

# ЭНЕРГИЯ И АНЕРГИЯ

В.А. Эткин В.А.

Обсуждаются попытки определить понятие энергии и обосновывается возможность вернуть ей близкий к изначальному смысл меры работоспособности системы

## ENERGY AND ANERGY

V.A. Etkin

Attempts to define concept of energy are discussed and possibility to return its like to primary sense of a working capacity measure is proved

**Введение.** В научно–технической литературе и в повседневном обиходе вряд ли отыщется понятие более употребительное и менее определенное, чем энергия. Читатель будет, вероятно, немало удивлен, не найдя в справочниках и энциклопедиях физически более содержательного определения этого понятия, нежели трактовка ее как философской категории “общей количественной меры движения и взаимодействия всех видов материи” [1]. В результате, как справедливо заметил математик А.Пуанкаре, «мы не можем сказать об энергии ничего сверх того, что существует нечто, остающееся неизменным» [2]. Между тем в определенных условиях наряду с энергией неизменными остаются и такие величины, как масса, заряд, импульс и момент количества движения. Поэтому не способствует пониманию смысла энергии и её определение как «одного из семи интегралов движения» [3]. Для физической величины, которая связывает воедино все явления природы, такая ситуация является совершенно нетерпимой.

Настоящее обозрение имеет целью выявить недостатки существующих определений и способов классификации энергии, критически оценить попытки отразить количественную и качественную сторону этого понятия и предложить выход из положения, при котором «физике сегодняшнего дня неизвестно, что такое энергия» (Р. Фейнман) [4].

**1. Внешняя и внутренняя энергия.** Термин «энергия» (от греческого  $\epsilon\nu\rho\upsilon\acute{\iota}\alpha$  – деятельность) был введен в механику в начале XIX столетия английским физиком Т. Юнгом вместо понятия «живой силы» и означал работу, которую может совершить исследуемое тело или система тел при их торможении или переходе из данной конфигурации в «нулевую» (принятую за исходную). В соответствии с этим энергия делилась на кинетическую  $E^k$  и потенциальную  $E^п$ . Обе эти формы энергии могли реализоваться в форме работы только с возникновением относительного движения взаимодействующих тел, т.е. с изменением положения тела в пространстве (его радиус-вектора  $\mathbf{r}$ ). Математически это может быть выражено зависимостью  $E^k = E^k(\mathbf{r})$  и  $E^п = E^п(\mathbf{r})$ . В реальных системах сумма кинетической и потенциальной энергии в изолированной (замкнутой) системе взаимодействующих (взаимно движущихся) тел не оставалась постоянной в силу известного явления «диссипации» (рассеяния) энергии. При этом работоспособность системы становилась зависящей от характера процесса (степени его диссипативности) и уже не определяла энергии системы. Чтобы не нарушать закон сохранения энергии, в механике было введено условное понятие *консервативной* системы, для которой сумму кинетической и потенциальной энергии можно было считать величиной сохраняющейся и зависящей только от начального и конечного её состояния. С появлением термодинамики закон сохранения энергии удалось распространить и на неконсервативные системы. Это стало возможным благодаря доказательству существования у тел «внутренней» энергии  $U$  скрытого (микроскопического) движения, означавшей с позиций механики «рассеянную» (обесцененную)

энергию. Эта энергия по определению не зависела от положения тела или его движения относительно других тел, т.е.  $U \neq U(\mathbf{r})$ , и не измерялась величиной работы  $W$ . Однако она позволяла переформулировать закон сохранения энергии в виде утверждения о постоянстве суммы кинетической  $E^k$ , потенциальной  $E^п$  и внутренней  $U$  энергии изолированной системы:

$$(E^k + E^п + U)_{из} = \text{const.} \quad (1)$$

Естественно, что понятие энергии перестало соответствовать греческой этимологии этого слова («эн» (внешний) и «эргон» (работа)). К тому же и элемент  $dW$  работы  $W$  перестал быть полным дифференциалом  $dW$  (каковым он был в механике консервативных систем), поскольку работа стала зависимой от пути и скорости процесса<sup>1)</sup>, а не только от начального и конечного состояния системы [5].

Не будет преувеличением сказать, что именно использование термина «энергия» (хотя бы и с прилагательным «внутренняя») применительно к функции  $U$ , не измеряемой величиной работы, породило до сих пор не преодоленные трудности определения понятия энергии. Прежде всего, это потребовало введения еще двух новых терминов, поскольку понятие внутренней энергии предполагало существование антипода – внешней энергии  $E^{вн}$ , а также полной энергии  $\mathcal{E}$  как их суммы. Чтобы различить их, под  $E^{вн}$  стали понимать ту часть энергии системы  $E$ , которая не зависит от внутреннего состояния системы и по-прежнему определяется работой, которую может совершить система. Однако впоследствии стало ясно, что часть внешней энергии все же зависит от внутреннего состояния системы. Например, в диэлектриках и магнетиках результирующее электрическое и магнитное поля зависят от температуры этих тел. При этом работа поляризации и намагничивания этих тел сопровождается совершением работы против внешних полей, что изменяет как внешнюю, так и внутреннюю энергию. В некоторых частных случаях ситуацию удается спасти введением дополнительного понятия «собственной» внутренней энергии таких тел (без энергии поля в вакууме) [5]. Однако такое название является условным, поскольку внешнее поле уже изменено самим присутствием поляризованных или намагниченных тел. Дальше – больше. С появлением специальной теории относительности (СТО) выяснилось, что в быстро движущихся телах вообще отсутствует какая-либо часть энергии, которая не зависела бы от скорости их движения [6]. Что же касается изолированных систем, то для них понятие внешней энергии вообще утрачивает смысл. В связи с этим деление энергии на внешнюю и внутреннюю утратило свою эвристическую ценность, и вновь возникла потребность отразить в терминологии качественные различия работоспособных и неработоспособных форм энергии, приводящие к односторонней направленности естественных процессов.

**2. Свободная и связанная энергия.** Другая попытка различить количественную и качественную характеристику энергии нашла отражение в принятом в термодинамике делении энергии на «свободную» и «связанную». Такое деление стало возможным после введения Р. Клаузиусом основополагающего для термодинамики понятия энтропии  $S$ . В соответствии с её смыслом Г. Гельмгольц назвал произведение абсолютной температуры  $T$  и энтропии  $S$  «связанной энергией», а остальную часть  $F = U - TS$  – «свободной энергией». Вслед за этим Дж. Гиббс ввел понятие «свободной энтальпии»  $G$  как разности между энтальпией системы  $H \equiv U + pV$  и связанной энергией  $TS$ . Несложно показать, что в условиях постоянства температуры  $T$  и объема  $V$  системы убыль свободной энергии Гельмгольца определяет максимальную механическую работу (работу расширения), которую

<sup>1)</sup> Это потребовало введения в термодинамике и механике неконсервативных систем знака неполного дифференциала  $d$ , чтобы отличить элементарное изменение какой-либо функции состояния ( $dU$ ,  $dT$  и т.д.) от элементарной теплоты  $dQ$  или работы  $dW$  как функций процесса.

может совершить система при обратимом (бездиссипативном) характере процессов [5]. Действительно, обозначая элементарную работу расширения через  $dW_p$  и выражая теплоту обратимого процесса  $dQ$  известным образом через абсолютную температуру  $T$  и энтропию  $S$  ( $dQ = TdS$ ), после применения преобразования Лежандра  $TdS = d(TS) - SdT$  на основании (2) имеем при  $T, V = \text{const}$ :

$$dW_p = -[dF]_{T,V} . \quad (2)$$

Аналогичным образом, обозначая через  $dW^{\text{н}}$  работу немеханического характера, и применяя преобразование  $pdV = d(pV) - Vdp$ , найдем в условиях  $T, p = \text{const}$  :

$$dW^{\text{н}} = -d(H - TS)_{T,p} = -[dG]_{T,p} . \quad (3)$$

В соответствии с условиями процесса свободную энергию Гельмгольца и Гиббса называют соответственно изохорно – изотермическим и изобарно – изотермическим потенциалами. Однако в открытых системах (обменивающихся веществом с окружающей средой) работа  $dW^{\text{н}}$  уже не определяется убылью какого-либо термодинамического потенциала системы. Причину этого нетрудно понять, рассматривая объединенное уравнение 1–го и 2–го начал термодинамики открытых систем в форме обобщенного соотношения Гиббса:

$$dU = TdS - pdV + \sum_k \mu_k dN_k, \quad (4)$$

где  $N_k$ ,  $\mu_k$  – число молей  $k$ -го вещества и его химический потенциал. Если включить в правую часть (4) работу  $dW^{\text{н}}$  и применить преобразование  $\mu_k dN_k = d(\mu_k N_k) - N_k d\mu_k$ , получим:

$$dW^{\text{н}} = -d(H - TS - \sum_k \mu_k N_k) - (SdT - Vdp + \sum_k \mu_k dN_k), \quad (5)$$

откуда в силу определения химического потенциала  $\sum_k \mu_k N_k = H - TS$  и соотношения Гиббса – Дюгема  $SdT - Vdp + \sum_k \mu_k dN_k = 0$  следует  $dW^{\text{н}} = 0$ . Вследствие этого в открытых системах деление энергии на свободную и связанную также утрачивает свою эвристическую ценность. С другой стороны, понятие «свободной энергии» (Гельмгольца и Гиббса) вовсе не характеризует и «запас» превратимой энергии в системе, поскольку как  $W_p$ , так и  $W^{\text{н}}$  совершаются не только за счет энергии самой системы, но и за счет энергии окружающей среды (при теплообмене с ней). Кроме того, для большинства случаев связанная энергия  $TS$  по своей абсолютной величине зачастую оказывается больше самой внутренней энергии  $U$  или энтальпии  $H$  и потому не может трактоваться как часть последних [7]. Этот недостаток мог бы быть в принципе устранен смещением начала отсчета энергии  $U$  или энтальпии  $H$  с учетом ядерной, атомной, лучистой и других еще не известных составляющих энергии. Однако для них пока не найдено соответствующего параметрического выражения.

**3. Эксергия и анергия.** Уравнение энергетического баланса системы (4) не учитывает различия количества и качества энергии, и потому явно не достаточно для оценки совершенства преобразователей энергии. Таким показателем могла бы стать способность системы к совершению работы в условиях отсутствия равновесия с окружающей средой. Соответствующие термины были предложены в 1955 году югославским ученым З. Рантом, который разделил энергию системы на *эксергию* (технически пригодную, превратимую энергию) и *анергию* (технически непригодную, непревратимую ее часть) [8]. В технической литературе термин «эксергия» весьма распространен. Однако величина эксергии неоднозначна и зависит от параметров окружающей среды, принимаемых за начало её отсчета. В частности, эксергия источника тепла определяется произведением его количества

$Q$ , подведенного от горячего источника, на термический КПД идеальной машины Карно, использующей окружающую среду в качестве теплоприемника. Последняя, как известно, существенно различна в различных точках Земного шара и к тому же меняется со временем. В еще большей мере это относится к эксергии различных веществ, которая зависит от их концентрации, отличающейся в окружающей среде на много порядков. По этой причине выбор начала отсчета эксергии представляет значительные трудности, что до настоящего времени препятствует распространению этого термина и эксергетического анализа процессов в целом [8].

Не менее важно, что эксергия не является частью внутренней энергии системы и не может быть задана как функция её состояния. С особой очевидностью это проявляется, когда работа совершается не только за счет убыли внутренней энергии системы, но и за счет подвода тепла извне. Еще одна трудность использования эксергии возникает, когда рассматриваются системы с более низкой температурой, чем температура окружающей среды. Тогда эксергия источника тепла становится отрицательной, а совершение системой работы сопровождается не уменьшением, а увеличением эксергии. В общем случае ошибочно также утверждение, что эксергия – часть энергии, превратимая в любую другую ее форму. Например, эксергия элементарного углерода выше его теплотворной способности [8]. Следовательно, если некоторое количество эксергии израсходовать на выделение чистого углерода из углекислого газа атмосферы, то вызванное этим увеличение химической энергии окажется меньше затраченной эксергии. Вследствие этого введение понятия эксергии не позволяет решить весь комплекс возникающих задач.

Таким образом, ни одна из прежних попыток отразить количественную и качественную характеристику энергии не является не только исчерпывающей, но и не может считаться удовлетворительной.

**4. Упорядоченная и неупорядоченная энергия.** Понятие энергии является общезначимым, поэтому и подходить к её определению следует с позиций междисциплинарной теории, объединяющей по возможности большее число фундаментальных дисциплин. Именно такова энергодинамика, обобщающая методы равновесной и неравновесной термодинамики на нетепловые процессы и формы энергии [9]. Предлагаемое ею решение проблемы основано на обобщении понятия работы и её определением как *количественной меры процесса, связанного с преодолением каких-либо сил*. Чтобы прийти к такому пониманию, целесообразно начать с понятия *действия*, введенного в механику задолго до открытия закона сохранения энергии. Под действием в механике понимается процесс, вызывающий изменение количества движения  $Mdv_0$ , где  $M$  – масса системы,  $v_0$  – скорость центра её массы. В соответствии с законами механики величина действия выражается произведением силы  $\mathbf{F}$  на длительность ее действия  $dt$ . Эту величину называют также *импульсом силы* (Н·с). Обобщая это понятие на немеханические формы движения, будем понимать под действием *количественную меру процесса, связанного с преодолением каких-либо сил*. Произведение действия на скорость перемещения объекта приложения силы  $\mathbf{v} = d\mathbf{R}/dt$  характеризует величину *работы*  $W$  (Дж). Понятие работы пришло в термодинамику из механики (Л. Карно, 1783; Понселе, 1826), где она измерялась скалярным произведением вектора результирующей силы  $\mathbf{F}$  на вызванное ею перемещение  $d\mathbf{R}$  объекта её приложения (радиус – вектора  $\mathbf{R}$  центра приложения силы)  $dW = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{R}$ . Таким образом, работа изначально рассматривалась как количественная мера воздействия одного тела на другое<sup>1)</sup>. В последующем в зависимости от природы сил их стали называть механическими, электрическими, магнитными, химическими, ядерными и т.п.). Мы будем обозначать силы  $i$ -го рода через  $\mathbf{F}_i$  по природе носителя данной формы взаимодействия. Силы – величины аддитивные, т.е. суммируемые по элементам массы тела  $dM$ , его объема  $dV$ , поверхности

<sup>1)</sup> Заметим, что в соответствии с господствующей общенаучной парадигмой существует только взаимодействие (взаимное действие) материальных объектов, так что работа является *наиболее универсальной* мерой воздействия их друг на друга.

$df$  и т.д. Это означает, что в простейшем случае они пропорциональны некоторому фактору их аддитивности  $\Theta_i$  (массе  $M$ , объему  $V$ , поверхности  $f$  и т.д.). Соответственно этому их называют *массовыми*, *объемными*, *поверхностными* и т.д. Силы также подразделяются на *внешние* и *внутренние* в зависимости от того, действуют ли они между частями (частицами) системы или между системой и окружающими телами (окружающей средой).

Для нас особое значение имеет наличие или отсутствие у сил результирующей  $\mathbf{F}$ . Чтобы выяснить, от чего зависит наличие или отсутствие последней, учтем, что в общем случае силы  $i$ -го рода действуют на частицы разного ( $k$ -го) сорта и иерархического уровня материи (ядра, атомы, молекулы, клетки, их соединения, тела и т.п.). Обозначая радиус-векторы этих элементарных объектов приложения силы через  $\mathbf{r}_{ik}$ , а действующую на них «элементарную» силу через  $\mathbf{F}_{ik}$ , найдем, что любое  $i$ -е воздействие на систему в целом складывается из элементарных работ  $dW_{ik} = \mathbf{F}_{ik} \cdot d\mathbf{r}_{ik}$ , совершаемых над каждым из них [9]:

$$dW_i = \sum_k \mathbf{F}_{ik} \cdot d\mathbf{r}_{ik} \neq 0. \quad (6)$$

Очевидно, что результат такого действия будет различен в зависимости от направления элементарных сил  $\mathbf{F}_{ik}$  и вызванных ими перемещений  $d\mathbf{r}_{ik}$ . Рассмотрим вначале случай, когда элементарные силы  $\mathbf{F}_{ik}$  вызывают перемещение  $d\mathbf{r}_{ik}$  одного знака у объектов её приложения (частиц  $k$ -го сорта), т.е. изменяют положение радиус-вектора  $\mathbf{R}_i$  всей совокупности  $k$ -х объектов приложения элементарных сил  $\mathbf{F}_{ik}$ . В таком случае  $d\mathbf{R}_i = \sum_k d\mathbf{r}_{ik} \neq 0$ , и силы  $\mathbf{F}_{ik}$  приобретают результирующую  $\mathbf{F}_i = \sum_k \mathbf{F}_{ik}$ . Именно такую работу совершают механические системы и технические устройства (машины), предназначенные для целенаправленного преобразования одних видов энергии в другие. Поэтому в технической термодинамике такую работу обычно называют *полезной внешней* или *технической*. Однако поскольку в общем случае такую работу совершают не только технические устройства, но и биологические, астрофизические и т.п. системы, мы будем называть её просто *упорядоченной* работой и обозначать через  $W^e$ . Работа  $i$ -го рода определяется как произведение результирующей силы  $\mathbf{F}_i$  на вызванное ею перемещение  $d\mathbf{R}_i$  объекта ее приложения:

$$dW_i^e = \mathbf{F}_i \cdot d\mathbf{R}_i. \quad (7)$$

Таковы, в частности, все механические виды работ. Характерной особенностью упорядоченной работы является её *векторный характер*, обусловленный направленным характером перемещения  $d\mathbf{R}_i$ . Такова же работа, совершаемая электрическим, магнитным и гравитационными полями, электрическими и химическими источниками тока.

Иного рода работа, совершаемая, например, при всестороннем сжатии или расширении газа, в отсутствие в нем градиентов давления  $\nabla p$ . Рассматривая локальное давление  $p$  как механическую силу, действующую на элемент замкнутой поверхности  $df$  в направлении нормали к ней  $\mathbf{n}$ , на основании теоремы о градиенте находим, что результирующая сил давления на замкнутую поверхность равна нулю:

$$\mathbf{F}_p = \int p d\mathbf{f} = \int \nabla p dV = 0. \quad (8)$$

Таким образом, работа всестороннего сжатия равновесной (пространственно однородной) системы не связана с преодолением результирующей сил давления, а сам процесс сжатия или расширения не связан с изменением положения тела как целого. С точки зрения механики, в которой работа понималась исключительно как количественная мера превращения энергии из одной формы в другую (например, кинетической в потенциальную), это означает отсутствие при всестороннем сжатии самого процесса *преобразования* энергии. Ввиду отсутствия упорядоченного движения  $i$ -го объекта (его перемещение  $d\mathbf{R}_i = 0$ ) такого рода работу мы будем называть в дальнейшем *неупорядоченной* и обозначать через  $W^H$ . К этой категории следует отнести и многие другие виды работ, не имею-

щих результирующей, в частности, работу равномерного ввода в систему  $k$ -х веществ (частиц) или заряда, придания компонентам системы импульса относительного движения и т.п.). Все эти виды работ описываются в термодинамике выражениями вида

$$dW_i^H = dU = \Psi_i d\Theta_i, \quad (9)$$

где  $\Psi_i$  – обобщенные потенциалы типа абсолютного давления, химического потенциала  $k$ -го вещества, его электрического потенциала и т.п.;  $\Theta_i$  – экстенсивные меры количества движения  $i$ -го рода (объем, масса  $k$ -го вещества, заряд и т.д.). К этой же категории следует отнести и теплообмен, представляющий собой не что иное как «микроработу» против хаотических межмолекулярных сил. Ввиду отсутствия результирующей силы процесс совершения неупорядоченной работы носит скалярный характер и характеризует перенос энергии в одной и той же форме (без энергопревращения). Такого рода процессы, будучи квазистатическими (бесконечно медленными), не нарушают внутреннего равновесия в системе (её пространственной однородности).

Таким образом, мы имеем возможность различать упорядоченную  $W_i^e$  и неупорядоченную  $W_i^H$  работу по тому, имеют ли преодолеваемые силы результирующую  $\mathbf{F}_i$ , или нет. Полезная (упорядоченная) работа, совершаемая над какой-либо совокупностью взаимодействующих (взаимно движущихся) тел или частей тела, с необходимостью нарушает равновесие в такой системе, даже если процессы квазистатичны (бесконечно медленны). Она отличается тем, что приводит к противоположным по характеру изменениям состояния в различных частях этой системы: появлению разноименных зарядов или полюсов, противоположному по направлению смещению различных частей тела, повышению температуры, давления, концентрации и т.п. в одних частях системы, и понижению их – в других. Словом, эта работа делает системы пространственно неоднородными.

Напротив, в отсутствие результирующей силы работа приобретает неупорядоченный характер, независимо от того, каким способом подведена энергия к системе: путем теплообмена, массообмена или всестороннего сжатия. Соответственно этому и энергию системы  $\mathcal{E}$  целесообразно разделить на *упорядоченную*  $E$  и *неупорядоченную*  $U$ , измеряемые различными группами переменных. Такая классификация энергии весьма близка по смыслу к принятому в нерелятивистской механике консервативных систем делению её на внешнюю и внутреннюю, позволяя в то же время избежать отмеченных выше трудностей использования этих понятий. Эти две составляющие измеряются соответственно способностью системы совершать упорядоченную и неупорядоченную работу. При этом диссипация энергии получает естественную трактовку как превращение упорядоченной энергии в неупорядоченную. Последняя, таким образом, приобретает смысл рассеянной, технически непригодной энергии, для которой весьма уместен термин «анергия».

Таким образом, деление энергии на упорядоченную и неупорядоченную позволяет отказаться от классического деления энергообмена на теплообмен и работу, тем более что с переходом к открытым системам такое деление стало недостаточным в связи с появлением еще одного его вида – массообмена, не сводимого ни к теплообмену, ни к работе. Стало ясно, что энергия становится единой мерой любой работы (упорядоченной и неупорядоченной, внешней и внутренней, полезной и диссипативной, механической и немеханической, располагаемой или действительной).

Важную роль в понимании специфики энергии и её отличия от других сохраняющихся величин играет нахождение в энегергодинамике необходимого и достаточного числа координат состояния исследуемой системы. С этой целью в ней доказывается теорема, согласно которой *число независимых переменных, определяющих состояние и энергию какой-либо системы, равно числу независимых процессов, протекающих в ней*. Поскольку энергия системы изменяется (количественно или качественно) в каждом из таких процессов, число её аргументов как функции состояния однозначно определяется числом степеней свободы рассматриваемой системы. Это отличает (полную) энергию системы  $\mathcal{E}$  от

упорядоченной и неупорядоченной, внешней и внутренней, свободной и связанной, кинетической и потенциальной. Все это позволяет определить энергию как *наиболее общую функцию состояния системы, характеризующую её способность совершать любую работу*. Такое определение энергии весьма близко к её пониманию К. Максвеллом как «суммы всех действий, которые может оказать система на окружающие ее тела». Близко оно и к определению энергии как общей меры всех форм движения материи, если эти формы делить на упорядоченные и неупорядоченные.

Данное здесь определение энергии позволяет не только вернуть её близкий к изначальному смысл, но и избежать свойственного многим теориям произвола в оценке числа степеней свободы исследуемой системы, что проявляется, в частности, в необоснованном привлечении «скрытых параметров», в приписывании физических свойств точке или вакууму, в рассмотрении «многомерных пространств» и т.п. Оно вынуждает критически отнестись к теориям, допускающим нарушение закона её сохранения, существование отрицательной энергии, наличие энергии у «пустого» пространства, эквивалентность энергии массе и т.п.

**Обсуждение результатов.** Понимание того, что «работа работе рознь», и что действительная «линия водораздела» в отношении степени превратимости энергии проходит не между теплотой  $Q$  и работой  $W_i$ , а между упорядоченными и неупорядоченными её формами (и соответствующими им категориями работ  $W_i^e$  и  $W_i^h$ ), имеет решающее значение для понимания не только термодинамики, но и других фундаментальных дисциплин. Становится предельно ясным, что внутренняя энергия равновесной (однородной) системы  $U$ , с которой имеет дело классическая термодинамика, является на самом деле не энергией, а анергией. Следовательно, изначальное понимание этой функции Р. Клаузиусом как «полной теплоты тела» (как привнесенной извне, так и рассеянной), было значительно ближе к действительности, нежели трактовка её как «механической энергии тела». Лишь с переходом термодинамики к исследованию неоднородных (внутренне неравновесных) сред появилась возможность выделить в составе внутренней энергии системы упорядоченную часть, которая способна к совершению внешней работы (если система не изолирована) или внутренней работы (если система изолирована). Это хорошо понимал основоположник термодинамики С. Карно, давший исторически первую формулировку 2-го начала термодинамики в виде утверждения: «Повсюду, где имеется разность температур, может возникать и живая сила» (т.е. в современном понимании способность совершать полезную работу). Оглядываясь назад, приходится с сожалением констатировать, скольких трудностей можно было избежать, если бы функции  $U$  было дано соответствующее ей название анергии. Это позволило бы уже с середины XIX столетия сформулировать закон сохранения суммы энергии и анергии как действительно общей количественной мере всех (превратимых и непревратимых) форм движения (взаимодействия) материи. Тем самым было бы сохранено простое и ясное (и вопреки всему бытующее до сих пор) понимание энергии как способности системы к совершению полезной внешней работы.

Однако история не знает сослагательного наклонения. Поэтому в создавшейся обстановке деление энергии на упорядоченную и неупорядоченную части [9] представляется нам приемлемой альтернативой. Упорядоченная энергия – превратимая часть энергии любой (в том числе изолированной) системы; анергия – её непревратимая, неработоспособная часть. Доля упорядоченной энергии, именуемая степенью её упорядоченности, дает простое и ясное понимание различия количества и качества энергии, позволяя избежать той невероятной путаницы, которая царит в головах многих исследователей, постоянно выплескиваясь на страницы научной и околонуучной печати. В частности, становится ясным, что величина, измеряемая в СТО произведением массы покоя тела  $M_0$  на квадрат скорости света, отнюдь не определяет работоспособности системы. Последнюю определяет лишь упорядоченная часть энергии, преобразуемая в процессах ядерных энергопревращений и равная доле дефекта массы  $\Delta M/M_0$ , которая не превышает 0,1% массы покоящей-

ся системы. Поскольку же в химических реакциях величина  $\Delta M$  намного меньше, становится ясным, насколько далеки мы от возможности использовать «всю энергию» тела! В не меньшей степени это относится к оценкам работоспособности физического вакуума, плотность энергии которой по некоторым данным эквивалентна  $10^{95}$  г/см<sup>3</sup> [10]. Между тем никаких экспериментальных оснований считать физический вакуум неоднородной средой, обладающей упорядоченной энергией, не существует. Это необходимо иметь в виду тем, кто, игнорируя термодинамику, собирается строить энергетику будущего на этом поистине безграничном хранилище... анергии!

Важным следствием данного здесь определения понятия энергии является облегчение понимания единства и специфики многих процессов переноса и преобразования различных её форм. С выделением упорядоченной части энергии системы становится очевидной универсальность принципа исключенного вечного двигателя 2-го рода как утверждения о невозможности совершения полезной (упорядоченной) работы любой пространственно однородной системой. Столь же ясной становится суть 2-го закона термодинамики для необратимых процессов, отражающая факт самопроизвольного превращения упорядоченных форм энергии в неупорядоченные. Основываясь на понятии упорядоченной энергии, несложно опровергнуть тезис о существовании «превратимых» и «непревратимых» форм энергии [8] и показать, что все её формы (в том числе и тепловая) превратимы в той мере, в какой они упорядочены (вопреки утверждениям о «специфике» теплоты). Становится очевидной и необоснованность утверждения о неоднозначности знака энергии: энергия – величина сугубо положительная (по принципу: работоспособность либо есть, либо её нет!). Все это способствует лучшему пониманию различия энергии и анергии.

### Литература

1. Физический энциклопедический словарь. – М.: Сов. энциклопедия, 1984.
2. Пуанкаре А. О науке. – М.: «Наука», 1983.
3. Ландау Л., Лившиц Е. Теоретическая физика. Т.1. Механика. – М.: «Физматлит», 2001
4. Фейнман Р. Характер физических законов. - М.: Мир, 1968.
5. Базаров И.П. Термодинамика. Изд. 4–е. М., «Высшая школа», 1991.
6. Толмен Р. Относительность, термодинамика и космология. М.: «Наука», 1974
7. Путилов К.А. Термодинамика. М.: «Наука», 1971.
8. Эксергетические расчеты технических систем (справочное пособие под ред. А.А. Долинского и В.М. Бродянского).-Киев: «Наукова думка», 1991.
9. Эткин В.А. Энергодинамика (синтез теорий переноса и преобразования энергии).- СПб, «Наука», 2008.-409 с.
10. Уилер Дж. Предвидение Эйнштейна, М., «Мир», 1970.