

О ЕДИНСТВЕ ЗАКОНОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

Д.т.н., проф. В. Эткин

В статье обосновывается универсальный характер принципа исключенного вечного двигателя 2-го рода и ошибочность существующего деления энергии на превратимую и непревратимую. Установлено единство выражения абсолютного КПД тепловых и нетепловых циклических машин и вскрываются причины ошибочных утверждений о достижимости в них 100%-го КПД.

Введение. Принято считать, что возможности взаимного превращения энергии, т.е. их

Таблица 1.1. Возможности взаимного преобразования одних видов (I) энергии в другие (II)

№ п/п	1	2	3	4	6	7
1	○	○	○	○	○	○
2	○	○	○	○	○	○
3	◐	◐	○	◐	○	◐
4	◐	◐	○	◐	○	◐
5	○	○	○	○	○	○
6	◐	◐	○	◐	◐	◐
7	○	○	○	○	○	○

Примечания: 1. Светлые кружки означают возможность полного преобразования видов энергии первой группы (I) во вторую (II), закрашенные — неполного. 2. № 1 — механическая; № 2 — электрическая; № 3 — молекулярная; № 4 — химическая; № 5 — ядерная энергия, соответственно; № 6 — энергия в переходе (теплота); № 7 — то же (работа).

способность совершать работу зависят от формы используемой энергии. Для иллюстрации сошлемся на таблицу 1.1. из справочного пособия для энергетиков [1], в которой светлыми кружками обозначены полностью превратимые, а заштрихованными — неполностью превратимые виды энергии. В этой таблице к полностью превратимым отнесена механическая, электрическая, ядерная энергия и работа, понимаемая как энергия в состоянии перехода, а к неполностью превратимым — некая молекулярная энергия, химическая энергия и теплота как «энергия в состоянии перехода». Как видим, «линия водораздела» в отношении превратимости пролегла у авторов справочника не только в отношении тепловых и нетепловых форм энергии, но даже в отношении молекулярной, химической и ядерной энергии, хотя все они являются составляющими одной и той же внутренней энергии.

Отражением этих взглядов является и представление о различии КПД тепловых и нетепловых машин. Принято считать как нечто само собой разумеющееся, что максимальный КПД любой нетепловой машины всегда равен единице,

тогда как для тепловых двигателей он ограничен температурами подвода и отвода тепла T_1 и T_2 [2]:

$$\eta_{max} = W_{ц}/Q_1 = 1 - T_2/T_1 < 1. \quad (1)$$

Здесь $W_{ц}$ — совершаемая в обратимом цикле работа; Q_1 — полученное от горячего источника количество тепла.

Такая «дискриминация» тепловых машин основана на убеждении, что энергия, подведенная к машине в форме работы, может быть целиком превращена в любую другую её форму. Отсюда — утверждения о неприменимости 2-го закона термодинамики (принципа исключенного вечного двигателя 2-го) к нетепловым машинам, и необоснованные упреки в адрес тепловых электрических станций (ТЭС) в «расточительстве» большей части теплоты сгорания топлива.

Цель настоящей статьи — показать, что «работа работе рознь», и что любая форма энергии превратима лишь в меру пространственной неоднородности (упорядоченности) её источника, дарованного нам природой.

2. Энергия в процессе переноса и законы её преобразования

Современная физика вслед за механикой при формулировании закона сохранения энергии подразделяет полную энергию \mathcal{E} на внешнюю (кинетическую E^k и потенциальную $E^п$), и внутреннюю U , утверждая постоянство их суммы в изолированных системах:

$$\mathcal{E}_{из} = (E^k + E^п + U)_{из} = \text{const.} \quad (3)$$

Внешняя энергия E измеряется упорядоченной (полезной внешней, технической) работой $W^т$, которую необходимо затратить для перевода системы из исходной конфигурации тел (начального состояния) в данную. Внутренняя энергия U в (3), напротив, представляет собой ту часть полной энергии \mathcal{E} , которая утратила работоспособность вследствие диссипации энергии (превращения упорядоченного движения в «скрытое», хаотическое внутреннее движение частиц). По определению, внутренняя энергия не зависит от движения или положения системы как целого относительно окружающей среды и целиком определяется внутренним движением или взаимодействием частиц, составляющих систему [3].

Классическая термодинамика, изучающая внутренние процессы в системе и потому оперирующая исключительно понятием внутренней энергии U , рассматривает все изменения этой энергии как результат её переноса из окружающей среды в форме теплоты Q или работы, аналогичной работе расширения W_p (ввода вещества, заряда и т.п.). В отличие от полезной внешней работы, служащей в механике, гидродинамике и электродинамике, количественной мерой процесса энергопреращения, эти виды работ (которые следовало бы отнести к «нетехническим»), являются количественной мерой переноса энергии в одной и той же форме (т.е. обмена ею между системой и окружающей средой). В частности, работа расширения связана с обменом энергией упругой деформации газа или пара, работа ввода вещества – с массообменом, и т.д. При этом 1-е начало термодинамики сложных систем отражает сохранения внутренней энергии *при обмене ею между системой и окружающей средой* [4]:

$$dU = dQ + dW^н = TdS - pdV + \sum_i \psi_i d\Theta_i, \quad (4)$$

Сумма $\sum_i \psi_i d\Theta_i$ в правой части этого выражения описывает работу, совершаемую поливариантной системой помимо работы расширения $dW_p = pdV$, например, работу ввода в систему k -го вещества $dW_k = \mu_k dN_k$, работу ввода газа в поток $dW_{вв} = pvdM$ и т.д. Как и элементарный обратимый теплообмен $dQ = TdS$, эти дополнительные виды работ также описываются произведением некоторого «обобщенного» потенциала $\psi_i \equiv (\partial U / \partial \Theta_i)$ на изменение «обобщенной» координаты процесса Θ_i . В таком случае в число ψ_i помимо абсолютной температуры T и абсолютного давления p входят, например, химические потенциалы k -х веществ μ_k , а при замене внутренней энергии U на полную \mathcal{E} – также электрический ϕ , гравитационный ψ_g , кинетический $\psi_w = v_o^2/2$ и т.п. потенциалы; а в понятие «обобщенной» координаты процесса Θ_i наряду с энтропией S , объемом V – числа молей k -го вещества N_k , электрический заряд z , масса M и т.п.

Все члены в правой части (4) описывают различные формы энергии в состоянии их перехода (переноса) через границы системы. Таким (более общим) пониманием процесса энергообмена мы обязаны Н.Умову (1873). Применим теперь это выражение к некоторой циклической машине, преобразующей какую-либо i -ю форму энергии в другую (механическую, электрическую, химическую и т.п.). Произвольный цикл такой машины показан на рис. 1. Работа $W_{ц}$, совершаемая такой машиной за цикл, в соответствии с (4) определяется выражением:

$$W_{ц} = \oint dE_i = \oint \psi_i d\Theta_i. \quad (5)$$

Предположим, что потенциал ψ_i как аналог температуры T в тепловой машине, остается неизменным в указанном круговом процессе. Тогда, вынося его за знак интеграла (5) и учитывая, что круговой интеграл от любого параметра состояния $\oint d\Theta_i$ с необходимостью обращается в нуль (система возвращается в исходное состояние), немедленно придем к

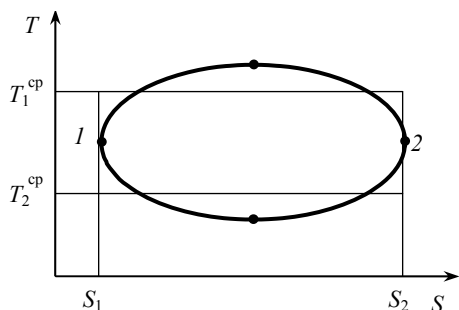


Рис. 1. Обобщенный цикл тепловой машины.

выводу, что работа такой циклической машины будет равна нулю. Это означает, что в любой циклической машине рабочее тело должно контактировать периодически как минимум с двумя источниками энергии, имеющими разное значение потенциала ψ_i , например с двумя источниками тепла с температурами T_1 и T_2 , как это показано на рис.1. Иными словами, для осуществления преобразования i -й формы энергии в любую другую форму необходим аналог «горячего» и «холодного» источника тепла, т.е. пространственно неоднородная среда. Однако наличие двух источников энергии еще не означает невозможности получать энергию от

них обоих. Поэтому покажем, что один из этих источников должен быть на самом деле её приемником. Для этого разобьем круговой интеграл (5) на два линейных интеграла, соответствующих участкам цикла 1–2 и 2–1, где dE или $d\Theta_i$ (например, dS) имеют различный знак:

$$W_{ц} = \int_{1-2} T_1 dS + \int_{2-1} T_2 dS = T_1^{cp} \Delta S - T_2^{cp} \Delta S = Q_1 - Q_2 \quad (6)$$

Поскольку в процессе 2–1 $dS < 0$, делаем вывод, что для осуществления циклического процесса необходимы как источники, так и приемники носителя преобразуемой формы энергии (энергоносителя) Θ_i . Это соответствует представлению о тепловой или нетепловой машине как совокупности источника энергии E_i и энергоносителя Θ_i (в частности, энтропии S), рабочего тела, совершающего преобразование энергии, и приемника энергоносителя Θ_i , как это показано на рис.2. Требование обязательного присутствия в структуре тепловой машины всех трех указанных элементов и составляет суть принципа исключенного вечного двигателя 2-го рода. В том, что тепловые машины имеют именно такую структуру, каким бы экзотическим ни выглядело рабочее тело, можно убедиться, рассматривая термоэлектрический преобразователь энергии, изображенный на рис.3. На нем изображена обычная термопара, состоящая из двух проводников А и В, спаи которых 1 и 2 поддерживаются при различной температуре T и $T + \Delta T$. В качестве рабочего тела цикла выступает электрический заряд, циркулирующий между источником и приемником тепла. В этом примере наглядно проявляется «компенсация» за процесс преобразования теплоты в работу, о которой говорил Р. Клаузиус. Она состоит в необходимости передачи теплоприемнику части тепла Q_1 , отобранного от его источника. Лучше было бы сказать, что для осуществления процесса преобразования любой энергии (в данном случае тепловой) необходимо организовать поток её энергоносителя (в данном случае энтропии) от источника энергии к её приемнику подобно тому, как это осуществляется с потоком воздуха через ветроэнергетическую установку. Эту аналогию с мельничным колесом и использовал С. Карно в своей теории тепловых машин [5]. Она справедлива и сейчас, если

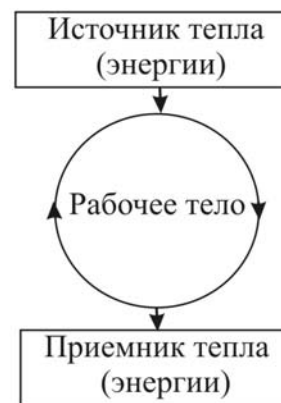


Рис.2. Схема тепловой машины - двигателя

только понятие «теплород» заменить энтропией, поток которой в тепловых машинах также остается неизменным в отсутствие диссипации.

Отсюда естественным образом возникает представление о единстве выражения КПД любой (тепловой или нетепловой) циклической машины η_i как об отношении совершаемой ею полезной работы в цикле $W_{ц}$ к поступающей на вход машины энергии E_1 (в том числе Q_1). Этот КПД удобно выразить через средние потенциалы $\bar{\psi}'_i = E_1/(\Theta_2 - \Theta_1)$ и $\bar{\psi}''_i = E_2/(\Theta_2 - \Theta_1)$ подвода и отвода энергоносителя Θ_i (как аналоги среднетермодинамической температуры подвода и отвода тепла T_1^{cp} и T_2^{cp}). Тогда выражение КПД любой циклической машины (1) примет вид [6]:

$$\eta_{max} = W_{ц}/U_1 = 1 - \bar{\psi}''_i/\bar{\psi}'_i. \quad (7)$$

Это положение не требует каких-либо допущений относительно конфигурации цикла, рода рабочего тела, квазистатичности (равновесности) составляющих цикл процессов и т.д. В частном случае установок, преобразующих тепловую энергию, и изотермических процессов подвода и отвода тепла ($\bar{\psi}'_i = T_1 = \text{const}$; $\bar{\psi}''_i = T_2 = \text{const}$) оно переходит в выражение термического КПД цикла Карно (2). Такие КПД получили название *абсолютных*.

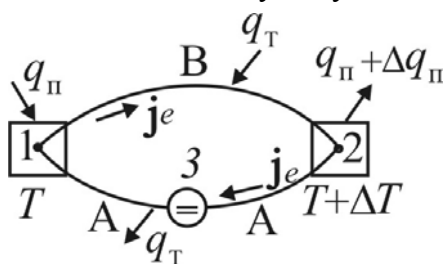


Рис.3. Схема термоэлектрического преобразователя энергии

Заметим, что эти КПД определяются только отношением усредненных значений потенциала источника и приемника преобразуемой формы энергии $\bar{\psi}'_i$ и $\bar{\psi}''_i$ в процессах подвода и отвода её в цикле. Это положение обобщает теорему Карно о независимости термического КПД обратимой тепловой машины от природы рабочего тела [6], распространяя её на нетепловые машины и необратимые процессы преобразования энергии. Все это свидетельствует об универсальном характере принципа исключенного вечного двигателя 2-го рода. Во всяком случае, прав А.А.Гухман, отметивший, что «сужение идеи о невозможности создания вечного двигателя 2-го рода до утверждения об исключительности источников тепла с методологической точки зрения не оправдано» [7].

3. Абсолютные КПД как мера неравновесности источника энергии

Как мы теперь видим, абсолютный КПД любой нетепловой циклической машины, у которой удастся различить процессы подвода и отвода энергоносителя, выражается соотношением, аналогичным выражению термического КПД тепловой машины. Это означает, что к превращению энергии способны только неравновесные (пространственно неоднородные) системы, в структуре которых можно выделить источники и приемники соответствующего энергоносителя Θ_i с различным потенциалом ψ_i . Таковы, например, расширительные машины (детандеры), осуществляющие расширение потока газа от давления p_1 до $p_2 < p_1$; и др. [6]; магнитогидродинамические генераторы, работающие по открытой схеме с энтальпией плазмы на входе и выходе генератора h_1 и $h_2 < h_1$ [8]; уже упоминавшиеся ветроэнергетические установки со скоростями ветра на входе и выходе v_1 и $v_2 < v_1$; циклические электростатические машины в виде плоских конденсаторов с изменяющимся зазором между обкладками, получающие заряд 3 при потенциале ϕ_1 и отдающие его при потенциале $\phi_2 < \phi_1$ и т.д. [9]. Для всех них абсолютные КПД меньше единицы, поскольку абсолютные значения потенциала приемника энергии $\bar{\psi}''_i = 0$ ни теоретически, ни тем более практически не достижимы [6]. Это обстоятельство свидетельствует о единстве законов преобразования любых форм энергии. При этом различие η_{max} преобразователей различных форм энергии определяются не самой этой формой, а степенью неравновесности ис-

точника преобразуемой энергии, т.е. отношением имеющих в ней перепадов обобщенного потенциала $\Delta\psi_i$ к абсолютной величине этого потенциала:

$$\eta_{max} = \Delta\psi_i/\psi_i. \quad (8)$$

Вместе с тем предпринятое рассмотрение вскрывает несовершенство понятия «абсолютный кпд» и основанных на нем формулировок принципа исключенного вечного двигателя 2-го рода. Дело в том, что этот показатель не зависит от конструкции машины, природы ее рабочего тела, конфигурации цикла, характера составляющих его процессов, степени их необратимости и т.п., и, наконец, от режима её работы [10]. Следовательно, этот показатель имеет весьма малое отношение к самой машине, осуществляющей преобразование энергии. Иначе говоря, он определяет скорее степень превратимости энергии источника, но никак не степень совершенства самой машины. По этой причине величину η_{max} в выражении (1) целесообразно называть коэффициентом преобразования (преобразуемости) энергии *источника* (кпэ), а не кпд *машины*.

Поэтому и формулировать принцип исключенного вечного двигателя 2-го рода следовало бы формулировать не как носящий характер запрета, а как необходимое условие преобразуемости энергии, аналогичное принципу С. Карно: «*повсюду, где имеется разность каких-либо потенциалов, возможно полезное преобразование энергии*» [10].

4. Реальная степень превратимости нетепловых форм энергии.

Для подтверждения ошибочности отнесения некоторых форм энергии в [2] к полностью превратимым, рассмотрим степень превратимости электростатической энергии. Для этого уместно рассмотреть (в слегка измененном виде) пример с электростатическим двигателем, приведенный Гугенгеймом [11]. Пусть на сфере радиусом 1м., служащей источником электростатической энергии, размещена одна миллионная доля грамма электронов, так что её потенциал в вакууме (в соответствии с законом Кулона) $\varphi_1 = -8,69 \cdot 10^8$ В. Пусть имеется еще одна сфера того же радиуса со значением потенциала φ_2 , меньшим на $8,69 \cdot 10^3$ В. Тогда при использовании второй сферы в качестве приемника заряда в конденсаторном двигателе с подвижными пластинами, упомянутом выше, мы получим электростатическую машину, кпд которой

$$\eta_e = 1 - \overline{\varphi}_i''/\overline{\varphi}_i' = 8,69 \cdot 10^3 / 8,69 \cdot 10^8 = 10^{-5}. \quad (9)$$

Как видим, и в этом случае мы очень далеки от возможности использовать «всю электростатическую энергию».

В качестве другого примера рассмотрим кпд ветровых энергетических установок, использующих кинетическую энергию набегающего потока $E^k = Mv_1^2/2$. Довольно очевидно, что при организации потока воздуха через преобразующее устройство скорость потока на его выходе v_2 не может быть равной нулю (иначе поток прекратится). При этом чем выше мощность, снимаемая с колеса, тем выше эта скорость. Поэтому теоретический коэффициент использования ветра (КИЭВ) $\eta_{max}^e = W_e/E_1^k = 1 - v_2^2/v_1^2$ всегда меньше единицы. Более того, из теории парусных установок А.Е. Жуковского следует, что их максимальный кпд их составляет 0,593. Реально он значительно меньше и для многих типов ВЭУ не превышает 7,4...19,7 %.

Рассмотрим теперь гидроэлектростанцию, использующую гравитационную энергию. Согласно закону Ньютона, потенциал гравитационного поля точечного источника определяется выражением $\psi_g = -GM/r$, где G – гравитационная постоянная; M – масса «полеобразующего» тела; r – текущее расстояние между центрами тяготеющих масс (в данном случае до центра Земли). Если перепад высот верхнего и нижнего бьефов составляет $\Delta r=30$ м., масса воды M перемещается из точки поля r' с потенциалом ψ_i' до положения с

расстоянием $r'' < r'$ и потенциалом ψ_i'' , то степень превращения его гравитационной энергии становится равной:

$$\eta_g = 1 - \psi_i''/\psi_i' = \Delta r/r'', \quad (10)$$

что при радиусе Земли $r'' = 6\,378$ км составляет величину, составляющую $\sim 0,5 \cdot 10^{-3} \%$.

Столь же далека от 100% степень превратимости ядерной энергии, поскольку высвобождаемая в ядерных реакциях энергия определяется лишь дефектом массы ΔM , составляющим ничтожную долю массы покоя тела M . Например, ядерное топливо, применяемое на АЭС, при начальном обогащении уранового топлива в 2,5 - 3% по массе и при глубине выгорания 10% (рекордное выгорание – 20%) теряет в массе 0,25...0,3%. Это и составляет реальный кпд ядерного реактора, определяемый в данном случае относительным дефектом массы $\eta_\gamma = \Delta M/M$. Поэтому утверждения о «полной превратимости» ядерной энергии [1] весьма далеки от реальности.

5. Причины ошибочности сложившихся представлений

Возникает вполне естественный вопрос: откуда же тогда берется стойкое представление о полной превратимости нетепловых форм энергии? Одной из главных причин, как следует из изложенного, является неразличение процессов *переноса* и *преобразования* энергии. Механика, электродинамика и гидроаэродинамика, оперировавшие понятием внешней энергии E , имели дело только с процессами взаимопревращения энергии. Для них работа, определяемая произведением вектора результирующей силы \mathbf{F}_i на вызванное ею перемещение $d\mathbf{r}_i$ объекта её приложения

$$dW_i^e = \mathbf{F}_i \cdot d\mathbf{r}_i, \quad (11)$$

имела смысл количественной меры процесса превращения энергии одной и той же совокупности взаимодействующих (взаимно движущихся) тел из одной формы в другую (например, кинетической в потенциальную). Изучение процессов переноса энергии в одной и той же форме из одной области пространства с обобщенным потенциалом $\bar{\psi}_i'$ в другую с потенциалом $\bar{\psi}_i''$ не входило в компетенцию этих дисциплин. Поэтому вопрос о превращении энергии в процессе её переноса (в постановке, принятой в термодинамике) не мог возникнуть в рамках этих теорий. Более того, сама постановка вопроса о степени превращения энергии, подводимой к машине в процессе энергопревращения (т.е. при совершении над системой полезной (технической) работы), была бы для них не более, чем тавтологией. Речь в таких установках идет об отношении действительной работы W_i , совершаемой преобразователем энергии, к её максимальной (теоретической) величине W_{max} :

$$\eta_{oi} = W_i/W_{max} \leq 1. \quad (12)$$

Это отношение называется *относительным кпд*. В отличие от абсолютного кпд (1), он характеризует потери только от несовершенства самого процесса преобразования энергии (например, потери на трение). Естественно, что величина такого кпд всегда выше абсолютного и может быть весьма близкой к единице, поскольку отвод энергии её приемнику в нем не учитывается. Между тем именно такой кпд обычно имеют в виду, говоря о совершенстве электрических, механических и т.п. машин, преобразующих внешнюю энергию E^k или E^n .

Энергия, подводимая к системе в форме полезной (технической) работы (11), в идеале (при отсутствии диссипации) действительно может быть превращена в любую другую форму внешней энергии (с относительным кпд, близким к единице). Следовательно, когда мы говорим о работе технической и нетехнической, мы должны понимать, что «работа работе рознь». Различение двух категорий работ, определяемых выражением (4) и (11)

существенно облегчается, если вторую из этих двух категорий работ называть упорядоченной, а вторую – неупорядоченной работой, обозначив их соответственно через $W_i^T = W_i^T(\mathbf{r}_i)$ и $W_i^H = W_i^H(\Theta_i)$ [12]. Это тем более целесообразно, что полезную работу могут совершать и нетехнические системы, например, живые организмы. Такое деление облегчает понимание специфики таких видов работы в термодинамике, как «работа газа в потоке», «полезная», «располагаемая», «техническая» и т.п.¹⁾ [3]. При этом становится совершенно ясным, что истинная «линия водораздела» в отношении превратимости различных форм энергии пролегает не между теплотой и работой, а между неупорядоченной и упорядоченной работой, описываемой переменными различного тензорного ранга (скалярной и векторной природы).

Соответственно этому внешнюю и внутреннюю энергию как функции соответственно скалярных и векторных переменных целесообразно называть упорядоченной $E = E(\mathbf{r}_i)$ и неупорядоченной $U = U(\Theta_i)$ энергией. Такое интуитивно понятное деление становится особенно актуальным в связи с затруднительностью традиционного деления энергии на внешнюю и внутреннюю. Например, у диэлектриков и магнетиков, находящихся во внешних электрическом и магнитном полях, их внешняя энергия зависит от внутреннего состояния, т.е. часть их внешней энергии становится внутренней. Более того, для замкнутых и изолированных систем типа Вселенной в целом понятие внешней энергии вообще утрачивает свой смысл ввиду отсутствия у неё окружающей среды. Для релятивистских систем, напротив, исчезает какая-либо часть энергии, которая не зависела бы от скорости системы в целом v_0 . В результате деление энергии на внешнюю и внутреннюю давно утратило свою эвристическую ценность.

Другой причиной путаницы в вопросе о степени превратимости энергии является существующий произвол в выборе нуля отсчета потенциальных форм энергии. Такой произвол действительно существует в механике и электродинамике, имеющих дело с внешней энергией. Для них начало отсчета является предметом договоренности. Некоторые исследователи так и поступают, полагая потенциал приемника энергии $\psi_i'' = 0$. Если бы такой произвол существовал и в термодинамике, то, приняв за нуль температуру теплоприемника $T_2 = 0$, мы немедленно пришли бы к выводу, что и термический КПД может быть равен единице! Для тепловой энергии это запрещается третьим началом термодинамики (принципом недостижимости абсолютного нуля температур), для других же форм энергии необходимость такого принципа ещё не осознана [13].

Еще одной причиной путаницы является подмена выражения абсолютного КПД (1) относительным (10) по терминологическим причинам или ввиду затруднительности (а порой и невозможности) выделить в неравновесной системе части, могущие служить источником и приемником энергии. Последнее особенно ощутимо, когда рассматриваются сплошные среды, отдельные микроскопические части которых (подсистемы), противоположным образом изменяют свое состояние в процессе преобразования энергии, не разделены в пространстве. К таким подсистемам относятся перемещающиеся в противоположные стороны разноименные заряды или полюса поляризованных и намагниченных тел, электроны и дырки в полупроводниках, положительные и отрицательные ионы в электролитах и плазме, спин-система и атомная решетка в кристаллах, однородно деформированные тела и т.п. Убедиться в том, что все эти системы неравновесны, несложно, наблюдая самопроизвольное изменение их состояния после изоляции от внешней среды. Исследование таких систем, вообще говоря, выходит за рамки применимости классической термодинамики. В этих случаях необходимо прибегать к методам неравновесной термодинамики [7], что является предметом отдельного рассмотрения.

Вывод. Мы показали, таким образом, что утверждение о достижимости 100% –го КПД нетепловых машин является следствием неразличения упорядоченной и неупорядоченной энергии, непонимания специфики процессов их переноса и преобразования, смешения по-

¹⁾ Различение этих видов работы затруднено необходимостью их представления через те же скалярные переменные, что и неупорядоченные виды работ.

нятий абсолютного и относительных КПД и существующего произвола в выборе начала отсчета потенциала нетепловых форм энергии. Мы убедились в том, что максимальный КПД тепловых и нетепловых циклических машин определяется одним и тем же соотношением потенциалов источника и приемника преобразуемой формы энергии и в принципе всегда меньше единицы. Это приближает нас к пониманию неизбежности принципа исключенного вечного двигателя как универсального закона природы и заставляет критически относиться к любым попыткам его «опровержения».

Литература

1. Эксергетические расчеты технических систем. / П/р. А.А. Долинского и В.М. Бродянского). Киев: Наукова думка, 1991.
2. Базаров И.П. Термодинамика. Изд. 4-е. М.: 'Высшая школа', 1991.
3. Андриященко А.И. Основы технической термодинамики реальных процессов. – М. : Высш. школа, 1975.
4. Сычѳв В.В. Сложные термодинамические системы.- М., Энергоатомиздат, 1986.
5. Карно С. Размышления о движущей силе огня и машинах, способных развивать эту силу // Второе начало термодинамики. //М.: Гостехиздат, 1934. – С. 17...62.
6. Эткин В.А. О максимальном КПД нетепловых двигателей. // Сборник научно-методических статей.Теплотехника. М.: Высшая школа, 1980.
7. Гухман А.А. Об основаниях термодинамики. М.: Энергоатомиздат, 1986.
8. Фаворский О.Н., Фишгойт В.В., Янтовский Е.И. Основы теории космических электрореактивных двигательных установок. – М.: Высшая школа, 1970.
9. Леонова В.Ф. Термодинамика.- М., 2Высшая школа,1965.
10. Эткин В.А. Энергодинамика (синтез теорий переноса и преобразования энергии).- СПб, «Наука», 2008.- 409 с.
11. Gugenheim E.A. Thermodynamics/ -Amsterdam, 1950.
12. Эткин В.А. Работа упорядоченная и неупорядоченная // http://zhurnal.lib.ru/e/etkin_w_a/shtml. 09/08/2010
13. Эткин В.А. Об универсальном характере третьего начала термодинамики. // http://zhurnal.lib.ru/e/etkin_w_a/shtml. 27.09.2009.