

ПОЧЕМУ НЕОБХОДИМО ПЕРЕПИСАТЬ УЧЕБНИКИ ПО КЛАССИЧЕСКОЙ МЕХАНИКЕ

Шипов Г.И.

Введение

Классическая механика была и остается той «лакмусовой бумажкой», которая определяет фундаментальность новой физической теории. Каждый раз, когда появлялась новая фундаментальная физическая теория, то она, прежде всего, обобщала основы классической механики. Так было уже три раза: при создании специальной теории относительности, общей теории относительности и квантовой механики.

Особый статус при фундаментальных обобщениях классической механики имеют изменения наших представлений о структуре пространства. В первом случае больших скоростей ($v/c \leq 1$) в СТО пространство оказалось четырехмерным, при больших скоростях и ускорениях в ОТО оно оказывается, вдобавок, искривленным, а в квантовой теории появилось гильбертово пространство состояний. Если такие физические понятия, повседневно ощущаемые каждым из нас, как скорость и ускорение прозрачны для «человека с улицы», то представление о физическом смысле гильбертова пространства достаточно абстрактно даже для физика с университетским образованием. По этому поводу среди физиков существует две точки зрения:

- 1) Квантовая теория неполна и из-за этого в ней потеряно образное, (т.е. физическое) мышление (А.Эйнштейн и его сторонники, которых в современной физике меньшинство).
- 2) Обычное «классическое» представление о материи (т.е. образное мышление) в квантовой теории отсутствует, вероятностное описание физических явлений принципиально, а понимать квантовую теорию необязательно (Н.Бор и копенгагенская школа, преобладающая в современной физике).

Я придерживаюсь эйнштейновской точки зрения, но считаю, что проблема «непонимания» квантовой теории связана с неполнотой существующей классической механики. Считается, что классическая механика включает в себя: 1) механику материальной точки, 3 уравнения движения которой инвариантны относительно преобразований Галилея-Ньютона (механику Ньютона); 2) механику абсолютно твердого тела (механику Ньютона-Эйлера), 6 уравнений которой так же инвариантна относительно преобразований Галилея-Ньютона. В результате изучения работ Галилея и Декарта, касающихся основ механики, И.Ньютон, в своей знаменитой работе [1], дает словесную формулировку трех законов механики Ньютона. Однако, известный нам аналитический аппарат, позволяющий решать множество задач о движении материальной точки под действием внешней силы, был разработан Л.Эйлером [2]. Эйлер был математик и его особо не интересовали возможные изменения основ механики, при выводе уравнений движения вращающегося

твердого тела, хотя эти изменения очевидны для физика. Во-первых, вращающееся твердое тело имеет 6 степеней свободы и его движение описывается шестью координатами: тремя трансляционными x, y, z и тремя угловыми φ, ψ, θ . Во-вторых, известные гироскопические эффекты 3D гироскопа, такие как прецессия и нутация (т.е. прецессия свободного гироскопа, например, в невесомости), вообще говоря, выводят нас за рамки механики Ньютона. Вот что пишет по этому вопросу известный ученый по теории гироскопов К.Магнус [6]: «Чтобы объяснить поведение вращающегося тела, часто проводят аналогию между вращательным движением тела и движением материальной точки (т.е. механики Ньютона (прим. автора)). Однако эта аналогия в теории гироскопа скорее вредна, чем полезна, так как область, в которой она справедлива, кончается как раз там, где начинаются типичные гироскопические явления». Ему вторит другой специалист по теории гироскопов Р.Граммель [7]: "Анизотропия твердого тела, порождаемая его вращением", не имеет аналога в механике материальной точки (т.е. механике Ньютона (прим. автора)). Если нанести удар по покоящейся материальной частице, она начинает двигаться в направлении ударного импульса. И, напротив, совсем не обязательно, чтобы приложение к покоящемуся телу ударного момента вызвало вращение тела именно вокруг той оси, относительно которой действовал момент». В-третьих, при вращении гироскопа, свободного от внешних сил, наблюдается ускоренное инерциальное движение составляющих его материальных частиц, что находится в прямом противоречии с принципом инерции (первым законом) механики Ньютона.

1. Уравнения Эйлера и проблема движения массы по инерции

Примерно через 30 лет после работы [2], Л.Эйлер публикует уравнения движения абсолютно твердого тела, которые мы запишем как

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F}, \quad (1)$$

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{N}, \quad (2)$$

где в уравнениях (1) $\vec{P} = M\vec{V}$ - импульс центра масс тела, определяемый через сумму $\vec{P} = \sum \vec{p}$ импульсов \vec{p} частиц, составляющих тело, $M = \sum m$ - полная масса тела и $\vec{F} = \sum \vec{f}$ - сумма всех (внешних) сил, действующих на каждую из частиц. Если устремить размеры тела к нулю, то, в пределе, из уравнений (1) следуют уравнения движения материальной точки механики Ньютона. Поэтому считается, что принцип относительности Галилея-Ньютона и все другие законы механики Ньютона для уравнения (1) выполняются, а именно:

1) пространство, в которых справедливы уравнения (1) трехмерно и евклидово, однородно и изотропно, время абсолютно;

2) уравнения (1) инвариантны относительно 3D трансляционных преобразований координат – преобразований Галилея-Ньютона, образующих глобальную группу трансляций T_3 (однородность 3D евклидова пространства);

3) уравнения (1) инвариантны относительно 3D поворотов (улы от времени не зависят), образующих глобальную группу $O(3)$ (изотропность 3D евклидова пространства);

4) в отсутствие внешних сил ($\vec{F} = \sum \vec{f} = 0$) и для $M = \sum m = const$ импульс и энергия тела в уравнениях (1) сохраняются. Действительно, уравнения (1) для переменной массы записываются как

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \frac{d}{dt}(M\vec{V}) = \frac{d}{dt}(M)\vec{V} + M \frac{d}{dt}(\vec{V}) = \vec{F}, \quad (3)$$

которые, при условиях

$$\vec{F} = \sum \vec{f} = 0, \quad M = const$$

записываются как

$$M \frac{d}{dt}(\vec{V}) = 0. \quad (3a)$$

В этом случае решения уравнений (1) представляют собой (в декартовых координатах) прямые линии, что является аналитическим подтверждением первого закона механики Ньютона:

I. Центр масс тела без вращения движется прямолинейно и равномерно – по инерции, если на него не действуют внешние силы.

Уравнения (2) Л.Эйлер получает, опираясь на уравнения (1). Для простоты изложения, мы выберем «особую точку» тела – его центр масс и свяжем с ним 3D инерциальную систему отсчета. Если тело вращается, то всегда существует ось вращения, которая, в общем случае, может не проходить через центр масс тела. Вращение каждой материальной точки m тела относительно выбранной локальной системы отсчета создает момент импульса $\vec{l} = [\vec{r} \vec{p}]$, поэтому полный момент импульса тела запишется как

$$\vec{L} = \sum [\vec{r} \vec{p}]. \quad (4)$$

Соответственно, момент внешних сил относительно выбранной локальной системы отсчета записывается в виде

$$\vec{N} = \sum [\vec{r} \vec{f}]. \quad (5)$$

Дифференцируя (4) по времени, находим

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \frac{d}{dt} \sum[\vec{r} \vec{p}] = \sum[\vec{r} \frac{d\vec{p}}{dt}] + \sum[\frac{d\vec{r}}{dt} \vec{p}] = \sum[\vec{r} \vec{f}] + \sum[\vec{v} \vec{p}]. \quad (6)$$

Первый член в правой части (6) совпадает с моментом внешних сил (5), а второй равен нулю, поскольку скорость и импульс в данный момент времени имеют одинаковое направление. В результате из (6) следуют уравнения (2). Уравнения (6) получены в 3D инерциальной системе отсчета, связанной с центром масс, однако в силу принципа относительности Галилея-Ньютона, они справедливы во всех 3D инерциальных системах отсчета.

Если воспринимать вывод уравнений (2) с использованием уравнений (1) чисто формально, то создается впечатление, что уравнения (2) не выводят нас за рамки механики Ньютона. Однако это не так, поскольку при выводе уравнений (2) мы ввели неявным образом угловые переменные – углы Эйлера как функции времени. Поэтому система уравнений (1) и (2) задана на шестимерном многообразии координат, в которое входят три координат трансляционные координаты x, y, z и три угла Эйлера φ, ψ, θ .

Действительно, в уравнениях (2) скорость \vec{v} любой точки вращающегося тела можно представить через вектор угловой скорости вращения $\vec{\omega}$ как

$$\vec{v} = [\vec{\omega} \vec{r}] \quad (7)$$

и записать момент импульса в уравнениях (2) в виде

$$\vec{L} = \sum m[\vec{r} \vec{v}] = \sum m[\vec{r} [\vec{\omega} \vec{r}]] = \sum m(\vec{\omega} \vec{r}^2 - \vec{r}(\vec{\omega} \vec{r})).$$

В тензорном виде это соотношение запишется как

$$L_{\alpha} = \sum m(\delta_{\alpha\beta} \omega^{\beta} x^2 - x_{\alpha} x_{\beta} \omega^{\beta}) = \sum m(\delta_{\alpha\beta} x^2 - x_{\alpha} x_{\beta}) \omega^{\beta} = I_{\alpha\beta} \omega^{\beta}, \quad (8)$$

где

$$I_{\alpha\beta} = \sum m(\delta_{\alpha\beta} x^2 - x_{\alpha} x_{\beta}) \quad \alpha, \beta, \dots = 1, 2, 3 \quad (9)$$

- тензор моментов инерции тела. В тензорных обозначениях вращательные уравнения (2) теперь запишутся как

$$\frac{d}{dt} L_{\alpha} = \frac{d}{dt} (I_{\alpha\beta} \omega^{\beta}) = \frac{d}{dt} (I_{\alpha\beta}) \omega^{\beta} + I_{\alpha\beta} \frac{d}{dt} \omega^{\beta} = N_{\alpha}. \quad (10)$$

В случае абсолютно твердого тела уравнения (10) принимают вид

$$\frac{d}{dt} L_{\alpha} = I_{\alpha\beta} \frac{d}{dt} (\omega^{\beta}) = N_{\alpha} \quad (11)$$

и, если момент внешних сил отсутствует, то

$$\frac{d}{dt} L_{\alpha} = I_{\alpha\beta} \frac{d}{dt} (\omega^{\beta}) = 0, \quad (12)$$

при этом угловой момент $L_{\alpha} = I_{\alpha\beta} \omega^{\beta} = const$ и угловая скорость $\omega^{\beta} = const$ сохраняются.

Давайте сравним уравнения (3а) и (12), первое из которых описывает свободное движение центра масс тела, а второе - свободное собственное вращение тела вокруг некоторой оси. Первое, что бросается в глаза, так это ускоренное движение «по инерции» материальных точек, составляющих тело, при вращении тела вокруг выбранной оси. Действительно, для простоты, рассмотрим вращение однородного сферического твердого тела вокруг оси, проходящей через его центр масс. У такого тела момент все три главных момента инерции (9) (для них главные оси симметрии тела совпадают с осями выбранной системы отсчета) равны

$$I_1 = I_2 = I_3 = I$$

и угловой момент (8) запишется как

$$L_{\alpha} = I \omega_{\alpha}, \quad (13)$$

т.е. угловой момент совпадает с угловой скоростью вращения. В общем случае, при вращении более сложного тела, направление углового момента и угловой скорости не совпадают. В работе [3] разработана компьютерная программа, которая позволяет вычислить и наглядно представить траектории материальных точек, составляющих тело, при различной форме вращающегося тела (гироскопа) и различных направлениях геометрических осей симметрии \vec{n} , углового момента \vec{L} и угловой скорости $\vec{\omega}$.

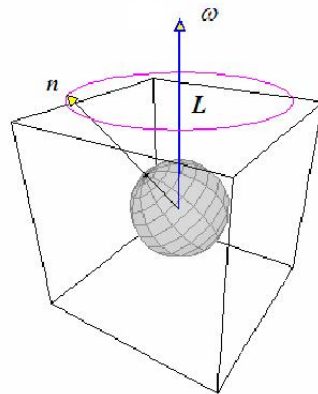


Рис. 1. Материальные точки, составляющие сферически симметричное тело, движутся по окружностям, центры которых лежат на оси вращения.

На рис. 1 изображено свободное вращение однородного, сферически симметричного тела вокруг произвольной оси. Конец вектора, \vec{n} , который для наглядности, специально

вынесен за пределы тела, рисует траектории материальных точек, составляющих тело. Как видно из рисунка, материальные точки движутся по окружностям, т.е. ускоренно, при этом движение материальных точек происходит по инерции. *Такое инерциальное, но ускоренное движение находится в противоречии с принципом инерции механики Ньютона, в которой движение по инерции материальных точек может быть только прямолинейным и равномерным. Это говорит о том, что при вращении тела принцип инерции механики Ньютона подлежит обобщению.*

2. Траектории точек тела при его вращении по инерции

Когда я на лекциях рассказывал об ускоренном движении по инерции, то некоторые физики парировали мой пример, приведенный выше тем, что скорость материальных точек тела меняет свое направление, но не меняет величины и, в этом смысле, остается постоянной. Кроме того, возражения состояли в том, что по круговым траекториям движутся материальные точки тела, а не его центр масс. Действительно, когда отсутствует нутация, т.е. прецессия оси свободно вращающегося тела, вектора \vec{L} и $\vec{\omega}$ совпадают по направлению, как это показано на рис. 1. В этом случае центр масс, лежащий на оси вращения, покоится или движется прямолинейно и равномерно в соответствии с принципом инерции механики Ньютона. Давайте усложним ситуацию и

перейдем в систему отсчета, жестко связанную с вращающимся телом. В такой системе отсчета любой вектор \vec{A} можно разложить по ортам $\vec{n}_1, \vec{n}_2, \vec{n}_3$ системы отсчета, жестко связанной с телом как [4]

$$\vec{A} = A_1 \vec{n}_1 + A_2 \vec{n}_2 + A_3 \vec{n}_3, \quad (14)$$

причем

$$\frac{d\vec{A}}{dt} = [\vec{\omega}\vec{A}]. \quad (14a)$$

В общем случае, направление угловой скорости $\vec{\omega}$ не совпадает с направлением ни одного из векторов $\vec{n}_1, \vec{n}_2, \vec{n}_3$, поэтому мы можем представить угловую скорость в уравнениях (11) в виде (14) и записать производную по времени как

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \vec{L} &= \frac{d}{dt} (L_1 \vec{n}_1 + L_2 \vec{n}_2 + L_3 \vec{n}_3) = \\ & \left(\frac{dL_1}{dt} \vec{n}_1 + \frac{dL_2}{dt} \vec{n}_2 + \frac{dL_3}{dt} \vec{n}_3 \right) + \left(L_1 \frac{d\vec{n}_1}{dt} + L_2 \frac{d\vec{n}_2}{dt} + L_3 \frac{d\vec{n}_3}{dt} \right) = \frac{d\vec{L}}{dt} + [\vec{\omega}\vec{L}], \end{aligned} \quad (15)$$

поскольку, в соответствии с (14a),

$$L_1 \frac{d\vec{n}_1}{dt} = [\vec{\omega} L_1 \vec{n}_1], \quad L_2 \frac{d\vec{n}_2}{dt} = [\vec{\omega} L_2 \vec{n}_2], \quad L_3 \frac{d\vec{n}_3}{dt} = [\vec{\omega} L_3 \vec{n}_3].$$

Теперь уравнения (11) запишутся как

$$\frac{d\vec{L}}{dt} + [\vec{\omega}\vec{L}] = \vec{N}. \quad (16)$$

«Штрихованная» производная в уравнениях (16) означает, что эти уравнения записаны в системе отсчета, жестко связанной с телом.

Выберем теперь оси подвижной системы отсчета так, чтобы они совпадали с главными осями инерции тела, тогда

$$L_1 = I_1 \omega_1, \quad L_2 = I_2 \omega_2, \quad L_3 = I_3 \omega_3 \quad (17)$$

и для проекции на ось x мы имеем из (16)

$$\frac{dL_1}{dt} + [\vec{\omega}\vec{L}]_1 = N_1$$

или, учитывая (17),

$$I_1 \frac{d\omega_1}{dt} + \omega_2 L_3 - \omega_3 L_2 = N_1,$$

или

$$I_1 \frac{d\omega_1}{dt} + (I_3 - I_2) \omega_2 \omega_3 = N_1. \quad (18)$$

Соответственно, для других компонент уравнений (16), имеем

$$I_2 \frac{d\omega_2}{dt} + (I_1 - I_3) \omega_1 \omega_3 = N_2, \quad (19)$$

$$I_3 \frac{d\omega_3}{dt} + (I_2 - I_1) \omega_1 \omega_2 = N_3.$$

Система уравнений (18),(19) называется вращательными уравнениями Эйлера. Эти уравнения особенно наглядно показывают, что в них в качестве новых переменных используются 3 дополнительные угловые координаты (углы Эйлера), которые, в общем случае, невозможно получить из голономных координат x, y, z .

В случае свободного движения, имеем

$$\frac{d\omega_1}{dt} + \frac{(I_3 - I_2)}{I_1} \omega_2 \omega_3 = 0,$$

$$\frac{d\omega_2}{dt} + \frac{(I_1 - I_3)}{I_2} \omega_1 \omega_3 = 0, \quad (20)$$

$$\frac{d\omega_3}{dt} + \frac{(I_2 - I_1)}{I_3} \omega_1 \omega_2 = 0.$$

Из уравнений (20) видно, что угловая скорость вращающегося тела меняется даже если на него не действуют моменты внешних сил. Это изменение называют нутацией. Рассмотрим случай явления нутации, когда $I_1 = I_2$. Из уравнений (20) следует, что

$$\frac{d\omega_3}{dt} = 0, \quad \omega_3 = \omega_0 = \text{const.} \quad (21)$$

и первые два уравнения (20) можно записать как

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_1}{dt} &= -\Omega \omega_2, \\ \frac{d\omega_2}{dt} &= \Omega \omega_1 = 0, \end{aligned} \quad (22)$$

где мы ввели обозначение

$$\Omega = \omega_3 \frac{I_3 - I_1}{I_1}. \quad (23)$$

Умножая второе из уравнений (22) на i и складывая его с первым, получим

$$\frac{d}{dt}(\omega_1 + i\omega_2) = i\Omega(\omega_1 + i\omega_2)$$

откуда

$$\omega_1 + i\omega_2 = Ce^{i\Omega t} = C(\cos \Omega t + i \sin \Omega t), \quad C = \text{const}$$

или

$$\begin{aligned} \omega_1 &= C \cos \Omega t, \\ \omega_2 &= C \sin \Omega t. \end{aligned} \quad (24)$$

Полученная в решении физическая картина наглядно представлена на рис.2 [3]. При $I_1 = I_2 \neq I_3$ геометрическая форма тела может быть разной. Если тело вытянуто вдоль оси момента инерции I_3 , то оно представляет собой сфероид. По большей оси сфероида направлен вектор постоянной угловой скорости вращения $\vec{\omega}_0$, модуль которого определяется по формуле (21). Проекция вектор угловой скорости $\vec{\omega}$ на плоскость, перпендикулярную оси вращения, вращается в этой плоскости с угловой скоростью Ω , оставаясь постоянной по величине в соответствии с формулой

$$C = \sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2}. \quad (24a)$$

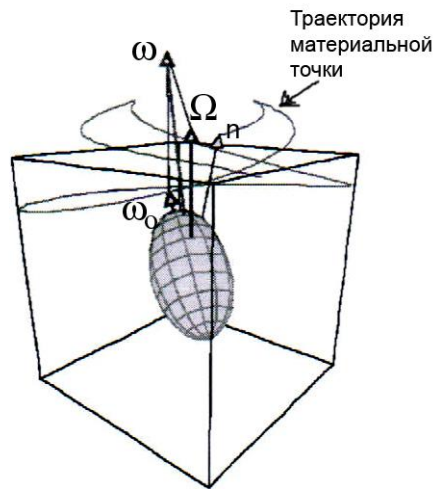


Рис.2. Траектория движение точек тела при свободной прецессии (нутации) сфероида

Вектор угловой скорости $\vec{\Omega}$ неподвижен в пространстве для внешнего наблюдателя, а его направление совпадает с направлением вектора \vec{L} [3]. Ось вращения гироскопа и направленный вдоль нее вектор $\vec{\omega}_0$ прецессирует вокруг вектора \vec{L} с угловой скоростью $\vec{\Omega}$, называемой скоростью нутации. Все три вектора $\vec{\omega}$, $\vec{\omega}_0$ и $\vec{\Omega}$ лежат в одной плоскости. Особенно интересно на рис.2 выглядят траектории материальных точек, составляющих тело. Во-первых, эти траектории совсем не плоские окружности, а во-вторых, они представляют собой далеко не гладкие кривые. И это все при свободном вращении тела!

3. Движение центра масс гироскопа под действием локальных сил инерции

При $M = const$ уравнения движения центра масс гироскопа (1) в системе отсчета, жестко связанной с вращающимся гироскопом, принимают вид

$$\frac{d'\vec{P}}{dt} + [\vec{\omega}\vec{P}] = \vec{F} \quad (25)$$

или, в покомпонентной записи

$$M \left(\frac{d'V_1}{dt} + \omega_2 V_3 - \omega_3 V_2 \right) = F_1, \quad (25a)$$

$$M \left(\frac{d'V_2}{dt} + \omega_3 V_1 - \omega_1 V_3 \right) = F_2 , \quad (25b)$$

$$M \left(\frac{d'V_3}{dt} + \omega_1 V_2 - \omega_2 V_1 \right) = F_3 . \quad (25c)$$

Уравнения (25) интересны тем, что действие локальной силы инерции $[\vec{\omega}\vec{P}]$ на центр масс гироскопа мы можем наблюдать в инерциальной системе отсчета. Из уравнений механики нам известно, что силы инерции не действуют в инерциальных системах отсчета. Тем не менее, результат их действия в ускоренных системах мы можем наблюдать, находясь в инерциальной системе. Это факт следует из экспериментов, о которых речь пойдет ниже.

В случае движения свободного гироскопа уравнения (25) принимают вид

$$M \frac{d'\vec{V}}{dt} = -M[\vec{\omega}\vec{V}]. \quad (26)$$

Здесь M – полная масса гироскопа, V – скорость его центра масс. Сравнивая эти уравнения с уравнениями движения частицы массы m , проходящей через начало вращающейся с частотой ω системы отсчета

$$m \frac{d'\vec{v}}{dt} = -2m[\vec{\omega}\vec{v}] \quad (27)$$

мы видим, что сила инерции в уравнениях (26) в два раза меньше, чем сила Кориолиса в уравнениях (27). Впервые это было указано в работе Е.Губарева [13]. Эта сила, как известно [4], не совершает работы, но изменяет траекторию центра масс. Она направлена под прямым углом к скорости перемещения и обеспечивает обмен между поступательной и вращательной энергией системы при условии ее сохранения. Другими словами, энергия свободного гироскопа сохраняется, хотя импульс центра масс может менять свое значение, например, периодически. Поскольку локальное ускорение в левой части уравнений (26) можно представить как вращение в пространственно-временных плоскостях [12], то мы можем говорить о пространственно-временной прецессии 3D гироскопа. Впервые это понятие было введено и экспериментально исследовано в экспериментах с 4D гироскопом [5].

Пространственно-временную прецессию 3D гироскопа можно найти из решения уравнений (26), представив их покомпонентно

$$\begin{aligned}
M \left(\frac{dV_1}{dt} + \omega_2 V_3 - \omega_3 V_2 \right) &= 0, \\
M \left(\frac{dV_2}{dt} + \omega_3 V_1 - \omega_1 V_3 \right) &= 0, \\
M \left(\frac{dV_3}{dt} + \omega_1 V_2 - \omega_2 V_1 \right) &= 0.
\end{aligned} \tag{28}$$

Например, используя решение (21),(23),(24) и (24а) вращательных уравнений движения, можно записать уравнения (28) как

$$M \frac{dV_1}{dt} = M(-C \sin \Omega t V_3 + \omega_0 V_2), \tag{29}$$

$$M \frac{dV_2}{dt} = M(-\omega_0 V_1 + C \cos \Omega t V_3), \tag{30}$$

$$M \frac{dV_3}{dt} = M(-C \cos \Omega t V_2 + C \sin \Omega t V_1), \tag{31}$$

где

$$\Omega = \omega_0 \frac{I_3 - I_1}{I_1} = const.$$

Если начальная скорость V в уравнениях (29)-(31) отлична от нуля, то мы должны наблюдать изменение скорости центра масс свободного гироскопа, при этом полная энергия системы (поступательная + вращательная) сохраняется [5].

3.1 Нарушение закона сохранения поступательного импульса центра масс в системах с внутренним вращением

Пока чисто качественно покажем, что уравнения (29)-(31) описывают ускоренное движение центра масс 3D гироскопа при его нутации и зависит от начальной скорости оси вращения. Например, предположим, что однородный гироскоп в виде диска, у которого $R > h$, где R – радиус гироскопа, а h – его высота, прецессирует под действием внешней силы тяжести. В этом случае все материальные точки оси гироскопа, включая центр масс, движутся ускоренно по искривленным траекториям. Мысленно отключим действие силы тяжести. Тогда регулярная прецессия гироскопа исчезнет, но ось гироскопа продолжит свое движение (см. рис.3), поскольку возникнет нутация (прецессия свободного от внешних сил гироскопа). Закон ускоренного движения центра масс (вместе с ну

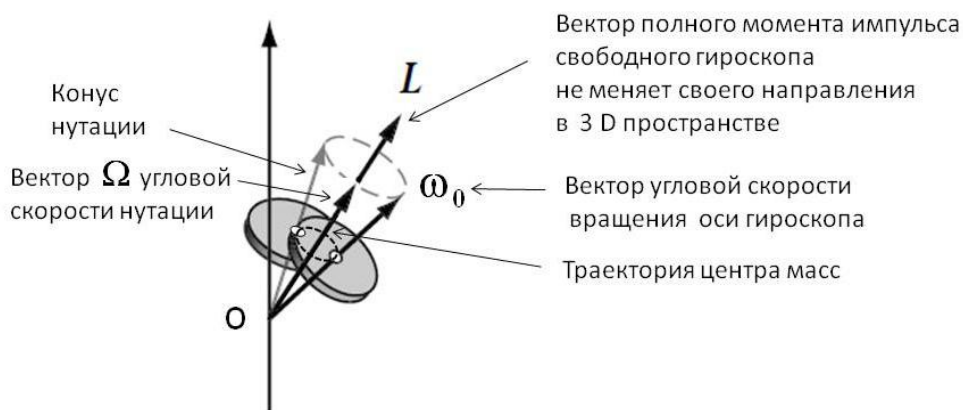


Рис.3. Ускоренное инерциальное движение центра масс гироскопа при его нутации

тационным движением оси) определит та начальная скорость центра масс, которая была у него в момент отключения внешней гравитационной силы [3]. В результате мы приходим к выводу, что, благодаря внутренней энергии гироскопа

Иными словами, пусть мы имеем свободно вращающийся без нутации гироскоп, находящийся внутри космического Спутника в состоянии невесомости, и центр масс которого покоится или движется прямолинейно и равномерно относительно стенок и

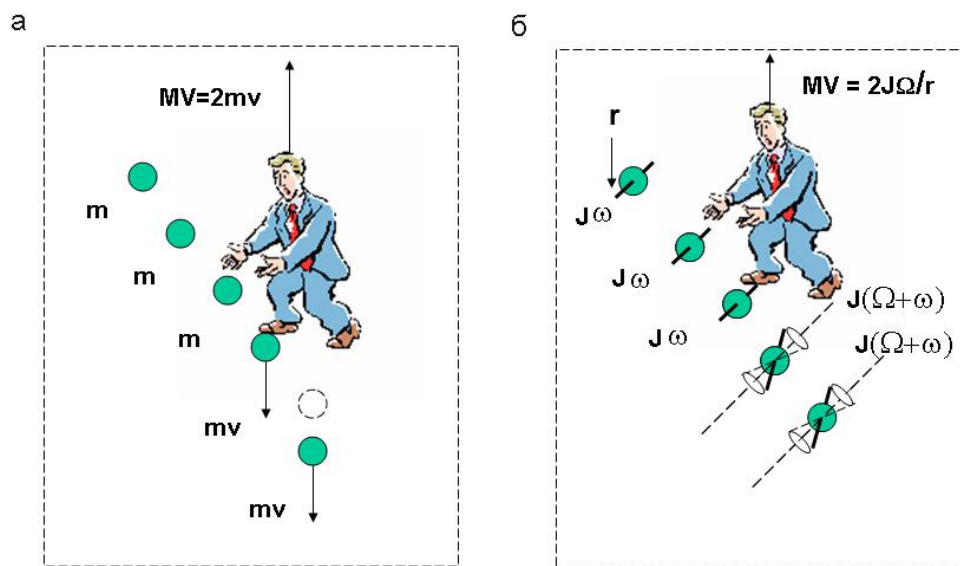


Рис. 4. Сохранение поступательного импульса механики Ньютона в системе лестница – космонавт а); нарушение закона сохранения поступательного импульса механики Ньютона б)

пусть гироскоп имеем выступающий из него цилиндрический стержень, направленный по оси гироскопа. Если космонавт ударит по стержню гироскопа, тогда у гироскопа воз-

никнет нутация. Это, в свою очередь, приведет ускоренному движению центра масс гироскопа относительно стенок Спутника как следствие появившейся нутации оси гироскопа. Понятно, что это движение вызвано силами инерции, действующими на составляющие гироскоп материальные точки, причем действие происходит таким образом, что центр масс движется ускоренно, но при этом энергия вращающегося тела не меняется. Другой мысленный эксперимент представлен на рис. 4. Предположим, что в невесомости внутри космического корабля существует «массовая лестница», состоящая из нескольких не вращающихся масс m (см. рис. 4а). Космонавт с массой M может, отталкиваясь от малых масс m , подниматься по этой лестнице, получая поступательный импульс $P = MV$. Соответственно, малые массы m получают каждый раз импульсы $p = mv$. Если космонавт сделает 2 шага, то, силу закона сохранения поступательного импульса, он получит импульс $P_1 = MV_1 = 2mv$. Полный линейный импульс механической системы лестница-космонавт сохраняется в соответствии с законом сохранения поступательного импульса механики Ньютона. Пусть теперь «лестница» состоит из гироскопов со стержнями (см. рис. 4б), масса которых равна опять m . И пусть ω – угловая скорость вращения гироскопов. Космонавт поднимается по лестнице, опираясь на стержни и создавая на каждом гироскопе момент $N = MVr$, где r – длина стержня. Сам он при этом получает каждый раз поступательный импульс MV . В результате гироскоп, на который опирается космонавт, начинает нутировать с частотой Ω , трансформируя полученный внешний поступательный импульс во внутреннее вращение, причем полный поступательный импульс системы лестница-космонавт не сохраняется, нарушая тем самым закон сохранения поступательного импульса механики Ньютона. Если мы рассматриваем механическую систему, представленную на рис.4 а), как замкнутую, то никакого изменения линейного импульса центра масс этой системы не происходит. Наоборот, у изолированной механической системы, представленной на рис. 4 б), линейный импульс центра масс не сохраняется.

3.2 Эксперименты Н.В.Филатова, доказывающие нарушение линейного импульса центра масс в гироскопических механических системах

Таким образом, в гироскопических система наблюдается связь между поступательным импульсом центра масс и вращательным гироскопическим импульсом. Используя эту связь, можно изменять линейный импульс центра масс изолированной системы без воздействия внешних сил. Эксперименты, показывающие справедливость высказанных утверждений, был проведены в конце 60^х годов доцентом кафедры теоретической механики Тверского политехнического института Н.В.Филатовым [8]. В экспериментах Н.В.Филатова исследовалось столкновение двух массивных тел, установленных на тележках (рис. 5). Одно из тел представлял собой вращающиеся в разные стороны гироскопы, закрепленные в кардановых подвесах. Вращение гироскопов происходило с одинаковой угловой скоростью, обеспечивая тем самым равенство

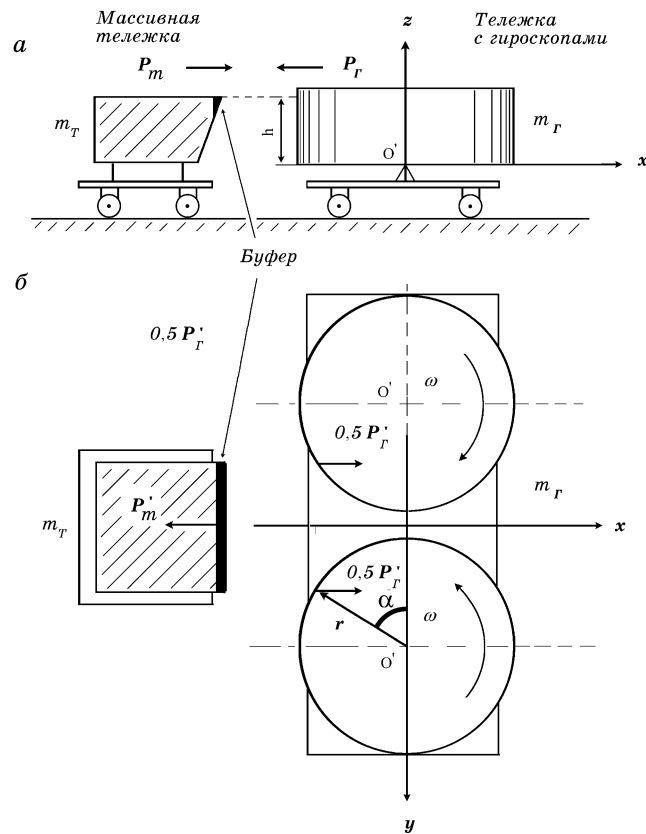


Рис. 5. Столкновение гироскопов m_G с массой m_T : а) – вид сбоку; б) – вид сверху.

нулю полного углового момента импульса системы. Чтобы в момент столкновения гироскопов с массой m_T проскальзывание отсутствовало, по ободу гироскопов были укреплены выступающие короткие штыри. Процесс столкновения вращающихся гироскопов m_G с массой m_T снимался на киноплёнку со скоростью 2000 кадров в секунду и затем подвергался обработке с целью определить скорость центра масс системы до и после столкновения.

В результате большого числа экспериментов было установлено, что когда после удара гироскопы начинали прецессировать, центр масс системы v_c изменял свою скорость. Результаты некоторых экспериментов представлены в табл. 1. В этой таблице v_c и v'_c - скорости центра масс системы до и после удара в см/сек, n_1 и n_2 - число оборотов/мин гироскопов до и после удара.

Полученные данные показывают, гироскопическое преобразование энергий внутри системы Филатова меняют скорость масс более чем в два раза.

Табл. 1

Буфер	Массы m_T, m_G	v_c	v'_c	n_1	n_2
Метал	$m_T = m_G$	-0,196	-0,326	1093	272
“	“	-0,31	-0,16	1000	231
Метал	$2m_T = m_G$	-0,0208	-0,167	1253	263
Резина	“	0,23	0,154	1078	253
Метал	$m_T = 2m_G$	0,233	0,0532	1153	82
“		0,402	0,181	922	87
Резина	“	0,446	0,196	840	50

Подобное поведение центра масс механической системы, изолированной от внешних сил, мы экспериментально наблюдали при исследовании динамики 4D гироскопа [5]. В отличие от угловой пространственной прецессии $\vec{\Omega}$ свободного гироскопа, периодическое изменение скорости центра масс свободного 4D гироскопа в работе [5], было названо пространственно-временной прецессией. Почему было выбрано это название, и к каким представлениям о структуре пространства это ведет, будет изложено в последующих статьях.

4. Эксперимент Лэйтвэйта-Глушко, который доказывает нарушение закона сохранения поступательного импульса центра масс прецессирующего гироскопа, подвешенного на нити

Интересные эксперименты с гироскопическими системами были проведены английским исследователем Эриком Лэйтвэйтом [14]. Среди множества экспериментов наибольшее впечатление производит прецессирующий в гравитационном поле Земли гироскоп, подвешенный на нити (см. рис.1)

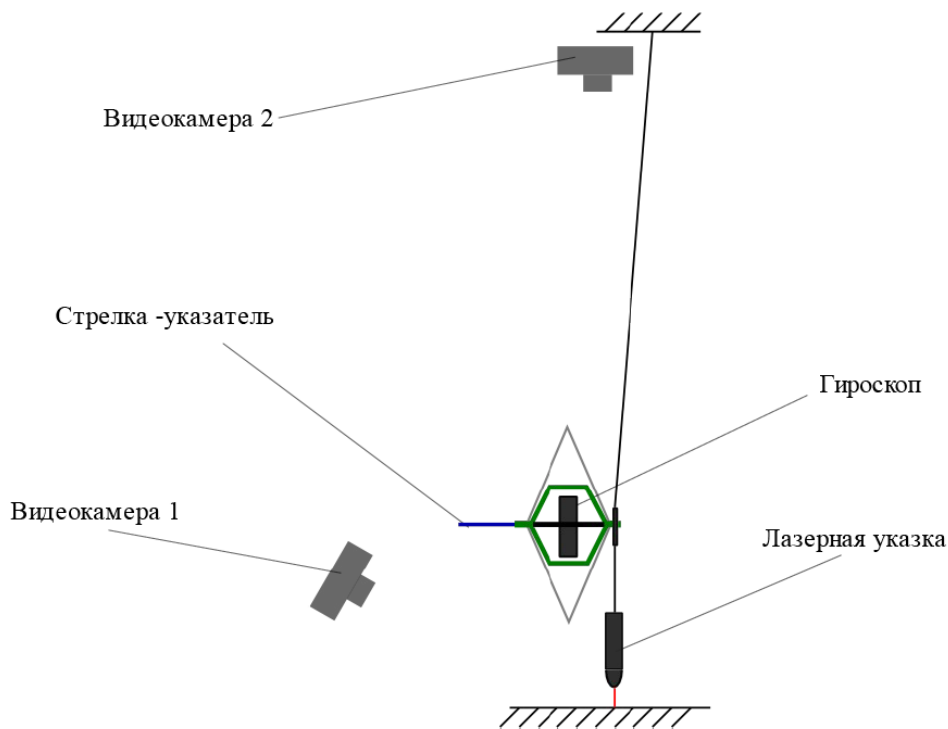


Рис.1. Прецессия гироскопа, подвешенного на нити

Этот рисунок взят нами из работы [15] Г.Глушко, повторившего эксперимент Лэйтвэйта в различных вариантах. В экспериментах Лэйтвэйта-Глушко наблюдается отклонение центра масс прецессирующего гироскопа от положения равновесия. Это указывает на возникновение силы тяги, преодолевающей гравитационную силу. В данном случае, для вычисления этой тяги необходимо использовать систему уравнения (16) и (25), которые, кроме внешней силы тяжести, содержат локальную силу инерции $[\vec{\omega} \vec{P}]$, создающую тягу.

Решить совместно систему нелинейных уравнений (16) и (25) довольно сложно. Достаточно напомнить, что даже такая простая задача, как движение твердого тела относительно неподвижной точки не имеет общего решения [16].

Заключение

Похоже, что со времен Эйлера у нас сложилось неверное представление о структуре пространства в механике, которая описывает движение абсолютно твердого тела. Прежде всего, необходимо было бы сформулировать вращательный принцип инерции, который можно назвать первым законом механики Ньютон-Эйлера:

1. Вращающееся тело будет вращаться сколь угодно долго по инерции (с учетом нутации), если на него не действуют моменты внешних сил.

Далее, надо признать, что пространство в механике Ньютона-Эйлера не евклидово, шестимерно и состоит из комбинации трех голономных трансляционных координат x, y, z и трех неголономных вращательных координат φ, ψ, θ . Геодезические в этом пространстве могут быть далеко не прямые линии. Только этим можно объяснить ускоренное, но инерциальное движение материальных частиц, из которых состоит вращающееся тело. Кроме того, шестимерное пространство вращающегося тела не должно быть изотропным, поскольку у него есть выделенное направление – его ось вращения, и не обязательно должно быть однородным из-за неголономной связи между координатами x, y, z и φ, ψ, θ . Именно этой связью можно объяснить нарушение закона сохранения поступательного импульса механики Ньютона в гироскопических системах, изолированных от внешних сил.

Интересно, что в 1922 г. математик Эли Картан высказал идею, согласно которой вращение материальных объектов порождает *кручение пространства* [9]. Руководствуясь этой идеей и результатами работ [10,11], я в 2005 г. на конференции в Бельгии сделал доклад о новой механике, названной мной механикой Декарта [12, 5], поскольку в ней всякое реальное движение оказывается 4D вращением. Эта механика является четвертым обобщением классической механики и в ней кручение пространства (торсионное поле) порождается вращением материи, в соответствии с идеей Э.Картана.

Ссылки

1. *Ньютон И.* //Математические начала натуральной философии. Перевод с латинского и примечания А. Н. Крылова. М., Наука, 1989. 688 стр.
2. *Эйлер Л.* // Основы динамики точки. ОНТИ-НКТП-СССР, 1938, с. 537.
3. *Бутиков Е.И.* // Свободное вращение твердого тела.
<http://faculty.ifmo.ru/butikov/Applets/PrecessionR.pdf>
4. *Ольховский И.И.* // Курс теоретической механики для физиков. М.: Наука, 1970.
5. *Шипов Г.И.* // 4D гироскоп в механике Декарта // «Академия Тринитаризма», М., Эл № 77-6567, публ.13938, 26.10.2006.
<http://www.trinitas.ru/rus/doc/0231/004a/02311026.htm>
6. *Магнус К.* // Гироскоп: теория и применение. М.: Мир, 1974, с. 526.
7. *Граммель Р.* // Гироскоп, его теория и применения, т. 1. т. 2, ИЛ, М., 1952.
8. *Филатов В.П.* // Исследование удара тел с большими кинетическими моментами: Письмо Н.В. Филатова к Чичерину В.Г. , 08.07.1969.
9. *Cartan E.* // Compt. Rend.1922. Vol. 174, p. 437.

10. *Шипов Г.* // О решении первой проблемы Эйнштейна, М.: Кириллица, 2006,
<http://www.trinitas.ru/rus/doc/0231/003a/02311018.htm> или
<http://www.shipov.com/science.html>
11. *Шипов Г.* // О решении второй проблемы Эйнштейна, М.: Кириллица, 2007.
<http://www.trinitas.ru/rus/doc/0231/003a/02311019.htm> или
<http://www.shipov.com/science.html>
12. *Shipov G.* // Decartes' Mechanics - Fourth Generalization of Newton's Mechanics. In "7th Intern.Conference Computing Anticipatory Systems"~ НЕС - ULg, Liege, Belgium, 2005. P. 36.
13. *Губарев Е.А.* // Теория реальной относительности. М., Новый Центр, 2009. P.216.
14. *Lathwait E.* // Lecture 5/7 on gyroscopes, 1974.
<http://www.youtube.com/watch?v=WCLLGqvpp7o&feature=related>
15. *Глушко Г.* // Обнаружение гироскопической тяги.
<http://www.youtube.com/watch?v=GW13FqrobYI>
16. *Архангельский Ю.А.* Аналитическая динамика твердого тела. М., Наука, 1977, с.3