

## ИЗМЕНЯЕТСЯ ЛИ МАССА СО СКОРОСТЬЮ?

Эткин В.А.

Вскрывается противоречие СТО с законом сохранения массы и рядом положений современной термодинамики. Приводятся другие аргументы, подтверждающие необходимость расстаться с понятиями инертной, электромагнитной, гравитационной и т.п. массы.

## WHETHER THE MASS CHANGES WITH A SPEED?

Etkin V.A.

The contradiction of the STR with the law of mass preservation and with a number of modern thermodynamics positions is disclosed. Necessity to separate from concepts of the inert, electromagnetic, gravitational, etc. mass is shown.

Прошло 100 лет с момента возникновения теории относительности А.Эйнштейна. Однако до сих пор не утихают дискуссии о том, зависит ли масса тел от их скорости, аддитивна ли масса при объединении тел в систему и сохраняется ли она в изолированных системах при превращении кинетической энергии относительного движения их частей в энергию покоя? Классическая механика, как известно, отрицала изменение массы со скоростью, считая её величиной аддитивной и сохраняющейся в изолированных системах при любых превращениях энергии в них. Теория же относительности А.Эйнштейна (ТО) считает более правильной формулу [1]

$$M_p = M_o \gamma, \quad (1)$$

где  $M_p$ ,  $M_o$  – масса тела, движущегося со скоростью  $v$  и неподвижного тела;  $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$  – множитель Лоренца;  $c$  — скорость света в вакууме.

Согласно (5), любое тело с энергией  $E$  (в том числе фотон) имеет массу  $M = E/c^2$ , которая растет не только при увеличении скорости материальной частицы, но и её энергии покоя  $E_o$ . И наоборот, увеличение любой формы энергии системы  $E = Mc^2$  влечет за собой возрастание её массы  $M$ . В связи с этим в физику были введены понятия «релятивистской массы»  $M_p$ , «массы покоя»  $M_o$ , «инертной», «электромагнитной» и «гравитационной» массы.

Это выражение эквивалентности массы и энергии вошло в науку настолько прочно, что стала символом теории относительности и критерием её практической значимости. Такой точки зрения придерживался не только сам А.Эйнштейн [1], но и другие выдающиеся физики прошлого столетия, такие, как М.Борн (1962), В.Паули (1921), Р.Толмен (1934), Р.Фейнман (1965), В.А.Фок (1955), Е.Тейлор и Дж. Уиллер (1966), не говоря уже об авторах многочисленных учебников, пособий и популярных книг на эту тему.

Лишь в последнее время в среде не только «диссидентов от науки», но и специалистов в этой области появились исследователи, считающие единственным правильным выражение

$$E_o = Mc^2, \quad (2)$$

также встречающееся в работах А.Эйнштейна. Согласно этому выражению, масса тела  $M$  эквивалентна энергии покоящегося тела  $E_o$  и потому не меняется при его ускорении, а фотон, движущийся со скоростью света, не имеет массы. Одним из наиболее стойких и по-

следовательных приверженцев этой точки зрения является российский ученый академик Л.Б. Окунь (1989) [2].

Это привело к такой сумятице в головах специалистов, преподавателей, методистов и популяризаторов физики, что в настоящее время вряд ли возможно дать на поставленные вопросы однозначный ответ, оставаясь в рамках ТО. Поэтому нашей задачей является рассмотрение этого вопроса с позиций энергодинамики как единой теории процессов переноса и преобразования любых форм энергии, обобщающей термодинамику на пространственно неоднородные системы и нетепловые формы движения [3]. В частности, представляет интерес показать, что выражение (1) несовместимо с законом сохранения массы в изолированных системах.

Для этого рассмотрим в целом неподвижную и изолированную систему с массой  $M_0$ . Предположим, что в такой системе вследствие её неравновесности две её произвольные части с массой покоя  $m_0 < M_0$  пришли в относительное движение. При этом в соответствии с (1) релятивистская масса этих тел  $m_p$  становится равной  $m_0\gamma$ , в то время как масса покоя системы  $M_0$  уменьшается на величину  $m_0$ . Если теперь потребовать, чтобы суммарная масса покоя системы  $M_0$  при этом не изменялась, должно иметь место очевидное равенство:

$$m_0\gamma + M_0 - m_0 = M_0. \quad (3)$$

Отсюда непосредственно следует, что  $\gamma = 1$ , т.е.  $v/c = 0$ . Таким образом, увеличение массы каких-либо частей изолированной системы вследствие релятивистских эффектов исключается самим законом сохранения массы. Приведем и другие аргументы термодинамического характера, которые научное сообщество, очарованное красотой СТО, до сих пор «не замечает».

Известно, что сам И.Ньютон не допускал никакой двойственности в понимании массы, определяя её следующим образом: «количество материи (масса) есть мера таковой, устанавливаемая пропорционально плотности и объему ее» [4]. Тем не менее в механике Ньютона масса предстала в двух обличьях – как мера количества вещества (в законе всемирного тяготения) и как мера инерционных свойств тела (во 2-м законе Ньютона), где ей была отведена роль коэффициента пропорциональности между силой инерции  $\mathbf{F}$  и ускорением тела  $\mathbf{a}$ :

$$\mathbf{F} = M\mathbf{a}, \quad (4)$$

Соотношение (4) относилось исключительно к процессу ускорения тела. Тем самым уже в классической механике создались предпосылки для различения «инертной» и «тяжелой» массы.

В классическую термодинамику понятие массы пришло из механики, однако вне связи с процессом ускорения. Это было обусловлено спецификой термодинамики, которая изучала внутренние процессы, протекающие в твердых, жидких или газообразных телах. При этом она оперировала понятием внутренней энергии системы  $U$  как той части её полной энергии  $E$ , которая по определению не зависела от её движения или положения как целого относительно других тел (окружающей среды). Эта функция состояния  $U = U(S, V)$ , как и аргументы  $\Theta_i$ , её определяющие (в простейшем случае энтропия  $S$  и объем  $V$ ), являлась экстенсивной величиной, и масса  $M$  служила для всех них единым коэффициентом пропорциональности. Это позволяло рассматривать массу  $M$  как универсальную меру количества вещества, заключенного в системе. Такое её понимание закрепилось в дальнейшем при обобщении классической термодинамики на открытые системы, обменивающиеся веществом с окружающей средой. При этом масса  $M$  стала еще одним из независимых параметров состояния и приобрела смысл координаты процесса массообмена, т.е. экстенсивного параметра состояния, с необходимостью изменяющегося в этом процессе.

В соответствии с определением, внутренняя энергия  $U$  как часть энергии покоя  $E_0$  не должна была изменяться со скоростью. Это обстоятельство, однако, было проигнорировано сторонниками

ТО, в частности, М.Планком, который первым с одобрения А.Эйнштейна в 1907 г. предложил формулу релятивистского преобразования внутренней энергии в виде [5]:

$$U = U_0 \gamma, \quad (5)$$

где  $U$ ,  $U_0$  – внутренняя энергия движущейся и неподвижной системы. Этот результат, воспроизведенный во многих руководствах по релятивистской термодинамике (Р. Толмен, 1974), послужил основанием одного из парадоксов термодинамики, выразившегося в выводе о достижимости в релятивистском цикле Карно (с быстро движущимся источником тепла) термического КПД, превышающего КПД идеальной машины Карно [6]. Детальный анализ этого парадокса вскрывает его противоречие с принципами СТО, согласно которым законы физики (включая выражение термического КПД цикла Карно как математическую формулировку 2-го начала термодинамики) должны оставаться инвариантными в любой ИСО.

Еще более серьезные противоречия обнаруживаются при рассмотрении вопроса о зависимости массы от скорости с позиций термодинамики необратимых процессов (ТНП) [7,8]. В ней доказывается, что для процессов переноса (включая явления теплопроводности, электропроводности, диффузии, фильтрации, вязкого трения и т.п.), справедливы кинетические законы вида [4]:

$$\mathbf{F}_i = \sum_j \bar{R}_{ij} \mathbf{J}_j \quad (i, j = 1, 2, \dots, n), \quad (6)$$

где  $\mathbf{J}_j$  – обобщенные скорости процессов переноса энтропии, заряда,  $k$ -х веществ, импульса и т.п., именуемые в случае векторных процессов потоками;  $\bar{R}_{ij}$  – коэффициенты пропорциональности, называемые «феноменологическими» (т.е. подлежащими экспериментальному определению). Они характеризуют сопротивление системы  $i$ -й силе  $\mathbf{F}_i$  со стороны «чужеродного» процесса, например, сопротивление электрического поля  $\mathbf{F}_e$  диффузионным потокам  $k$ -х заряженных веществ  $\mathbf{J}_k$ . Такое стремление системы «противостоять» протеканию того или иного процесса вытекает из принципа Ле-Шателье – Брауна и свойственно любым процессам. Применительно к процессу ускорения его обобщенная скорость  $\mathbf{J}_j = \mathbf{J}_a$  выражается согласно Ньютону производной по времени  $t$  от импульса системы  $d\mathbf{P}/dt = M\mathbf{a}$ , так что уравнение (6) даже в простейшем случае действия единственной силы  $\mathbf{F}_a$  принимает вид :

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

где коэффициент  $R_a$ , характеризует «инерционность» системы по отношению к ускоряющей силе  $\mathbf{F}_a$ . Сопоставляя это выражение со 2-м законом Ньютона  $\mathbf{F} = d\mathbf{P}/dt$ , находим, что в нем коэффициент  $R_a$  равен единице, поскольку речь идет о силе инерции, а не о более общем понятии движущей силы  $\mathbf{F}_i$  в выражении (6), которая порождает множество процессов. В случае же нелинейных систем коэффициенты  $\bar{R}_{ij}$  зависят от обобщенной скорости процессов  $\mathbf{J}_j$ , так что их учет обязателен.

Проявлением этой зависимости и является увеличение коэффициента  $R_a$  с возрастанием импульса  $\mathbf{P}$ , ошибочно приписываемое в СТО массе  $M$ . Действительно, как и любые экстенсивные параметры  $\Theta_i$ , импульс  $\mathbf{P}$  пропорционален количеству вещества в системе  $M$ . Однако в общем случае фактором экстенсивности может служить и другая величина. Скажем, в законе Ома, где  $\mathbf{F}_i$  – электродвижущая сила;  $\mathbf{J}_j$  – сила тока, а  $R_a$  – коэффициент, характеризующий электрическое сопротивление проводника, он зависит от природы проводника (заряда  $\Theta_e$ ), но не от его массы  $M$ .

В большинстве реальных систем, особенно вдали от равновесия, уравнения (7) становятся нелинейными вследствие зависимости коэффициентов  $\bar{R}_{ij}$  от обобщенной скорости процесса  $\mathbf{J}_j = R_a(\mathbf{J}_a)$  [7,8]. Частным случаем этой нелинейности и является зависимость коэффициента  $R_a$  от скорости  $\mathbf{v}$  (или импульса  $\mathbf{P}$ ), которой в классической механике пренебрегают. Поэтому в общем случае релятивистских скоростей 2-й закон Ньютона должен записываться в форме (7). Такая запись означает, что масса  $M$ , играющая в выражении  $\mathbf{P} = M\mathbf{v}$  роль меры количества вещества, не имеет никакого отношения к коэффициенту  $R_a$  как мере его инертности. Это тем более очевидно, что масса  $M$  является функцией состояния, в то время как  $R_a$  – функция процесса (его скорости  $\mathbf{v}$ ).

Как видим, подход к механике с более общих позиций энергодинамики позволяет обнаружить в законе Ньютона  $\mathbf{F} = d\mathbf{P}/dt$ , становящимся в случае зависимости  $\mathbf{F}$  от скорости  $\mathbf{v}$  нелинейным, отсутствие коэффициента  $R_a$ , характеризующего сопротивление системы процессу ускорения. В ре-

зультате именно массе  $M$  стали приписывать смысл экстенсивной меры инертности, каковой в действительности является  $MR_a$ . В последующем это сделало незаметной подмену в СТО массы  $M$  как функции состояния инертной массой  $M_{и}$  как функцией процесса, что заведомо некорректно.

То обстоятельство, что между величиной  $MR_a$ , ошибочно названной инерционной массой  $M_{и}$ , и обычной массой  $M$  существует зависимость

$$M_{и} = R_a(\mathbf{J}_a)M, \quad (8)$$

является следствием нелинейности закона Ньютона и отражением зависимости  $R_a = R_a(\mathbf{J}_a)$ , что отнюдь не противоречит классической механике. Она не требует привлечения принципа относительности Пуанкаре–Лоренца–Эйнштейна и вытекающего из него преобразования Лоренца, для которых  $R_a(\mathbf{J}_a) = \gamma$ . С позиций ТНП такая зависимость должна устанавливаться опытным путем. Однако в некоторых случаях это удается сделать и на основе теоретических соображений. Такова, в частности, теория подобия процессов преобразования энергии, развитая в рамках энергодинамики [3].

Эта теория, в отличие от классической термодинамики, учитывает все виды потерь, связанных с преобразованием одних форм энергии в другие. Сюда входят не только потери при переносе энергии от источника к рабочему телу, но и в самом процессе преобразования энергии. Эти потери зависят от режима работы преобразователя энергии, вследствие чего отношение полезной мощности  $N''$ , развиваемой каким-либо преобразователем энергии (в том числе ускорителем элементарных частиц), к затрачиваемой на это мощности  $N'$  (названное в [3] «мощностным КПД»  $\eta_N = N''/N'$ ), определяется критериальным уравнением:

$$\eta_N = (1 - B)/(1 + 1/B\Phi), \quad (9)$$

где  $B = J_j/J_{jk}$  – критерий нагрузки, представляющий собой отношение потока  $J_j$  в текущем режиме к его максимальному значению  $J_{jk}$ ;  $\Phi$  – критерий конструктивного совершенства установки, определяемый соотношением «реактивных»  $\bar{R}_{ij}$  и «активных»  $\bar{R}_{jj}$  сопротивлений процессу преобразования энергии и равный для идеальных преобразователей бесконечности. При этом благодаря представлению мощности  $N''$  в виде произведения потока  $J_j$  на сопряженную с ним силу  $F_j$  становится ясным, что КПД любого преобразователя энергии обращается в нуль дважды: при  $J_j = 0$  (холостой ход) и  $F_j = 0$  (режим короткого замыкания). Это обстоятельство не только вскрывает истинную причину возрастания до бесконечности ускоряющей силы по мере приближения скорости частиц к предельной, но и предсказывает характер этой зависимости для случая процесса ускорения тел или частиц. В этом случае поток  $\mathbf{J}_j \equiv \Theta_j \mathbf{v}_j$  выражается произведением импульса  $\Theta_j = M\mathbf{v}_j$  на скорость частицы  $\mathbf{v}_j$ , т.е. приобретает смысл удвоенной кинетической энергии её. Соответственным образом определяется и его предельное значение  $J_{jk} = Mc^2$  по достижении скорости света. В таком случае в условиях независимости массы от скорости КПД ускорителя определяется выражением:

$$\eta_N = (1 - B) = (1 - v^2/c^2), \quad (10)$$

Отсюда следует, что увеличение потребляемой ускорителем мощности  $N'$  обусловлено падением КПД преобразователя по мере приближения скорости частиц  $\mathbf{v}_j$  к предельной. Действительно, как следует из (7), в процессе ускорения  $\mathbf{J}_j \equiv d\mathbf{P}/dt$ , так что  $F_j = R_a \mathbf{J}_j$  и  $N'' = \mathbf{J}_j \cdot \mathbf{F}_j = F_j^2/R_a$ . В таком случае отношение ускоряющей силы в режиме «холостого хода» и в текущем режиме  $F_j'/F_j'' = (N''/N')^{0,5} = \gamma$ , т.е. в точности соответствует множителю Лоренца. Это дает совершенно иное объяснение результатам опытов В.Кауфмана и аналогичных им экспериментов, послуживших якобы подтверждением СТО. Предложенное объяснение не имеет никакого отношения к релятивистским преобразованиям времени и пространства. Сама по себе физическая причина ухудшения КПД ускорителя довольно очевидна: она обусловлена прекращением процесса ускорения при достижении предельной скорости частиц (режима «короткого замыкания»). Такое поведение свойственно любым преобразователям энергии,

Таким образом, и с термодинамических позиций мы приходим вслед за [2] к выводу, что существует единственная масса  $M$ , являющаяся мерой количества вещества, а понятия «массы покоя», «релятивистской», «инертной», «электромагнитной», «гравитационной» и т.п. масс должны быть отброшены как излишние.

### Литература

1. *Einstein A.* //Ann. d. Phys., 1905, Bd 18. S. 639; 1906, Bd 20, S. 371; 1907. Bd 23. S. 371; 1911, Bd 35. S. 898.
2. *Окунь Л.Б.* Понятие массы (масса, энергия, относительность). // УФН, 1989. Т.158, Вып.3. С.511-530;
3. *Эткин В.А.* Энергодинамика (синтез теорий перенос и преобразования энергии).- СПб.: «Наука», 2008. – 409 с.
4. *Ньютон И.* Математические начала натуральной философии.- М., 'Наука', 1989, с. 22.
5. *Planck M.* //Sitzungsber. Akad. Wiss. Berlin. 1907. Bd 13. S. 542.
6. *Базаров И.П.* Термодинамика. М.: «Высшая школа», 1994. Изд.4-е.
7. *Хаазе Р.* Термодинамика необратимых процессов.- М.: «Мир», 1967.- 544 с.
8. *Де Грот С.Р., Мазур П.* Неравновесная термодинамика. – М.: Мир, 1964.- 456 с.
9. *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.
10. *Бернштейн В.М.* Масса и энергия. – М.: «Спутник», 2010.