

О НАИБОЛЕЕ ОБЩЕЙ ФОРМЕ ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Д.т.н., проф. В. Эткин

Аннотация.

На основе ретроспективного анализа вскрываются причины неопределённости понятия энергии и предлагается её более общее определение как способности к действию. Выводится более общее выражение закона сохранения энергии в его содержательной форме, справедливое для изолированных и неизолированных, равновесных и неравновесных, открытых и закрытых, простых и сложных систем, выраженное через измеримые параметры состояния систем. Дано представление его в двух формах, одна из которых отражает неизменность энергии в процессах превращения из одной формы в другую, а вторая – в процессах переноса в той же форме. Дается вывод локальных и интегральных выражений этих законов и показывается необходимость учёта в них внутренних источников всех форм энергии. Показано, что единство понятийной системы и математического аппарата вскрывает глубинные взаимосвязи фундаментальных дисциплин, облегчает их изучение и переход от одной из них к другой, что позволяет скорректировать ряд сложившихся представлений об окружающем нас мире.

Ключевые слова: энергия, законы сохранения, энергоперенос и энергопревращение, работа упорядоченная и неупорядоченная, потенциалы и силы.

1. Введение.

В современной литературе мы не встречаем более употребительного термина, чем «энергия», и более известного закона, нежели закон её сохранения. Им посвящены сотни книг и тысячи статей [1]. С ними связано идущее из глубины веков представление о вечности движения и кругообороте энергии и материи во Вселенной. Казалось бы, об этом известно всё и ещё со школьной скамьи. Вместе с тем всем известно и явление «рассеяния» энергии в любом реальном процессе, ведущее к его прекращению и установлению равновесия. С появлением термодинамики это явление стало рассматриваться как «само собой разумеющееся» и имеющее всеобщий характер. Возникло понятие «стрелы времени», предписывающей всем «естественным» процессам одностороннюю направленность в сторону равновесия и деградации энергии. Понятие «вечного движения» стало нарицательным, как и попытки воссоздать его в технических устройствах.

Конфликт двух этих несовместимых воззрений коснулся как понятия энергии, так и закона её сохранения. Современный читатель бывает немало удивлён, не найдя в справочниках и энциклопедиях физически более содержательного определения понятия энергии, чем философская трактовка её как «общей количественной меры всех форм движения и взаимодействия материи» [2]. Для физической величины, связывающей воедино все явления окружающего мира, такое определение энергии является явно недостаточным. Оно превратило закон сохранения энергии в некоторую абстрактную «формулу для расчёта определённых численных величин» [3], а саму энергию - в «один из семи интегралов движения» [4]. В такой ситуации, как справедливо заметил А. Пуанкаре, мы не можем сказать об энергии «ничего сверх того, что существует нечто, остающееся неизменным» [5]. К этим трудностям добавилось придание гравитационной энергии в законе Ньютона (1687) отрицательного значения [6], а также доказательство Р.

Клаузиусом (1870) «теоремы вириала», распространившей отрицательный знак потенциальной энергии на другие формы потенциальной энергии. Внесло свою лепту в понятие отрицательной энергии и «море Дирака» [7]. Дело дошло до того, что и Вселенной в целом стали приписывать нулевую энергию на том основании, что её отрицательная потенциальная энергия точно компенсирует кинетическую энергию [8]. Отсюда и признание нобелевского лауреата Р. Фейнмана в том, что «физике сегодняшнего дня неизвестно, что такое энергия» [9].

В создавшихся условиях целесообразно попытаться распутать гносеологические корни понятия энергии и переосмыслить те исторически сложившиеся наслоения, которые привели к упомянутому выше положению. Для этого необходим хотя бы краткий исторический экскурс.

Понятие энергии исторически связано с понятием действия, возникшим при решении задач о работе простейших механизмов типа рычага и нахождении условий его равновесия. впервые термин «энергия» (от др. греч. ἐνέργεια — деятельность, действие, сила) встречается у Аристотеля (384–322 гг. до н. э.) [10]. Как мы сейчас понимаем, этот многозначный термин объединяет понятия разного физического содержания и размерности. Аристотель использовал его для обозначения человеческой деятельности, направленной на изменение состояния окружающей его среды. Р. Декарт (1596–1650) акцентировал внимание на связи действия с движением, введя понятие «количества движения» Mv [11], а Г. Лейбниц (1646–1716) дополнил его умножением на скорость v , введя понятие «живой» силы» Mv^2 [12]. Наряду с этим он ввёл и понятие «мёртвой силы», определив её по «формальному эффекту» её действия — произведению массы M на её перемещение s . К ним он относил центробежные силы, силы тяжести, упругого сжатия и т. п., т. е. «статические» силы, способные изменить состояние объекта их приложения. Тысячелетние наблюдения выявили постоянство («стационарность») этих изменений состояния в природе, что вылилось в «принцип стационарности действия» и его частный случай – принцип наименьшего действия» П. Л. Мопертьюи (1744). Позднее упомянутый «формальный эффект» действия послужил основой для введения понятия «работы» как его количественной меры, измеряемой произведением «мёртвых» сил F на вызванное ими перемещение s (Ж. Понселе, Г. Кориолис, ,1829) [13]. При этом работа равнялась только половине разности «живых сил» в двух состояниях системы. Это означало, что «живая сила» в понимании Лейбница включала в себя, помимо эквивалентной этой работе кинетической энергии упорядоченного движения E^k энергию неупорядоченного движения, которую впоследствии назвали тепловой энергией E^q или кратко теплотой Q . Поскольку механику интересовала только энергия, способная к действию, то по предложению Т. Юнга (1807) и У. Ренкина (1853) вместо «живой» и «мёртвой» силы стали употреблять термины «кинетическая» E^k и «потенциальная» E^p энергия. Это позволило У. Ренкину впервые сформулировать закон сохранения механической энергии как их суммы [14]. По отношению к энергии действие приобрело характер первообразной функции, из которой можно получить как «принцип стационарности действия», так и «закон сохранения механической энергии». Однако определение действия как произведения «живой силы» на время не имело в однородных системах никакого физического смысла. С его выяснения и целесообразно начать распутывать «клубок нитей», ведущих к понятию энергии. В настоящей статье это будет

сделано с позиций энергодинамики как единой теории мощности неравновесных процессов переноса и преобразования любых форм энергии [15].

2. Энергия как способность к действию

Основной методологической особенностью энергодинамики является рассмотрение в качестве объекта исследования всей совокупности взаимодействующих (взаимно движущихся) материальных тел или их частей, что соответствует условиям применимости законов сохранения. Такие системы неравновесны, а все процессы и любая i -я. форма U_i её энергии $U = \sum_i U_i$ является внутренней. Это обуславливает неприменимость к таким системам классической термодинамики и необходимость ориентации её понятийной системы и математического аппарата на пространственно неоднородные системы.

Первую попытку в этом направлении предприняла теория необратимых процессов (ТНП), базирующаяся на пионерских работах нобелевского лауреата Л. Онзагера [16] и на гипотезе локального равновесия другого нобелевского лауреата И. Пригожина [17]. Она учла неравновесность исследуемых систем, введя понятия скалярной X_i и векторной \mathbf{X}_i термодинамической силы как интенсивной меры отклонения системы от внутренне равновесного состояния. Эти силы сопряжены с соответствующими им потоками J_i и \mathbf{J}_i как обобщёнными скоростями приближения системы к равновесию. Благодаря этому ей удалось установить взаимосвязь между внутренними источниками энтропии $d_i S/dt$ и упомянутыми параметрами неравновесности, чья взаимная компенсация обеспечивала неизменность энергии системы U . Однако эта теория базировалась на принципе возрастания («производства») энтропии $d_i S/dt > 0$ и потому исключала из рассмотрения процессы совершения, а такой системе полезной внутренней работы W , не влияющие на её энтропию S . Между тем именно эти процессы прежде всего и интересовали энергетиков и технологов, биологов и астрофизиков. Поэтому энергодинамика пошла дальше ТНП, отказавшись как от гипотезы локального равновесия, так и от нахождения параметров неоднородности на основе принципа возрастания энтропии. Вместо этого энергодинамика перешла к рассмотрению локально неоднородных систем. Чтобы обосновать необходимость такого перехода, представим любой экстенсивный параметр системы Θ_i (массу M , число молей k -го вещества N_k , заряд Z , энтропию S , импульс \mathbf{J} , его момент \mathbf{L} и т. д.) интегралом от его локальной $\rho_i = d\Theta_i/dV$ и средней $\bar{\rho}_i = \Theta_i/V$ плотности выражением $\Theta_i = \int \rho_i dV = \int \bar{\rho}_i dV$. Отсюда непосредственно следует тождество:

$$\int (\rho_i - \bar{\rho}_i) dV \equiv 0. \quad (1)$$

Согласно этому тождеству, в однородных системах, где $\rho_i = \bar{\rho}_i$, подинтегральное выражение повсеместно обращается в нуль, так что никакие процессы $d(\rho_i - \bar{\rho}_i)/dt$ в них в принципе невозможны. Более того, и в неоднородных системах оно удовлетворяется лишь тогда, когда скорости процессов $d(\rho_i - \bar{\rho}_i)/dt$ в разных частях (областях, фазах и компонентах) системы имеют противоположный знак и взаимно компенсируются. Это положение, касающееся и энергии, было названо нами «*принципом направленности реальных процессов*». Этот принцип подтверждает основной закон диалектики о единстве и борьбе противоположностей и может служить его математическим выражением. Он противоположен концепции однородности и изотропности пространства, лежащей в основе существующей парадигмы и доказательств

закона сохранения энергии [18], если признать это пространство без остатка заполненным материей. Именно в этом кроется причина всех нетривиальных выводов энергодинамики.

Очевидно, что один и тот же материальный объект не может участвовать одновременно в различных формах движения (поступательном, вращательном и колебательном). Это обуславливает необходимость деления «живой силы» $U = \sum_i U_i$ на «парциальные» составляющие U_i . Частное от деления U_i (или её плотности $u_i = dU_i/dV$) на соответствующее им количество энергоносителя Θ_i (или его плотность ρ_i) определяет их интенсивную меру, именуемую глобальным Ψ_i или локальным ψ_i потенциалом:

$$\Psi_i = U_i/\Theta_i; \quad \psi_i = u_i/\rho_i. \quad (2)$$

Такой подход можно применить и к тепловой форме энергии U_q , определив её по остаточному принципу как неупорядоченную составляющую «живой силы» $U - U^k - U^m$, т. е. как величину, сходную по смыслу со «связанной энергией» Гельмгольца $U = TS$. Однако теперь в роли энтропии S выступает «количество неупорядоченного движения» Θ_q и его плотность $\rho_q = d\Theta_q/dV$, определяемая как частное от деления $u_q = dU_q/dV$ на абсолютную температуру T :

$$\rho_q = u_q/T. \quad (3)$$

Величину Θ_i целесообразно назвать «термоимпульсом» т. е. импульсом, утратившим векторную природу ввиду хаотичности теплового движения. Замена энтропии S термоимпульсом Θ_k , учитывающим внутренние источники тепла, делает его измеримым параметром и устраняет целый ряд паралогизмов, возникающих вследствие пренебрежения этими источниками тепла в понятии энтропии [19].

Представление любых форм парциальной энергии неоднородной системы в форме $U_i = \int \psi_i \rho_i dV$ открывает возможность записи в дальнейшем закона сохранения энергии в «содержательной» форме, выраженной исключительно через измеримые параметры системы. Для этого необходимо учесть неравномерность распределения любого из энергоносителей Θ_i по объёму изолированной системы. С этой целью обратим внимание на то, что в неоднородных системах радиус-вектор $\mathbf{r}_i = \Theta_i^{-1} \int \rho_i \mathbf{r} dV$ центра величины Θ_i смещён от его равновесного положения $\mathbf{r}_{i0} = \Theta_i^{-1} \int \bar{\rho}_i \mathbf{r} dV$ (где \mathbf{r} – «бегущая» (эйлерова) координата). Это смещение $\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{i0}$ вызывает появление «момента его распределения» [20]:

$$\mathbf{Z}_i = \Theta_i(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{i0}) = \int (\rho_i - \bar{\rho}_i) \mathbf{r} dV. \quad (4)$$

Для $\Theta_i = M$ этот момент распределения массы $\mathbf{Z}_m = M\Delta\mathbf{r}_m$ выражает упомянутый «формальный эффект действия» $M\mathbf{S}$ Лейбница, придавая ему вполне определённый смысл изменения внутренне неравновесного состояния изолированной системы вследствие совершения в ней работы «против равновесия» W . Эту работу $dW = \mathbf{X}_i \cdot d\mathbf{Z}_i$ выполняют внутренние «термодинамические» силы $\mathbf{X}_i = \mathbf{F}_i/\Theta_i$ при переходе её потенциальной составляющей энергии U^m внутренней энергии в кинетическую U^k . Подобно вектору \mathbf{Z}_m , являющемуся первообразной функцией для механического импульса $\mathbf{J}_m = d\mathbf{Z}_m/dt = M\mathbf{v}$, действие $\mathbf{Z}_u = Mv^2\Delta t$ как вектор смещения импульса $M\mathbf{v}\Delta\mathbf{r}_u$ является первообразной функцией для «живой силы» $U = d\mathbf{Z}_u/dt$. Таким образом, живая сила приобретает смысл скорости действия, а действие – меры неравномерности распределения импульса, выражаемого вектором его смещения. Подобным же образом и механическая работа $dW = \int \mathbf{X}_m \cdot d\mathbf{Z}_m = \bar{\mathbf{X}}_m \Delta\mathbf{r}_m$ предстаёт как момент распределения внутренних сил в системе. В однородных системах $\mathbf{Z}_u = 0$, что объясняет, почему понятие «действия» не могло иметь

физического смысла до появления термодинамики локально неоднородных систем. Для них удобнее относить все экстенсивные параметры Z_i к системам единичного объёма, обозначая их через $z_i \equiv Z_i/V$. В таком случае величины $z_i = \bar{\rho}_i \Delta r_i$ уместнее называть «векторами смещения плотности» или «векторами поляризации»¹. Таков, в частности, вектор электрического смещения D , характеризующий поляризованность среды.

Таким образом, в энергодинамике действие приобретает вполне определённый смысл процесса изменения поляризованности системы, а энергия – способности к действию, как совершаемому (кинетической её составляющей), так и уже совершённом (её потенциальной составляющей).

Частным случаем этого действия является переход потенциальной составляющей энергии некоторой массы M среды в кинетическую. Этот процесс рассматривается в термодинамике открытых систем как обмен между двумя равновесными подсистемами энергоносителем в условиях постоянства других их параметров и относится к категории «работ ввода» (массы, заряда, импульса и т. п.). Её можно найти, преобразуя известное выражение элементарной работы $dW = Fdr$ и ньютоновского выражения силы $F = dMv/dt$ к виду $\int v dMv$, где v – средняя скорость поступательного, вращательного и колебательного движения в рассматриваемой среде, являющаяся функцией её состояния и равная скорости распространения в ней возмущений. При $v = \text{const}$ эта работа и определяет величину «живой силы» Лейбница [21]:

$$U = Mv^2. \quad (5)$$

Для эфира как всепроникающей среды эта скорость максимальна и равна скорости света в ней c_0 , а описываемый процесс перехода потенциальной энергии в кинетическую имеет смысл фазового перехода неподвижного эфира в колеблющийся со скоростью c_0 . В таком случае выражение его «живой силы» имеет вид:

$$U_0 = M_0 c_0^2. \quad (6)$$

К такому выражению энергии эфира пришли разными путями Х. Шрамм (1871); Н. Умов (1873); Дж. Томсон (1881); О. Хэвисайд (1890), А. Пуанкаре (1898) и Хазенорль (1904). В 1905 к такому же соотношению между массой покоя системы M_0 и её энергии пришёл другим путём и А. Эйнштейн, разлагая в ряд полученное им релятивистское выражение массы как функции скорости $M(v)$ и ограничиваясь первыми двумя его членами. При таком подходе это соотношение относилось к любым веществам, что побудило его назвать это соотношение «принципом эквивалентности массы и энергии» и трактовать как способность энергии превращаться в массу и наоборот [22]. Это привело к не замеченному ранее конфликту этого принципа с «дефектом массы» [23]. Поэтому в энергодинамике соотношение (5) рассматривается не более чем как свойственную всем экстенсивным величинам пропорциональность их массе. Это делает возможным как кондуктивное ($dU = 2Mvdv$), так и конвективное ($dU = v^2 dM$) изменение «живой силы», что необходимо учитывать в дальнейшем при составлении баланса энергии системы.

¹ Имеется в виду «поляризация» в самом общем понимании этого термина как пространственная неоднородность какого-либо свойства.

5. Две формы закона сохранения энергии

Как уже отмечалось выше, нарушения закона сохранения механической энергии $E^k + E^p = \text{const}$ стали возникать, когда стало невозможно пренебрегать диссипацией (рассеянием) энергии, что привело к разделению энергии на внешнюю $E^e = E^k + E^p$ и внутреннюю U . Последняя понималась как «рассеянная» часть внешней энергии, утратившая зависимость от движения или положения системы относительно окружающей среды, а с нею – и работоспособность. Тогда закон сохранения стали относить к «полной» энергии системы E :

$$E_{\text{из}} = (E^k + E^p + U)_{\text{из}} = \text{const} \quad (7)$$

Уже в самой этой форме закона сохранения были заложены противоречия, обусловленные тем, что в изолированной системе понятия «внешней» энергии E^k и E^p лишены какого-либо смысла. Поэтому не будет преувеличением сказать, что именно разделение энергии на внешнюю, не имеющую смысла для изолированных систем, и внутреннюю, не являющейся мерой работоспособности, привело к утрате энергией её простого и ясного изначального смысла. Поскольку же термин «энергия системы» в изолированных системах относится только к внутренней энергии U , такое деление стало излишним. Поэтому и в термодинамике, и в энергодинамике закон сохранения имеет вид:

$$U_{\text{из}} = (U^k + U^p + U_q)_{\text{из}} = \text{const} \quad (8)$$

Все составляющие внутренней энергии как «живой силы» Mv^2 являются величинами сугубо положительными. Это вскрывает ошибочность существующей калибровки потенциальной энергии и требует пересмотра многих сложившихся представлений. Однако на сейчас интересует лишь представление составляющих (8) через параметры.

В неоднородных системах локальная плотность энергии $\rho_u = dU/dV$ зависит от радиус-вектора \mathbf{r} элемента объёма dV и времени t . В таком случае полная производная от $\rho_u = \rho_u(\mathbf{r}, t)$ по времени t включает в себя локальную $(\partial\rho_u/\partial t)_r$ и конвективную $(\partial\rho_u/\partial\mathbf{r})(d\mathbf{r}/dt) = (\mathbf{v} \cdot \nabla)\rho_u$ составляющую:

$$d\rho_u/dt = (\partial\rho_u/\partial t)_r + (\mathbf{v} \cdot \nabla)\rho_u. \quad (9)$$

Если в соответствии с методологией энергодинамики рассматривать в качестве объекта исследования систему неизменного объёма $V_o = \text{const}$, для которой скорость объёмного расширения $\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$, то, внося \mathbf{v} в уравнении (3) под знак оператора ∇ , имеем:

$$d\rho_u/dt = \sigma_u - \nabla \cdot \mathbf{j}_e, \quad (10)$$

где $\mathbf{j}_e = -\rho_u \mathbf{v}$ – плотность потока энергии через границы системы в направлении внешней нормали \mathbf{n} (Рис.1).

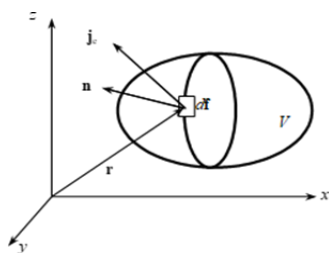


Рис.1. Поток энергии через границы системы

От закона сохранения энергии в форме $d\rho_u/dt = -\nabla \cdot \mathbf{j}_e$, предложенной Н. Умовым (1873), это выражение отличается наличием внутреннего источника энергии σ_u . Такое его обобщение полезно тем, что позволяет выяснить необходимые и достаточные условия изолированности (замкнутости) системы. Для этого запишем (9) в интегральной форме, заменив на основании теоремы Гаусса – Остроградского объёмный интеграл $\int \nabla \cdot \mathbf{j}_e dV$ интегралом $\int \mathbf{j}_e \cdot \mathbf{n} d\Omega$ по замкнутой поверхности системы Ω :

$$dU/dt = \int \sigma_u dV - \int \mathbf{j}_e \cdot \mathbf{n} d\Omega. \quad (11)$$

В этом выражении первый интеграл характеризует изменения энергии при внутренних энергопревращениях ($d_u U/dt = \int \sigma_u dV$, а второй – изменения её при энергопереносе ($d_e U/dt = \int \mathbf{j}_e \cdot \mathbf{n} d\Omega$). Соотношение мощностей этих процессов $d_u U/dt$ и $d_e U/dt$ определяется отношением объёма системы V к её поверхности Ω . Для тел сферической формы соотношение V/Ω пропорционально радиусу сферы R . Поэтому для микроскопических тел ($R \rightarrow 0$) внутренними источниками $d_u U$ можно пренебречь, используя закон сохранения энергии в форме Н. Умова [24]

$$dU/dt = - \int \nabla \cdot \mathbf{j}_e dV, \quad (12)$$

которое учитывает только перенос энергии через границы системы и потому следует именоваться *законом сохранения при энергопереносе*. Этот закон справедлив для микромира, где изменением внутреннего состояния частиц обоснованно пренебрегают. Напротив, в мегамире внутренние процессы играют основную роль, а влияние внешних силовых полей при $R \rightarrow \infty$ исчезает. Это освобождает от необходимости постулировать «замкнутость» (изолированность) Вселенной, справедливость чего никогда не сможет быть подтверждена никакими экспериментами.

Другой вывод из закона сохранения энергии в форме (11) состоит в том, что энергия системы может оставаться неизменной не только в отсутствие энергообмена ($\mathbf{j}_e = 0$), но в том случае, когда её убыль с потоком \mathbf{j}_e компенсируется «подпиткой» системы извне энергией, для носителей которой нет непроницаемых границ. К ним относятся гравитационное поле, физический вакуум (эфир) и нейтрино. Особенностью этих форм энергии является невозможность описания их потоков в систему через её параметры, что приводит к пренебрежению ими и к ошибочной оценке КПД реальных устройств, подпитываемых этой энергией (их «сверхединичности» [25]. Чтобы установить закон сохранения для таких источников энергии, запишем аналогичное (9) выражение полного дифференциала для любой i -й формы «парциальной» энергии E_i :

$$du_i/dt = (\partial u_i / \partial t)_r + (\mathbf{v}_i \cdot \nabla) u_i. \quad (13)$$

Член $(\mathbf{v}_i \cdot \nabla) u_i$ можно выразить через параметры, которыми оперирует термодинамика необратимых процессов (ТНП) [26,27]. Для этого умножим и поделим его на плотность i -го энергоносителя $\rho_i = d\Theta_i/dV$, и учтём, что произведение $\rho_i \mathbf{v}_i$ представляет собой плотность потока i -го энергоносителя $\mathbf{j}_i = \rho_i \mathbf{v}_i$, а градиент $\nabla \psi_i$ потенциала $\psi_i = u_i/\rho_i$ – локальную термодинамическую силу $\mathbf{x}_i = \mathbf{F}_i/\Theta_i$.

Для поливариантных систем с произвольным, но конечным числом степеней свободы ($i=1,2,n$) это выражение имеет вид:

$$\sum_i \sigma_{u_i} = \sum_i \mathbf{x}_i \cdot \mathbf{j}_i \quad (\text{Вт м}^{-3}), \quad (14)$$

Это уравнение отражает взаимосвязь источников различных форм энергии замкнутой системы с параметрами её неравновесности и может быть названо *законом сохранения энергии в процессах энергопревращения*. Оно является обобщением основного соотношения ТНП, связывающего «производство» энтропии $d_i S/dt$ с «глобальными» термодинамическими силами \mathbf{X}_i и потоками \mathbf{J}_i векторной природы, и отличается от него учётом таких же источников и у других энергоносителей, например, у реагентов химических реакций. Его главное достоинство состоит в том, что оно позволяет установить факт «подпитки» системы внешними (в том числе полевыми) источниками

различных форм энергии системы по возникновению в системе внутренних потоков энергоносителя \mathbf{j}_i , не пересекающих её границ, или по изменению напряжённости её состояния (сил \mathbf{x}_i).

Другое его достоинство состоит в том, что оно освобождает от необходимости составления сложных и громоздких уравнений баланса массы, заряда, вещества, импульса, его момента и энергии для нахождения параметров \mathbf{x}_i и \mathbf{j}_i из уравнения баланса энтропии, как это было необходимо в ТНП. Немаловажно и то, что при этом устраняется и характерный для ТНП произвол в разбивке $dS/dt = \sum_i \mathbf{X}_i \cdot \mathbf{J}_i$ на сомножители, который чрезвычайно затрудняет понимание их физического смысла. Отпадает и необходимость в самой гипотезе локального равновесия И. Пригожина, которая допускает применение уравнений равновесной термодинамики к необратимым процессам вопреки их неизбежному переходу в неравенства [17].

Однако ещё более важным результатом установления этого закона является вывод о неизбежности протекания в изолированных системах упомянутых выше «противонаправленных процессов», одни из которых в данном случае приближают систему к равновесию ($\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{j}_i < 0$), а другие – удаляют от него ($\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{j}_i > 0$). Примерами последних является эволюция, наблюдающаяся вопреки принципу возрастания энтропии на всех уровнях мироздания, а также такие физико-химические процессы, как перенос вещества в сторону возрастания его концентрации («восходящая диффузия» в сплавах и «активный транспорт» в живых организмах), «сопряжённые» химические реакции, идущие в направлении возрастания сродства (в том числе циклические реакции Белоусова - Жаботинского), процессы возникновения «порядка» из «хаоса» и т. д. и т. п. [28]. Именно такие процессы позволяют Вселенной функционировать неограниченно во времени и пространстве, минуя состояние равновесия [28].

Чтобы объединить достоинства законов сохранения энергии при энергопереносе и энергопревращении, поступим так, как это сделал Д. Пойнтинг (1884), описав поток электромагнитного поля вектором $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ и включив его в \mathbf{j}_e . Если от внешних полей и потоков энергии нет изоляции, их следует включить в состав системы, сделав тем самым последнюю замкнутой, и с помощью закона (14) заменить источники энергии σ_{ei} внутренними параметрами системы \mathbf{x}_i и \mathbf{j}_i . В таком случае закон сохранения энергии примет вид уравнения Н. Умова (12) с тем отличием, что все потоки энергии в нём $\mathbf{j}_e = \sum_i \psi_i \mathbf{j}_i$ станут внутренними. Тогда, разлагая $\nabla(\psi_i \mathbf{j}_i)$ на независимые составляющие $\sum_i \psi_i \nabla \cdot \mathbf{j}_i + \sum_i \mathbf{j}_i \cdot \nabla \psi_i$, и вынося за знак интеграла среднее значение \mathbf{X}_i локальной термодинамической силы $\mathbf{x}_i = -\nabla \psi_i$, приходим к выражению закона сохранения энергии через параметры системы в целом, как это принято в классической термодинамике [15]:

$$dU/dt = \sum_i \Psi_i J_i + \sum_i \mathbf{X}_i \cdot \mathbf{J}_i = 0. \quad (\text{Вт}) \quad (15)$$

Здесь $J_i = -\int \nabla \cdot \mathbf{j}_i dV$ – производительность внутреннего источника i -го энергоносителя; $\mathbf{J}_i = \int \rho_i \mathbf{v}_i dV = \Theta_i \mathbf{v}_i$ – векторный поток этого же энергоносителя, имеющий смысл его импульса.

Можно получить и более детальную картину происходящих в неоднородных системах процессов, разложив скорость \mathbf{v}_i на независимые поступательную \mathbf{w}_i и вращательную $\boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{R}_i$ составляющие, где $\boldsymbol{\omega}_i$ – угловая скорость вращения единичного объёма системы; \mathbf{R}_i – мгновенный радиус вращения единицы объёма системы. Тогда в уравнении закона сохранения энергии наряду внутренними силами $\mathbf{F}_i = \mathbf{X}_i \Theta_i$ и скоростями

перемещения $\mathbf{w}_i = \mathbf{J}_i/\Theta_i$ появляются их крутящие моменты $\mathbf{M}_i = \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{R}_i$, а закон сохранения энергии в изолированных системах принимает более общий вид:

$$\sum_i \Psi_i J_i + \sum_i \mathbf{F}_i \cdot \mathbf{w}_i + \sum_i \mathbf{M}_i \cdot \boldsymbol{\omega}_i = 0 \text{ (Вт)} \quad (16)$$

Это уравнение описывает кинетику (производительность и мощность) внутренних термомеханических, физико-химических, электромагнитных и гравитационных, биоэнергетических и космофизических процессов в их взаимосвязи. Благодаря ему оказалось возможным установить единство законов переноса и преобразования всех видов энергии, и благодаря этому кардинально облегчило переход от одной фундаментальной дисциплины к другой [29]. В результате удалось получить множество нетривиальных следствий, позволивших коренным образом скорректировать наши представления о мироздании [30].

Литература

1. *Льоцци М.* История физики. — М.: «Мир», 1970.
2. Физический энциклопедический словарь. — М.: «Советская энциклопедия», 1984.
3. *Feynman R.* Character of Physical Laws.— М.: Physical Encyclopedia, 1984. (In Russian).
4. *Ландау Л. Д., Лившиц Е. М.* Теоретическая физика. Т.1. Механика.- м.: Наука, 1973.
5. *Пуанкаре А.* О науке. — М.: «Наука», 1983.
6. *Ньютон И.*
7. *Дирак АПМ.*, Теория электронов и позитронов. //Сб. «Гейзенберг, Шредингер, Дирак». —М.: ГИИТЛ, 1934, с. 61–75.
8. *Краусс Л.* Всё из ничего: как возникла Вселенная? М., Мир, 2012. 280 с.
9. *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.* Фейнмановские лекции по физике. Т.5., М.: Наука, 1977.
10. *Аристотель.* Сочинения. В 4 т. (Серия «Философское наследие»). М.: Мысль, 1975—1983
11. *Декарт Р.* Сочинения в двух томах. — М.: Мысль, 1989.
12. *Лейбниц Г. В.* [Сочинения](#). Т.3 Теория познания, методология, логика и общая теория науки. М.: Мысль, 1984. 734 с.
13. *Coriolis.* [Du calcul de l'effet des machines](#). — Paris, 1829. P. 17. ([Архивировано](#) 7.08.2019).
14. *Rankine W. J. M.* [A manual applied mechanics](#). — 6 ed. — London, 1872.
15. *Эткин В. А.* Энергодинамика (синтез теорий переноса и преобразования энергии).- СПб, «Наука», 2008; *Etkin V.* Energodynamics (Thermodynamic Fundamentals of Synergetics).- New York, 2011.
16. *Onsager L.* Reciprocal relations in irreversible processes.//Phys. Rev., 1931.- **237**(14).- P.405- 4 26; **238**(12).- P.2265–2279.
17. *Пригожин И.* Введение в термодинамику необратимых процессов. — М.: ИИЛ., 1960,
18. Нётер Э. Инвариантные вариационные задачи // Вариационные принципы механики / под ред. Полак Л. С. М., Физматлит, 1959. 613–614.
19. *Etkin V.A.* Thermoimpulse as a True Extensive Measure of Heat. //Global Journal of Research in Engineering: G Industrial Engineering, 23(1)2023.21-31.
20. *Etkin VA.* Parameters of spatial heterogeneity of non-equilibrium systems //Scientific Israel-Technological Advantages, 19(1). 2017.107–111.

21. *Эткин В.* Устранение неопределённости понятия энергии. /В кн. В.А.Эткин «Нетривиальные следствия энегродинамики», Хайфа, 2020. с. 230–253; *Etkin VA.* Eliminating the uncertainty of the concept of energy. // International Journal of Energy and Power Engineering. 8(3). 2019. 35-44.doi: 10.11648/j.ijep.20190803.
22. *Einstein A.* //Ann. d. Phys. 1905. Bd 18. S. 639.
23. *Эткин В. А.* О несовместимости дефекта массы с законом её сохранения. // Вестник Дома учёных Хайфы, 49(2021).5-12.
24. *Umov A. I.* Selected Works. M.L., 1950. p. 203.(*Умов А. И.* Избранные сочинения. М. Л., 1950. С. 203).
25. *Эткин В. А.* Теоретические основы бестопливной энергетики. – Saarbrücken, 2013.
26. *De Groot S.R., Mazur R.* Non-Equilibrium Thermodynamics:– Amsterdam, 1962
27. *Дьярмату И.* Неравновесная термодинамика. Теория поля и вариационные принципы. – М.: Мир, 1974.
28. *Etkin V.A.* Perpetual Movement of the Universe. //Aeronautics and Aerospace Open Access Journal, 6(2). 2022.29–36.
29. *Эткин В. А.* К термодинамической теории производительности технических систем. // Изв. АН СССР. Энергетика, 1(2000).99-106; *Etkin V.A.* Thermodynamic theory of the productivity of technical systems. // Appl. Energetic, 38(1).2000.126-133.
30. *Эткин В. А.* Нетривиальные следствия энегродинамики. -Хайфа, Lulu Inc., 2020. 440. DOI 10.17513/np.547; *Etkin V.* Verifiable Forecasts of Energodynamics. //Scientific Israel-Technological Advantages" Vol.16, no.1-2, 2014.p/130-137.