, как и изменение ВЭ системы.

В физике различие между энергией и работой видят, прежде всего, в том, что изменение энергии «не зависит от пути», а работа «зависит». Здесь следует уточнить, что поскольку в механике, где изменение энергии происходит только в результате совершения работы, как изменение энергии, так и работа, вызывающая это изменение, определяются одним и тем же выражением

$$\delta W = dE = \vec{F} d\vec{s} = F ds \cos\alpha,$$

то они в одинаковой степени зависят от пути тела, но не от пути вообще, а от пути в направлении действия силы – от проекции пути на направление действия силы – $ds \cos\alpha$ (эта проекция пути в направлении, перпендикулярном действию силы, равна нулю, $\cos 90^\circ = 0$). Так, например, изменение ПЭ шарика и работа силы тяжести при скатывании шарика по наклонной плоскости будут зависеть лишь от пути в направлении действия силы тяжести (от высоты падения) и не будут зависеть от пути, пройденному шариком в горизонтальной плоскости, на котором сила тяжести не действует, $W = -\Delta E_p = mg\Delta H$.

Следовательно, при действии на тело одной силы и совершении одной работы различия между изменением энергии и работой нет: они равны произведению силы на проекцию пути на направление действия силы. Различие между полным (суммарным) изменением энергии тела и отдельной работой, вызывающей совместно с другими работами или теплотой это изменение, состоит в различии частичного и полного приращений (части и целого).

В термодинамике, чтобы подчеркнуть различие между изменением энергии (ВЭ) и работой (теплотой) используют то же утверждение, что и в механике: «работа в общем случае зависит от пути, а изменение энергии не зависит». Например, у Бэра читаем: «Для адиабатной системы работа оказывается характеристикой состояния, т. е. не зависит от пути, а только от выбора начального и конечного состояния» [4]. На самом деле работа, как уже отмечалось, всегда зависит от пути в направлении действия силы (здесь от перемещения поршня или изменения объема цилиндра). Поэтому не следует отождествлять различные понятия «путь» и «термодинамический процесс». Правильно сказать, что изменение энергии системы не зависит от процесса, а теплота и работа (поскольку они являются частичными приращениями энергии), зависят от термодинамического процесса, который как раз и определяет(ся) соотношение(м) между теплотой и работой в полном изменении энергии.

В приведённом контексте работа не зависит от процесса потому, что процесс уже задан – адиабатный, в котором доля работы в полном изменении ВЭ равна единице и остаётся постоянной, т. е. эта доля не является переменной величиной при определении работы.

Ещё раз подчеркнём, что различие между изменением энергии и работой (теплотой) возникает в термодинамических процессах, когда наряду с совершением работы происходит и теплообмен. Поскольку частичные приращения не равны полному, а зависят от процесса, то именно поэтому не следует отождествлять теплоту и работу с изменением энергии системы. Следовательно, различие между энергией и работой или теплотой – различие между энергией системы и энергиями перехода – между внутренними (собственными) и внешними (граничными) величинами; различие между изменением энергии и работой или теплотой – различие между полным приращением и частичными приращениями.

Поскольку теплота и работа величины алгебраические, то возникает вопрос в выборе знака этих величин. В соответствии с балансовым

уравнением энергии (9) знак теплоты и работы должен совпадать со знаком изменения энергии системы: при подводе движения к системе изменение энергии системы положительно, следовательно, и подводимые теплота и работа должны быть положительными величинами, а при отводе движения – отрицательными величинами. Для теплоты это правило выполняется всегда: подводимая теплота положительна, отводимая отрицательна. Что же касается знака работы, то исторически её знак определялся не из балансового соотношения (9), которого тогда ещё не было, а из соображений, что положительна для человека та работа, которую он получает от двигателя, т. е. отводимая работа, стоящая в правой части уравнения (1)

Работу, знак которой определяется из балансового соотношения (9) – по знаку приращения энергии системы, назовём внешней по знаку работой (внешней, так как она совершается за счёт убыли внешней энергии – энергии источников работы) и обозначим символом W' . Эта работа положительна при сжатии и отрицательна при расширении рабочего тела.

Работу, знак которой совпадает со знаком убыли энергии системы, назовём внутренней по знаку работой¹ (внутренней, так как она совершается за счёт убыли собственной, внутренней энергии) и обозначим символом W . Эта работа положительна при расширении и отрицательно при сжатии рабочего тела. Следовательно, рассмотренные работы противоположны по знаку: $W = -W'$.

В результате диссипативных процессов (процессов, преобразующих УД в ХД), происходящих внутри системы, внешняя работа системы (её принято называть эффективной работой δW^e) получается меньше внутренней (её принято называть индикаторной работой δW^i) на работу трения:

$$\delta W^e = \delta W^i - \delta W_{\text{тр}} . \quad (10)$$

Что касается теплоты, то к ней также применяются термины внешняя и внутренняя теплота. Под внешней теплотой δQ^e понимается теплота, подведённая к системе извне – от источника тепла, в результате сгорания топлива внутри рабочего тела, нагрева спирали внутри газа или внутри материала оболочки системы.

В результате совершения работы трения выделяется эквивалентная теплота трения $\delta Q_{\text{тр}} = \delta W_{\text{тр}}$ (внутренняя теплота), которая наряду с внешней теплотой (от источника тепла) подводится к рабочему телу. Следовательно, полная (суммарная) теплота, подводимая к рабочему телу, равна сумме внешней теплоты и теплоты трения

$$\delta Q = \delta Q^e + \delta Q_{\text{тр}} = \delta Q^e + \delta W_{\text{тр}}. \quad (11)$$

Поскольку уравнение (9) получено из уравнения (3), где в правой части стоят убыли энергии источников тепла и работы, то, следовательно, в правой части уравнения (9) теплота и работа будут внешними (по месту расчёта) и уравнение энергии (9) следует записывать в виде

$$dE = \delta Q^e + \delta W^{e'} = \delta Q^e - \delta W^e. \quad (12)$$

В общем случае система (элемент подвижной среды) может обладать кинетической, потенциальной и внутренней энергиями, а в состав работы в уравнении (12) могут входить различные виды работ. В частном случае для одного только хаотического движения, характеризуемого ВЭ, уравнение (12) примет вид

$$dU = \delta Q^e + \delta W^{e'} \quad \text{или} \quad \delta Q^e = dU + \delta W^e. \quad (13)$$

Применительно к рабочему телу в цилиндре внешняя (эффективная) работа (δW^e), отводимая от поршня в окружающую среду, в соответствии с (10) равна разности между внутренней (индикаторной) работой изменения объёма ($\delta W = \delta W^i = pdV$), совершаемой газом над поршнем, и работой трения поршня:

$$\delta W^e = pdV - \delta W_{\text{тр}}.$$

² До 1961 г., когда была введена Международная система единиц (СИ), в качестве единицы теплоты использовались калория (от лат. *calor* – тепло, жар) и килокалория, а работы – эрг и килограмм-метр. Потребовались значительные усилия многих учёных (Джоуля, Майера и др.), чтобы доказать эквивалентность (сходство) величин “теплота” и “работа” и установить переводной коэффициент для единиц теплоты и работы – механический эквивалент теплоты, – равный 427 кгс·см/ккал (1 ккал = 4,1868 кДж).

Тогда уравнение энергии (13) примет общеизвестный вид уравнения ПЗТ

$$\delta Q^c = dU + \delta W^c = dU + pdV - \delta W_{тр} \quad (14)$$

или с учётом выражения (11) для полной теплоты

$$\delta Q = \delta Q^c + \delta Q_{тр} = dU + pdV = dU + \delta W. \quad (15)$$

Сравнивая выведенные уравнения (14) и (15) с уравнением Клаузиуса (1), заключаем, что в уравнении (1) под теплотой можно понимать как внешнюю, так и полную теплоту, а под работой как внешнюю (эффективную), так и внутреннюю (индикаторную) работу. Игнорирование этого обстоятельства приводит к неверному толкованию уравнения (1) для процессов, протекающих с трением и без трения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Техническая термодинамика: Учеб. для вузов //Под ред. В. И. Крутова-2-е изд. – М.: Высшая школа, 1981. – 439 с.: ил.
 2. Рындин В. В. Вывод уравнения первого закона термодинамики на основе законов механики Ньютона и статистической физики //Наука и техника Казахстана. – 2005. – № 2. – С. 114–122.
 3. Рындин В. В. Использование гидротермодинамической аналогии для пояснения смысла теплоты, работы, энергии //Энергетика (Изв. высш. учеб. заведений). – 1991. – № 4. – С. 78–82.
 4. Бэр Г. Д. Техническая термодинамика. Теоретические основы и технические приложения //Пер. с нем. – М.: Мир, 1977. – 518 с.: ил.
-
-