

## УСТРАНЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПОНЯТИЯ ЭНЕРГИИ

Д.т.н., проф. В.Эткин

Показана возможность вернуть энергии ее простой и ясный изначальный смысл меры работоспособности системы путем обобщения понятия работы и отказа от деления энергообмена на теплообмен и работу. Показано, что энергия является наиболее общей функцией состояния, характеризующей способность системы тел совершать любую (упорядоченную и неупорядоченную) работу.

**Введение.** Термин «энергия» (от греческого  $\epsilon\nu\rho\upsilon\gamma\iota\alpha$  – деятельность) был введен в механику в начале XIX столетия английским физиком Т. Юнгом вместо понятия «живой силы» и означал внешнюю работу  $W^e$ , 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  $W^e$  только с возникновением относительного движения взаимодействующих тел, т.е. с изменением положения тела в пространстве (радиус-вектора  $\mathbf{r}$  центра его массы). Отсюда следовало, что  $E^k = E^k(\mathbf{r})$  и  $E^п = E^п(\mathbf{r})$ , т.е. являются функцией внешних параметров системы, определяющих положение системы как целого. В последующем это явилось основанием для введения понятия «внешней» энергии.

Пока механика обходилась этими двумя видами энергии и исключала из рассмотрения внутренние, в том числе диссипативные процессы в движущихся телах, сумму  $E^k + E^п$  можно было считать постоянной. Это положение получило название «закона сохранения энергии». Однако когда механика столкнулась с превращением энергии упорядоченного движения в неупорядоченную (теплоту), этот закон утратил силу. Казалось бы, следовало признать этот факт и ввести наряду с понятием «энергия» противоположное ему понятие типа «анергия»<sup>1)</sup>, что позволило бы отнести закон сохранения к сумме энергии и анергии как действительно общей мере всех (превратимых и непревратимых) форм движения материи. Однако вместо этого было введено понятие «внутренней» энергии  $U$ , означавшей с позиций механики «рассеянную» (обесцененную) энергию скрытого (микроскопического) движения, утратившую способность к совершению полезной внешней работы  $W^e$ . Эта энергия по определению не зависела от положения тела  $\mathbf{r}$  или его движения относительно других тел, т.е.  $U \neq U(\mathbf{r})$ . Это позволило сохранить формально закон сохранения энергии, переформулировав его 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 при этом понятие «энергия» перестало соответствовать этимологии этого термина («эн» – внешний и «эргон» – работа).

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. Читатель бывает 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]. Для физической величины, которая связывает воедино все явления природы, такое «определение» является совершенно неудовлетворительным, тем более что в определенных условиях наряду с энергией неизменными остаются и такие величины, как мас-

са, заряд, импульс и момент количества движения. Еще более удивится читатель, узнав, что и «физике сегодняшнего дня неизвестно, что такое энергия» [3].

В создавшихся условиях остается только постараться вернуть энергии хотя бы близкий к изначальному смысл.

**1. Энергия как способность системы совершать работу.** Новые возможности в этом направлении открылись в энергодинамике как теории, обобщающей законы переноса и преобразования теплоты на любые (упорядоченные и неупорядоченные) формы энергии [4]. В качестве объекта исследования она рассматривает пространственно неоднородные поливариантные системы (с любым конечным числом степеней свободы) и наряду с внешней работой учитывает другие виды работ, связанных с изменением только внутренней энергии системы. Помимо работы расширения  $W_p$ , к этой категории относится работа равномерного ввода в систему  $k$ -х веществ  $W_k$ , заряда  $W_e$  и т.п. Все эти виды работ выражаются произведением скалярной величины (давления  $p$ , химического потенциала  $k$ -го вещества  $\mu_k$ , электрического потенциала  $\phi$  и т.д. на элементарное изменение  $d\Theta_i$  соответствующей скалярной координаты  $\Theta_i$  (объема  $V$ , числа молей  $k$ -го веществ  $N_k$ , заряда  $Z$  и т.п.). Все эти виды работ изменяют внутреннюю энергию системы  $U$  и совершаются против сил, не имеющих результирующей. Убедиться в этом можно на примере работы всестороннего расширения, учитывая, что давление  $p$  в термодинамике – это скаляр, а не вектор. В таком случае интеграл от произведения давления  $p$  на элемент  $df$  замкнутой поверхности системы, определяющий результирующую сил давления  $\mathbf{F}_p$ , равен нулю, если градиенты давления  $\nabla p$  в ней отсутствуют, поскольку в соответствии с теоремой о градиенте

$$\mathbf{F}_p = \int p df = \int \nabla p dV = 0. \quad (2)$$

Это естественно, поскольку работа всестороннего сжатия не связана с изменением положения тела как объекта приложения силы ( $d\mathbf{r} = 0$ ). Такие виды работы зависят также от пути и скорости процесса, а не только от начального и конечного состояния системы. Поэтому элемент  $dW_i$  такой работы перестает быть полным дифференциалом  $dW_i$  (каковым он был в механике консервативных систем)<sup>2)</sup> [5].

Таков же в принципе и теплообмен, состоящий в передаче импульса от частиц одного тела к другому. В этом случае отсутствие результирующей преодолеваемых сил особенно очевидно и обусловлено хаотическим характером теплового движения в системе как целом. В то же время для отдельных частиц обмен импульсом  $\mathbf{P}$  носит вполне упорядоченный характер и представляет собой работу их ускорения. Поэтому теплообмен  $dQ = TdS$ , выражающийся произведением температуры  $T$  на элементарное изменение  $dS$  энтропии  $S$ , в своем аналитическом представлении ничем не отличается от других видов немеханических работ и представляет собой своего рода термическую «микроработу»  $dQ = dW_s$ . Это означает, что предпринятое в термодинамике деление энергообмена на теплоту и работу утрачивает смысл с переходом к исследованию систем, изменяющих в процессах энергообмена не только внутреннюю, но и внешнюю энергию. Более того, отказ от деления энергообмена на теплообмен и работу становится просто неизбежным при переходе к исследованию открытых систем (обменивающихся веществом с окружающей средой), поскольку в них наряду с теплообменом и работой появляется еще один вид энергообмена – массообмен, не сводимый ни к теплообмену, ни к работе. Разновидностью этого процесса является диффузия отдельных веществ через границы системы. В таком случае однозначное деление энергообмена на «теплоту» и «работу» оказывается вообще невозможным [6,7].

Таким образом, рассматривая поливариантные системы, мы приходим к пониманию того, что истинная «линия водораздела» проходит не между теплотой и работой, а между двумя принципиально различными видами работ, как связанных с преодолением резуль-

тирующей преодолеваемых сил, так и не связанных с этим. В термодинамике, как известно, работа типа  $dW^e = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$  называется *полезной внешней* или *технической*. Именно такую работу совершают машины, предназначенные для целенаправленного преобразования одних видов энергии в другие. Характерной особенностью такой работы является направленный (векторный) характер. Однако поскольку в общем случае такую работу совершают не только технические устройства, но и биологические, астрофизические и т.п. системы, мы называли просто *упорядоченной* работой и обозначили через  $W^T$ . Противоположную категорию работ, носящую скалярный характер, мы назвали *неупорядоченной* и обозначили через  $W^H$ . Как показано в [4], помимо этого формального признака названные работы отличаются принципиально тем, что последняя является *количественной мерой процесса переноса энергии*, в то время как первая – *процесса её превращения*.

Вместе с тем при таком подходе работа становится *единой количественной мерой воздействия одних материальных объектов на другие*, каковой она и была в механике. Наряду с делением работы на *упорядоченную* и *неупорядоченную* это открывает возможность *вернуть энергии ее изначальный физический смысл способности системы совершать любую работу*. Это очень близко к данному К. Максвеллом определению энергии как «сумме всех действий, которые может оказать система на окружающие ее тела» [8], поскольку под «всеми действиями» теперь понимается любая работа, изменяющая не только внешнюю энергию системы («упорядоченная» работа), но и ее внутреннюю энергию («неупорядоченная» работаю).

**2. Энергия как наиболее общая функция состояния.** Определение энергии было бы неполным без рассмотрения математической стороны этого вопроса. Речь идет об определении ее как функции состояния рассматриваемой системы тел. Как следует из предыдущего, изменить полную энергию системы  $\mathcal{E}$  можно путем совершения любой работы, как неупорядоченной  $W_i^H$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), так и упорядоченной  $W_j^T$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ). Каждая из этих работ связана с изменением специфической независимой переменной состояния  $\Theta_i$  (объема  $V$ , энтропии  $S$ , числа молей  $k$ -го веществ  $N_k$ , заряда  $Z$  и т.д.) или  $\mathbf{R}_j$  (положение центров объема, энтропии, массы  $k$ -го вещества, заряда и т.п., которые в общем случае пространственно неоднородных сред могут не совпадать). Следовательно, энергия системы  $\mathcal{E}$  является функцией координат всех работ, которые может совершать данная система, т.е.  $\mathcal{E} = \mathcal{E}(\Theta_i, \mathbf{R}_j)$ , а ее полный дифференциал имеет вид:

$$d\mathcal{E} = \sum_i (\partial\mathcal{E}/\partial\Theta_i) d\Theta_i + \sum_j (\partial\mathcal{E}/\partial\mathbf{R}_j) d\mathbf{R}_j. \quad (3)$$

Поскольку производные от одних параметров состояния ( $\mathcal{E}$ ) по другим ( $\Theta_i, \mathbf{R}_j$ ) также являются параметрами системы, то, обозначая их через

$$\Psi_i \equiv (\partial\mathcal{E}/\partial\Theta_i); \quad (4)$$

$$\mathbf{F}_j \equiv -(\partial\mathcal{E}/\partial\mathbf{R}_j), \quad (5)$$

приходим к уравнению баланса энергии системы в виде тождества:

$$d\mathcal{E} \equiv \sum_i \Psi_i d\Theta_i - \sum_j \mathbf{F}_j \cdot d\mathbf{R}_j. \quad (6)$$

Параметры  $\psi_i$  (абсолютная температура  $T$ , давление  $p$ , химические потенциалы  $k$ -х веществ  $\mu_k$ , компоненты  $v_\alpha$  и  $\omega_\alpha$  линейной и угловой скорости ( $\alpha = 1, 2, 3$ ), электрический  $\phi$ , гравитационный  $\psi_g$  потенциал и т.п.) именуются обычно «обобщенными потенциалами» системы, а  $\mathbf{F}_j$  – силы в их обычном (ньютоновском) понимании. Последние выражаются в энегродинамике отрицательными градиентами обобщенных потенциалов ( $\mathbf{F}_j = -\nabla\psi_j$ ). В

ряде случаев  $m = n$ , т.е. число тех и других совпадает [4]. Нередко их вслед за Лагранжем именуют просто *обобщенными силами*.

В изолированных системах после достижения состояния равновесия, все параметры  $\Theta_i$  и  $\mathbf{R}_j$  остаются неизменными ( $d\Theta_i, d\mathbf{R}_j = 0$ ), так из (6) следует:

$$d\mathcal{E}_{\text{из}} = 0 \quad (7)$$

Таким образом, полная энергия изолированной системы  $\mathcal{E}$  является сохраняющейся величиной. Этим она отличается как от внешней энергии  $E(\mathbf{R}_j)$ , так и от внутренней  $U(\Theta_i)$  энергии, которые являются функциями только внешних ( $\mathbf{R}_j$ ) или только внутренних ( $\Theta_i$ ) параметров системы и в диссипативных системах не остаются неизменными даже в отсутствие внешнего энергообмена. Таким образом, полная энергия неоднородной поливариантной системы, включающая в себя упорядоченную и неупорядоченную составляющие  $E(\mathbf{R}_j)$  и  $U(\Theta_i)$ , является наиболее общей функцией состояния системы. Это позволяет дать энергии более полное определение: «Энергия – наиболее общая функция состояния системы, характеризующая её способность совершать работу». Однако теперь это работа любых обобщенных сил – имеющих результирующую и не имеющих ее, внешних и внутренних, далекодействующих и короткодействующих, скалярных и векторных, полезных и диссипативных, механических и немеханических.

Поскольку с учетом предпринятого обобщения понятия работы она становится единственной количественной мерой воздействия одних тел на другие, выражение (6) может быть записано в виде:

$$-d\mathcal{E} = \sum_i dW_i^{\text{H}} + \sum_j dW_j^{\text{T}}. \quad (8)$$

При таком определении закон сохранения энергии становится не только «формулой для расчета определенных численных величин» (Р.Фейнман), поскольку он отражает физическую сущность любых протекающих в поливариантных системах процессов переноса и преобразования любых форм энергии. Обоснование непротиворечивости и полезности такого (энергодинамического) подхода к изучению любых (физических, биологических, астрофизических, психофизических и т.п.) процессов дано в [4].

**3. Обсуждение результатов.** Данное здесь определение энергии не опирается на какие-либо дополнительные гипотезы и постулаты, позволяя в то же время вернуть ей простой и ясный изначальный смысл. Это достигнуто благодаря пониманию того, что «работа работе рознь» и отказу от противопоставления теплоты неупорядоченной работе. Этот «возврат к истокам» полезен во многих отношениях. Он показывает, что теоретическая физика длительное время шла по неверному пути, коль скоро от углубленного понимания энергии она пришла к ее непониманию<sup>3)</sup>. Один из таких шагов стало искажение физического смысла энергии, выразившееся в допущении ее отрицательного значения. Такова, в частности, потенциальная энергия взаимодействия электрических зарядов. Согласно закону Кулона, сила  $F_e$  взаимодействия зарядов  $Q_e$  и  $q_e$  определяется выражением:

$$F_e = K_e Q_e q_e / R^2, \quad (9)$$

где  $K_e = 1/4\pi\epsilon_0$  – электрическая постоянная;  $R$  – расстояние между зарядами.

Для разноименных зарядов  $Q_e$  и  $q_e$  эта сила отрицательна, что при кулоновской калибровке (когда за начало отсчета принимается  $R = \infty$ ) приводит к отрицательному значению внутренней потенциальной энергии взаимодействия зарядов

$$U^{\text{H}} = \int F_g dR = -K_e Q_e q_e / R. \quad (10)$$

В квантовой механике, допускающей существование точечных зарядов и возможность их сближения до  $R = 0$ , эта энергия достигает бесконечных отрицательных значений. Это противоречит не только физическому смыслу понятия энергии как величины сугубо положительной, но и порождает известную проблему «расходимостей». Иной будет калибровка, если учесть пространственную протяженность любых материальных объектов, и в том числе зарядов, что делает невозможным их сближение до  $R = 0$ , и интегрировать (10) от минимального расстояния  $R_c$ , до которого могут быть сближены заряды  $Q_e$  и  $q_e$ , до его текущего значения  $R$ . Тогда

$$U^n = K_e Q_e q_e (1/R_c - 1/R). \quad (R \geq R_c). \quad (11)$$

Это выражение устраняет отрицательные значения потенциальной энергии взаимодействия, поскольку при  $R = R_c$  она обращается в нуль, а не в бесконечность. Кроме того, оно снимает проблему расходимости, поскольку максимальное значение силы ограничивается величиной  $R_c$ .

Сказанное имеет самое непосредственное отношение к той части квантовой механики, которая базируется на стационарном уравнении Шрёдингера:

$$\Delta\psi + (8\pi^2 m_e / h)(H - U^n)\psi = 0. \quad (12)$$

где  $\Delta$  – оператор Лапласа;  $\psi$  – волновая функция;  $m_e$ ,  $h$  – масса электрона и постоянная Планка;  $H$ ,  $U^n$  – гамильтониан (полная энергия) и потенциальная энергия электрона.

В теории дифференциальных уравнений доказывается, что уравнения этого вида дают дискретные решения лишь при отрицательных значениях «собственной» энергии объекта исследования (в данном случае гамильтониана  $H$ ). Формально это возможно лишь тогда, когда потенциальная энергия электрона  $U^n$  отрицательна и по абсолютной величине превышает его кинетическую энергию  $E^k$ . При  $U^n > 0$  это исключается. Таким образом, искажение смысла понятия энергии имеет далеко идущие последствия. В результате этого наука все более напоминает театр абсурда, в котором энергия Вселенной в целом может быть сосредоточенной в материальной точке и быть отрицательной; где существует «темная» энергия неизвестного происхождения; где энергию можно извлекать «из пустоты» или из пространства и времени; где можно вычислять уровни энергии с точностью до миллиардных долей процента и в то же время не знать, что это такое вообще.

## Литература

1. Физический энциклопедический словарь. – М.: «Советская энциклопедия», 1984.
2. Пуанкаре А. О науке. – М.: «Наука», 1983.
3. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т.5., М.: Наука, 1977.
4. Эткин В.А. Энергодинамика (синтез теорий переноса и преобразования энергии).- СПб, «Наука», 2008.- 409 с.
5. Базаров И.П. Термодинамика. Изд. 4–е. М., «Высшая школа», 1991.
6. Трайбус М. Термостатика и термодинамика. – М.: Энергия, 1970.
7. Путилов К. Термодинамика. – М.: «Наука», 1971.
8. Максвелл Дж. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. М.: ГИТТЛ, 1952.

<sup>1)</sup> К сожалению, этот термин был введен только в 1955 году З.Рантом.

<sup>2)</sup> Это обстоятельство учитывается применением знака неполного дифференциала  $d$  (С. Neuman, 1875), позволяющего отличить элементарное количество теплоты  $dQ$  или работы  $dW$  как функций процесса от элементарного изменения какой-либо функции состояния ( $d\varepsilon$ ,  $dU$ ,  $d\Theta$ , и т.п.).

---

3) К этой ситуации очень точно подходят стихи Валерия Брюсова, отнесенные к сообществу ученых:

«Однажды ошибаясь при выборе дороги,  
Они упорно шли, глядя на свой компас.  
И был их труд велик, шаги их были строги,  
Но уводили прочь от цели каждый час».