Серия: **ФИЗИКА И АСТРОНОМИЯ**

Эткин В.А.

Обобщение принципов механики

Содержание

Аннотация

Показана возможность и целесообразность обоснования основных понятий и принципов механики как следствий энергодинамики - общефизической теории процессов переноса и преобразования любых форм энергии. Дано обобщение основных законов механики и доказательство ряда ее постулатов

Введение

Механика первой из естественных наук достигла зрелости и явилась теоретической основой технической цивилизации. Предмет ее исследования – движение макроскопических тел – издавна представлялся для исследователей наиболее наглядным. Именно с изложения механики начинаются курсы современной теоретической физики, а её понятийная и концептуальная система до сих пор служит базой для большинства естественнонаучных дисциплин.

Эти достоинства механики породили и известный механицизм – стремление «свести все явления природы к притягивательным и отталкивательным силам, величина которых зависит от их расстояния» (Г. Гельмгольц, 1847). Однако построение чисто механической картины мира оказалось невозможным. Более того, спустя 100 лет после квантово-релятивистской революции именно механика вызывает наибольшее число вопросов и ожесточенных дискуссий. В этих условиях представляет интерес рассмотрение механики как равноправного партнера среди других научных дисциплин, рассматривающих немеханические формы движения. При этом основное внимание следует уделить получению основных принципов механики дедуктивным путем как частного случая единой теории реальных процессов, названной для краткости энергодинамикой [1].

Особенностью энергодинамики является то, что она рассматривает в качестве объекта исследования пространственно неоднородные (внутренне неравновесные) системы в целом. Это не только гарантирует выполнение законов сохранения массы, заряда, импульса и его момента, сформулированных применительно к изолированным системам, но и позволяет обнаружить протекание в неоднородных системах специфического класса процессов перераспределения в них упомянутых выше носителей энергии Θ_i. Такие процессы описываются в энергодинамике изменениями *моментов распределения* i-х энергоносителей $\mathbf{Z}_i = \Theta_i\Delta\mathbf{r}_i$, где $\mathbf{r}_i$ – радиус-вектор центра величины Θ_i. Введение вместо функций распределения (полей плотности ϱ_i параметров Θ_i) новых координат состояния $\mathbf{Z}_i$, характеризующих отклонение системы в целом от внутреннего равновесия, позволяет распространить термодинамический метод исследования на пространственно неоднородные системы с протекающими в них внутренними процессами переноса и преобразования каких-либо форм энергии.

Такой подход позволяет избежать трудностей, которые возникают при изучении объектов, включающих всю совокупность взаимодействующих материальных точек. Их описание с позиции классической механики требует задания огромного (а в случае континуума – бесконечного) числа распределенных параметров. Это вынуждает делить систему на множество элементарных подсистем, предполагаемых однородными, и рассматривать их поведение в надежде, что свойства всей их совокупности можно найти с помощью подходящих интегралов. Между тем далеко не все свойства систем аддитивны, т.е. допускают суммирование. Таковы вообще все так называемые «системообразующие» свойства, присущие системе в целом, но отсутствующие у каждого ее элемента в отдельности. Неаддитивны, например, силы гравитационного притяжения, которые пропорциональны, как известно, произведению взаимодействующих масс, но не их сумме.

Другим неаддитивным свойством является наличие в неоднородных системах релаксационных процессов, приводящих к выравниванию в них скоростей, плотностей и т. д., в то время как в локально однородных элементах системы они отсутствуют. Еще очевиднее неаддитивность свойств, которые обусловлены структурой системы, т.е. относительным положением и ориентацией отдельных элементов системы. Это обстоятельство является, по-видимому, главной причиной, по которой физические явления перестают подчиняться законам, которые можно выразить с помощью дифференциальных уравнений. Именно с этим связано, по мнению А. Пуанкаре, «самое большое и самое глубокое потрясение, которое испытала физика со времени Ньютона» [2].

Выходом из положения является рассмотрение системы по принципу «от целого к части» при сохранении всех присущих ей «системообразующих» связей.

1. Коррекция исходных понятий механики

Изложение механики обычно начинается с кинематики, которая рассматривает движение тел в пространстве и времени независимо от физических причин этого движения. При этом понятия траектории, координаты точки на ней, ее скорости и ускорения допускается «a priori», до выяснения причин возникновения движения и его законов. Лишь затем переходят к изучению динамики, вводя понятия материальной точки, ее массы и импульса. На первый взгляд такое построение механики кажется вполне естественным. Однако, как заметил Л. Бройль [3], в основе такого подхода лежит предположение о том, что результаты абстрактного кинематического рассмотрения можно без дополнительного анализа применять к реальному движению более сложных физических объектов.

Обратный путь предлагает энергодинамика, математический аппарат которой ориентирован на общий случай произвольного (хотя и конечного) числа протекающих в системе процессов переноса и преобразования энергии [1]. Коррективы, вносимые энергодинамикой при рассмотрении механики как ее следствия, начинаются с объекта исследования. В кинематике им является абстрактная точка, не обладающая ни массой, ни важнейшим свойством любого материального объекта – его протяженностью. При этом состояние объекта исследования, процесс его перемещения, ускорения и т.п. описываются производными различного порядка от единственной координаты – радиус-вектора этой точки **r**. Между тем с позиций энергодинамики число независимых координат, необходимых и достаточных для описания состояния какой-либо системы, равно количеству независимых процессов, протекающих в ней. С этой точки зрения независимыми процессами являются не только поступательное движение центра масс и вращение тела вокруг мгновенного центра инерции, но и их равномерное или ускоренное движение. Это означает, что число координат, характеризующих состояние такой системы в целом, равно четырем. К тому же переменные, претендующие на роль координат этих процессов, должны быть величинами экстенсивными, как и энергия системы, которую они определяют. Все они могут быть найдены как частные дифференциалы или производные от *моментов распределения* массы системы $\mathbf{Z}_m = M\Delta\mathbf{r}_m$, где $\Delta\mathbf{r}_m$ – отклонение радиус-вектора центра массы системы M от его положения при однородном ее распределении. В частности, состояние движения системы характеризуется производной от $\mathbf{Z}_m$ п времени t, называемой импульсом системы:

$$\mathbf{P} \equiv d\mathbf{Z}_m/dt = M\mathbf{v}, \tag{1.1}$$

где $\mathbf{v} = d\mathbf{r}_m/dt$ – скорость перемещения центра масс тела (системы тел).

Как известно, скорость любой точки твердого тела можно разложить на две составляющие: скорость движения центра массы системы $\mathbf{v}_0$ и скорость вращения тела как целого $\boldsymbol{\omega}\times\mathbf{r}_0$, где $\mathbf{r}_0$ – мгновенный радиус вращения точки тела [4]. В соответствии с этим и импульс системы как целого можно разложить на две составляющие: импульс поступательного движения тела

$$\mathbf{P}_0 \equiv M\mathbf{v}_0 = Md\mathbf{r}_0/dt, \tag{1.2}$$

и импульс вращательного движения:

$$\mathbf{P}_\omega \equiv \boldsymbol{\omega}\times M\mathbf{r}_0. \tag{1.3}$$

где $d\mathbf{r}_0 = \mathbf{e}dr_0/dt$ – вектор смещения; $\mathbf{e}$ – единичный вектор в направлении скорости $\mathbf{v}_0$; $r = |\mathbf{r}|$. Вместо последнего выражения в качестве координаты вращательного движения обычно используется момент импульса системы $\mathbf{L} = I\boldsymbol{\omega}$, в котором I – момент инерции тела). Координатам $\mathbf{P}$ и $\mathbf{L}$ соответствуют две независимые составляющие кинетической энергии системы – соответственно энергия ее поступательного $E^к = M\mathbf{v}^2/2$ и вращательного $E^\omega = I\boldsymbol{\omega}^2/2$ движения. Если движение – это изменение состояния покоя (т.е. процесс, протекающий в пространстве переменных $\mathbf{r}_i$), то ускорение – это изменение состояния движения (т.е. процесс, протекающий в пространстве скоростей $\mathbf{v}_i$). Тогда изменение во времени $d\mathbf{P}/dt$ и $d\mathbf{L}/dt$ координат **P** и **L** характеризует уже два других независимых процесса – ускорения поступательного и вращательного движения, т.е. процессы изменения *состояния движения*.

Такое описание движущегося континуума в рамках энергодинамики является необходимым и достаточным для характеристики энергетического состояния системы в целом. Любое отклонение от этого правила приводит к ошибкам методологического характера – *переопределению* или *недоопределению* системы. Наглядным примером такого переопределения является введение в начале XX столетия Эли Картаном понятия «ориентируемой точки» - наделению ее способностью вращаться при движении по некоторой траектории. В результате состояние точки требует задания уже 6 независимых координат (трех поступательных и трех вращательных). Между тем движущаяся материальная точка, не обладающая протяженностью, располагает только кинетической энергией поступательного движения, так что ее вымышленные вращательные координаты не характеризуют никакого реального процесса. Еще дальше идет в этом направлении теория физического вакуума [5], наделяя материальную точку еще тремя координатами вращения в некотором «пространстве–времени». В результате пространство переменных становится уже 10-мерным (с учетом координаты времени). Построенная на таком фундаменте теория наделяет пространство свойствами, которых нет в действительности.

Наряду с этим можно указать примеры «недоопределения» механических систем. Так происходит, например, когда материальное тело описывают, не учитывая распределения ее плотности в пространстве, занятом им. Тогда тела с различной ориентацией момента распределения массы $\mathbf{Z}_m$ становятся неразличимыми, и из рассмотрения исключается целый класс реальных процессов *переориентации*. В результате игнорируется то обстоятельство, что тела с различной ориентацией в пространстве в механическом отношении не эквивалентны [4].

Энергодинамика вносит коррективы и в такие основополагающие понятия механики, как масса, скорость и ускорение. Коснемся прежде всего понятия массы M как меры инерционных свойств тела. Исторически такое её понимание M было обусловлено недостаточно общим способом введения понятия силы $\mathbf{F} = M\mathbf{a}$, при котором понятие силы прямо связывалось с понятием ускорения тела **a**, а масса M фигурировала в качестве коэффициента пропорциональности. Отсюда следовало, что при действии на тело одной и той же силы **F** его ускорение **a** будет тем меньшим, чем больше масса тела M. Тем самым масса M приобрела смысл меры инерционности тела, что не соответствовало её ньютоновскому определению как «меры количества материи, устанавливаемой пропорционально плотности и объему ее» [6]. В дальнейшем такое искаженное понимание массы закрепилось в понятиях «инерционной», «гравитационной», «электромагнитной» массы, «массы покоя» и т.п.

Иначе обстоит дело в энергодинамике, где понятие массы вводится задолго до рассмотрения процесса ускорения, т.е. вне связи с инерцией. При этом масса сохраняет ньютоновский смысл меры количества вещества, заключенного в системе, т.е. меры экстенсивных свойств любых энергоносителей Θ_i и энергии системы $Э$. Такое её понимание закрепляется в дальнейшем при введении параметра состояния, изменяющегося в процессах обмена веществом с окружающей средой, т.е. координаты массообмена.

Окончательное отличие массы от меры инерционных свойств системы устанавливается при формулировании в энергодинамике [1] и в термодинамике необратимых процессов [7] законов переноса. При действии на систему единственной силы $\mathbf{F}_i$ эти законы принимают вид:

$$\mathbf{F}_i = \bar{R}_i \mathbf{J}_i \ , \tag{1.4}$$

где $\mathbf{J}_i$ - обобщенная скорость процесса переноса, именуемая в ТНП «потоком»; $\bar{R}_i$ - коэффициент пропорциональности, характеризующий сопротивление системы изменению её состояния, т.е. её «инерционность» по отношению к силам i–й природы $\mathbf{F}_i$. Применительно к процессу ускорения его обобщенная скорость $\mathbf{J}_i$ выражается по Ньютону [6] производной по времени от импульса системы $d\mathbf{P}/dt = M\mathbf{a}$. Подставляя это выражение в уравнение (1.4) , находим:

$$\mathbf{F}_i = \bar{R}_i \, d\mathbf{P}/dt \, , \tag{1.5}$$

Как видим, коэффициент $\bar{R}_i$ появляется как функция процесса ускорения, характеризующая меру инерционных свойств системы, и не имеет ничего общего с массой системы M как функцией её состояния и мерой количества вещества в ней. Особенно очевидным становится последнее при сопоставлении (1.5) с законом Ома в электротехнике, где $\mathbf{F}_i$ – электродвижущая сила; $\mathbf{J}_i$ – сила тока, а коэффициент сопротивления току $\bar{R}_i$ вообще не зависит от массы проводника. Кстати, и во 2-м законе Ньютона, где коэффициент $\bar{R}_i$ принят равным единице, он также не зависит от массы. Это означает, что понятия массы как меры инерции и как меры количества вещества явно различимы, и их отождествление недопустимо. На этом основании мы будем называть $\bar{R}_i$ «*коэффициентом инерции*» или более кратко *инерционностью* .

Перейдем теперь к понятию ускорения. В кинематике точки под ускорением понимается полная производная от ее скорости по времени $\mathbf{a} \equiv d\mathbf{v}/dt$. Эта производная включает в себя две составляющие: изменение скорости частицы $\mathbf{v} = \mathbf{v}(\mathbf{r},t)$ без изменения ее направления $\mathbf{a} \equiv \mathbf{e}(d\mathrm{v}/dt)$ и изменение направления движения частицы $\mathrm{v}d\mathbf{e}/dt$ без изменения абсолютной величины ее скорости v. В результате в кинематике *всякое криволинейное движение точки оказывается движением с ускорением*. Между тем эти два процесса вызывают качественно различные изменения состояния движения материальных тел: первый вызывает изменение их кинетической энергии, второй – нет. Поэтому с позиций энергодинамики эти два процесса должны рассматриваться как *независимые*. Действительно, в динамике, объединяющей поступательное и вращательное движение твердого тела «по инерции» как движение в отсутствие внешних сил, определяющим фактором, позволяющим различать эти два вида движения, является постоянство в них кинетической энергии поступательного $E_{\mathrm{w}} = M\mathbf{v}^2/2$ и вращательного движения $E_\omega = I\boldsymbol{\omega}^2/2$. Иными словами, следует различать процесс поступательного ускорения материальной точки, координатой которого является производная от поступательного импульса $\mathbf{P}_0 \equiv M\mathbf{v}_0$ по времени $M\mathbf{a} = d\mathbf{P}_0/dt = M\mathbf{e}(dv/dt)$, и процесс вращательного ускорения, выражающийся, в изменении момента вращательного движения $d\mathbf{L}/dt$, т.е. вектора угловой скорости $d\boldsymbol{\omega}/dt$. Тогда становится очевидным, что вращение тела с постоянной угловой скоростью не является ускоренным, несмотря на непостоянство в нем вектора скорости **v**. Сказанное имеет непосредственное отношение к постулату Бора о безизлучательном характере равномерного движения электрона по круговой орбите, когда его кинетическая энергия остается неизменной. Таким образом, с позиций энергодинамики понятие «центростремительного ускорения» не соответствует существу дела и должно быть исключено.

Характерно, что установленная в рамках энергодинамики необходимость выделения в системе независимых процессов вступает в противоречие с существующей тенденцией объединять различные формы движения в один математический объект типа тензора энергии–импульса с различной размерностью и смыслом его компонентов. Это относится, в частности, и к понятию ускорения в кинематике, которое объединяет в себе два совершенно различных процесса: изменения модуля скорости и его направления. Действительно, рассмотрим с формально-математической точки зрения развернутое выражение ускорения $\mathbf{a} = \mathbf{a}(\mathbf{r},t)$ как функции радиус-вектора центра массы тела $\mathbf{r}_m$ и времени t :

$$\mathbf{a} \equiv d\mathbf{v}/dt = \mathbf{e}(\partial v/\partial t)_{\mathbf{R}} + \mathbf{e}\,(\partial v/\partial \mathbf{r})d\mathbf{r}/dt. \tag{1.6}$$

Поскольку ускорение тела или частицы без изменения их положения а пространстве невозможно, локальную составляющую ускорения $\mathbf{e}(\partial v/\partial t)_{\mathbf{R}}$ в этом выражении следует отбросить как не имеющую физического смысла. В таком случае

$$\mathbf{a} = v\nabla v, \tag{1.7}$$

где $\nabla v \equiv (\partial v/\partial \mathbf{r})$ – градиент поля скоростей.

Данное уточнение имеет немаловажное значение, подчеркивая неразрывную связь процесса ускорения с деформацией поля скоростей в системе как целом и единство энергодинамического описания любых процессов. Действительно, если учесть, что отрицательный градиент скорости имеет размерность и смысл термодинамической силы процесса ускорения $\mathbf{X}_w \equiv -\nabla v$, а обобщенная скорость этого процесса $\mathbf{J}_m = d\mathbf{P}_0/dt$ – смысл потока, то выражение $\mathbf{F} = M\mathbf{a}$ предстанет как частный случай линейных кинетических уравнений термодинамики необратимых процессов (ТНП) [7], в которых коэффициент инерции $\bar{R}_i$ принят постоянным и опущен.

2. Принцип инерции (первый закон Ньютона) и его обобщение на вращательное движение

Первый закон И.Ньютона является видоизмененной формулировкой принципа инерции, установленного впервые Галилеем: *“Всякое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменять это состояние”*.

Для математического обоснования этого принципа применим основное тождество энергодинамики :

$$dЭ \equiv \Sigma_i \Psi_i d\Theta_i - \Sigma_i \mathbf{F}_i \cdot d\boldsymbol{R}_i - \Sigma_i \mathbf{M}_i \cdot d\varphi_i, \quad (i = 1,2,\ldots, n) \qquad (2.1)$$

где $\Psi_i \equiv (\partial Э/\partial\Theta_i)$ – обобщенные потенциалы типа абсолютной температуры T, абсолютного давления p, химического, электрического, гравитационного и т.п. потенциала; $d\boldsymbol{R}_i = \mathbf{e}dr_i$ - смещение центра величины Θ_i (массы, заряда, энтропии, импульса, его момента и т.п.) без изменения ориентации момента $\mathbf{Z}_i$; $\mathbf{F}_i \equiv -(\partial Э/\partial \boldsymbol{R}_i)$ – силы в их обобщенном (энергодинамическом) представлении); $d\varphi_i$ – изменение угла ориентации момента $\mathbf{Z}_i$ в пространстве; $\mathbf{M}_i \equiv -(\partial Э/\partial\varphi_i)$ – вращательные моменты, изменяющие ориентацию векторов $\mathbf{Z}_i$.

Применим это уравнение к произвольной внутренне равновесной механической системе, на которую не действуют какие-либо внешние силы $\mathbf{F}_i$ или их моменты $\mathbf{M}_i$. В силу этого энергия системы остается неизменной ($dЭ = 0$), и выражение (2.1) принимает вид:

$$\Sigma_i \Psi_i d\Theta_i = 0. \qquad (2.\ 2)$$

Для механической системы, не участвующей во вращательном движении, единственным параметром Θ_i, характеризующим состояние движения системы, являются компоненты импульса поступательного движения системы как целого $\mathbf{P}$. В таком случае $\Psi_i \equiv \mathbf{v}$, и из (2.2) непосредственно следует закон сохранения импульса системы:

$$\mathbf{P} = M\mathbf{v} = \text{const}\ . \qquad (2.3)$$

Отсюда следует, что принцип относительности Галилея, согласно которому равномерное и прямолинейное движение замкнутой системы не влияет на ход протекающих в ней процессов, является всего лишь частным случаем «принципа самоненарушимости равновесия» (общего начала термодинамики). Действительно, с позиций термодинамики (и энергодинамики) состояние прямолинейно движущейся механической системы характеризуется единственной координатой – импульсом системы $\mathbf{P}$. Поэтому в ней в принципе возможен единственный процесс – ускорение системы как целого. Равномерное движение означает в этом случае отсутствие такого процесса, т.е частичное равновесие системы. Естественно, что нарушить такое состояние можно лишь воздействием извне. Однако поскольку система замкнута, такие воздействия отсутствуют. Следовательно, такая система может двигаться только «по инерции» с сохранением величины и направления импульса **P.**

Рассмотрим теперь те дополнительные следствия, которые вытекают при рассмотрении механики как частного случая энергодинамики. Это прежде всего закон сохранения момента количества ее движения (закон Эйлера), который непосредственно следует из (2.1), если система обладает единственной вращательной степенью свободы ($\Sigma_i \Psi_i d\Theta_i = 0$; $\Sigma_i \mathbf{F}_i \cdot d\boldsymbol{R}_i = 0$):

$$\mathbf{M}_i = I_i \boldsymbol{\omega}_i = \text{const} . \qquad (2.4)$$

Оба этих закона – (2.3) и (2.4) – можно объединить в одном утверждении, сформулировав его следующим образом: «любое материальное тело сохраняет состояние своего движения или покоя, пока и поскольку оно не принуждается какими-либо силами изменить это состояние». Нетрудно видеть, что это утверждение обобщает 1-й закон Ньютона (закон инерции), распространяя его на вращающиеся системы и требуя признания легитимности понятия «вращения по инерции». Характерно, что при таком подходе закон инерции оказывается справедливым независимо от какой-либо теории физического вакуума или предположений относительно однородности и изотропности пространства и времени [4].

Таким образом, законы Ньютона (3.3) и Эйлера (3.4), относящиеся соответственно к поступательному и вращательному движению системы как целого, вытекают из энергодинамики как частные случаи. Однако теперь мы уже не можем утверждать, что «свободное» движение замкнутой системы «по инерции» всегда будет прямолинейным и равномерным – с той же степенью общности это можно сказать и по отношению к равномерно вращающимся телам.

Рассмотрим теперь более общий случай механической системы, не находящейся во внутреннем равновесии. В таких системах вследствие взаимодействия (относительного движения) её макроскопических частей (подсистем) возникают самопроизвольные процессы перераспределения массы, заряда, импульса и т.п. ($d\mathbf{r}_i/dt \neq 0$), вызывающие изменение их упорядоченной энергии ($dE/dt \neq 0$). Это становится особенно очевидным, если представить кинетическую энергию поступательного движения таких подсистем E^k_w в виде суммы кинетической энергии движения центра массы всей системы

$\frac{1}{2}\Sigma_k M_k \mathbf{v}^2$ и кинетической энергии относительного движения частей системы $\frac{1}{2}\Sigma_k M_k \mathbf{w}_k^2$ (где $\mathbf{v}$, $\mathbf{w}_k = \mathbf{v}_k - \mathbf{v}$ – скорость центра масс системы и относительная скорость перемещения ее частей в системе центра масс). Эта кинетическая энергия относительного движения частей системы может уменьшаться вследствие действия сил вязкости. Аналогичным образом ведет себя кинетическая энергия вращательного движения частей системы $E^k_\omega = \frac{1}{2}\Sigma_k I_k \boldsymbol{\omega}_k^2$, которую также можно представить в виде суммы кинетической энергии вращения системы как целого $\frac{1}{2}\Sigma_k I_k \boldsymbol{\omega}^2$ и кинетической энергии относительного вращения частей системы $\frac{1}{2}\Sigma_k I_k(\boldsymbol{\omega}_k - \boldsymbol{\omega})^2$. Последняя также может уменьшаться за счет действия сил вращательной вязкости. Поэтому при составлении математической модели таких систем необходимо учитывать возможность изменения не только импульсов $\mathbf{P}_k = M_k \mathbf{v}_{\mathrm{k}}$ k–х компонентов (макроскопических частей) системы, но и моментов количества движения $\mathbf{L}_k = I_k \boldsymbol{\omega}_k$ (где I_k – моменты их инерции). В таком случае закон сохранения энергии (3.1) принимает для них вид:

$$\Sigma_k \mathbf{P}_k \cdot d\mathbf{v}_k/dt + \Sigma_k \mathbf{M}_k \cdot d\boldsymbol{\omega}_k/dt = \Sigma_k \mathbf{F}_k \cdot \mathbf{v}_k + \Sigma_k \mathbf{M}_k \cdot \boldsymbol{\omega}_k. \qquad (2.5)$$

Отсюда следует, что при отсутствии внешних сил $\mathbf{F}_k$ и их моментов $\mathbf{M}_k$ в правой части (2.5) сохраняется лишь сумма энергий поступательного и вращательного движения $E^k_w + E^k_\omega$, но не каждая из них в отдельности. Подобное происходит, например, при переходе ламинарного движения в турбулентное и обратно. Это положение сохраняет силу и в том случае, когда законы сохранения импульса и его момента

$$\mathbf{F}_k = d\mathbf{P}_k/dt\,;\ \mathbf{M}_k = d\mathbf{L}_k/dt \qquad (2.6)$$

выполняются для каждой k-й части рассматриваемой системы по отдельности. Однако в изолированной системе наряду с внешними могут существовать и внутренние силы $\mathbf{F}_k = -(\partial Э/\partial \mathbf{P}_k)$ и их моменты $\mathbf{M}_k = -(\partial Э/\partial \mathbf{L}_k)$. В таком случае импульсы k-х частей системы $\mathbf{P}_k = M_k \mathbf{v}_k$ и их моменты $\mathbf{L}_k = I_k \boldsymbol{\omega}_k$ в соответствии с (2.6) с необходимостью изменяются даже в условиях сохранения импульса системы в целом $\mathbf{P} = \Sigma_k M_k \mathbf{v}_k$ и момента количества её движения $\mathbf{L} = \Sigma_k I_k \boldsymbol{\omega}_k$. Это указывает на взаимное влияние сил и моментов одних подсистем на другие, т.е. на взаимное превращение энергии их поступательного и вращательного движения. Как принято говорить в неравновесной термодинамике, у импульсов и энергий поступательного и вращательного движения в таком случае существуют внутренние источники $d_s\mathbf{P}_k$, $d_s\mathbf{M}_k$ и $d_sE^k{}_w$, $d_sE^k{}_\omega$. Они связаны между собой уравнениями баланса, согласно которым возникновение источников у одной из этих величин неизбежно связано с появлением стоков у другой. Таким образом, в пространственно неоднородных средах упомянутое выше взаимное превращение энергии их поступательного и вращательного движения диктуется законами энергодинамики. Об этом же свидетельствуют и результаты экспериментов, проведенных Н.В. Филатовым (1969) с инерцоидами [8]. В этих экспериментах исследовалось столкновение двух массивных тел, установленных на тележках. Одно из тел представляло собой гироскопы, закрепленные на карданових подвесах и вращающиеся в разные стороны с одинаковой угловой скоростью для взаимной компенсации их моментов. В экспериментах гироскопы сталкивались без проскальзывания с обычной массой, установленной на другой тележке. Этот процесс фиксировался на кинопленке со скоростью 2000 кадров в секунду и затем подвергался обработке с целью определить скорость центра масс системы до и после столкновения. В результате большого числа экспериментов было установлено, что в случае, когда после удара начиналась прецессия гироскопов, центр масс системы изменял свою скорость. Тем самым была обнаружена возможность взаимопревращения энергии поступательного движения в кинетическую энергию прецессии гироскопов. В 1983 г. подобные эксперименты были проведены А.П. Гладченко с инерциоидами В.Н. Толчина – гироскопа, в котором установлен дополнительно мотор-тормоз для управления скоростью его центра масс. Перемещение тележки с гироскопом и мотором-тормозом фиксировалось на кинопленке.

Чтобы более наглядно объяснить смещение центра масс инерциоида при изменении кинетической энергии относительного вращения его частей, обозначим моменты инерции двух противоположно вращающихся их частей и их угловые скорости соответственно через I_1 , I_2 и $\boldsymbol{\omega}_1$, $\boldsymbol{\omega}_2$, а радиус-векторы их центров – соответственно через $\mathbf{R}_1$ и $\mathbf{R}_2$. Тогда в соответствии с общим определением момент распределения количества вращательного движения в такой системе определится выражением:

$$\mathbf{Z}_\omega = I_1\boldsymbol{\omega}_1\mathbf{R}_1 + I_2\,\boldsymbol{\omega}_2\mathbf{R}_2\,. \qquad (2.7)$$

Поскольку $\boldsymbol{\omega}_2 = -\,\boldsymbol{\omega}_1$, а $I_1 = I_2$, этому выражению можно придать вид:

$$\mathbf{Z}_\omega = I_2\boldsymbol{\omega}_2\Delta\mathbf{R}_\omega, \qquad (2.8)$$

где $\Delta\mathbf{R}_\omega = \mathbf{R}_2 - \mathbf{R}_1$ – смещение центра инерции системы вращающихся грузов вследствие противоположной направленности угловых скоростей вращения $\boldsymbol{\omega}_1$ и $\boldsymbol{\omega}_2$. Поскольку силы, вызывающие такое смещение, являются внутренними, то и вызванные ими изменения момента распределения импульса вращательного движения $\mathbf{Z}_\omega$ следует отнести к внутренним источникам или стокам $d_s\mathbf{Z}_\omega$ этой величины. В соответствии с уравнением баланса источников и стоков, соответствующие источники или стоки должны возникнуть и у момента распределения импульса поступательного движения $\mathbf{Z}_w$ (ибо другими степенями свободы установка не располагает). Это означает, что в системе инерциоид – окружающая среда может возникнуть относительное их перемещение вследствие перераспределения в ней положения центра массы и центра инерции вращательного движения. Тем самым энергодинамика впервые предоставляет теоретическую базу для объяснения движения инерциоидов.

3. Принцип силы (второй закон Ньютона). Единый метод нахождения сил.

Второй закон Ньютона вводит понятие силы. И. Ньютон сформулировал этот закон следующим образом: «*Изменение количества движения пропорционально приложенной действующей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует*»:

$$\mathbf{F} = d\mathbf{P}/dt\,. \qquad (3.1)$$

В этом выражении сила выступает как причина возникновения только процесса ускорения. Между тем физике и естествознанию в целом приходится иметь дело с силами, являющимися причиной возникновения и других процессов (перемещения, расширения, электризации, химических и ядерных превращений, диффузии, теплообмена, массообмена и т.п. Поэтому выражение (3) следует рассматривать скорее как частный случай ускоряющей силы, а не как определение понятия силы. Более общее определение силы дает энергодинамика выражением (2.1), из которого в отсутствие процессов переориентации следует:

$$\mathbf{F}_i \equiv -(\partial Э/\partial \mathbf{R}_i) . \qquad (3.2)$$

Это выражение отражает единство сил различной природы в самом их определении. В частности, если $\mathbf{R}_i$ – вектор, характеризующий неоднородность распределения массы какой-либо системы в пространстве (отклонение центра массы от его положения при равномерном распределении плотности), то сила $\mathbf{F}_i$ определяет поле тяготения. Если $\mathbf{R}_i$ – вектор смещения свободных зарядов, сила $\mathbf{F}_i$ определяет электростатическое поле, и т.д. Следовательно, *силовые поля порождены не массами, зарядами или токами, а их неоднородным распределением в пространстве*. Иными словами, истинным *полеобразующим фактором* является неоднородность.

Несложно показать, что выражение ускоряющей силы $\mathbf{F}$ следует из него как частный случай. Учитывая, что эта сила вызывает отклонение от равновесия (так что ее знак противоположен силе $\mathbf{F}_i$), на основании (3.2) имеем:

$$\mathbf{F} \equiv (\partial Э/\partial \mathbf{R}_m) = \partial(M\mathrm{v}^2/2)/\partial \mathbf{R}_m = M\mathrm{v}\nabla\mathrm{v} = M\mathbf{a} , \qquad (3.3)$$

где v, $\mathbf{R}_m$ – модуль скорости и радиус-вектор центра масс системы.

Характерно, что именно представление ускорения в форме $\mathbf{a} = \mathrm{v}\nabla\mathrm{v}$ позволяет записать работу ускорения $đW_w^{\mathrm{e}}$ в той же форме, что и для других видов работ:

$$đW_w^{\mathrm{e}} = \mathbf{F}\cdot d\mathbf{R}. \qquad (3.4)$$

Несложно также показать, что определение (3.2) применимо и к понятию центробежной силы, если учесть, что $\mathbf{v} = \omega\mathbf{R}_ц$

$$\mathbf{F}_ц \equiv (\partial E/\partial \mathbf{R}_ц) = \partial(M\mathbf{v}^2/2)/\partial \mathbf{R}_ц = M\omega^2\mathbf{R}_ц, \qquad (3.6)$$

На этом основании именно соотношение (3.2) следует считать аналитическим выражением 2-го закона Ньютона, а не соотношение $\mathbf{F} = M\mathbf{a}$, относящееся только к процессу ускорения. Об универсальности выражения (3.2) свидетельствует также возможность находить не только внешние, но и внутренние силы, что принципиально важно при изучении изолированных систем.

Обсудим теперь специфику «сил инерции». До сих пор не утихают споры относительно того, реальны ли эти силы, являются ли они активными или пассивными, относятся ли они к внутренним или внешним силам, присущи ли они всем видам движения или относятся только к процессу ускорения и т.п. [5].

Решение этого вопроса облегчается, если всю совокупность взаимодействующих тел рассматривать с позиций энергодинамики как единое целое. В таком случае все силы становятся внутренними. Как показано выше, такие силы возникают только парами и одновременно, поэтому вопрос о том, какая из них первична, отпадает сам собой. Обе они реальны и являются следствием действия пары сил иной природы, вызвавших процесс превращения энергии. В этом смысле они обе являются силами реакции. Вместе с тем подобно любым силам они либо вызывают напряженное состояние системы, либо порождают процесс. В первом случае они становятся функциями неравновесного состояния (подобно реакции опор), во втором – функциями процесса. Именно к последним и относятся силы инерции. Они существуют только тогда, когда процесс реально протекает, и исчезают, когда процесс прекращается. ($\mathbf{J}_i \neq 0$). Это с необходимостью следует из закона Ньютона (3.1), согласно которому в отсутствие ускорения (при $\mathbf{a} = 0$) силы инерции $\mathbf{F}$ отсутствуют. Таковы же кариолисовы силы и магнитная составляющая сил Лоренца. Следовательно, силы инерции являются не *функциями состояния*, а *функциями процесса*. Суммируя изложенное, силы инерции можно определить *как разновидность сил реакции, являющиеся функцией процесса*. Поэтому любые утверждения о наличии в природе специфических «полей» этих сил [5] несостоятельны.

Указанное обстоятельство вскрывает также ошибочность мнения, будто понятие силы инерции не может быть обобщено на немеханические процессы. Такое сужение понятия инерции противоречит принципу ле Шателье–Брауна, согласно которому любое внешнее воздействие на систему вызывает в ней такие изменения состояния, которые стремятся ослабить результат этого воздействия.

4. Принцип равенства действия и противодействия (третий закон Ньютона) и его расширенная трактовка

Свой третий закон (постулат) И. Ньютон формулирует в виде утверждения: «*Действию всегда соответствует и равная реакция*». Обычно это положение записывают в виде:

$$\mathbf{F}^a = - \mathbf{F}^p , \qquad (4.1)$$

где $\mathbf{F}^a$, $\mathbf{F}^p$ – активные силы и силы реакции. Эти силы приложены к разным телам и потому не компенсируются.

Чрезвычайно важно показать, что постулированное этим законом единство и противоположность сил является следствием того, что любые силы возникают и исчезают *только парами*. Для этого рассмотрим наиболее общий случай замкнутой системы, включающей всю совокупность взаимодействующих тел. Для такой системы все действующие в ней силы любой i-й природы являются внутренними, не имеющими результирующей $\mathbf{F}_j$. Пусть $\mathbf{f}_j$ (Н/м²) – удельная сила, приложенная к единице поверхности f (м²) произвольной замкнутой системы в направлении нормали $\mathbf{n}$ к ней. Тогда результирующая этих сил $\mathbf{F}_j$, представляющая собой интеграл от $\mathbf{f}_j$ по замкнутой поверхности f, собой $\mathbf{F}_j = \int \mathbf{f}_j \cdot \mathbf{n} df$, всегда равна нулю. Применяя к этому выражению теорему Гаусса, имеем:

$$\mathbf{F}_j = \int \mathbf{f}_j \cdot \mathbf{n} df = \int \mathrm{div} \mathbf{f}_j \, dV = 0. \qquad (4.2)$$

Это означает, что если в любом элементе dV объема такой системы $\mathrm{div}\mathbf{f}_j$ отлична от нуля (т.е. $(\partial \mathbf{F}_j/\partial V) \neq 0$), то в другом элементе объема она должна иметь противоположный знак (противоположное направление). Иными словами, любая внутренняя сила имеет противодействующую, что и предстояло доказать. Это положение можно назвать *принципом парности сил*: *внутренние силы в неоднородных системах возникают и исчезают только парами*. Такие силы не без основания называются *внутренними напряжениями*. Они и порождают в пространственно неоднородных системах внутренние процессы превращения энергии, являющиеся предметом изучения энергодинамики. В системах, обладающих несколькими степенями свободы, эти напряжения имеют разную природу. Этим и обусловливается преобразование энергии, характер которого зависит от природы преодолеваемых сил. В частности, если внутренняя сила имеет неупорядоченный характер, происходит процесс «рассеяния энергии», т.е. превращение части упорядоченной внутренней энергии в хаотическую (тепловую).

Деление сил в (4.1) на активные (действующие), и силы реакции (противодействующие) отражают причинно-следственные связи. При этом сам Ньютон не раз подчеркивал, что действие силы следует оценивать произведением величины приложенной силы $\mathbf{F}_i$ на скорость вызванного ею перемещения объекта ее приложения $\mathbf{v}$. При этом И. Ньютон ссылался на закон действия рычага Архимеда, который он формулирует следующим образом: «*Сколько проигрываем в скорости, столько выигрываем в силе*». Это позволяет расширить формулировку третьего закона, понимая под действием количественную меру произведенной работы. С этой целью приложим закон сохранения энергии в форме (3.1) к произвольной пространственно неоднородной системе, совершающей механическую работу, простейшим примером которой служит упомянутый рычаг Архимеда. Плечи его перемещаются в противоположных направлениях со скоростями $\mathbf{v}_1$ и $\mathbf{v}_2$ под действием сил $\mathbf{F}_1$ и $\mathbf{F}_2$. Поскольку для такой системы все параметры Θ_i остаются неизменными, уравнение (3.1) принимает вид:

$$\mathbf{F}_1 \cdot \mathbf{v}_1 + \mathbf{F}_2 \cdot \mathbf{v}_2 = 0 . \tag{4.3}$$

Это выражение представляет собой не что иное, как закон сохранения энергии (точнее, мощности) применительно к механическим явлениям. Действительно, лишь в частном случае, когда $\mathbf{v}_1 = \mathbf{v}_2$ (например, когда совершение работы сопровождается перемещением одной и той же границы раздела двух тел, или действие осуществляется без какого-либо промежуточного звена типа рычага), из (4.3) следует выражение (4.1). Поэтому именно соотношение (4.3) следует считать общей математической формой третьего закона Ньютона, а не его частный случай (4.1).

Следует также заметить, что в формулировке третьего закона Ньютона, соответствующей выражению (4.3), отсутствует требование, чтобы силы действия $\mathbf{F}^a$ и противодействия $\mathbf{F}^p$ были направлены по одной прямой. В механике Ньютона, исключавшей из рассмотрения вращательное движение тел, это требование было само собой разумеющимся. Однако с позиций энергодинамики, учитывающей наличие крутящих моментов, обусловленных именно несовпадением линий действия встречных сил, это требование является чрезмерным. Снятие этого требования позволяет в дальнейшем устранить известное противоречие с третьим законом Ньютона в случае взаимодействия проводников с током, когда силы действия и противодействия оказываются направленными не по одной прямой [10].

5. Теоретический вывод закона всемирного тяготения

Опираясь на законы Кеплера, И. Ньютон на основании имевшихся на то время данных о массах небесных тел и расстояниях между ними расчетным путем установил, что сила притяжения двух точечных масс m и M прямо пропорциональна их произведению и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними R. Позднее Кавендиш экспериментально доказал, что этот закон обратных квадратов справедлив и для земных тел, вычислив при этом массу Земли и постоянную гравитации G_g. Так родился закон Всемирного тяготения

$$\mathbf{F}_g = G_g mM/R^2, \tag{5.1}$$

влияние которого на историю науки невозможно переоценить.

До сих пор этот закон рассматривался как чисто экспериментальный и не выводимый из каких-либо первичных принципов. Тем привлекательней представляется получить его из энергодинамики как следствие неоднородности распределения масс в пространстве. Как следует из универсального определения понятия силы, данного выражением (3.2), любая, в том механическая сила исчезает, если распределение энергоносителя в пространстве равномерно, т.е. поле его плотности $\varrho_i(\mathbf{r},t)$ однородно, поскольку в таком случае $\mathbf{F}_i \equiv -(\partial Э/\partial \mathbf{R}_i) = 0$. В частности, известно, что в центре однородной массивной сферы гравитационное поле отсутствует. Это означает, что силовые поля создаются не массами, зарядами или элементарными частицами, как это следует, например, из «Стандартной модели», а *их неравномерным распределением в пространстве*. Действительно, достаточно в законе тяготения Ньютона (5.1) положить одну из масс, M или m, равной нулю, т.е. считать массу сосредоточенной в некоторой точке пространства, или, наоборот, считать ее равномерно «размазанной» по всему пространству, как сила тяготения $\mathbf{F}_g$ исчезнет. Следовательно, силы гравитации появляются только там, где массы распределены неравномерно. В данном случае эта неоднородность для системы массой M характеризуется моментом распределения $\mathbf{Z}_m = M\Delta\mathbf{r}$, представляющим собой произведение массы тела M на величину смещения радиус-вектора центра массы $\mathbf{r}$ от его положения при однородном распределении. Соответственно для системы единичного объема момент распределения массы $\mathbf{Z}_{mV} = \partial\mathbf{Z}_m/\partial V$ будет определяться произведением плотности системы $\varrho = \partial M/\partial V$ на величину смещения радиус-вектора $\mathbf{r}$ его центра $\Delta\mathbf{r}$, т.е. $\mathbf{Z}_{mV} = \varrho\Delta\mathbf{r}$. Отсюда как частный случай следует, что $\varrho = \nabla\cdot\mathbf{Z}_{mV}$, т.е. определяется дивергенцией вектора смещения массы точно так же, как в электродинамике плотность свободного электрического заряда ϱ_e определяется дивергенцией вектора электрического смещения $\mathbf{D}$ в единице объема проводника ($\varrho_e = \nabla\cdot\mathbf{D}$). Благодаря такому представлению массу M сплошной среды можно выразить интегралом от $\nabla\cdot\mathbf{Z}_{mv}$:

$$M = \int \varrho dV = \int \nabla \cdot \mathbf{Z}_{mV} \, dV. \qquad (5.2)$$

Переходя в этом выражении на основании теоремы Гаусса от интеграла по объему к интегралу по замкнутой поверхностности f, имеем:

$$M = \int \mathbf{Z}_{mV} \cdot \mathbf{n} df. \qquad (5.3)$$

Это выражение справедливо для тела любой формы. Поэтому выберем для удобства сферическую поверхность $f = 4\pi r_c^2$ (где r_c – радиус сферы, заполненной массой M). Тогда вместо (5.3) имеем:

$$M = 4\pi \int \mathbf{Z}_{mV} \cdot \mathbf{n} r_c \, dr_c. \qquad (5.4)$$

Неравномерность распределения массы порождает удельную силу $\mathbf{X}_g = -(\partial Э/\partial \mathbf{Z}_{mV}) = M^{-1}(\partial Э/\partial \mathbf{r}) = \mathbf{F}_g/m$. Эта сила связана с параметром $\mathbf{Z}_{mV}$ уравнением состояния общего вида $\mathbf{Z}_{mV} = \mathbf{Z}_{mV}(\mathbf{X}_g)$. Полагая эту зависимость пропорциональной на том основании, что обе величины ($\mathbf{Z}_{mV}$ и $\mathbf{X}_g$) исчезают одновременно, и обозначая коэффициент пропорциональности через ε_g), вместо (5.4) можно написать:

$$M = 4\pi\varepsilon_g \int \mathbf{X}_g \cdot \mathbf{n} \, r_c \, dr_c. \qquad (5.5)$$

Произведение $\mathbf{X}_g \cdot \mathbf{n}$ характеризует абсолютную величину $X_g = |\mathbf{X}_g|$ силы, действующей в направлении нормали к поверхности сферы. Эта сила, как известно, внутри тела равна нулю и терпит разрыв на поверхности тела. Однако формула Гаусса справедлива и в этом случае, если чего достаточно перейти к так называемой поверхностной дивергенции $X_g(+r_c) - X_g(-r_c)$, т.е. к разности сил по обе стороны поверхности сферы. Поскольку $X_g(-r_c) = 0$, вместо (5.5) имеем:

$$X_g = G_g M/r_c^2, \qquad (5.6)$$

где $G_g = 1/4\pi\varepsilon_g$ – коэффициент пропорциональности, определяемый экспериментально и называемый обычно гравитационной постоянной.

В стационарном поле $X_g = - d\psi_g/d\mathbf{r}$, так что из (5.6) путем интегрирования (5.6) в пределах от r_c до r легко найти гравитационный потенциал $\psi_g = -\int X_g dr$ в любой точке $r_c \geq r_c$:

$$\psi_g = G_g M\,(1/r_c - 1/r).\ (r \geq r_c). \qquad (5.7)$$

Гравитационный потенциал ψ_g представляет собой, как известно, силу тяготения, отнесенную к единице массы пробного тела m. Поэтому сила $\mathbf{F}_g = m\psi_g$, найденная из этого выражения, в точности соответствует закону тяготения (5.1). Однако согласно выражению (5.7), потенциальная энергия тяготеющих масс обращается в нуль не при их бесконечном удалении (как это следует из выражения (5.1), а, напротив, когда они занимают одно и то же пространство, что вполне соответствует экспериментальным фактам. Как частный случай, из него следует тот факт, что при однородном распределении масс (в том числе внутри тела с однородной плотностью) сила тяготения равна нулю (потенциал ψ_g постоянен). Следовательно, внутри тяготеющих тел закон тяготения Ньютона (5.1) не действует, т.е. область его справедливости ограничена условным (эквивалентным) радиусом сферы «полеобразующего» тела M (областью $r \geq r_c$). Другое отличие закона тяготения (5.7) состоит в том, что потенциал ψ_g и сила тяготения $\mathbf{F}_g$ не обращаются при $r \rightarrow 0$ в бесконечность. Это снимает «проблему расходимостей», которая, как выясняется, не возникает при теоретическом выводе этого закона и обусловлена, следовательно, произвольной экстраполяцией результатов наблюдения за небесными телами конечных размеров на «точечные» объекты, не имеющие протяженности. Учет минимального расстояния r_c , на которое можно сблизить пробную массу m с массой M, решает эту проблему. Действительно, каким бы ни было значение r_c, при $r_c = r_c$ потенциал $\psi_g = 0$. Это обстоятельство имеет непосредственное отношение к вопросу о соотношении гравитационных и электростатических сил, действующих в атомах. Поскольку в ядрах атомов величина r_c на много порядков меньше, чем соответствующая величина для их электронных оболочек, то и силы тяготения меду ядерными частицами оказываются не столь уж отличными от кулоновских сил отталкивания. Этим, возможно, и объясняется устойчивость атомов.

Еще более важно, что вопреки сложившимся представлениям потенциальная энергия тяготеющих масс не может быть величиной отрицательной. Это соответствует данному в энергодинамике общему определению понятия энергии как наиболее общей функции состояния системы, характеризующей ее способность совершать любую (упорядоченную или неупорядоченную) работу.

6. Обоснование принципа наименьшего действия

Одним из основополагающих принципов механики считается «принцип наименьшего действия». Касаясь истории этого принципа, нельзя не отметить, что он был сформулирован еще тогда, когда даже не существовало таких понятий как энергия и закон ее сохранения. Первым «принцип наименьшего действия» сформулировал Мопертюи (1744). Согласно его формулировке, относящейся к стационарным условиям, *для действительного пути материальной точки в консервативном силовом поле интеграл от импульса частицы, взятый по отрезку траектории между какими-либо двумя ее точками, минимален по сравнению с такими же интегралами, взятыми по отрезкам других кривых*.

Эта и другие формулировки названного далеко не очевидного принципа исходили не из физического смысла действия или каких-либо фундаментальных законов естествознания, а базировались на вере ученых того времени в то, что все процессы в природе происходят с определенной целью и протекают наиболее рациональным (экономным) путем. Естествоиспытатели видели в этом принципе «философский камень» для открытия всех законов природы. Оставалось только найти критерии, по которым природа определяет достижение своей цели. Так, Лаплас считал, что «истинная цель природы есть экономия живой силы» (т.е., в современной терминологии, работы). Этой же точки зрения придерживался и Лагранж, который считал, что этот принцип «с бóльшим основанием следовало бы назвать принципом экстремальной живой силы».

Первым, кто придал принципу наименьшего действия статус общего закона механики, был Г. Гельмгольц. Сохранив существо принципа, он, в отличие от других исследователей, взял в качестве исходной, первичной величины лагранжеву функцию объекта исследования $L = E^{к} – E^{п}$, понимая под ней разность между его кинетической $E^{к}$ и потенциальной $E^{п}$ энергией. Эта функция выражалась через обобщенные координаты $\mathbf{r}_i$ и импульсы $\mathbf{p}_i$ всех N частиц системы ($i= 1,2,\ldots, N$), что делало лагранжиан $L[\mathbf{r}_i (t), \mathbf{p}_i (t), t]$ функцией времени t. В соответствии с этим принцип наименьшего действия записывается в механике в виде функционала

$$D(t) = \int L[\mathbf{r}_i (t), \mathbf{p}_i (t), t]dt = \min. \tag{6.1}$$

Из свойств экстремума этой функции Гельмгольцу удалось вывести законы движения целого ряда систем. После того, как этот принцип был с успехом применен в электродинамике, а затем и в теории тяготения, ряд авторитетных ученых стали считать его применимым и к тем явлениям, которые еще предстоит изучить. Постепенно эта идея Гельмгольца «находить формулировки для законов новых классов явлений» трансформировалась в попытки превратить физику в науку, которая позволяла бы «свести все физические постоянные к математическим».

Между тем до настоящего времени не увенчались успехом не только попытки обосновать принцип наименьшего действия, исходя из каких-либо общих и твердо установленных законов, но даже понять физический смысл функции Лагранжа. В этом отношении энергодинамика представляет новые возможности. Прежде всего, заметим, что если интегрирование (3.6.1) осуществлять в одном и том же интервале времени $t_2 - t_1$, действие $D(t)$ с точностью до постоянной $E\Delta t$ соответствует интегралу $\int 2E^к dt$, выражающему действие по Мопертюи. Представляя $E^к$ через массу m исследуемого тела и скорость его движения $\mathbf{v} = d\mathbf{r}/dt$ (где $\mathbf{r}$ – радиус-вектор центра его массы), принцип действия Мопертюи можно представить в виде:

$$D(t) = \int m\mathbf{v}\cdot d\mathbf{r} = \min. \tag{6.2}$$

Нетрудно заметить, что в (6.2) подынтегральное выражение представляет собой частный случай более общего выражения приращения момента распределения $d\mathbf{Z}_i = \Theta_i d\mathbf{r}_i$ носителя i-й формы движения Θ_i. При этом $\Theta_i \equiv \Theta_w$, т.е. представляет собой импульс тела $\mathbf{P}$, а $\mathbf{r}_i = \mathbf{r}_w$ выражает смещение центра инерции вследствие перераспределения поля скоростей. Наглядным примером такого перераспределения является профиль скорости в потоке жидкости, скорость в ядре которого выше средней, а в пограничном слое – снижается до нуля. В таком случае принцип наименьшего действия приобретает смысл условия минимума момента распределения импульса $\mathbf{Z}_w = \Theta_w \mathbf{r}_w$, вызванного отклонением системы от состояния с однородным полем скоростей (динамического равновесия):

$$D(t) = \mathbf{Z}_w = \int \Theta_w d\mathbf{r}_w = \min . \tag{6.3}$$

Таким образом, принцип наименьшего действия является простым следствием энергодинамических условий равновесия, отражающих стремление неравновесной (упорядоченной) энергии системы E как функции моментов распределения $E = E(\mathbf{Z}_i)$ к нулю. Согласно им, убыль упорядоченной энергии сопровождается уменьшением $\mathbf{Z}_i$ до нуля, что позволяет проследить за эволюцией каждой степени свободы системы в отдельности. Таким образом, энергодинамика вскрывает физический смысл действия как *принуждения, удаляющего динамическую систему от состояния внутреннего равновесия*, т.е. порождающего неоднородность поля скоростей. Тем самым находит объяснение как поразительная универсальность принципа наименьшего действия, так и его независимость от изначального допущения о консервативности системы (сохранении в ней суммы потенциальной и кинетической энергии). Действительно, существование моментов распределения импульса $\mathbf{Z}_w$ как функции неравновесного состояния не зависит от того, каким путем пришла система в это состояние.

Вряд ли необходимо доказывать, что классическая механика, не рассматривавшая внутреннее движении в исследуемых телах, была не в состоянии обосновать принцип минимального действия, который является следствием стремления систем к внутреннему равновесию. Между тем именно благодаря диссипации и достигается минимум величины $\mathbf{Z}_w$. Учет этого обстоятельства и объясняет универсальность принципа минимального действия в его приложении к механике сред с памятью, термодинамике, гидро-аэродинамике и электродинамике.

Все это показывает, насколько полезным может быть рассмотрение классической механики как следствия энергодинамики.

Литература

1. Эткин В.А. Энергодинамика (синтез теорий переноса и преобразования энергии). – СПб, Наука, 2008. 409 с.
2. Пуанкаре А. Избранные труды. Т.3. - М.: Наука, 1974.
3. Де Бройль Луи. Революция в физике. (Новая физика и кванты). М.: Атомиздат, 1965.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т.1. – М.: Наука, 1973.
5. Шипов Г.И. Теория физического вакуума. – М. , Наука, 1997. 450 с.
6. Ньютон И. Математические начала натуральной философии.– Петроград, 1916 г.
7. Хаазе Р. Термодинамика необратимых процессов. М.: Мир, 1967.
8. Филатов Н.В. Исследование удара тел с большими кинетическими моментами. Письмо к Чичерину В.Г.18.07.1969.

9. Толчин В.Н. Инерцоид, силы инерции как источник движения. Пермь, 1977.
10. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. – М.: Мир, 1976. Т. 6.