УДК 524.827+531.51+530.12+530.16+535.14+537.8+539.17

Олейник В.П.

ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА МАССЫ ЧАСТИЦЫ. РЕЛЯТИВИСТСКАЯ МЕХАНИКА НА ОСНОВЕ УСКОРЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ПО ИНЕРЦИИ

Институт высоких технологий
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко
ул. Владимирская, 64, Киев, 01601, Украина
e-mail: valoleinik@gmail.com

Работа посвящена решению центральной проблемы физики — проблемы движения. Раскрыта физическая природа массы частицы с точки зрения механики. Получено дифференциальное уравнение для массы частицы m, определяющее зависимость массы от скорости движения v: $m=m(v)$. Частица рассматривается как простейший структурный элемент движущейся материи, способный к собственным ускоренным движениям в отсутствие действующих на частицу внешних полей. Указанные движения ответственны за формирование зависимости массы от скорости. Уравнение для массы частицы следует из условия стабильного развития движущейся материи. Зависимость $m=m(v)$ исследована как для нерелятивистской частицы, так и для релятивистской. Согласно полученным результатам, уравнение для массы релятивистской частицы существенно отличается от соответствующего уравнения, описывающего нерелятивистскую частицу. Это объясняется тем, что процесс формирования массы частицы протекает по-разному при движении в евклидовом пространстве и в 4-мерном пространстве-времени. При движении релятивистской частицы по инерции, т.е. в отсутствие внешних полей, оказывается существенной связь частицы с пространством-временем, в котором происходит движение. Благодаря этой связи частица обладает энергией покоя, которая и проявляется при формировании зависимости массы от скорости.

Существует два типа ускоренных движений материи — вынужденные движения (ВД) и собственные движения (СД) структурных элементов материи (частиц). Различие между ними состоит в том, что ВД совершаются под действием внешних сил, т.е. являются следствием действия внешних сил, вызывающих ускорение, а СД, будучи атрибутом материи, не имеют причины своего появления в виде силы, действующей на частицу. На частицу, совершающую СД, действует сила (мы называем ее силой инерции), но она является следствием ускоренных СД, а не их причиной.

В настоящее время в теоретических исследованиях широко используется принцип наименьшего действия (ПНД). Анализ показывает, что ПНД имеет ограниченную область применимости: он описывает лишь ВД, т.е. движения, которые происходят под действием внешней силы, являющейся их причиной. Попытка применить ПНД к собственным движениям материи приводит к движениям свободных частиц, которые не способны ни на что иное, кроме простого перемещения в пространстве с постоянной скоростью, т.е. к движениям частиц мертвой материи. Подчеркнем, что реальные движения частиц по инерции, происходящие в природе, являются ускоренными СД. На движения тел по инерции, как на ускоренные движения, впервые указал Галилео Галилей, который утверждал, что движением по инерции является равномерное круговое движение, например, движение Земли вокруг Солнца [1,2].

Собственные движения первичны, поскольку являются атрибутом материи, а вынужденные движения, будучи следствием действия внешних полей, вторичны. Собственные движения играют в природе фундаментальную роль. Они порождают силы инерции, образующие силовые поля, с помощью которых материя наблюдает за движениями своих структурных составляющих, управляет ими, организуя и направляя их на создание новых структур. Именно эти движения ответственны за самоорганизацию материи, именно они порождают сознание и мышление. Благодаря именно собственным движениям материя порождает законы природы, которые каждый раз приводят в изумление человека, открывающего их.

Оценивая место, какое занимает в природе каждое из упомянутых выше движений, можно утверждать, что вынужденные движения — это мелкая рябь на поверхности океана, который порождается собственными движениями материи. Кризис современной физики обусловлен ее принципиальной неполнотой, вследствие которой

физика занимается изучением ряби на некоторой поверхности, даже не подозревая, что под поверхностью лежит огромный мир, полный тайн и загадок, который управляется собственными ускоренными движениями по инерции.

Ключевые слова: физическая природа массы частицы в механике, дифференциальное уравнение для массы, зависимость массы от состояния движения, собственные и вынужденные движения материи, ускоренные движения по инерции (УДИ) как причина непостоянства массы, релятивистская механика на основе УДИ, неразрывная связь УДИ с пространством-временем, ограниченность области применимости вариационного принципа.

1. Введение

Ньютоновская схема механики исходит из следующих положений, основанных, как полагают, на опытных данных:

1) выполняется принцип инерции, согласно которому свободная частица пребывает в состоянии равномерного прямолинейного движения ($\vec{v} = const$, $\vec{v}$ — скорость частицы) до тех пор, пока на нее не подействует внешняя сила;
2) масса частицы m является величиной, не изменяющейся со временем $(m = const)$;
3) поведение частицы массой m во внешнем поле подчиняется динамическому принципу, согласно которому уравнение движения имеет вид:

$$m\vec{a} = \vec{F}_{вн}, \tag{1}$$

4) где $\vec{a} = d\vec{v} / dt$ — ускорение частицы, $\vec{F}_{вн}$ – действующая на частицу внешняя сила.

В современной физике масса тела выступает в качестве одной из основных физических величин. Она входит в определение важнейших физических характеристик — импульса, силы, кинетической энергии, энергии взаимодействия между частицами и др., определяя инерционные и гравитационные свойства материи. Масса считается генератором гравитационного поля. Полагают, что частица, обладающая массой и находящаяся в состоянии покоя в инерциальной системе отсчета, порождает гравитационное поле. Физический механизм этого процесса, однако, до сих пор не известен. Положение о постоянстве массы (например, массы элементарных частиц) принимается безоговорочно, хотя имеющиеся экспериментальные данные [3] вызывают сомнение в его истинности. Согласно [4], «природа массы — одна из важнейших еще не решенных задач физики», «количественная теория массы еще не создана».

Из уравнения движения (1) следует, что в отсутствие внешней силы, т.е. при $\vec{F}_{вн} = 0$, ускорение частицы массой m ($m \neq 0$) обращается в нуль: $\vec{a} = 0$ и, следовательно, скорость частицы $\vec{v} = const$. Значит, частица, не подверженная действию внешней силы, т.е. свободная частица, движется равномерно и прямолинейно. Такое движение называют движением по инерции. В механике Ньютона положение о существовании движения по инерции принимается в качестве первого закона движения. Приведенная выше в п.1 формулировка принципа инерции принадлежит Рене Декарту, хотя истинным автором открытия движения по инерции является Галилео Галилей, который под движением по инерции понимал вовсе не равномерное прямолинейное движение. Галилей считал движением по инерции равномерное криволинейное движение [1, 2]. По мнению Галилея, круговое движение Земли вокруг Солнца является движением по инерции.

Движение свободной частицы по инерции представляет собой, в сущности, математическую абстракцию, не имеющую отношения к физической реальности: это движение возникает при рассмотрении поведения одной-единственной частицы во внешнем поле в пределе, когда внешнее поле стремится к нулю $(\vec{F}_{вн} \to 0)$, и при условии, что не учитываются собственные движения материи (см. далее). Отметим, что в современных учебниках по физике творцом закона инерции справедливо называют Галилея, однако закон инерции формулируют по Декарту. Исходя из принципа инерции (по Декарту), вводят в рассмотрение инерциальные системы отсчета (ИСО), значение которых в общепринятом подходе определяется тем, что уравнения динамики, например, уравнения электромагнитного поля, справедливы только в ИСО. Благодаря Ньютону, понимание движения по инерции как равномерного прямолинейного движения сохраняется среди физиков в течение нескольких веков, хотя некоторые философы уже давно согласились с Галилеевым пониманием движения по инерции. Так, согласно Г.Гегелю, «притягивание представляет собой неподходящее выражение, правильнее сказать, что **планеты сами стремятся к Солнцу**» ([5], с.105).

Существование ускоренных движений по инерции, предсказанное еще Галилеем четыре века назад, означает, что в природе не выполняются принцип относительности и предположение о постоянстве массы электрона, лежащие в основе как теории относительности, так и квантовой электродинамики. Указанные теории, следовательно, нуждаются в коренном пересмотре.

Согласно динамическому принципу (1), внешнее поле $\vec{F}_{вн}$ выступает в качестве причины ускорения частицы. Следует подчеркнуть, что в механике Ньютона внешняя сила рассматривается как единственно возможная причина ускорения и поэтому ускоренное движение частицы является с необходимостью вынужденным ускоренным движением (УД).

Таким образом, в стандартном подходе признают лишь два типа движений — движение свободной частицы, т.е. движение по инерции по Декарту, получающееся при отключении внешнего поля, и вынужденное УД. Исследование проблемы движения показывает, однако, что, помимо указанных выше движений, должны существовать собственные движения структурных элементов материи, т.е. такие движения, которые обусловлены внутренними свойствами материи и никак не связаны с действием внешних полей. Чтобы разъяснить, что представляют собой собственные движения и чем они отличаются от вынужденных, напомним общие представления о материи и ее движениях.

Все, что нас окружает, представляет собой движущуюся материю — материю, которая непрерывно развивается. Материя — это первичная сущность, а ее движение — атрибут материи, т.е. врожденное, имманентное свойство структурных составляющих материи, внутренне присущее им по самой природе материи. Материя, как и каждый ее структурный элемент, в качестве простейшего из которых можно рассматривать классическую точечную частицу, находится в непрерывном движении. Это значит, что простейший элемент материи, например, точечная частица массой m, находящаяся в момент времени t в некоторой точке пространства в состоянии $\vec{r}, \vec{v}$ ($\vec{r}$ и $\vec{v}$ - радиус-вектор и вектор скорости частицы), переходит в следующий момент времени $t + dt$ в состояние $\vec{r} + d\vec{r}, \vec{v} + d\vec{v}$ ($d\vec{r}$ и $d\vec{v}$ — приращения радиус-вектора и вектора скорости за время dt). Указанный переход происходит самопроизвольно, в отсутствие каких-либо внешних полей. Его результатом является состояние движения частицы с ускорением $d\vec{v} / dt \equiv \vec{a}$. Если $\vec{a} \neq 0$, движение частицы является ускоренным, оно порождает действующую на частицу силу $\vec{F}$,

$$\vec{F} = d\vec{p} / dt \quad (\vec{p} \text{ — импульс частицы}). \qquad (2)$$

Описанное выше движение качественно отличается от вынужденного УД. Последнее вызывается насильственным путем — путем принуждения частицы к изменению состояния движения со стороны внешних, сторонних сил и описывается с чисто формальной, математической точки зрения как простое перемещение частицы в пространстве под действием некоторого внешнего поля, без проникновения в физический механизм процесса. В рассмотренном же выше переходе частица выступает в качестве структурного элемента движущейся материи, а движение предстает как атрибут материи, ее внутреннее свойство. Рассматриваемое здесь движение представляет собой простейший пример особого движения, которое естественно назвать **собственным движением материи,** поскольку его источником является сама материя. Такого рода движение, будучи атрибутом материи, является первичным понятием, наряду с понятием материи. По этой причине не может существовать каких-либо ограничений на физические характеристики собственного движения частиц, например, на ускорение $\vec{a}$ частицы, так что собственное движение частицы может быть ускоренным. Причиной ускоренных собственных движений материи не может служить внешняя сила. Эти движения происходят свободно, без принуждения со стороны внешних, сторонних сил. Принимая собственные движения материи за физическую реальность, мы выходим, следовательно, за рамки как механики Ньютона, так и всего общепринятого подхода в современной физике.

Очевидно, что вынужденное УД, в отличие от собственного, имеет вторичный характер, хотя в механике Ньютона оно относится к числу основных понятий и играет фундаментальную роль (см. (1)). Понятие вынужденного УД является вторичным по той причине, что частица не может перейти в это состояние движения самопроизвольно, без воздействия на нее со стороны внешнего поля. Однако понятие внешнего поля оказывается несколько туманным и неопределенным, поскольку внешнее поле может создать лишь некоторый дополнительный материальный объект, в качестве которого следует использовать, по-видимому, какой-либо структурный элемент материи. Следовательно, вынужденное УД можно рассматривать как такое собственное движение, которое вызывается действием некоторой внешней силы. Подчеркнем, что в механике Ньютона не учитываются собственные УД материи. Но именно эти движения ответственны за поведение материи как первичной реальности, именно они играют в природе первостепенную роль, формируя наиболее существенные черты всех материальных явлений и процессов, происходящих в мире. Уравнения движения (1) описывают лишь вынужденные УД частиц, которые могут дополнять собственные движения поправками, учитывающими действие на частицы внешних полей.

В связи с отмеченной выше расплывчатостью понятия внешнего поля, поля, которое сообщает частице вынужденное УД, напомним, что в стандартном подходе под заданным внешним полем понимают такое силовое поле, действующее в некоторой области пространства-времени, которое не искажается, не деформируется, если в указанную область внести какую-либо пробную частицу. При описании поведения системы многих частиц обычно исходят из представления о том, что силовое поле, действующее на отдельную частицу системы со стороны остальных частиц, можно рассматривать как заданное внешнее поле. Анализ показывает, однако, что такое представление глубоко ошибочно [6–8]. Так, если рассмотреть систему из двух классических точечных частиц, A и B, то оказывается, что при внесении в окрестность частицы A другой частицы, частицы B, силовое поле, порождаемое частицей A, существенно искажается, а также заметно изменяется исходное состояние движения частицы A. При этом происходит существенное деформирование как поля, образуемого частицей B, так и состояния движения этой частицы. Это означает, что силовое поле, порождаемое классической точечной частицей, качественно отличается от заданного внешнего поля. Характер силовых полей, порождаемых каждой из частиц в отдельности, существенно изменяется при учете взаимодействия между частицами, так что использование внешнего поля для описания взаимодействия между частицами недопустимо.

Отметим, что собственное и вынужденное УД обладают единственной общей физической характеристикой — ускорением (в каждом из них ускорение частицы $\vec{a} \neq 0$). Между остальными характеристиками имеется существенное различие. Так, в каждом из указанных движений на частицу действует сила. Но в случае вынужденных УД сила является внешней и служит причиной ускоренного движения частицы, а в случае собственных УД действующая на частицу сила порождается ускоренным движением, т.е. является следствием ускоренного движения; такую силу мы называем **силой инерции**. Принимая во внимание, что силы, действующие на частицу в собственном и вынужденном УД, играют существенно разные роли (в собственном движении они играют роль следствия УД, а в вынужденном — роль его причины), указанные виды ускоренных движений естественно рассматривать как диалектические противоположности. Следует подчеркнуть, что хотя материя и является источником собственных УД частицы, не существует порождающей их силы. Как отмечалось выше, собственные движения являются фундаментальным свойством движущейся материи, структурные элементы которой в своем движении непрерывно совершают, в отсутствие внешних полей, переходы из одного состояния движения в другое, и эти движения могут происходить с ускорением.

Необходимость и неизбежность существования собственных УД материи видна из следующих простых рассуждений. Согласно законам диалектики, любая физическая реальность представляет собой сосуществование диалектических противоположностей. Это значит, что если существует некоторый материальный процесс A, **который является причиной другого процесса, процесса** B, то с необходимостью должно существовать такое состояние материи, в котором процесс A **выступает в качестве следствия процесса** B. Иллюстрацией к этому выводу могут послужить уравнения движения механики $m\vec{a} = \vec{F}_{вн}$, согласно которым действующая на частицу внешняя сила $\vec{F}_{вн}$ **вызывает движение частицы с ускорением** $\vec{a}$. Опытные данные подтверждают существование такого вынужденного УД, причиной которого является сила $\vec{F}_{вн}$. Следовательно, в соответствии с законами диалектики, должен существовать и другой процесс, процесс вида $\vec{F}=m\vec{a}$, в котором сила $\vec{F}$ **выступает в качестве следствия движения частицы с ускорением** $\vec{a}$. Ускоренное движение частицы в этом процессе и является собственным УД, т.е. **причиной возникновения силы инерции** $\vec{F}$. Неизбежность существования такого собственного УД следует, таким образом, из данных опыта, подтверждающего, что внешняя сила вызывает ускорение.

Важный класс собственных УД составляют ускоренные движения частиц по инерции, которые мы определим следующим образом. Ускоренным движением по инерции (УДИ) мы называем такое собственное движение частицы, в котором действующая на частицу сила инерции $\vec{F}$ (2) не производит над частицей работы dA на каждом участке $d\vec{r}$ траектории движения, т.е. выполняется условие

$$dA=\vec{F}d\vec{r}=0, \quad \vec{F}\neq 0 . \tag{3}$$

УДИ представляет собой очевидное обобщение движения по инерции классической частицы, не подверженной действию внешних полей, на случай собственного ускоренного движения.

Возникает естественный вопрос: откуда берутся, в отсутствие внешних полей, УДИ и сопровождающие эти движения силы инерции? Ответ состоит в том, что УДИ представляют собой частный случай собственных УД: это такие собственные движения частиц, которые совершаются с ускорением, но не вызывают каких-либо энергетических потерь частицы (см. условие (3)). Физический механизм образования таких движений описан нами выше: переход структурных элементов материи (частиц) из одних состояний движения в другие неизбежно порождает собственные движения частиц, которые могут протекать как без ускорения, так и с ускорением. Действующие на частицы силы инерции выступают в качестве необходимого следствия собственных УД.

Вследствие того, что частицы, совершающие УДИ, не испытывают энергетических потерь, указанные движения, обеспечивая устойчивость и стабильность материи, играют определяющую роль в физических явлениях и процессах. УДИ структурных элементов материи порождают силы инерции, образующие силовые поля, с помощью которых материя наблюдает за движениями частиц, управляет ими, организуя и направляя их на создание новых структур. Именно эти движения ответственны за самоорганизацию материи, именно они порождают сознание, мышление, дух. Благодаря именно собственным движениям по инерции, материя способна мыслить и порождать законы природы, которые каждый раз приводят в изумление человека, открывающего их. В настоящее время мы пока не знаем конкретных физических механизмов, с помощью которых материя направляет УДИ своих составляющих элементов таким образом, чтобы процесс ее самосовершенствования шел по восходящей линии. Но открытие этих механизмов и их исследование уже стоит на повестке дня.

Принцип наименьшего действия (вариационный принцип) приводит к уравнениям движения (уравнениям Лагранжа), которые описывают движения рассматриваемых систем под действием внешних сил, т.е. вынужденные движения. Внешние силы выступают в качестве причины ускоренных движений, которые являются, таким образом, следствием действия внешних сил. Указанный принцип неспособен описать собственные УД материи, играющие основополагающую роль в природе. Это обусловлено тем, что, в отличие от вынужденных УД, собственные УД являются атрибутом материи. Следовательно, они принадлежат к числу первичных понятий, которые невозможно представить как следствие действия внешних сил — понятий, имеющих вторичный характер. Полученный результат можно сформулировать следующим образом. Физическая реальность, обладающая собственными ускоренными движениями, не может управляться в отсутствие внешних полей динамическими уравнениями, следующими из вариационного принципа. Она формируется собственными движениями, которые определяют ее поведение.

Равенство (3), выражающее собой условие стабильности движущейся материи, приводит к дифференциальному уравнению, которое определяет зависимость массы частицы от скорости: $m=m(v),\ v=|\vec{v}(t)|$. Указанная зависимость означает, по существу, что имеется фундаментальная связь между структурными элементами материи, пространством и временем. Пространство-время — не просто способ существования материи, это такой способ, который формируется собственными движениями материальных частиц. Собственные движения наделяют пространство-время физическими свойствами — силовыми полями, определяют его структуру, делают его неоднородным и неизотропным.

По-видимому, схема механики, учитывающей собственные УД, должна быть такой. Нужно начать с фундамента — ускоренных движений по инерции. Эти движения определят с помощью условия (3) зависимость массы m частицы, движущейся ускоренно по инерции, от скорости частицы. Определив эту зависимость, следует затем из принципа действия вывести уравнения вынужденных движений, учитывающие указанную зависимость. Значение принципа инерции, учитывающего УДИ, как раз и состоит в том, чтобы установить функциональную форму зависимости $m = m(v)$ и тем самым уточнить физический смысл массы частицы, который до сих пор остается неизвестным. Масса частицы — это фундаментальная характеристика движения частицы, которая определяется через УДИ. Установив уравнение, определяющее зависимость массы частицы от скорости, и найдя с его помощью эту зависимость, мы тем самым определяем неизвестное до сих пор звено, которого физике остро недоставало и которое совершенно необходимо для описания физической реальности.

Перечислим основные результаты, изложенные в последующих разделах работы.

В разделе 2 рассматривается принцип наименьшего действия (ПНД) в нерелятивистском приближении. Обращается внимание на то обстоятельство, что в пределе выключенного внешнего поля $\vec{F}_{вн} = 0$ уравнения движения, следующие из ПНД (уравнения Лагранжа), описывают свободные частицы, движущиеся по инерции — равномерно и прямолинейно. И возникают вопросы: неужели движущаяся материя, самоорганизующаяся и самоуправляемая реальность, в отсутствие внешнего поля превращается в совокупность свободных частиц, способных лишь перемещаться равномерно и прямолинейно? Получается так, что в отсутствие внешнего поля материя переходит в особое состояние — она становится мертвой, неспособной к развитию и только во внешнем поле приобретает свои замечательные качества. И возникает еще один непростой вопрос: почему среди движений по инерции, предсказываемых принципом наименьшего действия, нет равномерных круговых движений, существование которых предсказал еще Галилей, считавший, что Земля вращается вокруг Солнца по инерции?

Нужно подчеркнуть, что в основе современной теоретической физики лежит ПНД, с помощью которого принято выводить уравнения движения всех видов материи. Не существует никаких оснований сомневаться в действенности и эффективности методов исследования, основанных на ПНД. Следует, однако, учесть, что ПНД имеет ограниченную область применимости, его использование вне этой области может привести к ошибочным результатам. Это и случилось с движениями частиц по инерции, т.е. с движениями в отсутствие внешнего поля: применительно к указанным движениям ПНД дает лишь тривиальные, абстрактные движения частиц мертвой материи, не имеющие отношения к физической реальности.

Из приведенного в работе анализа движений материи следует, что существует два вида ускоренных движений — вынужденные движения (ВД) и собственные движения (СД) структурных элементов материи (в частности, точечных материальных частиц). Различие между ними состоит в том, что ВД совершаются под действием внешних сил, т.е. являются следствием действия внешних сил, а СД, будучи атрибутом материи, не имеют причины своего появления в виде силы, действующей на частицу. На частицу, совершающую СД, действует сила — сила инерции, но она является следствием СД, а не их причиной. Частица, совершающая собственное ускоренное движение (УД), воспринимается в теории, основанной на ПНД, точно так же, как и частица, движущаяся ускоренно под действием внешней силы, и поэтому, если $\vec{F}_{вн} = 0$, ПНД приводит к уравнению, описывающему движение свободной частицы — абстрактное движение по инерции, не существующее в природе.

Чтобы получить реальное движение частицы по инерции, нужно исследовать соотношение, связывающее энергию частицы с работой, совершаемой над частицей силой инерции $\vec{F}$, которая порождается собственным УД. Требование, чтобы энергия частицы сохранялась в условиях, когда на частицу действует сила инерции, приводит к дифференциальному уравнению второго порядка, определяющему зависимость массы частицы от ее скорости: $m = m(v)$.

Указанное выше требование имеет фундаментальный характер: оно представляет собой условие стабильности собственных ускоренных движений материи, которые в отсутствие энергетических потерь частицы являются ускоренными движениями по инерции (УДИ). Отметим, что указанное выше условие стабильности движущейся материи не выполняется, если масса частицы не зависит от скорости. Это значит, что масса материальных частиц не может быть постоянной величиной, не зависящей от скорости. Зависимость массы от скорости имеет принципиальное значение — она ответственна за стабильное развитие материи.

Получено общее решение уравнения для массы частицы. В качестве постоянных интегрирования в этом решении выступают интегралы движения — полная энергия E и модуль импульса p частицы. Интересно, что кинетическая энергия частицы, совершающей собственные УД, содержит кинетическую «энергию покоя», равную полной энергии E, взятой с обратным знаком. Отметим, что масса нерелятивистской частицы $m = m(v)$ расходится при $v \to 0$. Это обстоятельство указывает на то, что нерелятивистского приближения недостаточно для описания движения частицы по инерции в области малых скоростей — необходима релятивистская теория.

В качестве примера УДИ рассмотрено плоское движение частицы по окружности. Показано, что если угловая скорость ω частицы постоянна, то движение по инерции будет равномерным с нормальным ускорением, направленным к центру окружности. На частицу действует сила инерции, также направленная к центру окружности. Масса частицы является функцией скорости, но в рассматриваемом примере она не изменяется со временем, поскольку скорость частицы $v = const$. Если $\omega \neq const$, то движение частицы, оставаясь круговым, становится неравномерным, а ускорение, помимо нормальной компоненты, содержит и тангенциальную компоненту. При этом масса частицы становится величиной, изменяющейся со временем. Подчеркнем, что существование УДИ невозможно обосновать, используя ПНД: уравнения Лагранжа описывают лишь абстрактное движение по инерции — равномерное и прямолинейное движение свободной частицы.

Раздел 4 посвящен формулировке релятивистской механики, учитывающей существование собственных УД частицы с переменной массой: $m = m(v)$.

Согласно проведенному исследованию, изменение со временем полной энергии релятивистской частицы и энергетические потери, обусловленные действием силы инерции на релятивистскую частицу, описываются теми же соотношениями, что и в случае нерелятивистской частицы. Поэтому выводы, сделанные в предыдущем разделе относительно закона сохранения энергии и относительно энергетических потерь системы нерелятивистских частиц, сохраняют силу и для релятивистской частицы. Энергия релятивистской частицы сохраняется лишь при условии, что обращается в нуль работа, производимая над частицей силой инерции. Указанное условие накладывает существенное ограничение на форму функциональной зависимости массы частицы от скорости.

Из условия стабильного развития движущейся материи, полученного в разделе 2, выведено дифференциальное уравнение, определяющее зависимость массы релятивистской частицы от скорости. Указанное уравнение существенно отличается от уравнения для массы нерелятивистской частицы. Различие между ними, особенно значительное при $v \to 0$, обусловлено тем, что релятивистская частица, в отличие от нерелятивистской, обладает энергией покоя — энергией, внутренне присущей материи. Получено общее решение уравнения для массы релятивистской частицы. Постоянные интегрирования в этом решении представляют собой интегралы движения — полную энергию и модуль импульса релятивистской частицы.

В отличие от массы нерелятивистской частицы, расходящейся при $v \to 0$, масса релятивистской частицы при $v = 0$ остается конечной величиной. С формальной точки зрения, конечность величины массы релятивистской частицы при $v \to 0$ обусловлена тем, что в нерелятивистском пределе функция Лагранжа релятивистской частицы содержит постоянное слагаемое L_0, $L_0 = -m_0 c^2$, $m_0 = m(0)$. Указанное слагаемое появляется по той причине, что функция Лагранжа релятивистской частицы описывает движение частицы в 4-мерном пространстве-времени с псевдоевклидовой метрикой. Слагаемое L_0 в функции Лагранжа приводит к возникновению энергии покоя релятивистской частицы и обеспечивает конечность массы частицы при $v \to 0$. Полученные результаты указывают на то, что собственные движения релятивистской частицы происходят в 4-мерном пространстве-времени с псевдоевклидовой метрикой. Они свидетельствуют о существовании неразрывной связи между движением релятивистской частицы, ее физическими свойствами и пространством-временем, в котором совершается движение.

В качестве примера рассмотрено движение по инерции релятивистской частицы по криволинейной траектории. Показано, что ускорение частицы содержит тангенциальную и нормальную компоненты. Вычислена сила инерции, действующая на частицу. Существенно, что сила инерции не связана с действием на частицу внешнего поля, она порождается собственными ускоренными движениями частицы. Сила инерции направлена к центру кривизны траектории перпендикулярно к вектору скорости и не вызывает потерь энергии частицы.

В заключительном разделе формулируются основные результаты и выводы работы. В частности, отмечаются те новые аспекты, касающиеся физической природы и физического содержания понятия массы частицы, которые раскрыты в данной работе.

2. Принцип действия и ускоренные движения по инерции (УДИ). Нерелятивистский подход

Согласно принципу наименьшего действия, действительное движение физической системы подчиняется условию

$$\delta S = 0, \tag{4}$$

где δS – вариация функции действия S,

$$S = \int_{t_1}^{t_2} L dt\,, \tag{5}$$

L – функция Лагранжа, $L = L(\vec{r}_1, \vec{r}_2, ..., \vec{v}_1, \vec{v}_2, ...)$, $\vec{r}_i$ и $\vec{v}_i = \dot{\vec{r}}_i$ – радиус-вектор и вектор скорости частицы i, $i = 1, 2, \ldots$. Вариация функции Лагранжа определяется следующим образом:

$$\delta L = \sum_i \left(\frac{\partial L}{\partial \vec{r}_i} \delta \vec{r}_i + \frac{\partial L}{\partial \vec{v}_i} \delta \vec{v}_i \right), \quad \delta \vec{v}_i = \frac{d}{dt} \delta \vec{r}_i\,. \tag{6}$$

Используя равенства (5) и (6), условие (4) можно записать в виде:

$$\sum_i \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{\partial L}{\partial \vec{r}_i} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \vec{v}_i} \right) \delta \vec{r}_i dt + \sum_i \int_{t_1}^{t_2} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \vec{v}_i} \delta \vec{r}_i \right) dt = 0\,. \tag{7}$$

При выводе соотношения (7) использовано равенство

$$\frac{\partial L}{\partial \vec{v}_i} \delta \vec{v}_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \vec{v}_i} \delta \vec{r}_i \right) - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \vec{v}_i} \right) \delta \vec{r}_i\,.$$

Последнее слагаемое, стоящее в левой части равенства (7), обращается в нуль ввиду того, что радиус-векторы $\vec{r}_i$ частиц в моменты времени t_1, t_2 считаются фиксированными, так что $\delta \vec{r}_i \big|_{t = t_1, t_2} = 0$.

Вследствие произвольности вариаций $\delta \vec{r}_i$ радиус-векторов $\vec{r}_i$, из равенства (7) вытекают уравнения движения (уравнения Лагранжа):

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \vec{v}_i} - \frac{\partial L}{\partial \vec{r}_i} = 0, \quad i = 1, 2, \ldots\,. \tag{8}$$

Учитывая, что

$$L = T - U, \quad T = \sum_i T_i, \quad T_i = m_i \vec{v}_i^2 / 2, \quad U = U(\vec{r}_1, \vec{r}_2, ...) \tag{9}$$

и вводя обозначения

$$\frac{\partial L}{\partial \vec{v}_i} = \vec{p}_i, \quad \frac{\partial L}{\partial \vec{r}_i} = -\vec{\nabla}_i U = \vec{F}_{вн,i}, \tag{10}$$

уравнения движения (8) можно представить в форме:

$$\frac{d\vec{p}_i}{dt} - \vec{F}_{вн,i} = 0, \quad i = 1, 2, \ldots . \tag{11}$$

Выше T и T_i — кинетические энергии системы частиц и частицы i массой m_i, $\vec{p}_i$ — импульс частицы i, $U = U(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \ldots)$ — потенциальное поле, описывающее взаимодействие между частицами, $\vec{F}_{вн,i}$ — внешняя сила, действующая на частицу i со стороны потенциального поля U. Отметим, что в механике принято определение силы $\vec{F}$, действующей на частицу, через импульс самой частицы, а именно: если частица обладает импульсом $\vec{p} = \vec{p}(t)$, то сила $\vec{F}$, испытываемая частицей, определяется как скорость изменения со временем импульса: $\vec{F} = d\vec{p}/dt$. Принимая во внимание это определение силы и обозначая через $\vec{F}_i$ силу, испытываемую частицей i, т.е.

$$\vec{F}_i = \frac{d\vec{p}_i}{dt}, \tag{12}$$

уравнения движения (11) можно записать в виде равенства

$$\vec{F}_i = \vec{F}_{вн,i}, \quad i = 1, 2, \ldots, \tag{13}$$

согласно которому сила $\vec{F}_i$, испытываемая частицей i (силу $\vec{F}_i$ будем называть в дальнейшем **силой инерции**), отождествляется с внешней силой $\vec{F}_{вн,i}$ (10), действующей на частицу i со стороны ее окружения — потенциального поля U.

Считая, что функция Лагранжа L явно не зависит от времени, т.е. $\partial L/\partial t = 0$, вычислим полную производную по времени:

$$\frac{dL}{dt} = \sum_i \left(\frac{\partial L}{\partial \vec{r}_i} \dot{\vec{r}}_i + \frac{\partial L}{\partial \vec{v}_i} \dot{\vec{v}}_i \right) = \sum_i \left(\frac{\partial L}{\partial \vec{r}_i} \dot{\vec{r}}_i + \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \vec{v}_i} \vec{v}_i \right) - \vec{v}_i \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \vec{v}_i} \right) \right).$$

Это выражение удобно записать в виде следующего равенства, левая часть которого является полной производной по времени:

$$\frac{dE}{dt} = \sum_i \vec{v}_i \left(\frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \vec{v}_i} - \frac{\partial L}{\partial \vec{r}_i} \right) = \sum_i \vec{v}_i \left(\frac{d\vec{p}_i}{dt} - \vec{F}_{вн,i} \right), \tag{14}$$

где использованы обозначения (10), а также введено обозначение

$$E = \sum_i \vec{v}_i \frac{\partial L}{\partial \vec{v}_i} - L = \sum_i \vec{v}_i \vec{p}_i - L. \tag{15}$$

Принимая во внимание уравнения движения (8), или (11), обнаруживаем, что правая часть равенства (14) обращается в нуль. Значит, $dE/dt = 0$, т.е. величина E является интегралом движения. Величина E (15) представляет собой полную энергию рассматриваемой системы частиц.

Проведем анализ уравнений движения (8) и равенства (14), из которых следует закон сохранения энергии. Равенство (14) удобно записать следующим образом:

$$dE = \sum_i (\vec{F}_i - \vec{F}_{вн,i}) d\vec{r}_i = dA - dA_{вн}. \tag{16}$$

Здесь использованы равенство (12) и соотношения:

$$d\vec{r}_i = \vec{v}_i dt, \quad dA = \sum_i dA_i, \quad dA_{вн} = \sum_i dA_{вн,i}, \quad dA_i = \vec{F}_i d\vec{r}_i, \quad dA_{вн,i} = \vec{F}_{вн,i} d\vec{r}_i, \tag{17}$$

где $d\vec{r}_i$ — вектор перемещения частицы i по траектории движения за время dt, величины dA_i и $dA_{вн,i}$ имеют смысл элементарной работы, совершаемой силами, соответственно, $\vec{F}_i$ и $\vec{F}_{вн,i}$ при перемещении частицы i по траектории за время dt. Величины dA и $dA_{вн}$ дают, очевидно, полную элементарную работу, совершаемую указанными выше силами над всеми частицами системы при перемещениях частиц по траекториям за время dt.

В отсутствие внешнего поля, т.е. при $U = 0$, имеют место соотношения (см. (10) и (17)):

$$\vec{F}_{вн,i} = 0, \quad dA_{вн,i} = 0. \tag{18}$$

Следовательно, уравнения движения (11) и равенство (14) принимают вид:

$$\frac{d\vec{p}_i}{dt}=0, \quad \frac{dE}{dt}=\sum_i \vec{v}_i \frac{d\vec{p}_i}{dt}=\frac{dA}{dt}, \tag{19}$$

где, в соответствии с (12) и (17), $dA=\sum_i dA_i, \quad dA_i=\vec{F}_i\vec{v}_i dt, \quad \vec{F}_i=d\vec{p}_i\,/\,dt$. Движение частицы в отсутствие внешнего поля принято называть движением по инерции. Согласно первому из соотношений (19), движение частицы по инерции характеризуется постоянным импульсом $\vec{p}_i=m_i\vec{v}_i=const$ и, поскольку масса частицы считается постоянной $(m_i=const)$, то скорость частицы $\vec{v}_i$ также является постоянной величиной: $\vec{v}_i=const$. Как видим, из принципа наименьшего действия и условия $m_i=const$ следует, что движение частицы в отсутствие внешнего поля является равномерным и прямолинейным: частица движется без ускорения ($\vec{a}_i=\dot{\vec{v}}_i=0$) и не испытывает действия силы $(\vec{F}_i=d\vec{p}_i\,/\,dt=0, \ dA_i=0)$. Второе из соотношений (19) принимает форму закона сохранения энергии $(dE\,/\,dt=0)$ по тривиальной причине — из-за отсутствия сил инерции $\vec{F}_i$.

Согласно изложенному выше, в отсутствие внешнего поля материя превращается в совокупность свободных частиц, обладающих массами $m_i=const$ и движущихся по инерции — равномерно и прямолинейно. Составляющие материю свободные частицы движутся без ускорений и поэтому оказываются не способными к каким-либо силовым действиям, они могут лишь перемещаться в пространстве с постоянной скоростью. Это значит, что в отсутствие внешнего поля движущаяся материя переходит в особое состояние движения — она становится мертвой материей, лишенной всех тех качеств, благодаря которым она является самоорганизующейся, самоуправляемой реальностью. Уравнения Лагранжа, в пределе отключенного внешнего поля ($\vec{F}_{вн,i}\to 0$), описывают, таким образом, состояние движения мертвой материи.

Обратим внимание на то обстоятельство, что уравнения Лагранжа (11), вытекающие из принципа наименьшего действия, эквивалентны равенствам (13). Согласно последним, в вынужденных ускоренных движениях силы инерции $\vec{F}_i$ совпадают с внешними силами $\vec{F}_{вн,i}$. Однако, при $\vec{F}_{вн,i}=0$, т.е. в отсутствие внешних полей, силы инерции не обязаны обращаться в нуль, поскольку они порождаются собственными ускоренными движениями материи, которые не могут прекратиться при отключении внешнего поля. Более того, можно утверждать, что непрерывные переходы структурных элементов материи из одних состояний движения в другие с необходимостью порождают силы инерции $\vec{F}_i$, $\vec{F}_i=d\vec{p}_i\,/\,dt\neq 0,$ действующие на частицы. Поэтому второе из равенств (19) можно записать так:

$$dE=dA, \tag{19a}$$

где $dA=\sum_i dA_i, \quad dA_i=\vec{F}_i d\vec{r}_i=v_i dp_i, \quad dA_i$ — элементарная работа, совершаемая силой инерции $\vec{F}_i$ над частицей i при ее перемещении на участке траектории $d\vec{r}_i$. Если $\vec{F}_i\neq 0$, но $dA_i=0$ на каждом участке траектории частицы i, то, в силу (19а), выполняется закон сохранения энергии $E=const$. Собственные движения частиц, удовлетворяющие указанному условию, естественно назвать ускоренными движениями по инерции (УДИ). Они представляют собой близкий аналог движений свободных частиц по инерции с тем существенным отличием от них, что материя, структурные составляющие которой совершают УДИ, сохраняет все свои прежние атрибуты.

Заметим, что перейдя к пределу, в котором отключается внешнее поле, мы оказываемся на реальном фундаменте современной физики, который составляют положения, указанные в начале предыдущего раздела: 1) принцип инерции по Декарту; 2) предположение о постоянстве массы частиц ($m=const$); 3) уравнения Лагранжа, следующие из принципа наименьшего действия, как уравнения движения. Анализируя состояние квантовой электродинамики (КЭД) в 80ые годы прошлого века, П.А.М. Дирак пришел к выводу, что «основные уравнения неверны» и нуждаются в существенных изменениях [9]. Согласно Дираку, трудности теории, «ввиду их глубокого характера, могут быть устранены лишь радикальным изменением основ теории, вероятно, столь же радикальным, как и переход от теории боровских орбит к современной квантовой механике»[10](с.403). Отметим работы [11-14], посвященные исследованию проблемы

Дирака. Чтобы устранить трудности теории, нужно знать их причину. Причиной являются названные выше фундаментальные положения, образующие основания физики: они оказываются неподходящими для описания физической реальности. В этой связи здесь уместно еще раз вспомнить высказывания Г. Галилея о том, что движениями по инерции являются равномерные круговые движения тел [1,2].

Изложенное выше наводит на мысль, что принцип наименьшего действия не описывает реальных движений частицы по инерции, т.е. движений в отсутствие внешнего поля. Основанием для подобной догадки могут послужить рассуждения, приведенные во Введении. Фундаментальное свойство материи состоит в том, что она находится непрерывно в состоянии движения. Если $\vec{F}_{вн} = 0$, отсутствуют лишь вынужденные ускоренные движения, но должны происходить собственные движения, которые могут совершаться с ускорением. Собственные движения материи представляют собой атрибут материи, никаких ограничений на физические характеристики собственных движений, являющихся первичным свойством материи, быть не может. Возникает вопрос: **почему из поля зрения теории, основывающейся на принципе действия, выпадают собственные ускоренные движения материи**, которые с необходимостью возникают, как показано во Введении, в результате переходов структурных элементов материи из одного состояния движения в другое?

Чтобы ответить на этот вопрос, проведем **более подробный анализ собственных движений материи, т.е. движений структурных элементов материи, происходящих в отсутствие внешних полей**. Очевидно, что достаточно рассмотреть движение какого-либо структурного элемента материи, например, точечной частицы. Обозначим через m массу частицы, а через $\vec{v}$ и $\vec{p}$, T и E, соответственно, векторы скорости и импульса, кинетическую и полную энергии частицы. Будем считать, что $m \neq const$, а именно: $m = m(v)$, $v = |\vec{v}(t)|$, т.е. масса частицы изменяется со временем вследствие того, что она является функцией скорости. Используя определение вектора импульса (10) и полной энергии (15), вычислим импульс $\vec{p}$ и энергию E частицы, а также приведем соотношение, определяющее скорость изменения энергии со временем (см. (14) и (16)):

$$\vec{p} = p\vec{e}_{\vec{v}}, \;\; p = mv + \frac{dm}{dv}\frac{v^2}{2}, \;\; \vec{e}_{\vec{v}} = \frac{\vec{v}}{v}, \;\; E = \vec{v}\vec{p} - T = \left(m + \frac{dm}{dv}v\right)\frac{v^2}{2}, \tag{20}$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dA}{dt} = \frac{vdp}{dt}. \tag{21}$$

Здесь учтено, что в отсутствие внешнего поля функция Лагранжа частицы дается формулой: $L = T,\; T = mv^2 / 2$. Величина dA/dt в формуле (21) определяет энергетические потери, испытываемые частицей в единицу времени вследствие того, что действующая на частицу сила инерции $\vec{F},\; \vec{F} = d\vec{p}/dt,$ совершает над частицей работу при перемещении частицы по траектории. Согласно (21), если энергия частицы сохраняется ($E = const$), то энергетические потери отсутствуют ($dA/dt = 0$). Справедливо и обратное утверждение: в отсутствие энергетических потерь частицы ее энергия сохраняется. Следовательно, **равенство (21) имеет фундаментальный характер: оно выражает собой условие стабильности собственных движений материи, которые в отсутствие энергетических потерь совпадают с движениями материальных частиц по инерции.**

Принимая во внимание, что в силу (20) величины p и E зависят только от модуля вектора скорости v, и учитывая соотношение (21), закон сохранения полной энергии частицы можно представить в виде:

$$\frac{dE}{dv}\dot{v} = \frac{dp}{dv}v\dot{v} = 0. \tag{22}$$

Очевидно, что стабильность собственных ускоренных движений материи является необходимым условием самого существования движущейся материи как первичной реальности, самоорганизующейся и самоуправляемой. Поэтому равенства (22) должны выполняться при произвольных ненулевых значениях скорости v и ускорения $\dot{v}$ структурных элементов материи (т.е.

при произвольной зависимости $v=v(t)$). Это требование, в соответствии с (22), приводит к равенству

$$\frac{dp}{dv}=0. \qquad (23)$$

Следует подчеркнуть, что если масса частицы не зависит от скорости, то, в соответствии с равенствами (20), $p=mv,\ dp/dv=m\neq 0,$ т.е. равенство (23) не выполняется. Это означает, что не выполняется и условие стабильности (22) движущейся материи. Отсюда следует вывод, что масса структурных элементов материи не может быть постоянной величиной, не зависящей от скорости.

Равенство (23) преобразуется, если использовать выражение (20) для импульса p, к следующему дифференциальному уравнению второго порядка, определяющему зависимость массы частицы от скорости $(m=m(v))$:

$$\frac{dp}{dv}=\left(1+2v\frac{d}{dv}+\frac{v^2}{2}\frac{d^2}{dv^2}\right)m=0\,. \qquad (24)$$

Далее учитываем операторное тождество $v^2\dfrac{d^2}{dv^2}=v\dfrac{d}{dv}v\dfrac{d}{dv}-v\dfrac{d}{dv}$, вводим новую переменную

$$\eta=\ln v \qquad (25)$$

и используем следующие соотношения, вытекающие из равенства (25):

$$v=e^{\eta},\quad dv=vd\eta,\quad v\frac{d}{dv}=\frac{d}{d\eta}\,. \qquad (26)$$

Элементарные преобразования приводят уравнение (24) к следующему дифференциальному уравнению второго порядка с постоянными коэффициентами:

$$\left(1+\frac{3}{2}\frac{d}{d\eta}+\frac{1}{2}\frac{d^2}{d\eta^2}\right)m=0. \qquad (27)$$

Общее решение этого уравнения дается формулами:

$$m=m_1+m_2,\quad m_i=c_ie^{k_i\eta},\quad i=1,2, \qquad (28)$$

где $c_i=const,\quad k_1=-1,\quad k_2=-2.$ Учитывая равенства (25) и (28), приходим к следующим выражениям:

$$m=\frac{c_1}{v}+\frac{c_2}{v^2},\quad \frac{dm}{dv}=-\frac{c_1}{v^2}-2\frac{c_2}{v^3}. \qquad (29)$$

С помощью формул (20) и (29) легко вычислить импульс и полную энергию частицы. Расчет показывает, что $p=c_1/2,\quad E=-c_2/2$. Следовательно, постоянные интегрирования c_1 и c_2 в формулах (29) выражаются через интегралы движения p и E следующим образом:

$$c_1=2p,\quad c_2=-2E\,. \qquad (30)$$

Компоненты m_i ($m_1=c_1/v,\ m_2=c_2/v^2$) (28) массы частицы m (29) подчиняются уравнениям:

$$\Lambda_1m_1=p,\quad \Lambda_2m_2=E,\quad \Lambda_2m_1=0,\quad \Lambda_1m_2=0, \qquad (31)$$

где дифференциальные операторы $\Lambda_i=\Lambda_i(v),\ i=1,2,$ определены формулами:

$$\Lambda_1=v\left(1+\frac{v}{2}\frac{\partial}{\partial v}\right),\quad \Lambda_2=\frac{v^2}{2}\left(1+v\frac{\partial}{\partial v}\right).$$

Уравнения (31) легко получить, принимая во внимание соотношения (20). Здесь уместно обратить внимание на то обстоятельство, что компоненты m_i массы частицы подчиняются дифференциальным уравнениям первого порядка (31), в которых величины p и E являются интегралами собственного движения частицы, а полная масса частицы m удовлетворяет однородному дифференциальному уравнению второго порядка (24).

Используя равенства (20), (29) и (30), получаем следующие соотношения:

$$T = \frac{mv^2}{2} = vp - E = \frac{1}{2}(c_1 v + c_2) = vp + T_0, \quad T_0 = \frac{c_2}{2} = -E, \tag{32}$$

где $T_0 = T\big|_{v=0}$. Как видно из (32), кинетическая энергия T, характеризующая собственные движения частицы, пропорциональна скорости v частицы и содержит кинетическую «энергию покоя» T_0, которая оказывается равной полной энергии E, взятой с обратным знаком. Заслуживает внимания то обстоятельство, что величина T_0 оказывается отличной от нуля вследствие того, что масса частицы m (29) расходится при $v \to 0$ как $2T_0 / v^2$. Расходимость массы частицы при $v \to 0$ свидетельствует о том, что для описания движения по инерции в области малых скоростей нерелятивистского приближения недостаточно – необходима релятивистская теория. Интересно, что, если массу частицы m вычислить из равенства $mv^2 / 2 = vp - E$ (см. (32)), то получается формула:

$$m = \frac{2(pv - E)}{v^2}, \tag{33}$$

совпадающая с первым из равенств (29), в котором постоянные c_i выражены через интегралы движения (см. (30)). Это совпадение служит подтверждением правильности полученного нами дифференциального уравнения (24), определяющего зависимость массы частицы от скорости.

Определив зависимость массы от скорости, рассмотрим простейшие собственные движения частицы. Ограничиваясь плоским движением, происходящим в плоскости xy, выпишем радиус-вектор, векторы скорости и ускорения частицы, движущейся по окружности радиуса r, $r = const$. Используя полярные координаты, находим:

$$\vec{r} = r\vec{e}_{\vec{r}}, \quad \vec{v} = \dot{\vec{r}} = r\omega\vec{n}, \quad \vec{a} = \ddot{\vec{r}} = -r\omega^2\vec{e}_{\vec{r}} + r\dot{\omega}\vec{n}, \tag{34}$$

где $\vec{e}_{\vec{r}} = (\cos\phi, \sin\phi)$, $\dot{\vec{e}}_{\vec{r}} = \omega\vec{n}$, $\omega = \dot{\phi}$, $\vec{n} = (-\sin\phi, \cos\phi)$, $\dot{\vec{n}} = -\omega\vec{e}_{\vec{r}}$.

Как видно из (34), при $\omega = const > 0$ частица движется по окружности с постоянной скоростью $v = r\omega$ и нормальным ускорением $\vec{a} = -r\omega^2\vec{e}_{\vec{r}} \equiv \vec{a}_{\vec{n}}$, направленным к центру окружности. В силу (29) масса частицы является функцией скорости, но в рассматриваемом случае она не изменяется со временем, поскольку скорость частицы $v = const$. На частицу действует сила инерции, которую на основании (20), (30) и (34) можно записать в виде:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = p\dot{\vec{e}}_{\vec{v}} = -\omega p\vec{e}_{\vec{r}}. \tag{35}$$

Таким образом, при $\dot{\omega} = 0$ частица совершает равномерное круговое движение с нормальным ускорением $\vec{a}_{\vec{n}}$. Здесь уместно заметить, что под движением по инерции Г. Галилей понимал именно такое движение — равномерное круговое движение, а не равномерное прямолинейное [1,2].

Если $\dot{\omega} \neq 0$, то, согласно (34), движение частицы, оставаясь круговым, становится неравномерным, поскольку $v = r\omega \neq const$, а ускорение, помимо нормальной компоненты $\vec{a}_{\vec{n}}$, содержит и тангенциальную компоненту: $\vec{a}_\tau = r\dot{\omega}\vec{n}$, $\vec{n} = \vec{e}_{\vec{v}}$. При этом масса частицы (29) становится величиной, изменяющейся со временем. На частицу действует сила инерции $\vec{F}$, которая определяется прежней формулой (35).

Подведем итог проведенному выше анализу проблемы собственных движений материи — движений ее структурных элементов по инерции.

Из принципа наименьшего действия (ПНД) следует, что в отсутствие внешнего поля существует единственное собственное движение частицы с массой $m_i = const$ — равномерное и прямолинейное движение: $\vec{v}_i = const$. ПНД, «замечает», таким образом, лишь тривиальное движение по инерции — движение свободной частицы с ускорением $\vec{a}_i = 0$. Из поля зрения ПНД выпадает огромный класс собственных ускоренных движений, которые, как показано выше, являются криволинейными и могут быть как равномерными, так и неравномерными. Указанные движения играют фундаментальную роль в развитии материи. В таких движениях рождаются поля сил инерции — силовые поля, которые позволяют материи наблюдать за движениями своих структурных элементов и воздействовать на них, управляя процессами самоорганизации. Материя является самоорганизующейся и самоуправляемой реальностью именно благодаря существованию собственных ускоренных движений. Механика Ньютона исходит из того, что ускорение частицы может вызвать только действие на частицу внешней силы. В действительности же способность совершать ускоренные движения внутренне присуща структурным элементам материи — такие движения и являются собственными движениями материи, атрибутом материи, без которого материя утратила бы способность к развитию — она была бы мертва.

Причина неполноты уравнений движения (уравнений Лагранжа), к которым приводит ПНД, становится понятной уже из самого вида этих уравнений (см. уравнения (11)). Очевидно, что они описывают развитие системы частиц под действием внешних сил $\vec{F}_{вн,i}$, выступающих в качестве причины развития системы во времени. Изменение внешних сил со временем вызывает изменение импульсов $\vec{p}_i$ рассматриваемых частиц. По существу, в отсутствие внешних полей развитие системы прекращается: в самом деле, уравнения движения (11) приводят к постоянным импульсам $\vec{p}_i = m_i\vec{v}_i = const$. В силу того, что $m_i = const$, состояние движения частицы характеризуется парой векторов ($\vec{r}_i$, $\vec{v}_i$), где $\vec{r}_i = \vec{v}_i t + \vec{r}_{i0}$, $\vec{v}_i = const$, $\vec{r}_{i0}$ – радиус-вектор частицы в начальный момент времени $t = 0$. Следовательно, описание поведения системы на основе уравнений Лагранжа сводится лишь к простой констатации факта перемещения частиц, имеющих постоянную скорость, в пространстве из одной точки в другую. При $U = 0$ отсутствует внешняя сила как причина изменений в движении частиц. Вместо внешней силы появляется действующая на частицы сила инерции $\vec{F}_i$, которая выступает, однако, не причиной, а следствием собственных ускоренных движений.

Следует подчеркнуть, что имеется принципиальное различие между собственными ускоренными движениями (УД) и вынужденными УД. Последние порождаются внешней силой и могут быть найдены с помощью динамических уравнений, следующих из ПНД, если внешняя сила известна и подобраны подходящие начальные условия. Собственные же УД, в отличие от вынужденных, являются атрибутом материи. Внешней силы, порождающей эти движения, не существует. Вследствие этого, ПНД не может описать собственные УД частиц, он «замечает», как показано выше, лишь простые перемещения частиц в пространстве, которые не имеют отношения к реальным собственным УД материи. Нужно принять во внимание то обстоятельство, что собственные движения не могут подчиняться уравнениям движения, подобным тем, которые управляют вынужденными движениями в механике Ньютона, поскольку не существует силы, под действием которой изменяются со временем состояния собственного движения. Существуют, правда, другие силы — силы инерции, которые порождаются собственными ускоренными движениями, но они не могут служить причиной собственных движений. Изложенное выше указывает на то, что вынужденные и собственные УД представляют собой диалектические противоположности: первые являются следствием действия внешних сил, а вторые — причиной появления сил инерции.

Неизбежность существования собственных УД следует из основного свойства материи — материя является движущейся, ее структурные элементы непрерывно переходят из одного состояния движения в другое, причем эти переходы совершаются через состояния движения с ускорением. Собственные УД порождают силы инерции, которые могут привести к энергетическим потерям материи. Развитие материи будет стабильным, если потери отсутствуют. Среди собственных УД наибольшую роль в природе играют ускоренные движения по инерции (УДИ), поскольку они совершаются без каких-либо энергетических затрат. Именно эти движения обеспечивают стабильное развитие материи, происходящее при условии, что отсутствуют энергетические потери, которые могут испытывать частицы, совершающие собственные ускоренные движения. В данном разделе из условия стабильности материи выведено дифференциальное уравнение для массы частицы, определяющее зависимость массы частицы от скорости движения. Подчеркнем, что указанная зависимость формируется собственными ускоренными движениями частицы по инерции, причем функциональная форма этой зависимости определяется условием отсутствия энергетических потерь частицы.

Собственные движения частицы по инерции можно определить с помощью интегралов движения, которыми являются полная энергия E_i и модуль вектора импульса p_i частицы, используя соотношение, связывающее эти величины между собой. Нужно подчеркнуть, что интегралом движения в УДИ является не вектор импульса частицы $\vec{p}_i$, а его модуль p_i. В самом деле, согласно определению вектора импульса, последний можно записать в виде (см. равенства (10) и (9)): $\vec{p}_i = \dfrac{\partial T}{\partial \vec{v}_i} = p_i \vec{e}_{\vec{v}_i}$, где $p_i = \dfrac{\partial T_i}{\partial v_i}$, $\vec{e}_{\vec{v}_i}$ – орт вектора скорости частицы i. Следовательно, имеют место равенства: $\vec{v}_i \vec{p}_i = v_i p_i$, $\vec{v}_i \dfrac{d\vec{p}_i}{dt} = v_i \dfrac{dp_i}{dt}$. В силу этих равенств, как видно из соотношений (15) и (19), направление вектора скорости частицы $\vec{v}_i$ вообще выпадает из выражений для полной энергии E и для работы dA_i / dt, совершаемой в единицу времени силой $\vec{F}_i$ над частицей i при ее движении по инерции. Это и означает, что в ускоренном движении по инерции вектор импульса $\vec{p}_i$ не может сохраняться.

Отметим, что, согласно уравнениям движения (11), следующим из ПНД, в отсутствие внешнего поля сохраняется импульс: $\vec{p}_i = const$, т.е. вектор импульса частицы является интегралом движения. Как уже разъяснялось выше, это связано с тем, что в пределе выключенного внешнего поля ПНД «воспринимает» движущуюся материю просто как совокупность свободных частиц, которые, обладая строго фиксированными скоростями $\vec{v}_i = const$, оказываются неспособными совершать переходы, составляющие главную отличительную особенность движущейся материи, — переходы с ускорением из одного состояния движения в другое. В указанном пределе ПНД описывает не реальное движение частиц движущейся материи по инерции, существующее в природе, а абстрактное движение свободных частиц, составляющих материю, лишенную возможности совершать упомянутые выше переходы, — мертвую материю. Реальные движения частиц по инерции представляют собой собственные ускоренные движения, которые порождают действующие на частицы силы инерции и формируют зависимость массы частиц от скорости их движения, обеспечивая стабильное развитие материи.

3. Релятивистская механика на основе ускоренных движений по инерции

Функция Лагранжа L релятивистской частицы массой m в отсутствие внешнего поля ($U = 0$) определяется формулой

$$L = -mc\frac{ds}{dt} = -mc^2\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{1/2}, \tag{36}$$

где $ds = cd\tau = cdt\left(1-\dfrac{v^2}{c^2}\right)^{1/2}$ – пространственно-временной интервал между двумя бесконечно близкими событиями $(ct, \vec{r})$ и $(c(t+dt),\ \vec{r}+d\vec{r})$, происходящими с частицей в некоторой ИСО в моменты времени t и $t+dt$, которые отвечают радиус-векторам частицы $\vec{r}$ и $\vec{r}+d\vec{r}$, $\vec{v} = d\vec{r} / dt$ — вектор скорости частицы, $d\tau$ — собственное время частицы, отвечающее промежутку времени dt и отсчитанное по часам, покоящимся вместе с частицей. В нерелятивистском приближении

$$L \approx mv^2 / 2 - mc^2,\ m = const. \tag{37}$$

Вектор импульса $\vec{p}$ и полная энергия E частицы определяются равенствами:

$$\vec{p} = \frac{\partial L}{\partial \vec{v}} = \frac{dL}{dv}\vec{e}_{\vec{v}} = p\vec{e}_{\vec{v}},\quad p = \frac{dL}{dv} = mv\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2},\quad E = \vec{p}\vec{v} - L = mc^2\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}. \tag{38}$$

В формулах (38) полагалось, что $m = const$. Величина $E\big|_{v=0} = mc^2 \equiv E_0$ называется энергией покоя частицы, а величина $E - E_0 \equiv E\big|_{кин}$ – кинетической энергией. С формальной точки зрения, энергия покоя появляется вследствие того, что в нерелятивистском приближении функция Лагранжа (37) содержит постоянное слагаемое $-mc^2 \equiv L_0$, которое отсутствует в нерелятивистской теории. Физический смысл энергии покоя состоит в том, что релятивистская частица обладает внутренней энергией, не связанной с движением частицы как целого. Необходимость существования энергии покоя E_0 следует из релятивистской инвариантности уравнений движения частицы. Подчеркнем, что закон сохранения энергии релятивистской частицы имеет место лишь при условии, что в полную энергию включена энергия покоя [15]. Согласно (38), величины $\vec{p}$ и E связаны между собой равенством $\vec{p} = E\vec{v} / c^2$. 4-импульс P и его квадрат P^2 определяются соотношениями:

$$P = (p_0, \vec{p}), \quad p_0 = \frac{E}{c}, \quad \vec{p} = \frac{E\vec{v}}{c^2}, \quad P = \frac{E}{c^2}(c, \vec{v}), \quad P^2 = p_0^2 - \vec{p}^2 = m^2c^2. \tag{39}$$

Приведем формулы для 4-радиус-вектора X, его дифференциала dX, 4-скорости V и 4-импульса P и квадратов указанных 4-векторов:

$$X = (x_0, x_1, x_2, x_3) = (ct, \vec{r}), \quad dX = (cdt, d\vec{r}), \quad V = dX / d\tau,$$

$$d\tau = dt\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{1/2}, \quad V = (V_0, \vec{V}) = (c, \vec{v})\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}, \quad P = mV, \tag{40}$$

$$X^2 = c^2t^2 - \vec{r}^2, \quad (dX)^2 = (ds)^2, \quad V^2 = V_0^2 - \vec{V}^2 = c^2, \quad P^2 = m^2V^2 = m^2c^2.$$

Перейдем к рассмотрению релятивистской частицы, масса которой изменяется со временем. Функцию Лагранжа L определим прежней формулой (36), в которой массу частицы m будем считать зависящей от скорости частицы $\vec{v}$:

$$m = m(v), \quad v = |\vec{v}(t)|. \tag{41}$$

Учитывая соотношения (38) и равенства

$$\frac{d}{dv}\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{1/2} = -\frac{v}{c^2}\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}, \quad \frac{d}{dv}\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2} = \frac{v}{c^2}\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-3/2},$$

получаем следующие выражения для импульса p и полной энергии E:

$$p = \frac{dL}{dv} = mv\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2} - \frac{dm}{dv}c^2\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{1/2}, \quad E = \vec{p}\vec{v} - L = mc^2\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2} - v\frac{dm}{dv}c^2\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{1/2}. \tag{42}$$

Согласно (42), величины E и $\vec{p}$ связаны между собой следующим образом:

$$\frac{E\vec{v}}{c^2} - \vec{p} = \frac{dm}{dv}c^2\vec{e}_{\vec{v}}\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{3/2}.$$

При $m = const$ это равенство переходит в известное соотношение: $E\vec{v} / c^2 = \vec{p}$. В соответствии с выражениями (42) 4-импульс $P = (p_0, \vec{p}),\ p_0 = E / c,$ можно представить в виде суммы двух 4-векторов: $P = P_0 + P_1,$ где

$$P_0 = mV = m(c, \vec{v})\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}, \quad P_1 = -\frac{dm}{dv}c^2\left(\frac{v}{c}, \vec{e}_{\vec{v}}\right)\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{1/2}.$$

Здесь использованы обозначения (40); отметим, что в последних формулах $P_0 \sim m,$ $P_1 \sim dm / dv$. Вычисляя скалярный квадрат 4-вектора $P_i,\ i = 0,1,$ и скалярное произведение 4-векторов P_0 и P_1, получаем следующие равенства: $P_0^2 = m^2c^2, \quad P_0P_1 = 0,$ $P_1^2 = -\left(\frac{dm}{dv}\right)^2 c^4\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^2$. Используя эти равенства, вычисляем квадрат 4-импульса P:

$$P^2 = (P_0 + P_1)^2 = m^2c^2 - \left(\frac{dm}{dv}\right)^2 c^4\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^2. \tag{43}$$

Соотношение, связывающее изменение со временем полной энергии релятивистской частицы с энергетическими потерями, обусловленными действием на частицу силы инерции

$\vec{F}$, $\vec{F} = d\vec{p} / dt$, имеет такой же вид, как и в нерелятивистском случае (см. равенство (21)):

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dA}{dt} = \frac{vdp}{dt}, \tag{44}$$

где $dA = \vec{F}d\vec{r} = \vec{v}d\vec{p} = vdp$ – элементарная работа, совершаемая силой инерции $\vec{F}$ над частицей при перемещении частицы по траектории на участке $d\vec{r}$, $d\vec{r} = \vec{v}dt$. Из анализа соотношения (44), выполненного в предыдущем разделе в случае нерелятивистской системы частиц, следует, что это соотношение имеет фундаментальный характер: оно выражает собой условие стабильного развития движущейся материи. Нетрудно проверить, что основные выводы, сделанные в предыдущем разделе относительно закона сохранения энергии и относительно энергетических потерь системы частиц, сохраняют силу и для релятивистской частицы. Главный вывод, который нам потребуется, чтобы описать движение релятивистской частицы, можно сформулировать следующим образом. Собственные ускоренные движения, представляющие собой атрибут структурных элементов материи, порождают силы инерции, которые, действуя на частицы, вызывают потери энергии частиц. При выводе закона сохранения энергии необходимо учесть возможность таких потерь. Исследование показывает, что энергия частицы сохраняется лишь при условии, что масса частицы изменяется с изменением скорости движения частицы определенным образом, а именно: необходимо потребовать, чтобы обращалась в нуль работа, производимая над частицей силой инерции, возникающей при движении частицы по траектории. Указанное условие накладывает существенное ограничение на форму функциональной зависимости массы от скорости: функция $m = m(v)$ должна подчиняться дифференциальному уравнению второго порядка, которое получено в работе. Решение этого уравнения содержит две постоянные интегрирования: одна из них — модуль импульса, а вторая — полная энергия частицы, которые выступают в качестве интегралов собственных движений частицы. Следует подчеркнуть, что если в вынужденных ускоренных движениях частицы, являющихся следствием действия внешней силы, масса частицы выступает в качестве меры инертности тела, то **в собственных ускоренных движениях**, порождающих силу инерции, **масса частицы является мерой силового поля — поля силы инерции**. Как будет видно из дальнейшего, масса — это фундаментальная характеристика частицы, весьма чувствительная к изменению скорости движения; учет зависимости массы частицы от скорости необходим для описания устойчивого движения релятивистской частицы.

Из закона сохранения полной энергии (22) следует равенство

$$dp / dv = 0 \tag{45}$$

(см. (23)), которое после подстановки в него выражения (42) для релятивистского импульса приводит к следующему дифференциальному уравнению, определяющему зависимость $m = m(v)$:

$$\left[1 - c^2\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)\frac{d}{dv}\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)\frac{d}{dv}\right]m = 0. \tag{46}$$

Из сравнения уравнения (46) с уравнением (24) для массы нерелятивистской частицы видно, что эти уравнения существенно отличаются друг от друга, а именно: в нерелятивистском пределе, т.е. при $v << c$, уравнение (46) не переходит в уравнение (24); различие между ними особенно велико при $v \to 0$. Как будет видно из дальнейшего, это различие обусловлено тем, что релятивистская частица, в отличие от нерелятивистской, обладает энергией покоя. Вводя новую переменную $z = \ln\left[\left(1 + \frac{v}{c}\right)\left(1 - \frac{v}{c}\right)^{-1}\right]$, учитывая равенство $\frac{dz}{dv} = \frac{2}{c}\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1}$ и используя операторное тождество $\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)\frac{d}{dv} = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)\frac{dz}{dv}\frac{d}{dz} = \frac{2}{c}\frac{d}{dz}$, уравнение (46) приводим к виду:

$$\left(1 - 4\frac{d^2}{dz^2}\right)m = 0. \tag{47}$$

Его общее решение можно записать в следующей форме:

$$m = m_1 + m_2, \quad m_1 = A_1 \exp\left(\frac{z}{2}\right), \quad m_2 = A_2 \exp\left(-\frac{z}{2}\right), \tag{48}$$

где $\exp\left(\frac{z}{2}\right) = \left(\dfrac{1+\frac{v}{c}}{1-\frac{v}{c}}\right)^{1/2}$, $\exp\left(-\frac{z}{2}\right) = \left(\dfrac{1-\frac{v}{c}}{1+\frac{v}{c}}\right)^{1/2}$, A_1 и A_2 — постоянные интегрирования.

Выражения для массы m и ее производной dm/dv удобно представить в виде:

$$m = \frac{A_1\left(1+\frac{v}{c}\right) + A_2\left(1-\frac{v}{c}\right)}{\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{1/2}} \equiv m(v), \quad \frac{dm}{dv} = \frac{A_1\left(1+\frac{v}{c}\right) - A_2\left(1-\frac{v}{c}\right)}{c\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{3/2}}. \tag{49}$$

Подстановка выражений (49) в формулы (42) для импульса и полной энергии дают:

$$p = -c(A_1 - A_2), \quad E = c^2(A_1 + A_2). \tag{50}$$

С помощью соотношений (49) и (50) вычислим величины $m(0) \equiv m_0$ и $dm/dv\big|_{v=0} \equiv m_0'$:

$$m_0 = A_1 + A_2 = E/c^2, \quad m_0' = (A_1 - A_2)/c = -p/c^2. \tag{51}$$

Равенства (50) и (51) позволяют выразить постоянные A_i, $i = 1, 2$, следующим образом:

$$A_1 = \frac{1}{2}(m_0 + m_0'c) = \frac{1}{2c^2}(E - cp), \quad A_2 = \frac{1}{2}(m_0 - m_0'c) = \frac{1}{2c^2}(E + cp). \tag{52}$$

Отметим, что, согласно (51) и (52), постоянные A_1 и A_2 выражаются через интегралы движения p и E, а интегралы движения могут быть определены через величины m_0 и m_0':

$$E = m_0 c^2, \quad p = -m_0' c^2, \quad E/p = -m_0/m_0'. \tag{53}$$

Равенство $dL/dv = p,$ где $L = L(v) -$ функция Лагранжа, $p -$модуль вектора импульса (см. (36) и (38)), можно рассматривать как уравнение относительно функции Лагранжа. Если принять во внимание, что $p = const$ (см. (50)), то решение этого уравнения, подчиняющееся условию $L(0) = -m_0 c^2$ (см. (36)), можно записать в виде:

$$L = pv - m_0 c^2. \tag{54}$$

Следовательно, полная энергия E, определяемая формулой: $E = pv - L$, дается, как и должно быть, первым из равенств (53). Учитывая равенства (51) и (53), соотношения (49) можно представить в следующей форме:

$$m(v) = \frac{m_0 c^2 - pv}{c^2\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{1/2}}, \quad \frac{dm(v)}{dv} = \frac{m_0 v - p}{c^2\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{3/2}}, \quad m_0 c^2 = E, \quad p = -m_0' c^2. \tag{55}$$

Легко проверить, что первое из равенств (55) получается из выражения для полной энергии (42), если записать его в виде

$$-L = mc^2\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{1/2} = E - pv \tag{56}$$

и выразить отсюда массу частицы m, приняв во внимание первое из равенств (53). Интересно, что если в функции Лагранжа L, рассматриваемой в нерелятивистском приближении $v \ll c$, опустить постоянное слагаемое L_0, то, как видно из (56), получается выражение (33) для массы нерелятивистской частицы. Отметим также, что подстановка выражений (55) для массы $m(v)$ и ее производной $m(v)/dv$ в формулы (42), определяющие импульс p и полную энергию E, приводит к тождествам: $p = p, \quad E = m_0 c^2$ (см. (53)). С помощью соотношений (55) квадрат 4-импульса (43) нетрудно преобразовать к выражению

$$P^2 = \frac{E^2}{c^2} - \vec{p}^2 = m_0^2 c^2 - p^2, \qquad (57)$$

которое согласуется с равенствами (53).

Как видно из выражения (55), масса релятивистской частицы остается, как и должно быть, конечной величиной при $v = 0$. Согласно (33), однако, масса нерелятивистской частицы расходится при $v \to 0$. Причиной указанного различия в поведении релятивистской и нерелятивистской частиц служит то обстоятельство, что в нерелятивистском пределе функция Лагранжа релятивистской частицы содержит постоянное слагаемое, равное $-m_0 c^2 \equiv L_0$ (см. (37)). Указанное слагаемое, таким образом, не только приводит к появлению энергии покоя частицы и обеспечивает выполнение закона сохранения полной энергии, но и обеспечивает конечность величины массы частицы при $v \to 0$. Это обстоятельство, ввиду его важности, заслуживает более подробного обсуждения.

Согласно выражению (36), функция Лагранжа релятивистской частицы учитывает то обстоятельство, что движение частицы происходит в 4-мерном пространстве-времени с псевдоевклидовой метрикой. Вследствие этого, в нерелятивистском приближении $(v << c)$ функция Лагранжа содержит постоянное слагаемое L_0 ($L_0 = -mc^2$, см.(37)), которое приводит к энергии покоя частицы E_0, $E_0 = mc^2$. Появление энергии покоя частицы имеет глубокий физический смысл: оно указывает на существование неразрывной связи между движением релятивистской частицы и пространством-временем, в котором происходит движение. Промежутки времени dt, за которые частица проходит участки траектории $d\vec{r}$, и физические свойства самой частицы, являющейся структурным элементом материи, оказываются связанными между собой теснейшим образом. Благодаря этой связи, открываются огромные потенциальные возможности материи, обусловленные наличием энергии покоя частиц как энергии, внутренне присущей материи. Эксперименты подтверждают существование таких возможностей. Согласно экспериментальным данным, при столкновении электрона и позитрона в поле ядра атома может произойти аннигиляция электрона и позитрона, приводящая к уничтожению сталкивающихся частиц и образованию $\gamma -$кванта, в энергию которого переходит полная энергия частиц, включая их энергию покоя.

Как известно, появление постоянного слагаемого в функции Лагранжа не сказывается на уравнениях движения, и поэтому принято считать, что указанную постоянную можно отбросить. Однако в случае релятивистской частицы пренебрежение постоянной L_0 в функции Лагранжа приводит к невыполнению закона сохранения энергии частицы и поэтому недопустимо. Отбрасывание постоянной L_0 недопустимо и по физическим соображениям, поскольку реальность существования энергии покоя частиц подтверждается экспериментом.

В данной работе получен еще один аргумент, указывающий на невозможность пренебрежения постоянной L_0. Если отбросить указанную величину из функции Лагранжа, то это приведет к заведомо неприемлемой зависимости массы частицы от скорости: оказывается, что $m \to \infty$ при $v \to 0$. Это означает, что нерелятивистский подход к описанию движения частицы, основанный на функции Лагранжа L, $L = m\vec{v}^2/2$, приводит к серьезной ошибке, если его использовать для нахождения зависимости $m = m(v)$. Следует подчеркнуть, что при описании движения частицы на основе релятивистской механики указанная трудность не возникает именно по той причине, что движение частицы рассматривается в 4-мерном пространстве-времени, в котором сохраняется квадрат пространственно-временного интервала ds^2, $ds^2 = (cdt)^2 - (d\vec{r})^2$, где dt и $d\vec{r}$ – промежутки времени и соответствующие им участки траектории, лежащие на мировой линии частицы. Этот способ описания автоматически приводит к появлению постоянной L_0 в функции Лагранжа и энергии покоя, характеризующей физические свойства, внутренне присущие материи.

Используя формулы (38) и (42) для вектора импульса $\vec{p}$ релятивистской частицы, вычислим действующую на частицу силу инерции $\vec{F}$, $\vec{F} = d\vec{p}/dt = p\dot{\vec{e}}_v$. Учтем следующие выражения для орта $\vec{e}_{\bar{v}}$ вектора скорости и ее производной по времени $\dot{\vec{e}}_{\bar{v}}$:

$$\vec{e}_{\bar{v}} = \frac{\vec{v}}{v} = (\cos\Psi, \sin\Psi), \quad \dot{\vec{e}}_{\bar{v}} = \dot{\Psi}\vec{n}, \quad \vec{n} = (-\sin\Psi, \cos\Psi), \quad \dot{\Psi} = \frac{d\Psi}{dt}\frac{v}{v} = \frac{v}{R}, \tag{58}$$

где $R = ds / d\Psi$, $ds = vdt$, R – радиус кривизны траектории, по которой движется частица, ds и $d\Psi$ – длина дуги, которую описывает за время dt частица, двигаясь по траектории, и угол поворота вектора скорости $\vec{v}$ в плоскости движения за это же время; выше траектория движения считалась плоской. С помощью (58) получаем:

$$\vec{F} = \frac{pv}{R}\vec{n}. \tag{59}$$

Согласно (58) и (59), сила инерции направлена к центру кривизны траектории перпендикулярно к вектору скорости. Приведем формулу для ускорения частицы:

$$\vec{a} = \dot{\vec{v}} = a_\tau \vec{e}_{\bar{v}} + a_n \vec{n}, \quad a_\tau = \dot{v}, \quad a_n = v^2 / R. \tag{60}$$

Здесь a_τ и a_n – тангенциальная и нормальная компоненты вектора ускорения $\vec{a}$. Из соотношений (59) и (60) видно, что сила инерции пропорциональна нормальной компоненте ускорения частицы. Следует подчеркнуть, что в рассматриваемой задаче сила инерции не вызвана действием на частицу внешнего поля. Она порождается собственными ускоренными движениями частицы и обладает следующим свойством: действуя на частицу, она не вызывает потерь энергии частицы: $dA = \vec{F}d\vec{r} = 0$.

Как видно из представленных нами результатов, относящихся как к нерелятивистскому приближению, так и к релятивистской теории, помимо тривиальных движений по инерции, следующих из принципа наименьшего действия (ПНД) и отвечающих состоянию движения мертвой материи, имеются и нетривиальные движения по инерции, которые представляют собой ускоренные собственные движения.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что ПНД имеет ограниченную область применимости. Нужно различать два вида движений материальных частиц: движения, совершающиеся под действием внешних сил (или полей), — вынужденные движения частиц и движения, имеющие место в отсутствие каких-либо внешних сил (или полей), — собственные движения. ПНД описывает лишь вынужденные движения, т.е. движения, причиной которых являются внешние (вынуждающие) силы $\vec{F}_{вн}$. В случае же собственных движений причина движений отсутствует, т.е. не существует внешней силы $\vec{F}_{вн}$, вызывающей движение. Собственные движения, будучи атрибутом материи, выступают в качестве первичных свойств материи; для их возникновения не нужны какие-либо причины (внешние поля, внешние силы). Не существует каких-либо ограничений на их физические характеристики; в частности, собственные движения могут совершаться как с ускорением, так и без ускорения.

В отсутствие внешней силы уравнения Лагранжа имеют лишь тривиальное решение: частицы движутся с постоянными скоростями $\vec{v}_i = const$. Движение, которое в учебниках физики называют движением свободных частиц по инерции, и является движением такого типа: это вынужденное движение частиц, которое получается в пределе $\vec{F}_{вн,i} \to 0$. Совокупность свободных частиц качественно отличается от движущейся материи: свободные частицы — это материя, частицы которой, будучи не способными к переходам из одного состояния движения в другое, обречены лишь на равномерное прямолинейное движение, это материя, не способная к развитию. В случае собственных движений не существует причины движений, т.е. отсутствует сила, вызывающая движения (хотя источник движений хорошо известен — это материя, атрибутом которой и являются собственные движения). Истинные движения по инерции — это собственные ускоренные движения, которые порождают действующие на частицы силы инерции $\vec{F}$, но эти силы не совершают работы над частицами: $dA = \vec{F}d\vec{r} = 0$, т.е. это движения, в которых отсутствуют энергетические потери частиц. Впервые на существование таких движений указал Галилей.

Современная физика «не замечает» существования собственных движений материи и занимается исследованием лишь вынужденных движений, которые являются следствием действия на частицы внешних сил. Из поля зрения физики выпадает, таким образом, огромный класс движений — собственные движения материи, которые являются атрибутом материи и, вследствие этого, играют в природе главную, ведущую роль. Следует подчеркнуть, что зависимость $m = m(v)$ формируется собственными ускоренными движениями частиц по инерции, которые совершаются в 4-мерном пространстве-времени. Собственные движения не подчиняются уравнениям движения, подобным уравнениям для вынужденных движений. При попытке описать их с помощью ПНД получаются тривиальные движения, не существующие в природе, — движения свободных частиц, совокупность которых составляет материю, не способную к развитию.

Релятивистская механика, кратко изложенная в данном разделе, является обобщением специальной теории относительности (СТО). Она учитывает, в отличие от СТО, существование в природе реальных движений частиц по инерции, которыми являются ускоренные собственные движения материи.

4. Заключение

Как видно из полученных результатов, масса элементарных составляющих материи (частиц) играет в динамике материи исключительно важную роль. Она ответственна за стабильное развитие материи, обеспечивая сохранение ее энергии в условиях, когда собственные ускоренные движения порождают действующие на частицы силы инерции, совершающие над частицами работу и, следовательно, вызывающие потери энергии материи. Физический механизм, приводящий к сохранению энергии, состоит в том, что энергетические потери, связанные с ускоренными собственными движениями, компенсируются путем изменения массы частиц с изменением их скорости. Полученное в работе дифференциальное уравнение для массы частицы m определяет такую функциональную зависимость $m = m(v)$, которая обеспечивает компенсацию энергетических потерь материи. Как показано в разделе 2, если масса частиц не зависит от скорости ($m = const$), то условие стабильности движущейся материи не выполняется. Следовательно, зависимость массы частицы от скорости имеет принципиальное значение: она обеспечивает само существование материи.

Зависимость массы частицы от скорости формируется ускоренными собственными движениями (СД) материи, особенность которых состоит в том, что они совершаются в 4-мерном пространстве-времени и неразрывно с ним связаны. Следует подчеркнуть, что СД не описываются уравнениями Лагранжа и что не существует уравнений движения, способных их описать. Указанные движения можно учесть с помощью закона сохранения полной энергии частицы, принимая во внимание действующие на частицу силы инерции, порождаемые этими движениями. Полная энергия частицы сохраняется лишь при условии, что отсутствуют энергетические потери частицы при действии на нее силы инерции $\vec{F}$, т.е. при условии, что $\vec{F}d\vec{r} = 0$ на каждом участке $d\vec{r}$ траектории частицы. Приведенное условие определяет **ускоренные движения по инерции** (УДИ), которые ответственны за стабильное развитие материи и за формирование зависимости массы частицы от скорости. УДИ — это фундаментальное свойство материи, благодаря которому материя способна мыслить, чувствовать, творить новые структуры. Отметим работы [7,8,16-21], в которых раскрываются физическая сущность и физические особенности явления ускоренных движений частиц по инерции.

Физическое содержание понятия массы частицы видно из двух соотношений:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}_{вн} \text{ и } \frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F},$$

где $\vec{p}$ — импульс частицы, $\vec{F}_{вн}$ - действующая на частицу внешняя сила, выступающая в качестве причины вынужденного ускоренного движения частицы, $\vec{F}$ - действующая на частицу сила инерции, являющаяся следствием собственных ускоренных движений материи. Если принять для простоты, что $\vec{p} = m\vec{v}, \quad m = const$, то, очевидно, масса частицы является мерой количества движения (импульса) p частицы, которая по-разному проявляется в вынужденных и в собственных движениях материи. В вынужденных движениях, масса — это мера инерции частицы: изменение скорости частицы тем больше, чем меньше масса частицы (при фиксированной внешней силе $\vec{F}_{вн}$). А в собственных ускоренных движениях, масса — это мера поля силы инерции $\vec{F}$: сила инерции тем больше, чем больше масса частицы (при фиксированном ускорении частицы). Подчеркнем, что силы инерции, обусловленные ускоренными собственными движениями материи, представляют собой основные силы природы — это движущие силы, ответственные за развитие материи.

Неполнота современной теоретической физики объясняется в значительной мере тем, что исследователи всецело полагаются на принцип наименьшего действия (ПНД) как на надежный метод исследования, которому можно полностью доверять, описывая физические явления и процессы с его помощью. Анализ показывает, однако, что ПНД имеет ограниченную область применимости: уравнения Лагранжа, к которым приводит ПНД, описывают только вынужденные движения, т.е. движения, причиной которых является внешняя сила $\vec{F}_{вн}$. Если $\vec{F}_{вн} = 0$, уравнения Лагранжа имеют лишь тривиальные решения, описывающие не физическую реальность, а мертвую материю. Существенно, что совокупность вынужденных движений составляет лишь небольшую часть реальных движений материи.

В связи с завершением цикла работ по инерции, автор считает своим долгом выразить глубокую признательность Наталье Давыдовне Олейник, жене, другу, соратнику, за внимание, заботу и самоотверженную помощь, исключительно благодаря которым ему удавалось сосредоточиться на решении проблем физики в течение более полувека.

Литература:

1. *Галилео Галилей.* Избранные произведения в двух томах. Т.1,2. — М., Наука, 1964.
2. *Кузнецов Б.Г.* Проблема истинного движения Земли в «Диалоге» Галилея // Труды Института истории естествознания и техники. — М.: Академия наук СССР, 1954. — Вып. 1, С. 249—267.
3. *Еганова И.А., Каллис В., Самойлов В.Н., Струминский В.И.* Геофизический мониторинг Дубна-Научный-Новосибирск: Фазовые траектории массы. — Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2012.
4. Физический энциклопедический словарь/ Главный редактор А.М. Прохоров. — М., «Советская энциклопедия», 1983.
5. *Гегель Г.* Философия природы. Энциклопедия философских наук. Т. 2. — М., Мысль. 1975.
6. *Олейник В.П.* Решение проблемы Фейнмана: физические следствия. Ускоренные движения по инерции и силы инерции. 2017, — т.17, №1-2 (65-66), — С.22-55.
7. *Олейник В.П. и Прокофьев В.П.* Вращательная инерция и ее физические следствия. Что такое гравитация? // Физика сознания и жизни, космология и астрофизика. 2008, — т.8, №2(30), — С.23-56.
8. *Олейник В.П.* Новый подход к проблеме движения: ускоренные движения по инерции // Физика сознания и жизни, космология и астрофизика. 2009, — т.9, №3(35), — С.24-56.
9. *Дирак П.А.М.* Собрание научных трудов. Т.IV. Гравитация и космология. Воспоминания и размышления (лекции, научные статьи 1937-1984 гг.). Под общей редакцией А.Д. Суханова.– М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.–784с.
10. *Дирак П.А.М.* Принципы квантовой механики. — М.: Наука, 1979.
11. *Олейник В.П.* Проблема Дирака. Обобщение уравнений Максвелла для электромагнитного поля. // Физика сознания и жизни, космология и астрофизика. 2014, — т.14, №3(55), — С.5-17; К основам физического взаимодействия. Материалы IX Международной научно-практической конференции Международной академии биоэнерготехнологий «Грани познания: пространственно-временная субстанция живых волн», 7-8 сентября 2015 г., Днепропетровск, 2015, С. 52-72.
12. *Олейник В.П.* Проблема Дирака, часть 2. Электромагнитное взаимодействие как прямое следствие законов механики. // Физика сознания и жизни, космология и астрофизика. 2014, — т.14, №4(56), — С.5–23.
13. *Олейник В.П.* Проблема Дирака, часть 3. Электромагнитное поле и криволинейное движение по инерции. Приложение к модели атома и холодному синтезу ядер. // Физика сознания и жизни, космология и астрофизика. 2015, — т.15, №1(57), — С.32–61.
14. *Олейник В.П.* Решение проблемы Дирака: физические следствия. // Физика сознания и жизни, космология и астрофизика. 2016, — т.16, №1(61), — С.44–55.
15. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теория поля. — М.: Наука, 1973.
16. *Олейник В.П.* О физической природе гравитации. // Физика сознания и жизни, космология и астрофизика. 2010, — т.10, №3(39), — С. 24-55.
17. *Олейник В.П., Третяк О.В.* Проблема инерции и антигравитация. // Физика сознания и жизни, космология и астрофизика.2011. — т.11, №1(41). — С. 24-52.
18. *Олейник В.П.* О физической сущности вращательного движения. Квантовая картина движения классических частиц. // Физика сознания и жизни, космология и астрофизика.2012. — т.12, №1(45). — С. 17-54.
19. *Олейник В.П.* Криволинейные движения по инерции и закон Кулона. // Физика сознания и жизни,

космология и астрофизика. 2012, — т.12, №3(47), — С. 34-39.
20. *Олейник В.П.* О физической сущности явления криволинейного движения по инерции. Классическая частица как открытая самоорганизующаяся система. // Физика сознания и жизни, космология и астрофизика. 2013, — т.13, №2(50), — С. 13-46.
21. *Олейник В.П.* На пути к новой физической картине мира. // К основам физического взаимодействия. Материалы VIII Международной научно-практической конференции Международной академии биоэнерготехнологий «От атома к двухъядерным-физическим субстанциям и живым волнам», 4-6 октября 2013 г., Днепропетровск, 2013, с. 21-63.

Статья поступила в редакцию 20.06.2018 г.

Oleinik V.P.

The physical nature of particle mass.
Relativistic mechanics based on accelerated motions by inertia

The paper is devoted to solving the central problem of physics — the problem of motion. The physical nature of particle mass is revealed from the point of view of mechanics. A differential equation for the particle mass m is obtained, which determines the dependence of the mass on the motion velocity v: $m=m(v)$. The particle is considered as the simplest structural element of moving matter, capable of its own accelerated motions in the absence of external fields acting on the particle. These motions are responsible for the formation of the dependence of mass on velocity. The equation for the particle mass follows from the condition of stable development of moving matter. The dependence $m=m(v)$ is investigated both for a nonrelativistic particle and for a relativistic particle. According to the results obtained, the equation for the mass of relativistic particle differs significantly from the corresponding equation describing nonrelativistic particle. This is explained by the fact that the process of mass formation of particle proceeds differently when moving in Euclidean space and in 4-dimensional space-time. When relativistic particle moves by inertia, i.e. in the absence of external fields, the particle's connection with the space-time in which the motion occurs is significant. Due to this connection, the particle has a rest energy, which manifests itself in the formation of the dependence of mass on velocity.
There are two types of accelerated motions of matter — forced motions (FM) and proper motions (PM) of the structural elements of matter (particles). The difference between them is that FM are performed under the action of external forces, i.e. are a consequence of the action of external forces causing acceleration, and PM, being an attribute of matter, do not have a reason for their appearance in the form of a force acting on the particle. A force acts on the particle that performs PM (we call it the force of inertia), but it is a consequence of accelerated PM, and not their cause.
At present, the principle of least action (PLA) is widely used in theoretical studies. The analysis shows that the PLA has a limited range of applicability: it describes only FM, i.e. motions that occur under the action of an external force, which is their cause. An attempt to apply the PLA to the proper motions of matter leads to motions of free particles that are incapable of anything other than a simple displacement in space with a constant velocity, i.e. to the motions of particles of dead matter. We emphasize that the real motions of particles by inertia, occurring in nature, are accelerated PM. The first to point out the motions of bodies by inertia as accelerated motions was Galileo Galilei who argued that the inertial motion is a uniform circular motion, for example, the motion of the Earth around the Sun [1,2].
Proper motions are primary, because they are an attribute of matter, and forced motions, being a consequence of the action of external fields, are secondary. Proper motions play a fundamental role in nature. They generate forces of inertia that form force fields, with the help of which matter observes the motions of its structural components, controls them, organizing and directing them to create new structures. It is these motions that are responsible for the self-organization of matter, namely they generate consciousness and thinking. Thanks to its proper motions, matter generates the laws of nature, which each time bring to the amazement of the person who reveals them.
Estimating the place that each of the above motions takes in nature, it can be argued that forced motions are a shallow ripple on the surface of the ocean, which is generated by the proper motions of matter. The crisis of modern physics is due to its fundamental incompleteness, due to which physics is engaged in the study of ripples on some surface, without even realizing that under the surface lies a huge world full of secrets and riddles, which is controlled by its proper accelerated motions by inertia.

Key words: physical nature of the particle mass in mechanics, differential equation for mass, dependence of mass on the state of motion, proper and forced motions of matter, accelerated inertial motions (AIM) as a cause of mass inconstancy, relativistic mechanics based on AIM, inseparable connection of AIM with space-time, the bounded region of applicability of the principle of least action.