

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ**  
**ОДЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ МОРСКОГО ФЛОТА**

---

**ПОТЕХИН А. Ф.**

**СИЛЫ ИНЕРЦИИ И ПРИНЦИП ДАЛАМБЕРА**

Методические указания  
к изучению курса теоретической механики

**ОДЕССА – 1993**

Методические указания разработаны канд. техн. наук, доцентом Потехиным Анатолием Фёдоровичем – зав. кафедрой «Теоретическая механика» Одесского института инженеров морского флота в соответствии с учебной программой для машиностроительных и строительных специальностей учебных заведений.

Рецензент: докт. техн. наук, профессор Олейник Н. В.

Зак. 163, тираж 200, подп. к печати 17.02.93  
Усл. печ лист 1,6. КМП ОИИМФ Одесса  
Мечникова, 34

## ВВЕДЕНИЕ

Трудно назвать другой вопрос в классической механике, который вызвал бы столько дискуссий, как вопрос о силах инерции и принципе Даламбера. И все же однозначного мнения на этот счет не существует до настоящего времени. Противоположные мнения о силах инерции высказываются не только в специальных монографиях, но даже в учебниках и справочной литературе по механике и физике. Это ставит в тупик уже не одно поколение преподавателей по этим дисциплинам, и именно они, как правило, являются инициаторами повторяющихся по этому поводу дискуссий.

С силами инерции инженер имеет дело постоянно, он должен их учитывать в прочностных расчетах машин и конструкций. И если у преподавателей нет единого мнения по силам инерции, и одни учат студентов тому, что эти силы фиктивные, а другие, что они реальные, то, как быть студенту, инженеру?

Занимаясь этим вопросом в научном плане, начиная с исследования инерционных виброгасителей и кончая гравитацией, преподавая курс теоретической механики для будущих инженеров, автор настоящих методических указаний считает вправе высказать свою точку зрения по данному вопросу. Эта точка зрения является как обобщением существующих мнений по рассматриваемому вопросу, так и результатом собственных исследований автора.

Автор надеется, что такое обобщение закрывает вопрос о силах инерции, но он будет признателен за любые обоснованные критические замечания, как своих коллег, так и студентов, чей пылкий ум всегда побуждал к обдумыванию и осмысливанию данных вопросов.

## ИЗ ДИАЛЕКТИКИ ПРИРОДЫ

Определения. Вещество и физическое поле – формы существования материи как объективной реальности. Гравитационное поле – универсальное физическое поле, создаваемое всеми видами материи и проявляющееся в двух формах – как поле тяготения и фоновое поле. Поле тяготения – гравитационное поле в той его части (активной), которая проявляется как взаимное притяжение частиц вещества друг к другу, т.е. как силы тяготения. Фоновое поле – гравитационное поле в той его части (пассивной), которое проявляется как взаимное отталкивание тяготеющих друг к другу свободных частиц вещества, т.е. как силы инерции.

«Обыкновенно принимается, что тяжесть есть наиболее всеобщее определение материальности, т.е. что притяжение, а не отталкивание есть необходимое свойство материи. Но притяжение и отталкивание столь же неотделимы друг от друга, как положительное и отрицательное. Поэтому уже на основании самой диалектики можно предсказать, что истинная теория материи должна отвести отталкиванию такое же важное место, как и притяжению и что теория материи, основывающаяся только на притяжении ложна, недостаточна ...» [1]. При этом «не может быть и речи ни об окончательном уравнивании отталкивания и притяжения, ни об окончательном распределении и сосредоточении одной формы движения в одной половине материи, а другой формы в другой половине ее» [1]. При взаимном притяжении частиц вещества без их взаимного отталкивания движение не могло бы реализоваться как пространственно-временной процесс, т.к. при этом происходило бы мгновенное схлопывание вещества в точку.

Если поле тяготения создается веществом и зависит от плотности распределения этого вещества в пространстве (Ньютон), то фоновое поле отталкивания есть вторичное поле, создаваемое полем тяготения [2] и зависящее от плотности энергии последнего (Эйнштейн).

Итак, к каждой из движущихся в гравитационном поле частиц должна быть приложена как сила притяжения (тяготения)  $\vec{F}$ , так и сила отталкивания (инерции)  $\vec{J}$ . В общем случае, в любой точки пространства-времени для одной и той же частицы  $\vec{F} + \vec{J} \neq 0$ . «Всякое движение состоит во взаимодействии притяжения и отталкивания. Но оно возможно лишь в том случае, если каждое притяжение компенсируется соответствующим ему отталкиванием в другом месте, ибо в противном случае одна сторона должна была бы получить с течением времени перевес над другой и, следовательно, движение, в конце концов, прекратилось бы» [1]. Следовательно,

существуют такие точки пространства-времени, в которых должно локально выполняться равенство  $\bar{F} + \bar{J} = 0$  (стационарные орбиты, двигаясь по которым частицы не излучают гравитационные волны и поэтому, в частности, не падают с течением времени на притягивающий их центр). Однако для макропроцессов, в связи с достаточно мощным однородным и изотропным фоновым полем, создаваемым всеми объектами Вселенной, интегрально всегда

$$\bar{F} + \bar{J} = 0 \quad (1)$$

что и зафиксировано во втором законе Ньютона, но в другой форме

$$m\bar{a} = \bar{F} \quad (2)$$

т.е.

$$\bar{J} = -m\bar{a} \quad (3)$$

Формулировка второго закона Ньютона в форме (1) и составляет содержание принципа Даламбера, более детальное рассмотрение которого следует далее.

### КИНЕМАТИКА И ФОНОВАЯ МЕТРИКА

Согласно современным научным представлениям, пустого геометрического пространства в природе не существует. Это пространство едино с наполняющей его материей в форме вещества и поля. По крайней мере, в любой его точке не равна нулю плотность энергии физических полей.

Воздействие физических полей на материальную частицу в механике Ньютона учитывается в явном или неявном виде. В первом случае в уравнение движения частицы вводится соответствующая ускоряющая ее сила. Во втором случае это поле присутствует в уравнении движения лишь как фоновое, свойства которого постулируются.

Определение: Движение материальных частиц друг относительно друга без их взаимодействия между собой и внешними телами и полями называется свободным, невозмущенным или движением по инерции.

При свободном движении частиц никакие их индивидуальные свойства не влияют на эти движения. Поэтому, фиксируя закон свободного движения частиц, мы фиксируем форму проявления пространственно-временных отношений в том физическом поле, в котором эти частицы движутся, т.е. мы фиксируем кинематику тел в данном физическом поле как фоновом.

Понятие физического поля появилось лишь в начале 19 века после работ М.Фарадея в электродинамике, Ньютону оно было неизвестно. Каково же фоновое поле у Ньютона? Это поле им фиксировано, прежде всего, в его первом законе динамики. Согласно этому закону Ньютона, в постулированном им абсолютном пространстве, привязанном к сфере удаленных звезд, «всякое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние» [3]. Или иначе: фоновое поле у Ньютона таково, что оно не взаимодействует с материальной частицей, покоящейся или движущейся равномерно и прямолинейно по отношению к системе отсчета, привязанной к удаленным звездам. Отсюда следует, что время в кинематике Ньютона играет роль параметра, независимого от пространственных координат. В результате получаем кинематику классической механики Ньютона с жестко фиксированной звездной фоновой метрикой, которая характеризуется пространственным интервалом

$$ds = dx^2 + dy^2 + dz^2 \quad (4)$$

геометрии Эвклида и не зависящим от него интервалом времени  $dt$ .

В этой кинематике время универсально, едино, абсолютно, оно «само по себе и по самой своей сущности, без всякого отношения к чему-либо внешнему протекает равномерно» [3], оно одно и то же в любых системах отсчета независимо от их относительного положения или движения. Как стало яснее позже, после Специальной теории относительности Эйнштейна, установление такого времени предполагает мгновенную передачу сигнала между двумя любыми точками пространства. У Ньютона такая возможность постулирована его законом всемирного тяготения. Следовательно, этот закон предопределяет кинематику тел в классической механике Ньютона.

## ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА И ИНЕРТНАЯ МАССА [4]

Согласно Специальной теории относительности Эйнштейна, наш мир есть четырехмерное пространство-время. Событие, происходящее с некоторой частицей, определяется местом, где оно произошло, и временем, когда оно произошло. Для геометрической интерпретации события вводится четырехмерная система координат, на осях которой откладываются три пространственные и одна временная координаты точки. В этой системе координат событие изображается точкой – мировая точка, ее траектория – мировая линия.

Определения. Пространственно-временная система координат называется системой отсчета. Системы отсчета, привязанные к свободно движущимся друг относительно друга в данном фоновом поле материальным частицам, называются инерциальными.

В механике Ньютона, в связи с независимостью пространственных координат точек от временной координаты, системы отсчета реализуются как чисто пространственные системы координат с единым, для всех точек пространства, временем. В этом случае инерциальные системы отсчета можно, например, образовывать, связывая их с естественными осями координат траекторий свободно движущихся (по отношению к сфере удаленных звезд) материальных точек. В соответствии с первым законом Ньютона, в его механике инерциальные системы отсчета движутся друг относительно друга поступательно, равномерно и прямолинейно. Но отсюда еще вовсе не следует равноправие групп систем отсчета, в каждой из которых они движутся друг относительно друга поступательно равномерно и прямолинейно. Рассмотрим, например, две такие группы.

Первая группа – Галилеевы инерциальные системы отсчета, которые движутся поступательно, равномерно и прямолинейно по отношению к «неподвижной» системе отсчета, привязанной к удаленным звездам. Вторая группа – Эйнштейновы инерциальные системы отсчета, связанные со свободно «падающими» лифтами в однородном поле сил тяжести, которые движутся поступательно, равномерно и прямолинейно друг по отношению друг, но ускоренно по отношению Галилеевым инерциальным системам отсчета.

В каждом из указанных выше групп координат первый закон Ньютона выполняется. В Галилеевых  $\bar{v}^{abc} = const$  в силу исходного постулата Ньютона, в Эйнштейновых – в силу второго закона Ньютона применительно к движущейся вместе с лифтом в однородном гравитационном поле  $\bar{H}$  материальной точке

$$m\bar{a}^{abc} = m\bar{H} \quad (5)$$

или

$$\bar{a}^{abc} = \bar{H} \quad (6)$$

и кинематики классической механики, согласно которой ускорение этой же материальной точки относительно «падающей» с ускорением  $\bar{H}$  системы координат лифта равно

$$\bar{a}^{omni} = \bar{a}^{abc} - \bar{a}^{nep} \quad (7)$$

или, т.к. для рассматриваемого случая,  $\bar{a}^{nep} = \bar{H}$ ,

$$\bar{a}^{omni} = \bar{a}^{abc} - \bar{H} \quad (8)$$

отсюда, в силу (6),  $\bar{a}^{omni} = 0$  и тогда  $\bar{v}^{omni} = const$ .

Чем же отличаются системы отсчета одной группы от другой? Тем, что по отношению к системам отсчета Галилеевой группы гравитационное поле  $\bar{H}$  может быть обнаружено по ускоренному движению пробной частицы, а по отношению к системам отсчета Эйнштейновой группы мы это поле не обнаружим.

Понимал ли Ньютон, что сформулированные им законы справедливы в каждой из этих групп систем отсчета и видел ли он их различие? Понимал и видел, и четко это сформулировал в следующих следствиях [3].

«Следствие V. Относительные движения друг по отношению к другу тел, заключенных в каком либо пространстве одинаковы, покоится ли это пространство или движется равномерно и прямолинейно без вращения». (Напомним, что покоящееся пространство у Ньютона привязано к удаленным звездам.)

«Следствие VI. Если несколько тел, движущихся как бы то ни было друг относительно друга, будет подтверждено действию равных ускоряющих сил, направленных по параллельным между собою прямым, то эти тела будут продолжать двигаться друг относительно друга также, как если бы сказанные силы на них не действовали».

Но для Ньютона одна из главных задач как раз и состояла в установлении закона движения тел на Земле и планет на небе под действием сил тяготения. Поэтому он, не желая «терять» эти силы, не только выбрал в качестве базовых Галилеевы системы отчёта, но даже более того, отдаёт предпочтение лишь одной из них, привязанной к неподвижным звездам, называя покой и движение по отношению к ней истинным или абсолютным. «Причины происхождения, которыми различаются истинные и кажущиеся движения суть те силы, которые надо приложить, чтобы произвести эти движения. Истинное абсолютное движение не может ни произойти, ни измениться иначе, как от действия сил, приложенных непосредственно к самому движущемуся телу, тогда как относительное движение тела может быть и произведено, и изменено без приложения сил этому телу, достаточно, чтобы силы были приложены к тем телам, по отношению к которым это движение определяется» [3]. И хотя следствие V, процитированное выше, Ньютон и заключает примером: «Все движения на корабле совершаются одинаково, находится ли он в покое или движется равномерно и прямолинейно» [3], но он понимал ненадежность системы отсчёта, связанной с кораблем. Если по отношению к кораблю все тела начали ускоряться, то неизвестно, то ли тела движутся ускоренно потому, что на них подействовали силы, а корабль продолжал двигаться равномерно и прямолинейно, то ли оттого, что силы подействовали на корабль, то ли оттого, что имеет место то и другое одновременно. Для Ньютона это далеко не одно и то же: «Вся трудность... физики и состоит в том, чтобы по явлениям распознать силы природы, а затем по этим силам изъяснить остальные явления» [3].

Итак, по Ньютону, абсолютная инерциальная система отсчёта, привязанная к удаленным звездам, выделяется тем, что в ней изменение скорости материальной частицы может произойти лишь от действия силы, приложенной именно к данной частице. Следовательно, выбор этой системы отсчёта предопределен необходимостью регистрации сил тяготения окружающих нас тел пол их ускоренному (не равномерному и прямолинейному) движению по отношению к сфере удаленных звезд. Или иначе: Ньютон выделяет гравитационные поля тел Солнечной системы из фонового поля («абсолютного пространства»), формируемого сферой удаленных звезд. Сегодня, после теории гравитации Эйнштейна, условность такого расчленения очевидна, однако такой подход Ньютона не только исторически и логически обусловлен, но и практически оправдан.

В соответствии с третьим законом Ньютона, ускоренно движущееся в абсолютной инерциальной системе координат тело окажет противодействие ускоряющему его телу, в силу его «врожденной способности сопротивления» [3]. Но с позиций сегодняшних представлений о близкодействии, причиной появления противодействия может быть лишь взаимодействие тела с фоновым полем, в котором оно движется. Эта способность ускоренно движущейся материальной частицы взаимодействовать фоновым полем характеризуется качеством, выражаемым понятием ее инертной массы.

Определение. Инертная масса тела есть мера его взаимодействия с фоновым гравитационным полем при его ускоренном движении в инерциальной системе отсчета.

### СИЛЫ ИНЕРЦИИ В ИНЕРЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ОТСЧЕТА [5], [6]

Трехвековая практика производственной деятельности подтвердила, что свод законов Ньютона выхватил то главное, что отражает сущность механической формы движения материи, но выявление диалектической природы этих законов есть этап более позднего синтезирующего познания. Период же Ньютона – это период расчленения явлений природы, познания отдельных сторон этих явлений, рассмотрения их изолированно, «а в таком случае сменяющиеся движения выступают перед нами – одно как причина, другое как следствие» [1].

По Ньютону, чтобы вывести тело из состояния покоя (в Галилеевой инерциальной системы отсчёта), необходимо к нему приложить силу, т.е. причина движения – внешнее воздейст-

вие. Хотя он и фиксирует тот факт, что движущееся тело при этом окажет противодействие, но это противодействие в причину движения им не включается. У него действие и противодействие распределены между разными телами: тело  $B$  из состояния покоя выводит тело  $A$ , действие тела  $A$  есть причина движения тела  $B$ , но само тело  $A$  испытывает противодействие со стороны тела  $B$ . Это взаимодействие между действием и противодействием отражено Ньютоном в его третьем законе: «Действию всегда есть равное противодействие, иначе, взаимодействия двух тел друг на друга между собой равны и направлены в противоположные стороны» [3].

Согласно диалектике, чтобы познать сущность любой из форм движения материи, надо раскрыть это движение как единство и борьбы противоположностей, в противном случае «остается в тени САМО движение, его двигательная сила, его мотив» [7].

Механическое движение, как изменение взаимного положения тел в пространстве с течением времени, относится к простейшей форме движения материи и, казалось бы, его-то источник, его мотив должен быть давно уже раскрыт. Но, как показала завершенная лишь Энгельсом дискуссия о двух мерах механического движения [8] и продолжающаяся дискуссия о силах инерции [9], [10], [11], и др., эта простейшая форма движения материи является не столь уж простой, когда вопрос касается ее теоретического (в смысле диалектического) осмысления.

Из того, что в третьем законе Ньютона говорится о действии и противодействии, вовсе еще не следует, что именно в нем и раскрывается сущность механической формы движения как единства и борьбы противоположностей. Во-первых, не всякие полярности, противоположности являются противоречиями диалектическими. Во-вторых, выявленные в третьем законе противоположности распределены между разными телами, в то время как диалектические противоречия должны быть выявлены в самой сущности именно данного предмета или явления. Ф.Энгельс называет противоречиями в строгом смысле слова отношение противоположностей внутри одного и того же: «Если вещи присуще противоположность, то эта вещь находится в противоречии с самой себе; то же относится и к выражению этой вещи мысли» [8].

Согласно механике Ньютона, Земля есть источник силы, приложенной к Луне, что и является причиной движения последней вокруг Земли, но Луна противодействует с силой, равной ее центробежной силе и это противодействие приложено к Земле. Такая трактовка причины движения дала основание Энгельсу заметить: «Ньютоновское притяжение и центробежная сила – пример метафизического мышления: проблема не решена, а только поставлена, и это преподносится как решение» [1].

В-третьих, в конечном итоге, выявленное единство и борьба противоположностей должны раскрыть взаимоотношение движения с его противоположностью – покоем, но третий закон Ньютона не позволяет это сделать, в нем действие и противодействие относятся к разным телам.

Итак, третий закон Ньютона не раскрывает сущности механического движения ни в единстве противоположностей (в нем они разорваны, хотя и предполагают друг друга), ни в их борьбе (они не отрицают, не снимают, не исключают друг друга). Но это не исключает того, что выступающие на поверхности действие и противодействие в этом законе есть лишь внешняя форма проявления сущностных, глубинных, диалектических противоречий, которые могут быть выявлены лишь в одном и том же объекте, именно в том, который движется.

Рассмотрим второй закон Ньютона – основной закон динамики материальной точки, этой исходной «клеточки» как носителя диалектических противоречий механической формы движения материи. На первый взгляд, ни о каких противоположностях, ни о каких противоборствующих силах в этом законе речи не идет, в нем устанавливается количественная взаимосвязь между приложенной к материальной точке силой и ее ускорением

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (9)$$

Но если мы, чтобы раскрыть диалектическое содержание этого равенства, перенесем все его члены в одну сторону, приравняем его нулю и затем, как это принято в механике, назовем член –  $m\vec{a}$ , имеющий размерность силы, силой инерции  $\vec{J}$ , то получим

$$\vec{F} + \vec{J} = 0 \quad (10)$$

т.е. вместо уравнения движения мы получили уравнение равновесия. Что это, формальный математический прием, или в последнем равенстве скрыто более глубокое физическое содержание второго закона Ньютона? Попытаемся ответить на этот вопрос.

Существует ли в рассматриваемом явлении сила, в точности равная  $\bar{J}$ ? Да существует – это сила противодействия, о которой говорилось выше в третьем законе Ньютона. И приложена эта сила со стороны движущейся с ускорением материальной точки к тому телу, которое воздействует на нее силой  $\bar{F}$ . По Ньютону, это «врожденная сила материи как присущая ей способность сопротивления», которая «могла бы быть весьма вразумительно названа силой инерции» [3]. Следовательно, Ньютон наделил движущуюся под действием силы материальную точку способностью сопротивления, и сделал это он не по своей прихоти, а, очевидно, поэтому, что это заложено в самой сущности, в самой природе механического движения. По этому поводу диалектик Ф.Энгельс делает себе заметку: «Сила. Подвергнуть также анализу и отрицательную сторону – сопротивление, которое противопоставляется перенесению движения» [1].

Начнем такой анализ с вопросов: откуда точка «знает», что ей надо сопротивляться, откуда она «знает» какова ее масса и каково у нее в каждый момент времени ускорение, наконец, как она создает противодействие, в точности равное  $-m\bar{a}$ ? На все эти вопросы у Ньютона один ответ: «Это врожденная сила материи как присущая ей способность сопротивления». Сегодня на эти вопросы отвечают – таково свойство материи, что по сути одно и то же. Неужели за более чем трехсотлетний период развития науки мы не продвинулись в решении этих вопросов? Согласиться с приведенными выше ответами, значит отказаться от поиска научного ответа. Поэтому продолжим анализ.

Каково минимальное число материальных объектов задействовано во втором законе Ньютона? На первый взгляд два – движущаяся материальная частица и то тело, которое является источником приложенной к ней силы. Но это не так, есть еще один, хотя и неявный, материальный объект – тот, который Ньютон назвал абсолютным пространством. Это абсолютное пространство наделяется им вполне конкретными физическими свойствами, которые раскрываются, во-первых, в его первом законе, во-вторых, на опыте с вращающимся ведром с водой. По этому поводу Эйнштейн заметил: «В динамике Ньютона пространство обладает реальностью – в противоположность геометрии и кинематике» [12].

Ньютон формулирует свои динамические законы не для пустого пространства, а для того случая, когда частица движется в реальном физическом «абсолютном пространстве» – в фоновом поле, новом физическом объекте. Тогда все становится на свои места. Во втором законе Ньютона присутствует три материальных объекта: а) тело, которое является источником силы  $\bar{F}$ ; б) движущаяся материальная частица, к которой приложена сила  $\bar{F}$ ; в) фоновое поле, в котором движется частица. Далее события развиваются так. От действия силы  $\bar{F}$  у частицы появляется ускорение. Ускоренно движущаяся частица взаимодействует с фоновым полем. В результате появляется приложенная к данной частице сила инерции  $\bar{J}$ , которая опосредствованно, через движущуюся материальную частицу, воспринимается как противодействие тому телу, которое является источником силы  $\bar{F}$ . И здесь-то возникает два криминальных, с точки зрения искреннего сторонника Ньютона, вопроса.

Вопрос первый: по третьему закону Ньютона сила – понятие парное. Если сила инерции  $\bar{J}$  приложена к движущейся с ускорением частице, то где ее сила-двойник и к чему эта сила-двойник приложена?

Вопрос второй: если к ускоренно движущейся материальной частице приложена и сила-действие  $\bar{F}$  и сила противодействия  $\bar{J}$ , при этом их сумма равна нулю, то, как может частица двигаться с ускорением, если приложенная к ней система сил уравновешена, это же противоречит второму закону Ньютона? Т.е. искренний сторонник Ньютона спрашивает: «Так что же получается, вместо диалектического осмысления законов Ньютона мы пришли к тому, что они нарушаются, ошибочны, не действуют?» Вовсе нет, и не нарушаются, и не ошибочны, и действуют, но действуют диалектически.

Ответ на первый вопрос таков. Понятие силы имеет ограниченную область применения, именно там, где речь идет о механическом взаимодействии тел, т.е. при переходе механической формы движения материи в механическую же. Но понятие силы теряет свой смысл, когда речь идет с других, немеханических видах взаимодействия, т.е. при переходе механической формы движения в другие формы движения материи, как это имеет место при взаимодействии тела с полем. Если для выражения действия поля на тело все же в механике понятие силы применяют (такова, например, электромагнитная сила Лоренца), то обратное не имеет места, бессмысленно говорить о силе, приложенной к полю. При взаимодействии тела и поля сила не является универсальной мерой взаимодействия этих двух различных видов материи – вещества и поля, это взаимодействие можно и нужно рассматривать с позиции других мер движения, например, энергии. Поэтому не возникает никаких дискуссий, когда работу сил инерции, выраженную через кинетическую энергию тела, складывают с работой приложенных к нему активных сил и в результате получают ноль. С учетом этого становится понятным замечание Энгельса: «Механика: точкой отправления для нее была инерция, являющаяся лишь отрицательным выражением неуничтожимости движения» [1].

Теперь разрешим то противоречие, о котором говорится во втором вопросе. Уже сама постановка говорит о том, что задавший вопрос мыслит себе только две возможности, взаимоисключающие друг друга: приложенная к материальной частице система сил или уравновешена, и тогда, в соответствии со вторым законом Ньютона, частица покоится, либо движется равномерно и прямолинейно, или неуравновешенна, и тогда эта частица движется ускоренно. Но на самом деле реализуется третий вариант, противоречий по самой своей сущности отражаемого явления движения. Эта система сил и уравновешена и не уравновешена: «Движение само есть противоречие. Уже простое механическое перемещение может осуществиться лишь в силу того, что тело в один и тот же момент времени находится в данном месте и одновременно – в другом, что оно находится в одном и том же месте, и не находится в нем. А постоянное возникновение и одновременно разрешение этого противоречия и есть именно движение» [8].

Итак, приложенная сила  $\bar{F}$  вызывает ускоренное движение частицы. Противодействующая сила инерции  $\bar{J}$  отрицает это движение (с некоторым запаздыванием, ввиду конечности скорости распространения любых взаимодействий) равновесием сил. Но само это равновесие отрицается (опять-таки с некоторым запаздыванием) неуравновешенностью и мы приходим к исходному пункту, но на новом уровне, когда у частицы уже другая скорость, отличная от ее значения в предшествующий момент и т.д. И все это лишь огрубленная схема непрерывного процесса движения. В этом процессе движения бессмысленно ставить вопрос о том, какая из сил  $\bar{F}$  и  $\bar{J}$  является первичной и какая – вторичной. «С какой стороны мы не подошли бы к рассматриваемому вопросу, различие между первичным и вторичным процессами остается чисто формальным и, как правило, снова снимается в их взаимодействии между собой. Если это забывают, если рассматривают подобные относительные противоположности как нечто абсолютное, то, в конце концов, неизбежно запутываются... в безнадежных противоречиях» [1]. Например, при движении планет источником и силы действия (тяготение Солнца) и силы противодействия (центробежная сила инерции) является единое физическое поле, и нельзя выделить, какая из этих сил первична и какая вторична. Эта локальная эквивалентность сил тяготения и сил инерции была взята Эйнштейном в качестве исходной посылки его общей теории относительности и привела к теории гравитации, в которой понятия силы тяготения вообще и силы инерции в, частности, полностью исчезают. И о движении частиц при наличии между ними лишь гравитационного взаимодействия говорят как о свободном движении частиц по геодезической линии и связывают данное состояние с понятием невесомости. Заметим, что это движение по геодезической линии не есть движение по инерции в смысле Ньютона, т.к. последнее определяется как движение частицы, изолированной от любых взаимодействий.

Итак, законы Ньютона в совокупности отражают диалектику механического движения материальной частицы в реальном пространстве как физическом поле. Сама сущность этой формы движения материи, ее источник, ее мотив, ее причина раскрываются как единство и борьба противоположностей во втором законе Ньютона. Причем особенно наглядно – записан-

ном в форме  $\bar{F} + \bar{J} = 0$ , т.е. в форме равновесия. Но последнее обстоятельство нас не должно смущать, ибо «всякое равновесие либо является лишь относительным покоем, либо само представляет собой движение в равновесии, каким, например, является движение планет» [8].

### К ИСТОРИИ ПРИНЦИПА ДАЛАМБЕРА

Для движущейся несвободной материальной частицы Даламбер сформулировал принцип (1742 г.): часть  $\bar{F}_1$  активной силы  $\bar{F}$ , приложенной к материальной частице, сообщает ей ускорение и учитывается в законе Ньютона  $m\bar{a} = \bar{F}_1$  а другая ее часть  $\bar{F}_2$  в это равенство не входит ( $\bar{F} = \bar{F}_1 + \bar{F}_2$ ), т.к. она теряется. Но это возможно только в том случае, когда к частице приложена еще некоторая дополнительная сила  $\bar{N}$  - сила реакции связи, равная по величине и противоположная по направлению потерянной части  $\bar{F}_2$  активной силы  $\bar{F}$ , т. е.  $\bar{F} + \bar{N} = 0$ . Так как

$$m\bar{a} = \bar{F}_1 = \bar{F} - \bar{F}_2 = \bar{F} + \bar{N} \quad (11)$$

или

$$\bar{F} + \bar{N} - m\bar{a} = 0, \quad (12)$$

то позже (1856 г. Делоне) отсюда и возникла современная формулировка принципа Даламбера

$$\bar{F} + \bar{N} + \bar{J} = 0 \quad (13)$$

Принцип Даламбера: Приложенные к движущейся с ускорением материальной точке активные силы и силы реакций связей уравниваются ее силой инерции.

Еще раз подчеркнем, что в принципе Даламбера говорится о фактическом, а не условном равновесии сил, и это вовсе не обозначает движение с постоянной скоростью, т.к. входящая в этот принцип сила инерции возникает лишь при ускоренном движении частицы. Трактовка силы инерции как физической силы, приложенной к данной частице, полностью согласуется с ньютоновским понятием силы, если перейти к локальной системе координат, связанной с данной движущейся ускоренно частицей. В этой системе координат частица, действительно, покоится под действием приложенных к ней сил активных, сил реакций связей и сил инерции.

Из всего сказанного выше следует, что Даламберовы силы инерции есть силы объемные (массовые) и в этом отношении они сродни силам тяготения. И подобно тому, как отличают объемные силы тяготения тела от формы их проявления – веса тела, следует также отличать Даламберовы силы инерции от формы их проявления. Проявляются же эти силы либо как силы контактного воздействия ускоряемого тела на ускоряющие его тело при их контактном взаимодействии, либо как невесомость, если данное тело не стеснено никакими связями и движется в поле сил тяготения других тел. Невесомость же тела проявляется в отсутствии его деформации при свободном падении в поле сил тяготения.

### СИЛЫ ИНЕРЦИИ В НЕИНЕРЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ОТСЧЕТА

Силы инерции в классической механике рассматриваются как в инерциальных, так и в неинерциальных системах отсчета. В первом случае это Даламберова сила инерции

$$\bar{J} = -m\bar{a}^{abc}, \quad (14)$$

о которой говорилось выше, во втором – это относительная

$$\bar{J}^{омн} = -m\bar{a}^{омн}, \quad (15)$$

переносная

$$\bar{J}^{неп} = -m\bar{a}^{неп}, \quad (16)$$

и Кориолисова сила инерции

$$\bar{J}^{Кор} = -m\bar{a}^{Кор}. \quad (17)$$

Очевидно, ввиду соотношения

$$\bar{a}^{abc} = \bar{a}^{омн} + \bar{a}^{неп} + \bar{a}^{Кор} \quad (18)$$

имеем

$$\bar{J} = \bar{J}^{омн} + \bar{J}^{неп} + \bar{J}^{Кор} \quad (19)$$

При изучении динамики относительного движения материальной точки в неинерциальной системе отсчета, вводя понятия переносной и кориолисовой сил инерции, следует различать два случая [13].

В первом случае в направлении переносного и кориолисового ускорений существует контактное взаимодействие между движущейся материальной частицей и тем телом, с которым связана подвижная система отсчета. Тогда переносная и кориолисова силы инерции обусловлены взаимодействием движущейся материальной частицы с фоновым гравитационным полем и проявляются они как поверхностные силы, приложенные со стороны этой частицы к взаимодействующему с ней телом.

Во втором случае указанного выше взаимодействия не существует. В этом случае переносную и кориолисову силы инерции следует рассматривать как некоторые условные величины, вводимые для того, чтобы записать второй закон Ньютона в неинерциальной системе отсчета в той же форме, что и в инерциальной.

Аналогично, относительная сила инерции есть результат взаимодействия частицы с фоновым полем, если она взаимодействует с другими телами и полями, помимо ее контактного взаимодействия с переносящим телом. В противном случае относительная сила инерции есть чисто кинематический эффект – результат движения подвижной системы отсчета.

Таким образом, относительная, переносная и кориолисова силы инерции проявляются как физические силы, приложенные к взаимодействующим с нею телам, лишь в той их части, в какой они обеспечивают проявление Даламберовой силы инерции как силы физической в соответствии с (19).

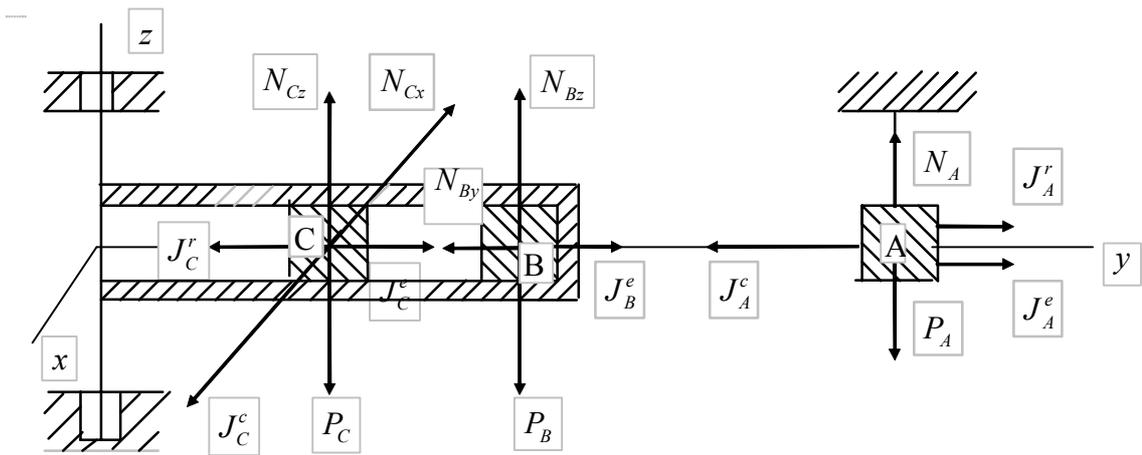


Рис. 1

Пусть, например, трубка вращается по отношению к инерциальной системе координат с постоянной угловой скоростью  $\omega$  - рис. 1. Свяжем с этой трубкой подвижную систему координат  $xuz$ . Тогда частица  $A$ , покоящаяся относительно выбранной инерциальной системы координат, по отношению к системе  $xuz$  движется равномерно по окружности в направлении, противоположном вращению трубки. Относительная, переносная и Кориолисова сила инерции этой частицы по величине равны

$$J^{omn} = m\omega^2 l, \quad (20)$$

$$J^{nep} = m\omega^2 l, \quad (21)$$

$$J^{Kop} = 2m\omega^2 l \quad (22)$$

и целиком обусловлены кинематическим эффектом – вращением подвижной системы координат  $xuz$ , поэтому как физические силы они не проявляются:

$$\bar{J}^{omn} + \bar{J}^{nep} + \bar{J}^{Kop} = 0 \quad (23)$$

Иначе обстоит дело при движении частиц  $B$  и  $C$ , взаимодействующих с трубкой.

Частица  $B$  в системе координат  $xuz$  покоится, при этом

$$\bar{v}^{omni} = \bar{a}^{omni} = \bar{a}^{Kop} = 0. \quad (24)$$

Следовательно,  $\bar{J}^{omni} = \bar{J}^{nep} = 0$  и тогда  $\bar{J} = \bar{J}^{nep}$ , т.е. при относительном покое частицы в неинерциальной системе отсчета ее переносная сила инерции есть одновременно и Даламберова сила инерции. Поэтому эта сила инерции обусловлена взаимодействием частицы с фоновым гравитационным полем, проявляется она как физическая сила, в данном примере как сила, с которой частица  $B$  давит на дно трубки, и эту силу надо учитывать при прочностном расчете трубки.

Наконец, рассмотрим материальную частицу  $C$ . В направлении оси  $x$  эта частица находится в относительном покое. Поэтому, под действием силы реакции трубки  $\bar{N}_{Cx}$ , частица  $C$  движется ускоренно в направлении  $\bar{a}_C^{Kop}$  в инерциальной системе отсчета, взаимодействуя с фоновым гравитационным полем. Тогда её кориолисова сила инерции  $\bar{J}^{Kop}$  есть сила, приложенная к самой материальной частице  $C$ . Но проявляется эта сила инерции как физическая сила воздействия данной частицы на стенку трубки.

В направлении переносного и относительного ускорений частица  $C$  не взаимодействует с другими телами, поэтому появление соответствующих ей переносной и относительной силы инерции есть кинематический эффект, обусловленный вращением подвижной системы отсчета вместе с трубкой.

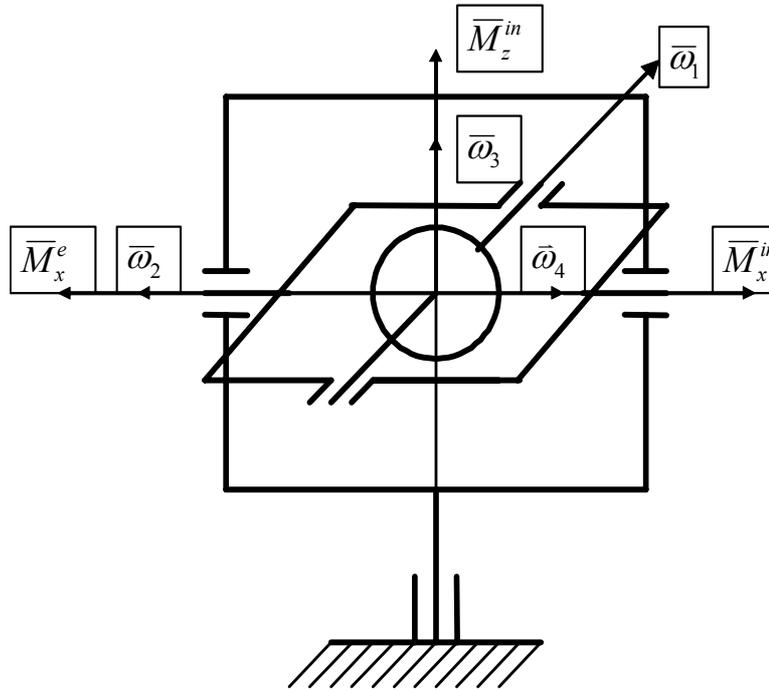


Рис. 2

Рассмотрим теперь с этих позиций механизм возникновения вынужденной процессии гироскопа и гироскопического момента.

Пусть к оси вращающегося с угловой скоростью  $\bar{\omega}_1$  ротора гироскопа – рис. 2, приложена пара сил с векторным моментом  $M_x^e$ . Ось  $y$  направлена вдоль оси ротора, оси  $x, z$  в собственном вращении ротора вокруг оси  $y$  не участвуют. Пара сил с моментом  $M_x^e$  стремится вызвать вращение ротора в угловой скоростью  $\bar{\omega}_2$ , что приведет к появлению системы пар Кориолисовых сил инерции его частиц с главным векторным моментом  $M_z^{in}$ . Если в направлении действия пар Кориолисовых сил инерции с моментом  $M_z^{in}$  ротор с другими телами не имеет контактного взаимодействия, то его процессия с угловой скоростью  $\bar{\omega}_3$  есть такой же кинематический эффект, как и движение частицы  $C$  вдоль трубки в предыдущем примере. Рассматри-

вая, в таком случае, движение частиц ротора как сложное с переносной угловой скоростью  $\bar{\omega}_3$  и относительной с угловой скоростью  $\bar{\omega}_1$  найдем, что на ротор будет действовать другая система пар Кориолисовых сил инерции с моментом  $M_x^{in}$ . Так как в направлении последнего момента ротор взаимодействует с опорными подшипниками, то этот момент обусловлен взаимодействием частиц с фоновым полем и проявится он как пара гироскопических сил реакций, приложенных со стороны ротора на опоры и противодействующих паре исходных внешних сил, в строгом соответствии с третьим законом Ньютона. В результате такого механизма взаимодействия вращения ротора в направлении действия пары внешних сил наблюдаться не будет, но будет наблюдаться его прецессия вокруг оси  $z$  в таком направлении, чтобы вектор  $\bar{\omega}_1$  (ось собственного вращения ротора) кратчайшим путем совмещался с вектором  $\bar{\omega}_2$ .

Если же подшипники ротора не позволяют ему прецессировать с угловой скоростью  $\bar{\omega}_3$ , то на них будет действовать пара сил гироскопическим моментом  $M_z^{in}$ , перпендикулярным исходному векторному моменту  $M_x^e$  внешних сил. В результате пара внешних сил с моментом  $M_x^e$  остается неуравновешенной, чем и объясняется тот факт, что уменьшением с трех до двух степеней свободы, гироскоп теряет способность сопротивляться усилиям, изменяющим направление оси его собственного вращения.

Итак, если силы инерции в инерциальных системах отсчета всегда являются физическими силами, т.е. динамическими объемными силами, возникающими вследствие взаимодействия движущейся с ускорением материальной частицы фоновым гравитационным полем, то в неинерциальных системах отсчета силы инерции могут быть и физическими (динамическими) и кинематическими. В первом случае в направлении относительного, переносного и кориолисового ускорений существует взаимодействие частицы с другими телами и как следствие, с фоновым полем, во втором – такого взаимодействия не существует.

### ТЯЖЕЛАЯ И ИНЕРТНАЯ МАССЫ И ИХ ЭКВИВАЛЕНТНОСТЬ

Рассматривая силу инерции в инерциальной системе отсчета, мы пришли к понятию массы тела как меры его взаимодействия с фоновым гравитационным полем или, по Ньютону, как меры его инертности: «Эта сила материи пропорциональна массе и если отличается от инерции массы, то разве только воззрением на нее» [3]

Однако у Ньютона понятие массы возникает и в законе его всемирного тяготения

$$F = \gamma \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}, \quad (25)$$

причем здесь масса несет двойную нагрузку: она, с одной стороны, есть активная тяжелая масса как источник поля сил тяготения, с другой – она есть пассивная тяжелая масса как мера взаимодействия с полем тяготения. Но поскольку в этом отношении масса входит в закон тяготения Ньютона совершенно симметричным образом, то различие между активной и пассивной тяжелой массой исчезает и поэтому вводится единое понятие – тяжёлая или гравитационная масса тела (гравитационный заряд как аналог электрическому заряду).

Определение. Тяжелая (гравитационная) масса тела есть мера его взаимодействия с полем тяготения, которая одновременно является мерой интенсивности излучаемого ею собственного поля тяготения.

Поскольку итог развития науки после Ньютона привел к выводу, что гравитационное поле тяготения (притяжение) и фоновое гравитационное поле (отталкивание) есть проявление одного и того же физического гравитационного поля притяжения-отталкивания, то естественным является вывод, что тяжелая и инертная масса тела есть проявление одного и того же его качества. Равенство тяжелой и инертной масс тела экспериментально доказано уже Ньютоном и подтверждено сегодня с той высокой точностью, которую позволяет современный уровень измерительной техники.

Определение. Масса тела есть его взаимодействия с гравитационным полем и проявляется она либо как масса инертная, либо как масса тяжелая.

Исторически вначале была осознана тождественность инертной и тяжелой масс тела: «Тяжелая и инертная масса равны. До настоящего времени механика контактировала, но не истолковывала это важное положение. Удовлетворительное истолкование можно дать в следующей форме: в зависимости от обстоятельств одно и то же качество тела проявляется либо как «инерция», либо как тяжесть» [12]. Лишь после этого, опираясь на данный постулат, Эйнштейн создает свою общую теорию относительности как теорию гравитации.

Из всего сказанного следует, что теория гравитации Эйнштейна есть релятивистское обобщение не закона тяготения Ньютона, (именно это и было его первоначальной целью), а системы уравнений движения вещества в его собственном гравитационном поле. Или иначе: теория гравитации Эйнштейна есть релятивистское полевое обобщение принципа Даламбера на базе постулата об эквивалентности сил инерции и сил тяготения. Правда, теперь нам ясно, что эту эквивалентность следует понимать лишь в той мере, в какой бывают эквивалентными диалектические противоположности.

### О ВКЛАДЕ ОТДЕЛЬНЫХ ТЕЛ В ФОНОВОЕ ПОЛЕ ВСЕЛЕННОЙ

Уже отмечалось выше, что в классической макромеханике Ньютона фоновое гравитационное поле проявляется как однородное и изотропное поле отталкивания, индуцируемое всеми объектами Вселенной. Чтобы понять эту однородность и изотропность, оценим соотношение между величинами полей притяжения и отталкивания в гравитационном поле, излучаемом отдельным телом, например, Землей.

Согласно постньютоновскому приближению [2], гравитационный потенциал поля, создаваемого покоящимся относительно сферы удаленных звезд телом, состоит из ньютоновского

потенциала тяготения  $\varphi_1 = -\gamma \frac{m}{r}$ , порожденного массой  $m$  и противоположного по закону до-

полнительного потенциала  $\varphi_2 = \left(\frac{\varphi_1}{2r}\right)^2$ , порожденного потенциалом  $\varphi_1$ . Это вторичное поле

есть поле отталкивания. Для величин напряженностей данных двух полей у поверхности Земли получается соотношение порядка  $10^{-10}$ . Если представить, что масса Земли сжата до шарика диаметром 0,5 см, то лишь тогда на ее поверхности напряженности полей притяжения и отталкивания были бы равны по величине. Отсюда ясна та большая точность, о которой подтверждается закон тяготения Ньютона в экспериментах, а фоновое поле оказывается однородным и изотропным – основной вклад в него вносит вся сфера удаленных звезд. Именно это обстоятельство и вынудило Ньютона выделить абсолютную инерциальную систему отсчета, привязанную к удаленным звездам. У нас, как и у Ньютона 300 лет назад, нет другого способа зафиксировать фоновое поле Вселенной кроме как интегрально, через силы инерции, т.е. через инертность тел.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Энгельс Ф. Диалектика природы. – М.: Политиздат, 1982. 400 с.
2. Потехин А.Ф. // Изв. вузов. Физика. – 1991. – № 5, – С.15-18.
3. Ньютон И. Математические начала натуральной философии. – М.: Наука, 1989. – 688 с.
4. Потехин А.ф. Законы механики в их развитии (к трехсотлетию «Математических начал натуральной философии» И.Ньютон) /Ред.журнала «Изв. вузов. Физика». – Томск, 1987.–20 с. – Библиогр. 10 назв. – Деп. в ВИНТИ 6.06.87, № 4107-1987.
5. Потехин А.Ф. Механическое движение как единство и борьба противоположностей. /Одесск. ин-т инж. мор. флота. Одесса, 1986. – 11 с. – Библиогр. 4 назв. – Деп. в ИНИОН АН СССР 9.01.87, № 27901.
6. Потехин А.Ф. О диалектической и метафизической трактовках исходных понятий классической механики. – Программа и тезисы докладов всесоюзной конференции «Мировоззренческие аспекты в преподавании общенаучных и общетехнических дисциплин. Алма-Ата, 1990, с.40.
7. Ленин В.И. Философские тетради. – М.: Политиздат, 1978. –752 с.
8. Энгельс Ф. Анти-Дюринг. – М.: Политиздат, 1977. –484 с.
9. Хайкин С.Э. Силы инерции и невесомость. – М.: Наука, 1967. –312с.
10. Ишлинский А.Ю. Классическая механика и силы инерции. –М.: Наука, 1987. –320 с.
11. Седов Л.И. Об основных моделях в механике. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1992. –152 с.
12. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. - М.: Наука, 1965. –Т.1-4.
13. Кильчевский Н.А. Курс теоретической механики. – М.: Наука, 1977. –Т.1-2.