

# ЭКВИВАЛЕНТНЫ ЛИ МАССА И ЭНЕРГИЯ?

В.А. Эткин

Показывается, что постулат А.Эйнштейна об эквивалентности массы и энергии противоречит закону сохранения энергии и не соответствует существу дела

## WHETHER THE MASS AND ENERGY ARE EQUIVALENT?

V.A. Etkin

It is shown, that Einstein's postulate on equivalence of mass and energy contradicts the law of energy conservation and not correspondence with bottom of fact

**Введение.** Прошло почти 100 лет с момента возникновения ТО. Однако до сих пор не утихают дискуссии о том, зависит ли масса тел от их скорости, отражает ли она запас энергии в них, аддитивна ли масса при объединении тел в систему и сохраняется ли она в изолированных системах масштаба Вселенной при аннигиляции в ней материальных частиц.

Классическая физика, квантовая механика (КМ) и теория относительности (ТО) по-разному отвечают на эти вопросы, причем их выводы не отвечают принципу соответствия, т.е. не согласуются друг с другом при изменении масштаба системы или скорости движения.

Один из таких спорных вопросов касается принципа эквивалентности энергии и массы, постулированного А.Эйнштейном в 1905 году [1]. Этот принцип распространяет связь между массой тела  $M$  и энергией его излучения  $E$ , найденную ранее рядом исследователей [2...7], на все формы энергии и явления природы. С тех пор формула  $E = Mc^2$  стала символом теории относительности (ТО), характеризуюя её основную «практическую отдачу». Однако при этом, насколько нам известно, никогда не анализировался детально вопрос о том, насколько этот постулат согласуется с термодинамикой. В этой статье мы постараемся восполнить этот пробел, привлекая к решению этого вопроса термодинамику необратимых процессов (ТНП) [8] и энергодинамику как её дальнейшее обобщение на процессы полезного преобразования любых форм энергии [9].

### 1. Понятия энергии и массы в механике, термодинамике и энергодинамике.

Прежде чем обсуждать вопрос о связи энергии и массы, необходимо, очевидно, дать определение этим понятиям. По утверждению Р. Фейнмана, физике сегодняшнего дня неизвестно, что такое энергия. Не желая мириться с таким положением, энергодинамика предлагает новый подход к определению этого понятия как наиболее общей функции состояния исследуемой системы, характеризующей её способность к действию (от греческого *ἐνέργεια* – деятельность). При этом за исходное положение она принимает не 1-е начало термодинамики, базирующееся на принципе эквивалентности теплоты и работы, а более общие опытные факты, подтверждающие возможность различать (с помощью всего арсенала экспериментальных средств) независимые процессы по тем *особым, феноменологически отличимым и несводимым к другим изменениям состояния систем, которые они вызывают*. Это положение для удобства ссылки названо «аксиомой различимости процессов». На её основе доказывается (от противного) теорема, согласно которой число независимых переменных  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , необходимых и достаточных для однозначного задания состояния исследуемой системы (т.е. число её степеней свободы), равно числу  $n$  независимых процессов, протекающих в ней. Отсюда следует существование специфици-

ческой функции  $E(x_1, x_2, \dots, x_n)$  «обобщенных» координат состояния системы  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), полный дифференциал которой имеет вид:

$$dE = \sum_i \psi_i dx_i, \quad (1)$$

где  $\psi_i \equiv (\partial E / \partial x_i)$  – параметры, получившие название «обобщенных» сил или потенциалов.

Определяемая выражением (1) функция изменяется при протекании любого из  $n$  процессов в системе, независимо от того, чем вызвано изменение параметров  $x_i$  – внешним воздействием или внутренними процессами. Эта функция описывает как внешние, так и внутренние процессы, происходящие в исследуемой системе, т.е. является наиболее полной. Во-вторых, в изолированных системах, достигших состояния равновесия, все параметры  $x_i = const$ , так что функция  $E$  остается неизменной:

$$dE_{из} = \sum_i \psi_i dx_i = 0 \quad (2)$$

Функция, обладающая этими свойствами, известна как энергия системы. В частном случае однородных многокомпонентных термомеханических систем это выражение приобретает форму объединенного уравнения 1-го и 2-го начал термодинамики (соотношения Гиббса):

$$dU = TdS - pdV + \sum_k \mu_k dm_k \quad (k = 1, 2, \dots, K), \quad (3)$$

где  $U$  – внутренняя энергия системы;  $\psi_i \equiv T, p, \mu_k$  – абсолютная температура, абсолютное давление и химические потенциалы  $k$ -х веществ;  $x_i \equiv S, V, m_k$  – энтропия, объем и масса  $k$ -го вещества, связанные с энергией системы  $U$  известным соотношением:

$$U = TS - pV + \sum_k \mu_k m_k. \quad (4)$$

Члены правой части соотношения (3) характеризуют соответственно обратимый теплообмен, работу расширения, диффузию  $k$ -х веществ через границы системы или массообмен (в случае неизменного состава системы  $m_k/m = const$ ). В более общем случае движущихся систем, находящихся в силовых полях с потенциалом  $\phi$  на единицу массы системы  $m = \sum_k m_k$  в число независимых аргументов функции  $E$  входит наряду с  $T, p, \mu_k$  скорости компонентов системы  $\mathbf{v}_k$ , определяющие её кинетическую энергию  $E^k = \sum_k m_k \mathbf{v}_k^2 / 2$ , а также потенциалы компонентов  $\phi_k$ , определяющие её потенциальную энергию  $E^\pi = \sum_k m_k \phi_k$ . Таким образом, энергия системы предстает как наиболее общая функция состояния системы  $E = E(T, p, \mu_k, m_k, \phi_k, \mathbf{v}_k)$ , характеризующая её способность к действию<sup>1)</sup> [9]. Вид этой функции определяется выражением (4), дополненным составляющими внешней энергии:

$$E = TS - pV + \sum_k \mu_k m_k + \sum_k m_k \phi_k + \sum_k m_k \mathbf{v}_k^2 / 2. \quad (5)$$

Согласно этому выражению, полная энергия системы представляет собой алгебраическую сумму всех её составляющих («связанной» энергии, энергии упругой деформации, химической, потенциальной, кинетической и т.п. энергии).

<sup>1)</sup> Это весьма близко к её определению Дж. К. Максвеллом как «общей меры воздействия системы на окружающую среду» и безусловно лучше, чем назвать энергией «нечто, остающееся неизменным» (А. Пуанкаре) или «один из семи интегралов движения» (Л.Д. Ландау), а закон её сохранения - «формулой для расчета определенных численных величин» (Р.Фейнман).

## 2. Несовместимость термодинамического и релятивистского определений массы.

То обстоятельство, что соотношение (1) определяет энергию системы как функцию  $n$  независимых переменных, делает массу  $k$ -го вещества  $m_k$  (а в случае неизменного состава – массу системы  $m = \sum_k m_k$ ) лишь одной из независимых аргументов функции  $E = E(T, p, \mu_k, m_k, \varphi_k, \mathbf{v}_k)$ . При этом масса  $m$  или  $m_k$  понимается как параметр состояния, изменяющийся в равновесных системах соответственно только при массообмене или диффузии  $k$ -го вещества через границы системы). Это соответствует ньютоновскому определению массы как «меры количества материи, устанавливаемой пропорционально плотности и объему ее» [10]. Таким образом, масса в энергодинамике (впрочем, как и в механике и в термодинамике), понимается отнюдь не как мера инерционных свойств системы. Это обстоятельство вынуждает искать причину, по которой масса из независимого параметра состояния превратилась в меру инерционных свойств системы, т.е. в функцию процесса ускорения. Ответ на этот вопрос с позиций энергодинамики был дан в нашей работе [11]. Он связан с традиционным построением динамики на основе кинематики, когда за исходное понятие принималось ускорения материальной точки  $\mathbf{a} = d\mathbf{v}_0/dt$ , где  $\mathbf{v}_0$  – скорость движения центра масс. В таком случае 2-й закон Ньютона (закон силы) записывался в виде

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}. \quad (6)$$

В таком случае роль коэффициента пропорциональности между силой  $\mathbf{F}$  и ускорением  $\mathbf{a}$  отводилась массе  $m$ , которая приобретала смысл меры инертности тела (чем больше масса тела  $m$ , тем большая сила требуется для обеспечения того же ускорения  $\mathbf{a}$ ).

Иным будет понимание этого закона, если строить механику не «от частного к общему», а от общего к частному, т.е. выводить законы механики из энергодинамики [12]. При таком подходе закон Ньютона рассматривается как частный случай кинетических уравнений теории необратимых процессов (ТНП) [8], который в данном случае устанавливает связь между движущей силой процесса  $\mathbf{F}$  и потоком  $\mathbf{J}_a = d\mathbf{P}/dt$ <sup>1)</sup>. Тогда становится очевидной необходимость введения в этот закон дополнительного коэффициента пропорциональности  $R_a$

$$\mathbf{F} = R_a d\mathbf{P}/dt, \quad (7)$$

который характеризует «сопротивление» системы процессу ускорения. Такого рода коэффициенты  $R_i$  называются в ТНП «феноменологическими» (определяемыми опытным путем) и характерны для любого  $i$ -го процесса. В данном случае  $R_a$  уместно назвать «коэффициентом инерции». То обстоятельство, что коэффициент инерции  $R_a$  оказался функцией потока  $\mathbf{J}_a$  как обобщенной скорости процесса ускорения, является общим местом ТНП. Эта зависимость легко объясняется в рамках теории «запаздывающего потенциала» [12]. Известно, что для возникновения процесса ускорения требуется нарушение равновесия между движущимся телом и окружающей средой (полем), т.е. появление некоторой силы  $\mathbf{F}$ . Связанное с этим возмущение поля распространяется в нем с определенной скоростью  $v$ . Очевидно, что если ускоряемое тело удаляется от источника силы с той же скоростью, воздействие на него будет равно нулю, какую бы силу ни создавал её источник. Именно это и наблюдается в циклотронах при ускорении элементарных частиц и в многочисленных экспериментах по изменению их траектории. Тому имеются весьма веские экспериментальные подтверждения. Из повседневной практики и энергодинамической теории производительности энергоустановок [9] следует, что относительный КПД любых преобразователей энергии  $\eta_0 = N''/N'$  обращается в нуль на режимах «холостого хода» и «коротко-

<sup>1)</sup> Заметим, что именно импульс тела  $\mathbf{P}$  фигурировал изначально во 2-м законе Ньютона в качестве координаты процесса ускорения.

го замыкания». В ускорителях последнему режиму соответствует равенство  $v = c$ , когда дальнейшее увеличение подводимой к ускорителю мощности  $N'$  (и возрастание силы  $\mathbf{F}$ ) не приводит к дальнейшему увеличению выходной мощности  $N''$  (в данном случае кинетической энергии ускоряемой частицы). При этом в преобразователях любых форм энергии наблюдается плавное снижение  $\eta_0$  до нуля по мере приближения к этому режиму. Если выходную мощность ускорителя считать в соответствии с ТО, т.е. с учетом возрастания массы, импульса и выходной мощности по мере ускорения, КПД ускорителя будут возрастать с приближением  $v/c$  к единице в противоречие с общим для всех преобразователей закономерностям. Тем не менее до настоящего времени сторонники ТО продолжают настаивать на объяснении наблюдаемого уменьшения ускорения частицы  $\mathbf{a}$  по мере увеличения её скорости как следствия возрастания её массы  $M$ . В результате стало обычным понятие «релятивистской массы»  $M$ , «массы покоя»  $m_0$ , «гравитационной», «электромагнитной» и т.п. массы. Следствием такой трактовки стал и знаменитый «принцип эквивалентности массы и энергии».

### 3. Несостоятельность принципа эквивалентности энергии и массы.

В обширной литературе, посвященной этому принципу, встречаются две основные его формы:

$$E = Mc^2 . \quad (8)$$

$$E_0 = m_0 c^2 . \quad (9)$$

Соотношение (8) связывает полную энергию тела (системы)  $E$  с «релятивистской» (зависящей от скорости) массой  $M$ ; соотношение (9) – энергию покоя  $E_0 = U + E^{\text{п}}$  с «массой покоя»  $m_0$ , которая, как и ньютоновская масса  $m$ , не зависит от скорости, но трактуется как мера инертных свойств тела. Согласно обоим соотношениям,  $\Delta M = \Delta E/c^2$  и  $\Delta m_0 = \Delta E_0/c^2$ , т.е. масса тела возрастает при увеличении соответствующей энергии системы независимо от того, чем это увеличение вызвано. Очевидно также, что в системе единиц, где  $c^2 = 1$ , масса и энергия эквивалентны друг другу. В этом суть упомянутого принципа, который прекрасно согласуется с опытными данными, когда речь идет о превращении энергии материальных тел в энергию излучения, не обладающую массой. Однако нет никаких доказательств того, что он соблюдается при любых преобразованиях энергии из одной формы в другую (в противном случае этот принцип имел бы иной статус). Более того, предпринятое выше доказательство независимости массы от скорости позволяет вскрыть несостоятельность и самого принципа эквивалентности массы и энергии.

С этой целью сопоставим выражение (5) с определением полной энергии  $E = Mc^2$  в ТО, представив её, как обычно, в виде:

$$E = Mc^2 = m_0 c^2 + m_0 \mathbf{v}_0^2 / 2 + \dots , \quad (10)$$

где  $M$  – так называемая «релятивистская» масса;  $m_0$  – масса «покоя» всей системы, отличающаяся от массы в её ньютоновском (и термодинамическом) понимании лишь трактовкой её как меры инертности тела (системы);  $m_0 c^2 = E_0$  – энергия покоя системы;  $\mathbf{v}_0 = \sum_k m_k \mathbf{v}_k / m_0$  – скорость центра массы системы. Предварительно выразим экстенсивные параметры системы в (5) через массу  $m = m_0$ :

$$E/M = Ts - pv + \sum_k \mu_k c_k + \sum_k c_k \Phi_k + \mathbf{v}_0^2 / 2. \quad (11)$$

где  $s = S/m$ ;  $v = V/m$ ;  $c_k = m_k/m$  – соответственно удельная энтропия, удельный объем и массовая концентрация  $k$ -го компонента;  $\mathbf{v}_o = \sum_k c_k \mathbf{v}_k$ .

Если пренебречь, как обычно, отсутствующими в (10) членами ряда, то после сопоставления с (11) находим, что принятие принципа эквивалентности равноценно утверждению равенства:

$$E/M = Ts - pv + \sum_k \mu_k c_k + \sum_k c_k \phi_k = c^2. \quad (12)$$

Правая часть этого выражения раскрывает удельную энергию неподвижной системы в как функцию независимых переменных состояния системы  $T, p, \mu_k, c_k$ . Она отражает возможность изменения энергии системы вследствие теплообмена и объемной деформации, изменения её состава при диффузии и вследствие перемещения в силовых полях. Правая же часть, напротив, утверждает неизменность энергии системы в этих процессах. Таким образом, принцип эквивалентности ведет к явному противоречию с законом сохранения и превращения энергии. Этот вывод относится и к простейшим механическим системам, не обладающим внутренней энергией, поскольку утверждает неизменность их внешней потенциальной энергии. Таким образом, принцип эквивалентности не отражает реальный «запас» энергии материальной системы. Он не отражает даже того предела, которого может достигнуть внешняя кинетическая энергия материальных тел при достижении предельной скорости движения, поскольку в условиях неизменности массы эта энергия равна  $m_o c^2/2$ , а не  $m_o c^2$ .

Таким образом, мы возвращаемся к пониманию того, что связь между энергией и массой возникает только в случаях превращения части энергии тела в излучение, распространяющееся со скоростью  $c$ , как это и следовало из работ [2...7]. В частности, Н.А. Умов еще за 32 года до А.Эйнштейна установил неоднозначность этой связи, получив следующее соотношение между энергией излучения  $E_{\text{л}}$  и массой  $M$  [3]:

$$E_{\text{л}} = kMc^2, \quad (13)$$

где коэффициент пропорциональности  $k$  изменялся от 0,5 до 1<sup>2)</sup>. Затем Дж.Дж. Томсон в 1881 г. нашел величину  $k = 4/3$  [4]. Значение  $k = 1$  получил в 1890 г. О. Хевисайд, исходя из теории Максвелла [5].

Этим можно было бы и ограничить анализ этого принципа. Однако он порождает еще целый ряд «нестыковок», которые заслуживают обсуждения. Прежде всего, все интенсивные параметры в правой части (11) в принципе не имеют верхнего предела, равно как и энергия системы. Напротив, правая часть (12) утверждает существование такого предела, и, следовательно, ограничивает реальный «запас» энергии материальных тел. Поэтому ни о какой «практической значимости» принципа эквивалентности не может быть и речи. Во-вторых, не только термодинамика, но и другие фундаментальные дисциплины исходят из возможности находить для каждого независимого процесса ту единственную независимую координату, изменение которой является необходимым и достаточным признаком его протекания [12]. ТО исключает эту возможность, поскольку с изменением скорости меняются и все другие экстенсивные координаты состояния. В-третьих, если в ТНП и энергодинамике инерционные свойства (сопротивление изменению состояния) вытекают из принципа Шателье-Брауна и присущи любому  $i$ -му процессу [8], то в ТО они характеризуются лишь сопротивлением процессу ускорения. В-четвертых, если в классической механике и термодинамике внутренняя энергия  $U$  не изменяется с увеличением скорости тел (что следует из самого определения её как той части полной энергии системы  $\mathcal{E}$ , которая не зависит от движения системы как целого или её положения относительно других

<sup>2)</sup> Кстати, именно в курсе лекций Н.А. Умова приводится тот самый пример с переносом части массы тела  $dM$  с энергией  $dE$  посредством излучения, который положил и А. Эйнштейн в основу при выводе им формулы  $E = Mc^2$ .

тел, то в ТО она возрастет с увеличением массы покоя в той же мере, что и кинетическая энергия [14]. В-пятых, если в механике, термодинамике и энергодинамике масса системы является лишь одной из независимых переменных её состояния, то в ТО она становится зависящей от любой формы энергообмена системы с внешней средой, что нарушает всю математическую структуру этих дисциплин. Наконец, если в термодинамике и энергодинамике энергия отнюдь не отождествляется со способностью системы совершать работу (т.е. превращаться из одной формы в другую)<sup>1)</sup>, то в ТО «запас» энергии оценивается именно её массой, а работа – убылью («дефектом») этой массы. Несовместимость всех этих положений с термодинамикой очевидна.

Таким образом, постулированный А.Эйнштейном «принцип эквивалентности массы и энергии» приводит к целому ряду противоречий с той самой классической термодинамикой, о которой А.Эйнштейн отзывался как о единственной физической теории общего содержания, в рамках применимости понятий которой она «никогда не будет опровергнута» [16].

### Литература

1. *Эйнштейн А.* Собрание трудов в 4-х томах. – М., «Наука», 1966.-Т.1. С.36.
2. *H. Schramm, W. Braumüller.* Die allgemeine Bewegung der Materie als Grundursache aller Naturerscheinungen.// k.k.Hof- und-Universitäts-Buchhändler , 1872.
3. *Умов Н.А.* Теория простых сред, Спб, 1873. (См. также Архив АН СССР, ф. 320, оп. 1, с. 83-84).
4. *Томсон Дж.Дж.* Об электрическом и магнитном эффекте, обусловленном движением наэлектризованных тел. (см. Кудрявцев П.С. Курс истории физики, М.: Просвещение, 1974).
5. *Хевисайд О.* // Electrical Papers. - London: «Macmillan and Co.», 1892.- Vol. 2. p. 492
6. *Пуанкаре А.* // Избранные труды.— М.: «Наука», 1974.- С.429-433.
7. *Hasenöhr F.* Zur Theorie der Strahlung in bewegten Körpern F.//Ann. Phys., В.15/-S. 344-370, (1904); 16, 589 (1905).
8. *Хаазе Р.* Термодинамика необратимых процессов.- М.: «Мир», 1974.
9. *Эткин В.А.* Энергодинамика (синтез теорий переноса и преобразования энергии).- СПб.: «Наука», 2008.-409 с.
10. *Ньютон, И.* Математические начала натуральной философии. - М., Наука, 1989, с. 22.
11. *Эткин В.А.* Изменяется ли масса со скоростью? //Сетевой ресурс <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/10905.html> от 24.02.2011 (см. также <http://new-idea.kulichki.net/pubfiles/110306232209.pdf> от 06.03.2011).
12. *Эткин В.А.* К явлению запаздывания потенциала. Сетевой ресурс [http://zurnal.lib.ru/e/etkin\\_w\\_a/](http://zurnal.lib.ru/e/etkin_w_a/), 10.08.2008.
13. *Гухман А.А.* Об основаниях термодинамики. Изд. 2-е.- М.: «Энергоатомиздат», 1986.
14. *Толмен Р.* Относительность, термодинамика и космология. – М.: Наука, 1974.
15. *Бродянский В.М. и др.* Эксергетические расчеты технических систем. (Справочное пособие под ред. акад. АН УССР А.А.Долинского) – Киев: Наукова думка, 1991.
16. *Эйнштейн А.* Творческая автобиография. // Физика и реальность.- М.: «Наука». 195.- С.131-166.

---

1) В соответствии с принципом исключенного вечного двигателя 2-го рода для превращения хотя бы части внутренней энергии внутренне равновесной системы необходим не только источник, но и приемник энергии данного рода, например, окружающая среда, потенциал которой ( $T, p, \mu_k$  или  $v_k$ ) отличается от потенциала системы. В условиях внешнего и внутреннего равновесия энергия становится непревратимой и именуется *анергией* [13].