

ГИРОСКОП И ГРАВИТАЦИЯ

(вторая редакция)

Гужеля Ю.А.

*«Все эти явления не содержат ничего большего,
чем комбинации законов Ньютона, однако, временами
просто трудно поверить, что всё это произошло из
 $F = m \cdot a$!»*

Ричард Фейнман

1. ВВЕДЕНИЕ

Спустя более чем столетие, после демонстрации Леоном Фуко первых опытов с гироскопом, Ричард Фейнман, приступая в своих лекциях к изложению динамики твёрдого тела, не может сдержать своего восхищения перед удивительными свойствами гироскопа. И эти чувства с Фейнманом, безусловно, разделяют многие. Замечательно здесь также и то, что удивительное поведение гироскопа описывается всего двумя его основными свойствами:

Первое свойство гироскопа говорит о том, что *гироскоп стремится сохранить своё положение относительно Мирового пространства*. Это утверждение сделано на основании опытных наблюдений за поведением свободного гироскопа. Однако погрешность этих опытов до сих пор не определена. Первое свойство гироскопа, по умолчанию, считается абсолютно точным. И, похоже, никто не задумывается над тем, какими же средствами Мировое пространство заставляет гироскоп сохранять относительно себя неизменное положение и, в то же время, заставляет гироскоп изменять своё положение (прецессировать) относительно земной поверхности? Ведь, очевидно, что для того чтобы гироскоп прецессировал ему надо сообщить вполне определённую величину энергии.

Второе свойство гироскопа представляет собой формулу, по которой можно определить направление прецессии гироскопа под действием момента сил, приложенного к оси вращения, и можно определить скорость прецессии. Формулу эту действительно можно вывести с помощью законов Ньютона, но не только с их помощью. Фейнман не делает подробного вывода формулы, описывающей второе свойство гироскопа, так как эта формула была уже выведена до него.

В векторной форме эту формулу принято записывать в следующем виде:

$$\vec{M} = J \cdot \vec{\omega} \times \vec{\Omega}; \quad (1)$$

Где: \vec{M} - момент сил, приложенный к главной оси гироскопа;

J – главный момент инерции;

$\vec{\omega}$ - угловая скорость прецессии;

$\vec{\Omega}$ - угловая скорость собственного вращения гироскопа.

Формула эта была выведена без детального рассмотрения физического процесса, происходящего при трёхмерном вращении твёрдого тела.

Попробовав устранить указанный недостаток и самостоятельно, независимым путём, вывести эту же формулу, я неожиданно получил другой результат, а именно:

$$\bar{M} = J_y \cdot \bar{\omega} \times \bar{\Omega}; \quad (2)$$

Где, J_y - момент инерции относительно побочной оси.

Вывод этого соотношения изложен ниже.

2. ВТОРОЕ СВОЙСТВО ГИРОСКОПА (вывод новой формулы)

Прежде чем переходить к анализу трёхмерного вращения твёрдого тела, уточним смысл соотношения $F = m \cdot a$; (3), с учётом выводов сделанных в Л 1.

Поскольку сила инерции является самой настоящей реальной силой, равной по величине произведению $m \cdot a$, то правая часть формулы (3) это выражение силы инерции (силы сопротивления), а левая часть – это действующая (активная) сила.

То есть, при движении тела с ускорением, действующая сила равна силе инерции, направленной противоположно ускорению.

По существу мы вспомнили «Принцип Даламбера», значение которого в настоящее время принижается. Академическая наука считает «Принцип Даламбера» просто математическим приёмом, облегчающим вычисления. Между тем, этот принцип, верно отображает реальный физический процесс и является физическим законом, а сила инерции является реальной силой.

Теперь мы можем приступить к анализу поведения гироскопа под действием момента сил M , приложенного к главной оси вращения.

Для упрощения вычислений возьмём самую простую конструкцию 3-х степенного гироскопа, центр масс которого совпадает с центром подвеса. Вся масса этого гироскопа сосредоточена в линии окружности, см. рис.1

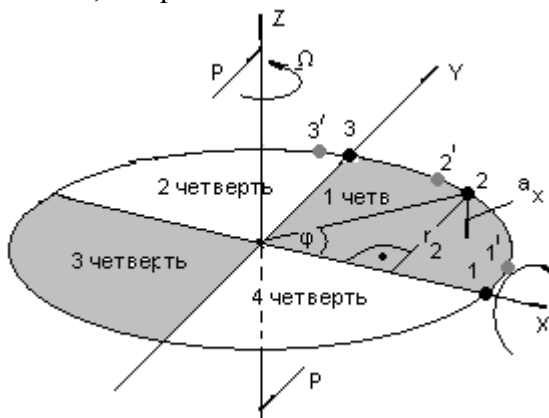


Рис.1

Элементы крепления оси к линии окружности условно не показаны. Гироскоп вращается вокруг оси Z со скоростью Ω . Радиус окружности равен R .

К главной оси гироскопа приложен момент сил M , равный произведению силы P на плечо относительно оси X , разворачивающий гироскоп вокруг оси X . Дадим возможность моменту M повернуть гироскоп вокруг оси X на небольшой угол α и, при этом, разогнать гироскоп до угловой скорости ω и посмотрим, что будет дальше.

Выберем на окружности три мгновенных положения материальных точек: 1,2,3.

Точка 1 находится на пересечении окружности с осью X . Радиус-вектор, проведённый из центра вращения в точку 2, составляет с осью X угол φ . Точка 3 находится на пересечении с осью Y .

Точка 2 за бесконечно малый промежуток времени Δt переместится из положения 2 в положение 2'. При этом, окружную скорость точки относительно главной оси, на отрезке 2-2', можно считать направленной по касательной к окружности в точке 2 и, соответственно, перпендикулярной радиус-вектору проведённому в точку 2. Величина этой скорости равна

$$v_z = R \cdot \Omega;$$

Длина отрезка дуги 2-2', которую можно считать отрезком касательной, равна произведению скорости v_z на отрезок времени Δt

$$2-2' = v_z \cdot \Delta t = R \cdot \Omega \cdot \Delta t;$$

Одновременно с вращением вокруг главной оси Z , точка 2 вращается и вокруг оси X , с угловой скоростью ω . При этом, её окружная скорость v_x, v_y , при движении из положения 2 в положение 2', увеличивается за счёт увеличения радиуса вращения r относительно оси X .

Поскольку $v_{x_2} = r_2 \cdot \omega$; а $v_{x_{2'}} = r_{2'} \cdot \omega$, то $\Delta v_{x_2} = (r_{2'} - r_2) \cdot \omega$;

Но из рисунка 1 видно, что $r_{2'} - r_2 = v_z \cdot \Delta t \cdot \cos \varphi_2$;

И, следовательно: $\Delta v_{x_2} = R \cdot \Omega \cdot \Delta t \cdot \omega \cdot \cos \varphi_2$;

И тогда, величина ускорения точки в направлении перпендикулярном плоскости окружности найдётся из выражения:

$$a_{x_2} = \frac{\Delta v_{x_2}}{\Delta t};$$

$$a_{x_2} = R \cdot \Omega \cdot \omega \cdot \cos \varphi_2; \quad (3)$$

Нетрудно увидеть, что полученное уравнение справедливо для любой точки окружности, поэтому индекс 2 можно опустить и заменить его индексом i .

$$a_{x_i} = R \cdot \Omega \cdot \omega \cdot \cos \varphi_i; \quad (4)$$

Для точки 1, $\varphi_1 = 0$; $\cos \varphi_1 = 1$; поэтому $a_{x_1} = R \cdot \Omega \cdot \omega$; (ускорение имеет максимальное значение).

В точке 3, $\varphi_3 = 90^\circ$; $\cos \varphi_3 = 0$; $a_{x_3} = 0$;

Величины: $R; \Omega; \omega$ - постоянны, поэтому закон изменения ускорения точек окружности относительно оси X представляет собой косинусоиду.

Таким же образом проанализировав перемещение точек принадлежащих другим четвертям окружности, можно сделать вывод, что в 1-й и 4-й четвертях нормальное ускорение точек направлено вниз, а во второй и третьей четвертях – вверх. Соответственно, сила инерции, действующая на каждую материальную точку окружности, в 1-й и 4-й четвертях направлена вверх, а во 2-й и 3-й четвертях – вниз, см. Рис. 2

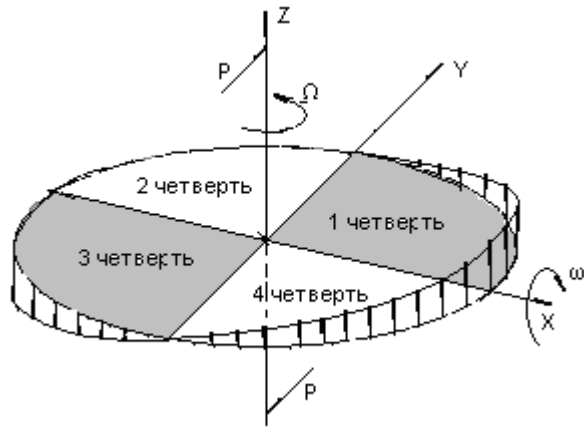


Рис.2

В сумме распределённые силы инерции создадут момент сил равный моменту, создаваемому силами P , но в перпендикулярной плоскости.

Что приведёт к вращению гироскопа с угловой скоростью ω вокруг оси Y , см.

Рис.3

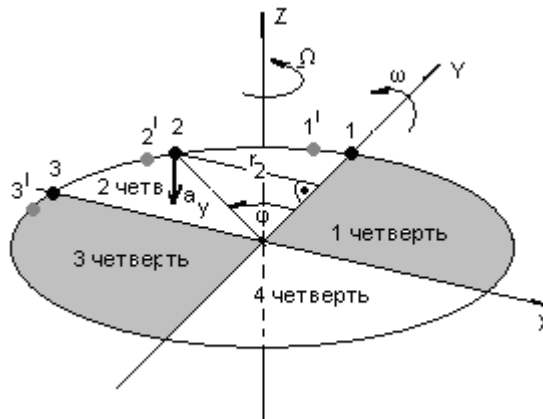


Рис.3

При вращении плоскости гироскопа вокруг оси Y , выберем на окружности три мгновенных положения материальных точек 1,2,3, но, на этот раз, во второй четверти

По аналогии с разобранным выше примером, для точки 2 и для любой произвольной точки i , можно записать:

$$a_{y_2} = R \cdot \Omega \cdot \omega \cdot \cos \varphi_2 ; \quad (5)$$

$$a_{y_i} = R \cdot \Omega \cdot \omega \cdot \cos \varphi_i ; \quad (6)$$

На каждую материальную точку окружности, со стороны гравитационного поля будет действовать сила инерции направленная противоположно ускорению и равная по величине произведению массы точечного элемента m_i на его ускорение a_{y_i}

Из рисунка 3 видно, что нормальное ускорение в 1-й и 2-й четвертях направлено вниз, а 3-й и 4-й четвертях – вверх.

Соответственно сила инерции в 1-й и 2-й четвертях направлена вверх, см. Рис.4., а 3-й и 4-й четвертях – вниз.

Распределённые силы инерции, приложенные к каждой материальной точке окружности, в сумме создают момент инерции M_u равный по величине действующему моменту M , и противоположно направленный, см Рис.4

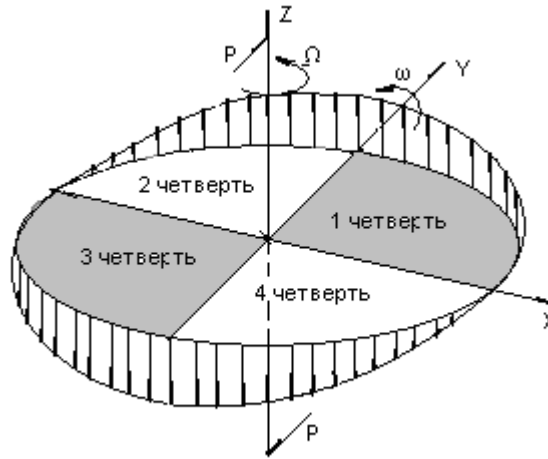


Рис.4

$$M = M_u ; \quad (7)$$

Определим величину M_u , проинтегрировав все распределённые по массе окружности моменты сил инерции.

Для удобства вычислений, проинтегрируем моменты сил инерции только для первой четверти окружности, при изменении φ от 0 до $\pi/2$

Момент создаваемый силой инерции приложенной к точечной массе m_i равен произведению: $m_i \cdot a_{y_i} \cdot R \cdot \text{Cos} \varphi_i$, а момент приложенный к элементу $d\varphi$ будет равен: $m_i \cdot d\varphi \cdot a_{y_i} \cdot R \cdot \text{Cos} \varphi_i$

Поскольку масса по дуге окружности распределена равномерно, заменим точечную массу m_i , распределённой массой $m_1 / \frac{\pi}{2}$

Где, m_i - масса дуги окружности 1-й четверти.

Подставляя значения m_i и a_{y_i} , запишем:

$$M_{u_1} = \int_0^{\pi/2} \frac{m_1}{\pi/2} \cdot d\varphi \cdot R \cdot \Omega \cdot \omega \cdot \text{Cos} \varphi \cdot R \cdot \text{Cos} \varphi ;$$

Где, M_{u_1} - момент сил инерции первой четверти окружности

Вынося постоянные величины за знак интеграла, получим:

$$M_{u_1} = \frac{m_1}{\pi/2} \cdot R^2 \cdot \Omega \cdot \omega \int \text{Cos}^2 \varphi \cdot d\varphi ; \text{ или}$$

$$M_{u_1} = \frac{m_1}{\pi/2} \cdot R^2 \cdot \Omega \cdot \omega \cdot \int_0^{\pi/2} \frac{(1 + \text{Cos} 2\varphi) \cdot d\varphi}{2} ;$$

Возьмём интеграл: $\int_0^{\pi/2} \frac{(1 + \text{Cos} 2\varphi) \cdot d\varphi}{2} = \frac{1}{2} \cdot \int_0^{\pi/2} d\varphi + \frac{1}{2} \cdot \int_0^{\pi/2} \text{Cos} 2\varphi \cdot d\varphi = \frac{\pi}{4} ;$

После подстановки полученного значения в выражение момента, получим:

$$M_{u_1} = \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot R^2 \cdot \Omega \cdot \omega ;$$

Но $m_1 \cdot R^2$ - это момент инерции 1-й четверти окружности относительно оси Z, то есть, главный момент инерции 1-й четверти, поэтому:

$$M_{u_1} = 0,5 \cdot J_1 \cdot \Omega \cdot \omega ;$$

Очевидно, что для всей окружности выражение для определения момента сил инерции запишется так:

$$M_u = 0,5 \cdot J \cdot \Omega \cdot \omega; \quad (8)$$

Где, J - главный момент инерции всей окружности;

M_u - момент сил инерции действующий на всю окружность.

Обратим внимание на то, что выражение $0,5J$ – это не что иное, как момент инерции окружности относительно оси Y , то есть, момент инерции относительно побочной оси.

Поскольку $M = M_u$, окончательно запишем:

$$M_x = J_y \cdot \Omega \cdot \omega; \quad (9)$$

Где, M_x - момент сил относительно оси X ;

J_y - момент инерции относительно оси Y .

В векторной форме выражение (9) запишется так:

$$\bar{M} = J_y \cdot \bar{\omega} \times \bar{\Omega}; \quad (2)$$

Где, $\bar{M}, \bar{\omega}, \bar{\Omega}$ - векторы; J_y - скалярная величина.

Как видно, полученное соотношение между приложенным моментом сил и скоростью прецессии не соответствует общепринятому соотношению, выведенному ещё Анри Резалем:

$$\bar{M} = J \cdot \bar{\omega} \times \bar{\Omega}; \quad (1)$$

Где, J – главный момент инерции

И следует признать, что общепринятое (до сих пор) соотношение неверно. Каким образом эта ошибка стала возможной? Очевидно, из-за недостаточно подробного рассмотрения физического процесса при трёхмерном вращении твёрдого тела и преувеличения возможностей общих математических подходов.

Продолжим рассмотрение физического процесса.

Если прекратить действие сил P (убрать действующий момент M), то очевидно, что момент сил инерции M_u начнёт вращать гироскоп вокруг оси X в направлении обратном, действовавшему ранее моменту M , раскрутит его до какой то скорости ω_x , что породит возникновение момента сил инерции относительно оси Y , и так далее. Направление скорости прецессии будет постоянно меняться, и главная ось гироскопа будет совершать конусообразное движение вокруг оси Z' , не совпадающей с первоначальным направлением оси Z , см. Рис.5

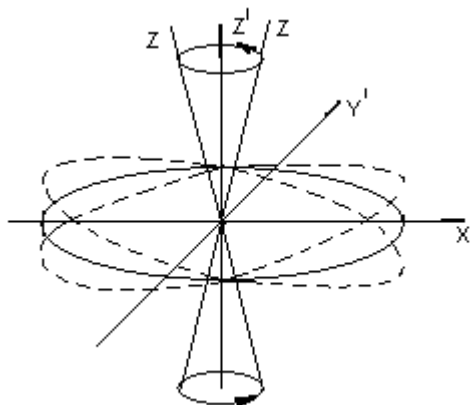


Рис.5

Из вышесказанного выделим одну простую мысль: прецессия гироскопа является следствием действия на ось гироскопа силы (момента сил). Отсюда следует, что если на гироскоп не действует (или не действовала) сила, то он должен сохранять своё положение. Но относительно чего? Ну, конечно же, относительно гравитационного поля, ведь именно от поворота оси гироскопа относительно поля и возникают силы инерции, вызывающие прецессию. Однако сложность состоит в том, что для оценки поведения гироскопа вблизи поверхности Земли необходимо учитывать взаимодействие с гравитационными полями, по крайней мере, трёх небесных тел: Земли, Луны и Солнца.

Гравитационное поле Земли, вблизи её поверхности, безусловно, самое сильное. И, поскольку оно перемещается и вращается в пространстве вместе с Землёй, то следовало бы ожидать, что свободный 3-х степенной гироскоп не должен изменять своё положение относительно Земли, то есть, не должен чувствовать вращение Земли (не должен прецессировать). Но все мы знаем (и знаем на основании опытов), что это не так.

3. ПЕРВОЕ ОСНОВНОЕ СВОЙСТВО ГИРОСКОПА (новая формулировка)

Опыты показывают, что свободный (разарретированный) гироскоп изменяет своё положение относительно Земной поверхности (прецессирует). Считается, что при этом гироскоп сохраняет своё положение относительно Мирового пространства (относительно далёких «неподвижных» звёзд). Но это заблуждение. Мировое пространство не обладает своим характерным и постоянным гравитационным полем. Гравитационное поле в любой точке Мирового пространства (и в любой точке Солнечной системы) складывается из гравитационных полей небесных тел. Если гироскоп находится вблизи поверхности Земли, то гравитационное поле складывается, прежде всего, из гравитационных полей Земли, Луны и Солнца. Эти небесные тела постоянно меняют своё относительное расположение – следовательно, постоянно меняется и суммарное гравитационное поле, действующее на гироскоп. Эти изменения (возмущения) распространяются в гравитационном поле Земли со скоростью вращения Земли относительно, возмущающих её поле, небесных тел, то есть, относительно Луны и Солнца. Логично предположить, что прецессия свободного гироскопа вызывается возмущениями этих реальных небесных тел, а не вымышленной Мировой системой отсчёта.

Сложность восприятия этой версии заключается в том, что гравитационные поля Солнца и Луны у поверхности Земли очень слабы, в сравнении с гравитационным полем Земли. Например, напряжённость гравитационного поля Солнца у поверхности Земли в 1663 раза меньше напряжённости Земного поля, а напряжённость Лунного поля в 292000 раз меньше Земного. И, поэтому, не сразу удаётся понять: за счёт чего слабые поля Луны и Солнца заставляют гироскоп прецессировать относительно сильного гравитационного поля Земли? Но это парадоксальное поведение гироскопа можно объяснить различной структурой гравитационных полей Луны, Солнца и Земли, у её поверхности.

Гравитационное поле Земли вблизи её поверхности обладает изотропными свойствами вследствие того, что любое пробное тело вблизи поверхности большой гравитирующей массы облучается со всех сторон в области нижней полусферы, см. также Л 1.

В случае с гироскопом, изотропность земного гравитационного поля проявляется в том, что на раскручивание гироскопа до заданной скорости Ω , при любой его ориентации относительно Земной поверхности, затрачивается одно и то же количество работы. То есть, кинетическая энергия гироскопа не зависит от его ориентации.

Гравитационные поля Луны и Солнца у поверхности Земли анизотропны вследствие того, что Земли достигают только параллельные, или слабо расходящиеся, лучи этих небесных тел. И если главная ось гироскопа направлена, скажем, на Солнце, то

все материальные точки гироскопа, вращаясь, движутся всё время перпендикулярно силовым линиям гравитационного поля Солнца. См. Рис. 6

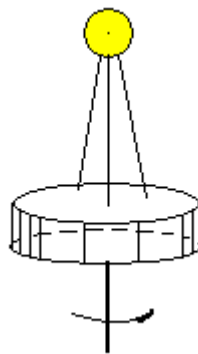


Рис.6

В этом случае, на раскрутку ротора гироскопа до угловой скорости Ω , надо затратить работу W_1 . Если же главная ось гироскопа направлена перпендикулярно к силовым линиям гравитационного поля, то каждая материальная точка постоянно меняет своё направление относительно силовых линий гравитационного поля Солнца. См. Рис.7

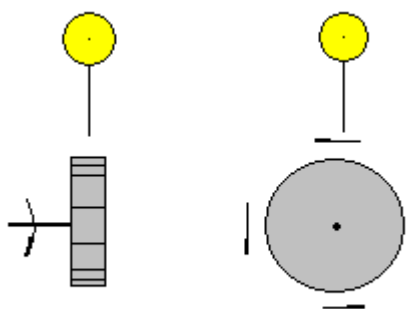


Рис.7

То для раскрутки ротора гироскопа до той же скорости необходимо выполнить работу W_2 . То есть, величина кинетической энергии ротора гироскопа в анизотропном гравитационном поле зависит от ориентации оси ротора гироскопа относительно силовых линий поля. И поэтому, для того чтобы повернуть ось раскрученного гироскопа на угол $\Delta\alpha$, из положения α_1 в положение α_2 , надо затратить работу

$$\Delta W = W_2 - W_1; \quad (10)$$

Для чего придётся приложить момент сил (M) равный

$$M = \frac{\Delta W}{\Delta\alpha}; \quad (11)$$

В изотропном же поле, раскрученный гироскоп можно развернуть на угол $\Delta\alpha$, с бесконечно малой скоростью, практически без усилия и без затрат энергии. В изотропном поле сила требуется только для поворота оси с определённой скоростью ω . Очевидно, что в анизотропном поле, для поворота оси гироскопа со скоростью ω потребуется во много раз большая сила.

Таким образом, если свободный гироскоп находится под воздействием двух качественно различных полей: изотропного (Земного) и анизотропного поля (Солнца и Луны), то поведение его можно представить следующим образом.

После раскрутки и разарретирования, гироскоп стремится сохранить своё положение относительно каждого из этих полей. Но это невозможно, так как поля поворачиваются относительно друг друга. И гироскоп начинает разворачиваться относительно этих полей, но с разными скоростями.

Скорость разворота относительно анизотропного поля минимальна, так как это поле оказывает большое сопротивление. А скорость разворота относительно Земного (изотропного) поля значительно больше угловой скорости прецессии относительно анизотропного поля.

В этом случае, прецессию относительно Солнечной или Лунной систем отсчёта можно и не зафиксировать. Или отнести эту прецессию на счёт погрешности опытов. А величина прецессии относительно Земной системы отсчёта будет определяться скоростью вращения Земли относительно звёзд ω_3 и географической широтой места установки гироскопа.

Подкрепим эту мысль простейшими расчётами.

Напряжённости гравитационных полей Луны и Солнца у поверхности Земли (рассчитанные по теории Ньютона) составляют, соответственно: $3,36 \cdot 10^{-5} (\text{кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2)$ и $5,9 \cdot 10^{-3} (\text{кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2)$. Суммарная напряжённость Солнечно-Лунного поля равна $5,93 \cdot 10^{-3} (\text{кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2)$;

Рассмотрим гироскоп с параметрами близкими к параметрам, реально применяемым на практике.

Масса ротора, $m=1$ кг;

Радиус инерции, $R=0,05$ м;

Собственная скорость вращения ротора гироскопа, $\Omega = 2000 (\text{с}^{-1})$

Такой гироскоп в раскрученном состоянии имеет запас кинетической энергии равный:

$$W = J \cdot \frac{\Omega^2}{2}; \text{ или } W = m \cdot R^2 \cdot \frac{\Omega^2}{2}; \text{ Подставляя значения, получим}$$

$$W = 1 \cdot 0,05^2 \cdot \frac{2000^2}{2} = 5 \cdot 10^3 (\text{Дж});$$

Эта энергия является продуктом взаимодействия массы ротора гироскопа с гравитационными полями Земли, Солнца и Луны. Очевидно, что на Солнечно-Лунное гравитационное поле приходится количество энергии пропорциональное напряжённости этого поля, т.е. можно записать:

$$W_{C+L} = \frac{E_{C+L}}{E_3 + E_{C+L}} \cdot W; \quad (12)$$

Где, W_{C+L} - кинетическая энергия гироскопа, связанная с Солнечно-Лунным полем;

E_{C+L} - напряжённость Солнечно-Лунного поля;

E_3 - напряжённость Земного поля.

Подставляя значения, получим:

$$W_{C+L} = \frac{5,93 \cdot 10^{-3}}{9,81 + 5,93 \cdot 10^{-3}} \cdot 5 \cdot 10^3 = 3,0206 (\text{Дж})$$

$$W_{C+L} = 3,0206 (\text{Дж});$$

Гироскоп (если он установлен на полюсе) будет прецессировать относительно Земли со скоростью примерно равной ω_3 . Определим кинетическую энергию прецессии

W_{ω_3}

$$W_{\omega_3} = J_y \cdot \frac{\omega_3^2}{2}; \quad (13) \quad \text{Подставляя значения, получим}$$

$$W_{\omega_3} = 0,5 \cdot m \cdot R^2 \cdot \frac{\omega_3^2}{2} = 0,5 \cdot 1 \cdot 0,05^2 \cdot \frac{(0,727 \cdot 10^{-4})^2}{2} = 3,303 \cdot 10^{-12} (\text{Джс})$$

$$W_{\omega_3} = 3,303 \cdot 10^{-12} (\text{Джс})$$

Сравним величины энергий $W_{C+Л}$ и W_{ω_3}

$$3,0206 \text{ и } 3,303 \cdot 10^{-12}$$

Результат удивительный. Со слабым полем связана кинетическая энергия гироскопа на 12 порядков превосходящая энергию прецессионного вращения свободного гироскопа!

И, следовательно, если это слабое поле действительно обладает анизотропными свойствами, то ему не составит особого труда заставить свободный гироскоп прецессировать относительно Земли со скоростью ω_3 , затратив на это $3,303 \cdot 10^{-12}$

Джоулей своей энергии (то есть, всего лишь, $1 \cdot 10^{-12}$ своей энергии).

Если, например, разность энергий W_1 и W_2 этого слабого анизотропного поля (для диаметрально противоположных направлений ротора гироскопа) составляет 10%. То есть, $W_1 - W_2 = 0,1 \cdot W_{CЛ} \approx 0,302(\text{Дж})$. То, в этом случае, гироскоп получит необходимое количество энергии для прецессионного движения W_{ω_3} , развернувшись относительно Солнечно-Лунного гравитационного поля на угол $\Delta\alpha$, величина которого определится из пропорции:

$$\frac{\pi}{2} \sim 0,1 \cdot W_{CЛ}$$

$$\Delta\alpha \sim W_{\omega_3}$$

Откуда получим:

$$\Delta\alpha = \frac{W_{\omega_3} \cdot \frac{\pi}{2}}{0,1 \cdot W_{CЛ}} = \frac{3,303 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{\pi}{2}}{0,302} = 1,72 \cdot 10^{-11}(\text{рад}) \approx 1 \cdot 10^{-9}(\text{град});$$

Понятно, что на практике заметить разворот оси гироскопа относительно Мировой, или Солнечно-Лунной систем отсчёта, на такой малый угол, трудно даже при желании. А желания такого, пока что, и не было.

Конечно, 10% от величины « $W_{C+Л}$ » нами взяты произвольно, в действительности, эта величина может быть другой. Прояснить этот вопрос сможет только эксперимент.

Тем не менее, с физической сущностью первого основного свойства гироскопа мы разобрались.

Гироскоп стремится сохранить своё положение не относительно Мировой системы отсчёта, а относительно анизотропного гравитационного поля (относительно Солнечно-Лунной системы отсчёта)

4. ОБЛАСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОРМУЛЫ $\bar{M} = J_y \cdot \bar{\omega} \times \bar{\Omega}$; (2)

При выводе этой формулы не учитывалось то обстоятельство, что прецессия гироскопа происходит под непосредственным воздействием двух принципиально различных гравитационных полей: изотропного и анизотропного. И поэтому естественно возникает вопрос, как это обстоятельство отразится на достоверности расчётов, выполненных по данной формуле?

Для начала, рассмотрим прецессию свободного гироскопа, вследствие вращения Земли. Пользуясь формулой (2) можно записать:

$$\bar{M} = J_y \cdot \bar{\omega}_u \times \bar{\Omega}; \quad (2)$$

Где, \bar{M} - момент сил вызывающий прецессию гироскопа относительно Земли;

$\bar{\omega}_u$ - угловая скорость прецессии гироскопа относительно изотропного (земного) гравитационного поля

При этом, гироскоп, повернувшись на какой то очень малый угол $\Delta\alpha$, сохраняет свою ориентацию относительно силовых линий Солнечно-Лунного анизотропного

гравитационного поля и, следовательно, вращается со скоростью $\bar{\omega}_u$ относительно земного гравитационного поля. В этом случае **можно** пользоваться формулой (2).

Приложим к оси гироскопа компенсирующий момент M_K , который остановит прецессию гироскопа относительно Земли и, тем самым, заставит ось гироскопа вращаться относительно Солнечно-Лунного анизотропного гравитационного поля со скоростью $\bar{\omega}_A$, противоположно направленной, но по абсолютной величине равной скорости $\bar{\omega}_u$.

На первый взгляд, кажется, что компенсирующий момент равен по величине моменту M , вызывающему прецессию относительно Земли. Но это не так, ведь анизотропное поле оказывает значительно большее сопротивление прецессии гироскопа, чем изотропное поле Земли. Если бы не это, то свободный гироскоп не смог бы сохранять своё положение относительно анизотропного гравитационного поля. Следовательно, M_K должен быть больше M , причём, он может быть больше на несколько порядков. То есть, в этом случае, пользоваться формулой (2), для определения величины компенсирующего момента, **нельзя**.

В общем случае, если мы имеем дело со скоростями прецессии превышающими величину произведения скорости вращения Земли на синус φ , где φ - географическая широта, то формулой (2), для определения момента прецессии M , пользоваться нельзя, так как в этом случае прецессия происходит относительно суммарного изотропно-анизотропного поля. Причём, анизотропная составляющая этого поля вносит очень серьёзные и, пока что, количественно не определённые коррективы.

Таким образом, общий вывод таков, что формулу (2) применять нельзя, за исключением одного частного случая: когда прецессия гироскопа происходит только относительно изотропного гравитационного поля Земли.

Для практического применения можно предложить следующее соотношение, основой которого является формула (2)

$$\bar{M} = J_y \cdot \bar{\omega}_u \times \bar{\Omega} + A \cdot J_y \cdot \bar{\omega}_A \times \bar{\Omega}; \quad (13)$$

Где, \bar{M} - момент сил, вызывающий прецессию;

J_y - момент инерции относительно вспомогательной оси;

$\bar{\omega}_u$ - угловая скорость прецессии относительно изотропного поля (в рассматриваемом случае это гравитационное поле Земли, вблизи её поверхности)

$\bar{\Omega}$ - собственная скорость вращения гироскопа;

A – коэффициент анизотропный, учитывающий сопротивление анизотропного поля, определяется полуэмпирическим путём;

$\bar{\omega}_A$ - угловая скорость прецессии относительно анизотропного поля (в рассматриваемом примере это Солнечно-Лунное гравитационное поле)

Если в этом выражении угловую скорость прецессии относительно изотропного гравитационного поля положить равной нулю, то мы получим формулу для определения компенсирующего момента

$$\bar{M}_K = A \cdot J_y \cdot \bar{\omega}_A \times \bar{\Omega}; \quad (13')$$

Следует ожидать, что величина коэффициента « A » на несколько порядков больше единицы. И тому есть косвенные подтверждения, например: в Л5 упоминается о том, что применение гироскопов на морских судах, в качестве успокоителей качки, не оправдало себя вследствие разрушения узлов их крепления. Похоже, что моменты действия и

противодействия там были рассчитаны неверно (сильно занижены). И, наверное, не по причине арифметических ошибок, а скорее потому, что применявшаяся при расчётах формула (1) не верно отображает реальный физический процесс.

Хотелось бы найти и прямые экспериментальные доказательства наличия анизотропных свойств, гравитационного поля небесных тел (Солнца и Луны), удалённых от места проведения опытов. Лучшим доказательством было бы определение величины компенсирующего момента M_K и сравнение её с величиной момента прецессии M , рассчитанной по формуле (2). Разделив почленно уравнения (13') и (2), в скалярном виде, и учитывая, что скорости ω_A и ω_u по абсолютной величине равны, получим

$$M_K / M = A;$$

Величина A должна быть много больше единицы. Если эксперимент это подтвердит, значит, гравитационное поле удалённых небесных тел действительно обладает анизотропными свойствами.

Но для того, чтобы окончательно развеять миф о влиянии Мировой системы отсчёта на поведение гироскопа, надо доказать, что анизотропное гравитационное поле, определяющее первое основное свойство гироскопа, принадлежит реальным небесным телам: Луне и Солнцу.

Всё это можно доказать. Надо лишь найти способ измерить величину компенсирующего момента или величину анизотропного коэффициента A , и измерять их регулярно, в течение длительного периода времени, для того чтобы выявить характер их изменения. И затем, проведя гармонический анализ этих изменений, можно выяснить: какие конкретные небесные тела стоят за этими изменениями.

5. ЭКСПЕРИМЕНТ

Для регистрации изменений величины компенсирующего момента можно использовать гироскопас. См. Рис.8; и Рис. 9

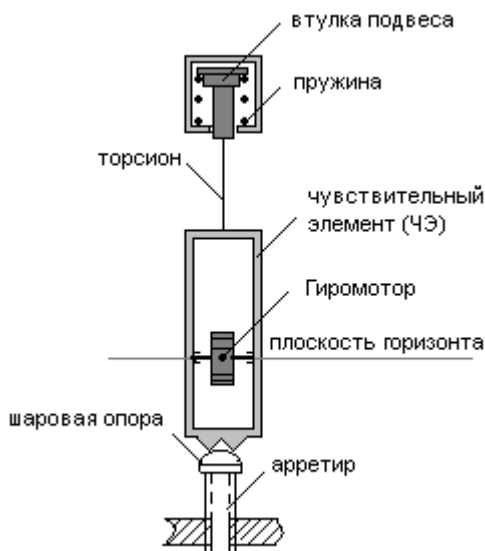


Рис. 8

Чувствительный элемент заарретирован, гироскоп выключен

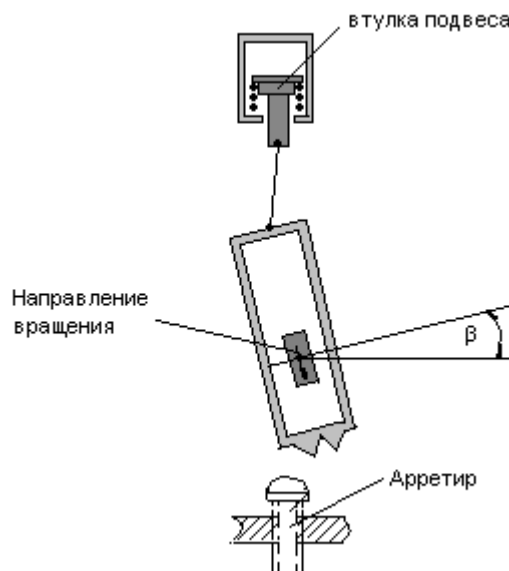


Рис.9

Гиросмотор раскручен, чувствительный элемент разарретирован

На рисунках 8 и 9 схематично изображён гиросмотор маятникового типа, применяемый для геодезических измерений на суше. Этот прибор применяется для определения азимута направления (угла направления отсчитываемого от направления географического меридиана). Прибор этот представляет собой гиросмотор на электрической тяге, помещённый в защитный корпус. Корпус вместе с гиросмотором называется *чувствительным элементом* (ЧЭ). Чувствительный элемент подвешен на тонкой металлической нити, называемой *торсионом*. В гиросмоторе имеется вспомогательное устройство, так называемый *арретир*, который предназначен для стопорения (*арретирования*) чувствительного элемента. Заарретированный чувствительный элемент не имеет возможности поворачиваться в горизонтальной плоскости. Арретир представляет собой винтовую пару. Головка винта представляет собой шаровую опору. При разарретировании (освобождении) шаровая опора уходит вниз и чувствительный элемент (вместе с гиросмотором) получает возможность поворачиваться в горизонтальной плоскости.

Узел подвеса, включающий в себя втулку подвеса и пружину, предназначен для защиты торсиона от разрыва (для смягчения рывка при разарретировании гиросмотора).

После раскручивания и разарретирования ось ротора гиросмотора будет совершать циклические движения. Траектория движения является очень вытянутым эллипсом, см. Рис. 10.



Рис.10

На рисунке показана траектория движения Северного конца оси гиromотора, при направлении оси от нас.

Примечание: если смотреть на Землю со стороны Северного полюса, то мы увидим Землю, вращающуюся против часовой стрелки, с угловой скоростью ω_3 . По аналогии, «Северной» будем называть полуось гиromотора, с конца которой, мы будем видеть гиromотор, вращающимся против часовой стрелки, с угловой скоростью Ω

По вертикальной оси эллипса отложены углы наклона оси ротора гиromотора относительно плоскости горизонта, а по горизонтальной – углы отклонения оси ротора гиromотора от гироскопического азимута. Гироскопический азимут это среднее направление прецессионных колебаний ЧЭ, определённое расчётным путём по зафиксированным отсчётам в точках реверсии. Среднее направление прецессионных колебаний обычно обозначают, как N_{cp} . Гироскопический азимут N_{cp} отклонён от географического азимута на постоянный угол δ , определяемый при эталонировании гиromотопаса и называемый поправкой гиromотопаса, см. Рис. 11

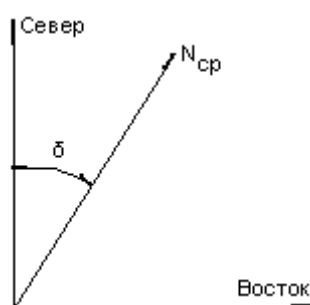


Рис. 11

При этом большая ось эллипса лежит в плоскости, отклонённой от плоскости горизонта на некоторый угол β_0 .

В техническом описании серийного прибора, применяемого для определения азимута направления на суше, это замечательное поведение гиromотопаса объясняется следующим образом: «Пусть маятниковый гироскоп с неподвижным ротором установлен в Северном полушарии на поверхности Земли на произвольной широте. Под действием маятникового момента ось ротора гироскопа займёт горизонтальное положение.

Предположим, что ось ротора отклонена от плоскости меридиана к Востоку на произвольный угол. Если ротор гироскопа мгновенно привести в быстрое вращение, то при таком расположении ЧЭ момент внешних сил не будет действовать на гироскоп, так как сила тяжести будет уравновешиваться реакцией подвеса. Ось гироскопа в этом случае будет сохранять своё положение в Мировом пространстве.

В результате суточного вращения Земли плоскость горизонта непрерывно поворачивается в Мировом пространстве так, что восточная половина плоскости горизонта непрерывно опускается, а западная половина поднимается относительно неподвижной в пространстве оси ротора.

Наблюдатель, также участвующий в суточном вращении Земли, будет видеть, что конец оси гироскопа, располагавшийся вначале в плоскости горизонта, в следующий момент начинает подниматься над ней на угол β (см. рис. 12).

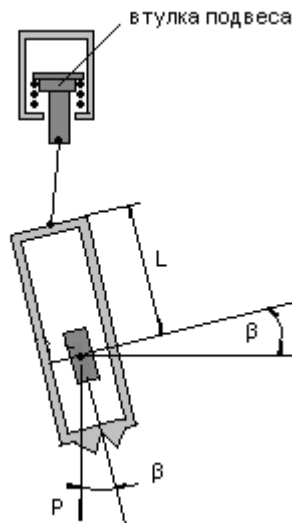


Рис. 12

Но как только ось гироскопа выходит из горизонтального положения, на гироскоп начинает действовать момент $M_{вн}$ силы тяжести P , равный

$$M_{вн} = P \cdot L \cdot \sin \beta; \quad (14)$$

Где, $M_{вн}$ - момент внешних сил;

P – сила тяжести;

L – плечо маятника;

β - угол наклона оси относительно плоскости горизонта.

Момент $\bar{M}_{вн}$ в рассматриваемом случае действует так, чтобы опустить вниз конец оси.

В соответствии со вторым свойством гироскопа, ось гироскопа под действием момента $\bar{M}_{вн}$ начинает прецессионное движение в западном направлении к плоскости меридиана

Так как восточная половина плоскости горизонта непрерывно опускается, то и угол β наклона оси к плоскости горизонта будет увеличиваться, соответственно увеличиваются величина маятникового момента и угловая скорость прецессии, которая достигает максимальной величины в момент прохождения оси гироскопа в плоскости меридиана.

Как только ось гироскопа пройдёт плоскость меридиана, угол её наклона к плоскости горизонта будет уменьшаться, (западная половина плоскости горизонта поднимается), соответственно уменьшается и скорость прецессии оси гироскопа.

В момент, когда ось будет находиться в плоскости горизонта, скорость её прецессионного движения станет равной нулю.

Затем ось будет непрерывно опускаться относительно плоскости горизонта, следовательно, изменится направление момента и направление прецессионного движения оси, которая начинает прецессировать к плоскости меридиана в восточном направлении.

Таким образом, ось гироскопа будет совершать прецессионные колебания относительно плоскости меридиана...»

Это общепринятое объяснение не совсем верно. Здесь, по сути, описан частный случай поведения гирокомпаса на экваторе (при $\varphi = 0$). На других широтах, ось гироскопа будет совершать прецессионные колебания относительно $N_{ср}$. Направление на

N_{cp} существенно отличается от направления географического меридиана. С увеличением широты места установки гирокомпаса, азимут N_{cp} (т.е. угол между меридианом и направлением N_{cp}) возрастает. И, на высоких широтах, N_{cp} направлено, скорее, на Восток, чем на Север. Но уникальность и полезность гирокомпаса заключается в том, что на постоянной широте, среднее положение оси гироскопа, при всех его многочисленных раскрутках, одинаково направлено, что и позволяет определять направление на Север, зная поправку гирокомпаса для данной географической широты.

Попробуем найти математическую зависимость поправки гирокомпаса от широты места установки прибора.

Для чего ещё раз, самостоятельно, рассмотрим

6. ФИЗИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ГИРОКОМПАСИРОВАНИЯ

Прежде всего, заметим, что в приведенном выше общепринятом описании поведения гирокомпаса, упущен из виду ещё один вид прецессии гироскопа с периодом равным периоду обращения Земли вокруг своей оси. Назовём эту прецессию долгопериодической, или суточной. Эту прецессию совершает среднее положение оси гироскопа, вследствие вращения Земли, относительно внешнего гравитационного поля. Прецессию же вокруг среднего направления оси гироскопа назовём короткопериодической, так как период обращения оси гироскопа вокруг среднего положения в реальных приборах составляет всего несколько минут, что значительно короче суток. См. Рис 13

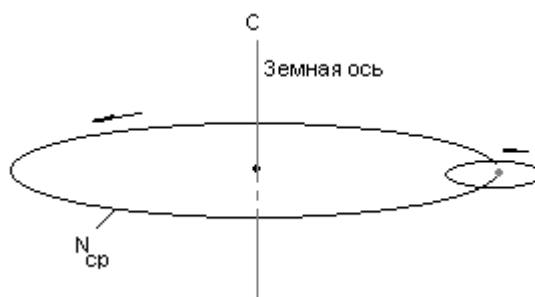


Рис. 13

Где, N_{cp} - суточная (долгопериодическая) круговая траектория движения среднего положения северного конца оси гиromотора;

Маленький эллипс представляет собой траекторию движения северного конца оси гиromотора вокруг среднего положения.

Таким образом, в общепринятом понимании процесса гирокомпасирования, по существу, рассматривается только короткопериодическая прецессия, где действующей (активной) силой является сила тяжести чувствительного элемента (ЧЭ), создающая действующий момент, вызывающий прецессию. На возбуждение и поддержание короткопериодической прецессии расходуется потенциальная энергия ЧЭ. Эта потенциальная энергия запасается при арретировании гирокомпаса, когда винт арретира приподнимает ЧЭ над его средним положением, см. Рис. 14

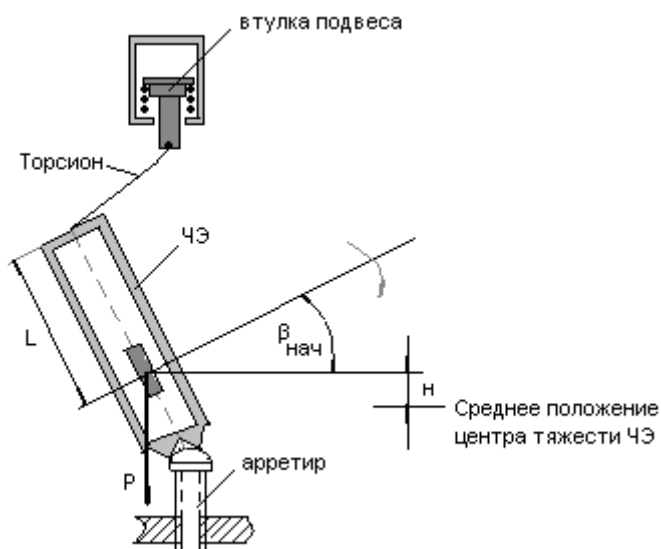


Рис. 14

На рисунке показано положение ЧЭ гироскопа после арретирования, перед выключением гироскопа. После выключения гироскопа, пружина втулки подвеса, распрямляясь, вытянет торсион и ЧЭ в вертикальное положение (как показано на Рис.9). Такое же положение (как на Рис. 14) ЧЭ гироскопа займёт и после раскрутки гироскопа, перед разарретированием.

При разарретировании потенциальная энергия, равная произведению $P \cdot H$, преобразуется в кинетическую энергию прецессионного движения вокруг N_{cp} . Этому преобразованию способствует наличие вращательного момента, относительно точки подвеса ЧЭ, равному произведению: $P \cdot L \cdot \sin \beta_{нач}$;

Где, P – вес ЧЭ ; L - плечо подвеса; $\beta_{нач}$ - угол подъёма северной оси гироскопа над горизонтом, после раскрутки гироскопа, но перед его разарретированием. Величина этого угла зависит от конструктивных параметров гироскопа и от широты местности установки прибора. Величина $\beta_{нач}$ больше β_0 .

Причина подъёма оси гироскопа, после его раскрутки, является следствием действия силы сопротивления со стороны внешнего гравитационного поля угловому вращению оси гироскопа, вместе с Землёй, вокруг земной оси. Этой силе противодействует момент силы веса ЧЭ, относительно точки подвеса ЧЭ. И наоборот, силе сопротивления внешнего гравитационного поля помогает момент силы веса ЧЭ, относительно точки опоры ЧЭ, - поэтому то $\beta_{нач}$ и больше β_0 .

Траектория движения Северного конца оси гироскопа в процессе разарретирования показана на Рис. 15

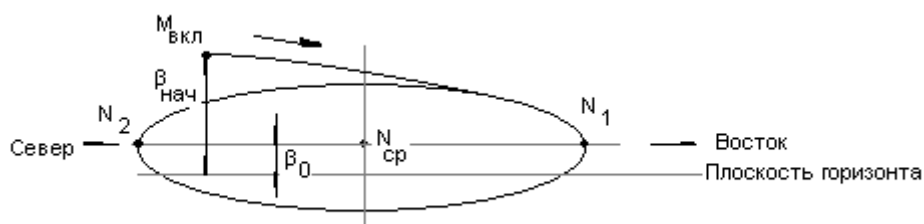


Рис. 15

На рисунке показана траектория Северного конца оси гиromотора, направленного от нас, Где:

N_1 - первая точка реверсии; N_2 - вторая точка реверсии; N_{cp} - среднее положение оси гиromотора;

$M_{вкл}$ - направление северной оси гиromотора перед разарретированием;

$\beta_{нач}$ - угол подъёма северного конца оси гиromотора над горизонтом, после раскрутки гиromотора, перед его разарретированием;

β_0 - угол подъёма над горизонтом среднего положения оси гиromотора.

При долгопериодической (суточной) прецессии движущим (активным) моментом является момент вращения Земли; на возбуждение и поддержание этого прецессионного движения расходуется кинетическая энергия вращательного движения Земли. Противодействующий момент создаёт сила сопротивления внешнего гравитационного поля, приподнимающая над горизонтом северную ось гиromотора на угол β . Эту силу сопротивления, в свою очередь, уравнивает сила тяжести ЧЭ (момент силы тяжести), удерживая ось гироскопа в положении, близком к горизонту.

Исходя из такого понимания процесса, физический смысл величин β_0 и N_{cp} , см. Рис.11 и Рис. 15, очевидно, состоит в следующем.

Если разарретировать гироскоп, раскрученный в направлении на N_{cp} , так аккуратно, чтобы гироскоп не получил никаких толчков и никакой дополнительной энергии, то ось гиromотора «застыла» бы в положении под углом β_0 к горизонту, сохраняя направление на N_{cp} . То есть, ось гироскопа осталась бы неподвижной относительно Земли и прецессировала бы относительно Солнечно-Лунного гравитационного поля, с периодом, примерно, 24 часа. Скорость этой суточной прецессии зависит от широты местности φ . От φ зависит также и величина гироскопического азимута δ (угол между географическим меридианом и направлением N_{cp}). Для заданной величины φ существует вполне определённая величина δ , - это опытный факт. Но мы ищем математическую связь, и пока не будем пользоваться опытными фактами.

Особенно нас должна интересовать составляющая этой суточной прецессии, которая происходит в плоскости касательной к поверхности Земли, относительно земной поверхности.

При направлении оси гиromотора на N_{cp} эта прецессия равна 0. Но надо иметь ввиду, что это результат противоборства двух противоположно направленных скоростей и моментов, их вызывающих. Прецессия Северной оси гироскопа относительно поверхности Земли с Севера на Восток возникает как следствие 1-го свойства гироскопа: *гироскоп стремится сохранить своё положение относительно внешнего анизотропного гравитационного поля.*

Если мы рассмотрим гироскоп, на широте φ , ось которого направлена строго по меридиану, то увидим следующее. После поворота Земли на угол $\pi/2$ Северная ось гироскопа повернётся к Востоку в касательной плоскости на угол φ . Кроме того, Северная ось гироскопа попытается подняться над уровнем горизонта на угол φ , но это не получится. Сила тяжести чувствительного элемента (ЧЭ) гироскопа оставит ось гироскопа в положении, близком к горизонту.

Таким образом, Северная ось гиromотора начнёт разворачиваться с Севера на Восток с угловой скоростью $\omega_3 \cdot \sin \varphi$. Угол δ при этом будет увеличиваться, а угловая скорость прецессии с Севера на Восток ω_{C-B} уменьшаться по закону:

$$\omega_{C-B} = \omega_3 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \delta ; \quad (15)$$

Где, ω_{C-B} - угловая скорость прецессии оси гиromотора относительно земной поверхности, с Севера на Восток;

ω_3 - угловая скорость вращения Земли;

φ - географическая широта места установки прибора;

δ - гироскопический азимут (угол между меридианом и северной осью гиromотора)

При, $\delta = \pi / 2$, Северная ось гиromотора, вместе с Землёй, поворачивается строго на Восток вокруг земной оси. При этом внешнее гравитационное поле будет оказывать момент сопротивления, пропорциональный скорости вращения Земли ω_3 , стремящийся отклонить ось гиromотора от горизонтального положения. Этот момент будет компенсирован моментом силы тяжести ЧЭ, и ось гиromотора останется в положении, близком к горизонту. Момент, создающий прецессию с Севера на Восток в касательной плоскости, будет равен нулю.

При отклонении северной оси гиromотора от меридиана к Востоку появится момент, противодействующий прецессии гироскопа с Севера на Восток. Величина этого противодействующего момента пропорциональна угловой скорости прецессии гироскопа относительно земной оси (ω_{AO}) Эта скорость определится из геометрических соображений, см. Рис.16. и составит:

$$\omega_{AO} = \omega_3 \cdot \sin \delta \cdot \cos \psi ; \quad (16)$$

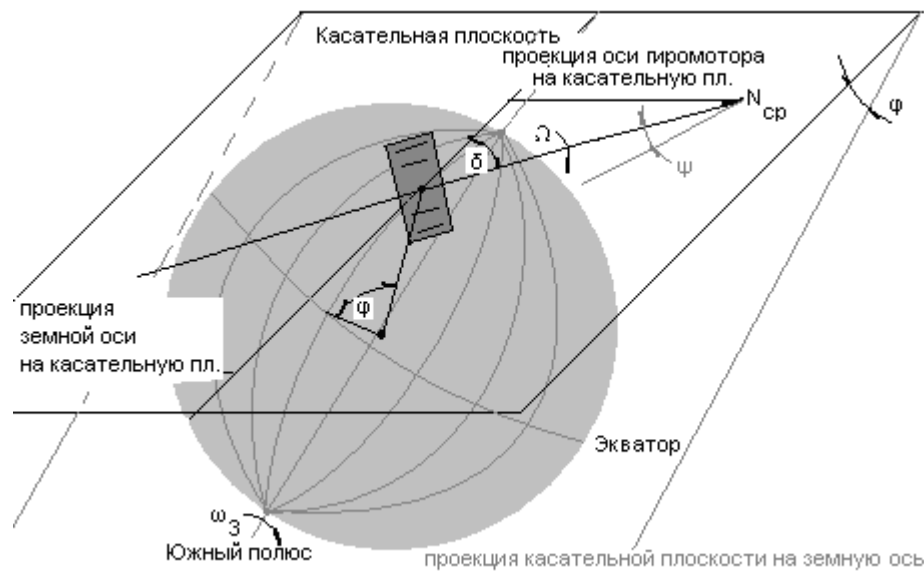


Рис. 16

Где, ω_3 - угловая скорость вращения Земли;

ω_{AO} - угловая скорость прецессии гироскопа вокруг земной оси, относительно анизотропного (Солнечно-Лунного) гравитационного поля;

δ - поправка гирокомпас (угол между направлением на N_{cp} и географическим меридианом)

ψ - угол между осью гиromотора и проекцией касательной плоскости на Земную ось,

Действительно, из рисунка видно, что угловая скорость прецессии гироскопа вокруг земной оси пропорциональна (проекции оси гиromотора) длине перпендикуляра, опущенного от северного конца оси гиromотора на линию географического меридиана, спроектированного на плоскость касательную к поверхности Земли в месте установки гирокомпаса. Кроме того, необходимо учесть, что касательная плоскость наклонена к оси вращения Земли. Угол между ними равен широте места установки гирокомпаса, т.е. равен φ . Угол между касательной плоскостью и проекцией этой плоскости на ось вращения Земли также равен φ . Ось гиromотора может разворачиваться только в плоскости, близкой к касательной. Следовательно, угол между осью гиromотора и проекцией касательной плоскости на земную ось будет меняться в пределах: от φ (при $\delta=0$) до 0 (при $\delta=\pi/2$); Угол этот обозначим ψ ;

Нам необходимо знать величину угловой скорости вращения оси гиromотора, а угловая скорость оси, по определению, перпендикулярна оси гиromотора, поэтому в выражении (16) и появляется множитель $\cos\psi$.

Определим величину угла ψ , решив несложную геометрическую задачу, см. Рис. 17



Рис. 17

На рисунке плоскость касательная к поверхности Земли, в точке установки гирокомпаса «Г». Точка «Д» - это проекция точки «Г» на ось вращения Земли. Точка «А» находится на пересечении линии касательной к меридиану в точке установки гирокомпаса (Г) и оси вращения Земли. Точка «В» находится на пересечении отрезка ГВ и линии пересечения касательной плоскости и её проекции на ось вращения Земли. Отрезки ГА и ГВ являются различными направлениями оси гирокомпаса. Углы: ГДА; ГДВ; ГАВ и ДАВ - прямые, по условиям построения.

Рассмотрим прямоугольный треугольник АГД. Примем сторону АГ = 1. Тогда, сторона АД = $\cos\varphi$

Рассмотрим прямоугольный треугольник АВГ. $AB = \operatorname{tg}\delta$;

$$BG = \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\delta}$$

Рассмотрим треугольник АВД. Две стороны уже известны. Сторона ВД определится из соотношения:

$$ВД = \sqrt{\operatorname{tg}^2 \delta + \operatorname{Cos}^2 \varphi};$$

Рассмотрим прямоугольный треугольник ВГД, из которого определим $\operatorname{Cos} \psi$

$$\operatorname{Cos} \psi = \frac{ВД}{ВГ}; \text{ Подставляя значения ВД и ВГ, получим}$$

$$\operatorname{Cos} \psi = \sqrt{\operatorname{Sin}^2 \delta + \operatorname{Cos}^2 \delta \cdot \operatorname{Cos}^2 \varphi}; \quad (17)$$

Угловое вращение оси гиromотора вокруг земной оси является основным. На это вращение затрачивается кинетическая энергия вращательного движения Земли и действует вращательный момент сил, а удерживает ось гиromотора в положении близком к горизонту сила притяжения Земли.

Вследствие вращения оси гиromотора вокруг земной оси, возникает момент сил, стремящейся развернуть ось гиromотора в перпендикулярном направлении, см. Рис.18. Выше, при выводе формулы (2), характеризующей 2-ое свойство гироскопа, мы уже убедились в том, что гироскоп является совершенным передаточным механизмом, передающим под прямым углом момент вращения и угловую скорость вращения оси гироскопа.



Рис. 18

Где, F_1 и F_2 – силы, приложенные к северному концу оси гиromотора.

Сила F_1 , направленная вертикально, обусловлена вращением Земли. Эта сила, совместно с другой парной силой, приложенной к южному концу гиromотора, образует момент сил, заставляющий ось гиromотора вращаться вокруг земной оси, с угловой скоростью $\omega_3 \cdot \operatorname{Sin} \delta \cdot \operatorname{Cos} \psi$.

γ - угол между направлением силы F_2 и плоскостью, касательной к поверхности Земли, в месте установки гироскопа;

φ - географическая широта места установки прибора.

Северная ось гиromотора на рисунке направлена строго на Восток, от нас, и обозначена крестиком.

Вращение оси гиromотора вокруг земной оси создаёт момент сил и, в частности, силу F_2 , направленную параллельно проекции касательной плоскости на ось вращения Земли.

Можно считать, что $F_2 = F_1$;

Проекция силы F_2 на плоскость, касательную к поверхности Земли, заставляет северную ось гиromотора разворачиваться (прецессировать) в направлении с Востока на Север, со скоростью:

$$\omega_{B-C} = \omega_3 \cdot \sin \delta \cdot \cos \psi \cdot \cos \gamma ; \quad (18)$$

Где, ω_{B-C} - угловая скорость прецессии оси гиromотора в касательной плоскости, с Востока на Север;

ω_3 - угловая скорость вращения Земли;

δ - гироскопический азимут (угол между меридианом и северной осью гиromотора)

ψ - угол между северной осью гиromотора и проекцией касательной плоскости на земную ось;

γ - угол между силой F_2 и касательной плоскостью. Косинус угла γ определяется из аналогичных соображений, что и косинус угла ψ .

$$\cos \gamma = \sqrt{\cos^2 \delta + \sin^2 \delta \cdot \cos^2 \psi} ; \quad (19)$$

И, если скорость прецессии, в касательной плоскости, с Востока на Север (ω_{B-C}), при каком то значении δ , станет равна скорости прецессии с Севера на Восток (ω_{C-B}), то ось гиromотора будет сохранять постоянное положение относительно географического меридиана Земли.

Приравнивая противоположно направленные скорости прецессии, получим выражение для определения гироскопического азимута.

$\omega_{C-B} = \omega_{B-C}$; подставляя выражения функций, получим:

$\omega_3 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \delta = \omega_3 \cdot \sin \delta \cdot \cos \psi \cdot \cos \gamma$; откуда, получим:

$$\sin \delta = \frac{\sin \varphi \cdot \cos \delta}{\cos \psi \cdot \cos \gamma} ; \quad (20)$$

Решая систему уравнений:

$$\sin \delta = \frac{\sin \varphi \cdot \cos \delta}{\cos \psi \cdot \cos \gamma} ; \quad (20)$$

$$\cos \psi = \sqrt{\sin^2 \delta + \cos^2 \delta \cdot \cos^2 \varphi} ; \quad (17)$$

$$\cos \gamma = \sqrt{\cos^2 \delta + \sin^2 \delta \cdot \cos^2 \varphi} ; \quad (19)$$

Методом последовательного приближения, можно найти значение гироскопического азимута для любой широты места установки прибора.

Вычисленные значения гироскопического азимута приведены в таблице:

φ (градусы)	δ (градусы)	$\cos \psi$	$\cos \gamma$
0	0	1	1
10	10	0,985	0,999
20	20	0,899	0,993
30	29,8	0,901	0,968
40	39	0,867	0,914
50	47,4	0,852	0,828
60	54,5	0,868	0,705
70	62	0,890	0,570
80	70,3	0,942	0,379

Насколько достоверные значения мы получили, покажут опыты. Расхождение с опытными данными вполне возможно. Как бы ни была подробна математическая модель, всегда можно, что-то упустить. Например, в предложенной выше математической модели процесса гирокомпасирования, сопротивление со стороны внешнего гравитационного поля прецессии гироскопа принято одинаковым для различных направлений прецессии, а это, скорее всего, не так.

Легко заметить, что в системе уравнений: 20, 17, 19, - отсутствует угол β_0 , подъёма оси гиromотора над плоскостью горизонта. То есть, согласно приведенной теории, величина гироскопического азимута не зависит от величины β_0 . При выводе системы уравнений для определения величины гироскопического азимута величиной β_0 действительно можно пренебречь, поскольку угол этот не велик. А, при необходимости, его можно сделать ещё меньше – для этого достаточно лишь увеличить вес чувствительного элемента (ЧЭ).

Но в других случаях рассмотрение этого малого угла представляет большой интерес.

Величина угла β_0 , несомненно, должна зависеть от величины сопротивления внешнего гравитационного поля, которое, в свою очередь, зависит от напряжённости поля. Напряжённость же внешнего гравитационного поля на поверхности Земли меняется.

Действительно, расстояние до Луны изменяется в 1,14 раза, следовательно, напряжённость гравитационного поля Луны у поверхности Земли (если её рассчитывать по теории Ньютона) меняется на 30%. Расстояние до Солнца меняется в 1,034 раза, соответственно напряжённость гравитационного поля Солнца меняется на 7%.

Изменения напряжённости внешнего гравитационного поля весьма существенны. Следовательно, изменения величины β_0 также должны быть существенными. Наблюдая за изменениями величины β_0 в течение длительного времени и затем, проведя гармонический анализ этих изменений, можно выяснить какие конкретные небесные тела стоят за ними. Можно также определить относительную силу влияния гравитационных полей Луны и Солнца и развеять миф о влиянии Мировой системы отсчёта на гироскопические процессы.

Не мешало бы также проанализировать: нет ли связи между изменениями напряжённости внешнего гравитационного поля и величиной погрешности гирокомпаса. Погрешность маятникового гирокомпаса невелика, порядка 20 угловых секунд. Но ведь погрешность прибора всегда хочется уменьшить.

Если эти наблюдения за изменением величины β_0 организовать столь же основательно как наблюдения за морскими приливами, то практические результаты могут быть существенны.

7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИН КОМПЕНСИРУЮЩЕГО МОМЕНТА И АНИЗОТРОПНОГО КОЭФФИЦИЕНТА (вывод формул)

Постоянное направление среднего положения оси гиromотора относительно географического меридиана означает, что к оси гиromотора приложен компенсирующий момент сил M_K , который останавливает прецессию гироскопа относительно поверхности Земли и заставляет его прецессировать относительно Солнечно-Лунного анизотропного гравитационного поля.

Создаётся этот компенсирующий момент за счёт вращения Земли. Ему противодействует момент силы сопротивления со стороны внешнего анизотропного

гравитационного поля, который в свою очередь уравнивается проекцией момента от веса чувствительного элемента. То есть, можно записать:

$$M_K = M_{АП} = M_{ЧЭ} \cdot \cos \varphi; \quad (21)$$

Где, M_K - компенсирующий момент, создаваемый вращением Земли, действующий в плоскости перпендикулярной оси вращения Земли;

$M_{АП}$ - момент силы сопротивления со стороны анизотропного гравитационного поля Солнца и Луны, действующий в плоскости перпендикулярной оси вращения Земли;

$M_{ЧЭ}$ - момент от веса чувствительного элемента гироскопа, удерживающий ось гироскопа в положении близком к горизонту, действующий в вертикальной плоскости;

$M_{ЧЭ} \cdot \cos \varphi$ - проекция момента от веса ЧЭ на плоскость перпендикулярную оси вращения Земли, где φ - географическая широта места установки гироскопа,

см. Рис. 19

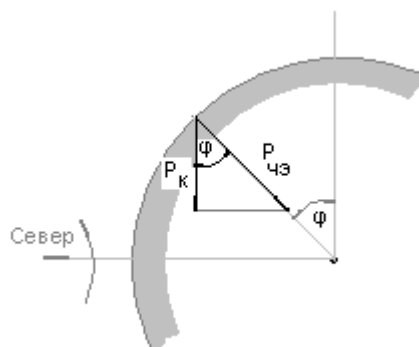


Рис. 19

Момент $M_{АП}$ определится из выражения:

$$M_{АП} = A \cdot J_y \cdot \Omega \cdot \omega_3 \cdot \sin \delta \cdot \cos \psi; \quad (22)$$

Момент $M_{ЧЭ}$ равен:

$$M_{ЧЭ} = P_{ЧЭ} \cdot L \cdot \sin \beta_0; \quad (23)$$

Приравнивая правые части этих выражений, получим уравнение для определения анизотропного коэффициента A

$$A = \frac{P_{ЧЭ} \cdot L \cdot \sin \beta_0}{J_y \cdot \Omega \cdot \omega_3 \cdot \sin \delta \cdot \cos \psi}; \quad (24)$$

Где, A – коэффициент анизотропный;

$P_{ЧЭ}$ - вес чувствительного элемента гироскопа;

L – плечо подвеса ЧЭ (расстояние от центра тяжести ЧЭ до точки подвеса ЧЭ);

β_0 - угол подъёма среднего положения оси гироскопа над плоскостью горизонта,

- определяется экспериментально;

J_y - момент инерции гироскопа относительно побочной оси;

Ω - угловая скорость вращения гироскопа;

ω_3 - угловая скорость вращения Земли относительно внешнего гравитационного

поля; $\omega_3 = 2\pi / T$; где: T – период обращения Земли относительно внешнего

гравитационного поля. Этот период равен, какому то, промежуточному значению между солнечными и лунными сутками. Если основное сопротивление прецессии гироскопа оказывает солнечное гравитационное поле, то этот период будет близок к 24 часам, если же большее сопротивление оказывает лунное поле, то этот период будет почти на час больше. Разобраться с этим можно только с помощью опытов;

δ - гироскопический азимут гироскопа (угол между средним положением оси гироскопа и географическим меридианом). Выше этот угол определён расчётным путём, см. таблицу, но в данном случае его необходимо определять опытным путём; ψ - угол между направлением среднего положения оси гироскопа и проекцией касательной плоскости на земную ось. Зная δ , $\cos\psi$ определяется по формуле:

$$\cos\psi = \sqrt{\sin^2\delta + \cos^2\delta \cdot \cos^2\varphi}; \quad (17)$$

Гироскопы широко применяются на практике, конструкция их непрерывно совершенствуется, технические характеристики проверяются и перепроверяются. Так что значения всех величин входящих в формулу уже давно известны, и нет серьёзных препятствий для определения величины анизотропного коэффициента «А» по формуле (24). Сложность состоит только в том, чтобы собрать эти конкретные данные вместе. Я такими данными не располагаю, и потому довести до числа определение анизотропного коэффициента «А» не имею возможности.

Имея прибор, описанный выше, и зная формулу (24), можно приступить к более подробному изучению свойств гравитационного поля и свойств гироскопа.

Сделать такой прибор, безусловно, возможно. Это, по сути, стандартный прибор, оборудованный дополнительной шкалой для наблюдения за вертикальным перемещением оси гироскопа.

Предполагается, что регулярные измерения величины β_0 , в течение длительного времени покажут, что величина β_0 существенно изменяется со временем, и что изменения эти носят циклический характер и зависят от взаимного расположения Земли, Солнца и Луны.

8. НАПРАВЛЕНИЕ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В предыдущих главах нам удалось вывести:

- формулу прецессии гироскопа в изотропном (земном) гравитационном поле

$$\bar{M} = J_y \cdot \bar{\omega} \times \bar{\Omega}; \quad (2)$$

- общую формулу прецессии гироскопа в изотропном и анизотропном гравитационных полях:

$$\bar{M} = J_y \cdot \bar{\omega}_u \times \bar{\Omega} + A \cdot J_y \cdot \bar{\omega}_A \times \bar{\Omega}; \quad (13)$$

- формулу для определения анизотропного коэффициента «А»

$$A = \frac{P_{\text{чз}} \cdot L \cdot \sin\beta_0}{J_y \cdot \Omega \cdot \omega_3 \cdot \sin\delta \cdot \cos\psi}; \quad (24)$$

Но, вопреки утверждениям Ричарда Фейнмана, см. эпиграф, для вывода этих формул комбинации законов Ньютона оказалось недостаточно.

Пришлось воспользоваться принципом Даламбера и тем самым расширить область применения 3-го закона Ньютона (равенства действия и противодействия) и на динамические процессы. Пришлось также признать реальность силы инерции и заняться изучением свойств гравитационного поля.

И при этом, мы рассмотрели наиболее простой вид прецессии гироскопа – прецессию с постоянной угловой скоростью, под действием постоянного момента сил. Но ведь в действительности так бывает не всегда.

Например, если действующий момент сил возрастает, то, очевидно, должна возрастать и скорость прецессии. Также очевидно, что в начальный момент времени, под действием

момента сил, скорость прецессии также должна возрастать. Но по какому закону она будет возрастать, математически показать невозможно, так как комбинации законов Ньютона, пусть даже усиленных Принципом Даламбера, здесь недостаточно.

Судите сами: При трёхмерном вращении материальной точки в рассмотренном выше примере, см. Рис.1., при равномерной прецессии гироскопа со скоростью ω , каждая материальная точка ротора гироскопа движется с ускорением. И мы легко справились с задачей нахождения величины силы, действующей на эту точку, применив 2-й закон Ньютона и Принцип Даламбера.

Если же мы попробуем рассмотреть неравномерную прецессию, например с равномерно возрастающей скоростью: $\omega = \omega_0 + \omega' \cdot t$, то каждая материальная точка ротора гироскопа будет двигаться с возрастающим ускорением. То есть, нам придётся иметь дело не только с величиной « a », но и с « a' » (не только с ускорением, но и с его производной) И, соответственно, придётся иметь дело не только с произведением « $m \cdot a$ », но и с произведением « $m \cdot a'$ ».

Но, если величина отношения между $m \cdot a$ и действующей (а значит и противодействующей) силой определена 2-м законом Ньютона, то величина соотношения между силой F и произведением: $m \cdot a'$, - не определена, и определить её могут только опыты, но никак не математика. Наши математические способности здесь также не при чём.

Если же мы будем рассматривать прецессию с неравномерно возрастающей скоростью, то нам придётся столкнуться ещё и с величиной « a'' » и с произведением « $m \cdot a''$ ».

Таким образом, мы столкнулись с тем, что для математического описания этого более сложного вида прецессии в нашем распоряжении нет физического закона, связывающего между собой силу, массу, ускорение и производные ускорения.

Закон этот можно представить в следующем виде:

$$F = m(k_1 \cdot a + k_2 \cdot a' + k_3 \cdot a'' + \dots + k_n \cdot a^{n-1}); \quad (25)$$

Где, F – действующая сила;

k_1 - коэффициент при ускорении. На поверхности Земли k_1 принят равным единице;

$k_2; k_3; \dots k_n$ - коэффициенты при первой, второй, n-1 производных ускорения.

Величины этих коэффициентов необходимо искать опытным путём. При постановке опытов надо не забывать, что все эти коэффициенты зависят от параметров гравитационного поля. И поэтому если эксперименты будут проведены на поверхности Земли, то формулу (25) с этими коэффициентами можно будет применять только на поверхности Земли. На поверхности, скажем, Луны коэффициент k_1 уже не будет равен единице, см. Л 1, да и величины всех других коэффициентов изменятся.

Это новое соотношение между действующей силой, массой, ускорением и его производными можно назвать *расширенным основным законом механики*. Нетрудно заметить, что 2-й закон Ньютона является частным случаем этого, более общего, соотношения.

Но и соотношение (25) это также лишь частный случай ещё более общего вида *основного закона механики*, вывод которого приводится в статье «Неизвестная механика» (вторая редакция)

9. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. **Теория гироскопа**, в основе которой лежат два основных свойства: стремление гироскопа сохранять своё положение относительно Мирового пространства и формула (1) связывающая действующий момент сил, приложенный к оси вращения, скорость и направление прецессии, - **не точна**.

До сих пор не выяснено, какими средствами Мировое пространство заставляет свободный гироскоп сохранять относительно себя неизменное положение и, в то же время, заставляет гироскоп изменять своё положение (прецессировать) относительно земной поверхности.

Следуя выводам сделанным в Л 1, о том:
что законы механики определяются гравитационными полями привилегированных систем (то есть, небесных тел);
что сила инерции - это реальная сила сопротивления, действующая со стороны гравитационного поля на ускоряющиеся тела;
что Принцип Даламбера является реальным физическим законом, расширяющим область действия 3-го закона Ньютона и на динамические процессы;
что сила притяжения небесных тел (напряжённость их гравитационных полей) убывает быстрее, чем по закону обратных квадратов, - можно утверждать следующее:

2. В Солнечной системе влиянием всех других звёзд (кроме Солнца) можно пренебречь.

Мировое пространство **не обладает** своим характерным и **постоянным** гравитационным полем. Гравитационное поле в любой точке Мирового пространства (в любой точке Солнечной системы) складывается из гравитационных полей небесных тел. Если гироскоп находится вблизи поверхности Земли, то гравитационное поле складывается, прежде всего, из гравитационных полей Земли, Луны и Солнца. Эти небесные тела постоянно меняют своё относительное расположение – следовательно, постоянно меняется суммарное гравитационное поле, действующее на гироскоп. Эти изменения (возмущения) распространяются в гравитационном поле Земли со скоростью вращения Земли относительно возмущающих её поле небесных тел, то есть относительно Луны и Солнца.

Прецессия свободного гироскопа относительно поверхности Земли вызывается возмущениями этих реальных небесных тел, а не вымышленной Мировой системой отсчёта.

3. Сила этих возмущений со стороны гравитационных полей Луны и Солнца превосходит силу сопротивления со стороны гравитационного поля Земли. Это удивительно, но это факт, подтверждённый многочисленными общеизвестными опытами. Это превосходство гравитационных полей Луны и Солнца можно объяснить узко направленной структурой этих полей (Земли достигают почти параллельные лучи). При различных направлениях движения материальной точки в таком поле, сопротивление поля будет различно. Такое поле называется *анизотропным*.

В то время как излучение гравитационного поля Земли, у её поверхности, распределяется по закону Косинуса, см.Л 1 и Л 2, и каждая материальная точка гироскопа облучается со всех сторон в области нижней полусферы. При любом направлении движения материальной точки она пересекает одинаковое количество силовых линий гравитационного поля и, следовательно, встречает одинаковое сопротивление. Такое поле называется *изотропным*.

4. Момент сил, действующий на свободный гироскоп со стороны анизотропных гравитационных полей Солнца и Луны, и заставляющий его прецессировать относительно земной поверхности определяется формулой (2)

$$\vec{M} = J_y \cdot \vec{\omega}_u \times \vec{\Omega}; \quad (2)$$

Где, \bar{M} - момент сил вызывающий прецессию и действующий со стороны внешнего анизотропного гравитационного поля Солнца и Луны;

J_y - момент инерции гироскопа относительно побочной оси;

$\bar{\omega}_u$ - угловая скорость прецессии гироскопа относительно земного изотропного поля;

Ω - собственная угловая скорость вращения гироскопа.

Как видно, выведенная нами формула (2) отличается от общепринятой формулы тем, что вместо главного момента инерции в ней присутствует момент инерции относительно побочной оси. Присутствие в формуле (2) момента инерции относительно побочной оси говорит о том, что прецессия представляет собой последовательный процесс поворота оси гироскопа вокруг побочных осей. Это легко заметить и при визуальном наблюдении за прецессией гироскопа.

5. Общепринятая формула $\bar{M} = J \cdot \bar{\omega} \times \bar{\Omega}$; (1), определяющая второе свойство гироскопа,

Где, \bar{M} - момент сил вызывающий прецессию;

$\bar{\omega}$ - угловая скорость прецессии;

$\bar{\Omega}$ - угловая скорость собственного вращения гироскопа;

J - главный момент инерции,

не верна. При выводе этой формулы допущена ошибка, вследствие не достаточно подробного рассмотрения физического процесса, происходящего при вращении твёрдого тела.

6. Второе свойство гироскопа определяется формулой:

$$\bar{M} = J_y \cdot \bar{\omega}_u \times \bar{\Omega} + A \cdot J_y \cdot \bar{\omega}_A \times \bar{\Omega}; \quad (13)$$

Где, J_y - момент инерции относительно вспомогательной оси;

$\bar{\omega}_u$ - угловая скорость прецессии гироскопа относительно изотропного гравитационного поля;

$\bar{\omega}_A$ - угловая скорость прецессии гироскопа относительно анизотропного гравитационного поля;

A – коэффициент анизотропный, учитывает сопротивление анизотропного (Солнечно-Лунного) гравитационного поля, зависит от величин: Ω , ω_3 и от напряжённости внешнего гравитационного поля, определяется по формуле:

$$A = \frac{P_{чэ} \cdot L \cdot \sin \beta_0}{J_y \cdot \Omega \cdot \omega_3 \cdot \sin \delta \cdot \cos \psi}; \quad (24)$$

Где, A – коэффициент анизотропный;

$P_{чэ}$ - вес чувствительного элемента гироскопа;

L – плечо подвеса чувствительного элемента;

β_0 - угол подъёма среднего положения оси гироскопа над плоскостью горизонта, - определяется экспериментально;

J_y - момент инерции гироскопа относительно побочной оси;

Ω - угловая скорость вращения гироскопа;

ω_3 - угловая скорость вращения Земли относительно внешнего анизотропного гравитационного поля; $\omega_3 = 2\pi / T$; где: T – период обращения Земли относительно внешнего гравитационного поля.

δ - гироскопический азимут гироскопа, определяется опытным путём;

ψ - угол между направлением среднего положения оси гиromотора и проекцией касательной плоскости на земную ось, $\text{Cos } \psi$ определяется по формуле:

$$\text{Cos } \psi = \sqrt{\text{Sin}^2 \delta + \text{Cos}^2 \delta \cdot \text{Cos}^2 \varphi}; \quad (17)$$

Где, φ - географическая широта места установки гирокомпаса

7. В частном случае, для определения величины компенсирующего момента M_K , останавливающего прецессию гироскопа относительно Земли и заставляющего гироскоп прецессировать относительно внешнего анизотропного поля Солнца и Луны, необходимо пользоваться формулой (14')

$$\bar{M}_K = A \cdot J_y \cdot \bar{\omega}_A \times \bar{\Omega}; \quad (13')$$

Разделив почленно уравнения (13') и (2), в скалярной форме, и сокращая подобные члены, получим

$$M_K / M = A; \text{ или } M_K = A \cdot M;$$

То есть компенсирующий момент, заставляющий гироскоп прецессировать относительно внешнего анизотропного поля в « A » раз больше величины момента, заставляющего гироскоп прецессировать относительно изотропного поля Земли.

Где, A – анизотропный коэффициент, показывающий относительную силу анизотропного и изотропного полей, по их воздействию на гироскоп.

Предполагается, что величина этого анизотропного коэффициента много больше единицы.

В настоящее время наукой накоплено достаточно данных, для того чтобы незамедлительно определить величину анизотропного коэффициента.

8. В свете вышеизложенного, **первое основное свойство гироскопа** надо понимать так, что **гироскоп стремится сохранить своё положение относительно анизотропного гравитационного поля наиболее влиятельного небесного тела**. Например, если гироскоп находится на поверхности Земли, то для него влиятельными анизотропными полями будут являться гравитационные поля Луны и Солнца. Какое из этих двух полей наиболее влиятельное покажут эксперименты.

9. Предполагается, что регулярные измерения величины β_o , в течение длительного времени покажут, что величина β_o существенно изменяется со временем, и что изменения эти носят циклический характер и зависят от взаимного расположения Земли, Солнца и Луны. Эти эксперименты должны развеять миф о Мировой системе отсчёта.

10. Предложенные эксперименты с гирокомпасом, по наблюдению за превышением оси гиromотора над плоскостью горизонта, позволят выяснить степень влияния Луны и Солнца на поведение гироскопа и использовать полученные данные для более точной настройки различных гироскопических устройств.

11. Для анализа гироскопических процессов с неравномерной скоростью прецессии необходимо экспериментальным путём найти коэффициенты в уравнении вида:

$$F = m(k_1 \cdot a + k_2 \cdot a' + k_3 \cdot a'' + \dots + k_n \cdot a^{n-1}); \quad (25)$$

Где, F – действующая сила;

k_1 - коэффициент при ускорении. На поверхности Земли k_1 принят равным единице;

$k_2; k_3; \dots k_n$ - коэффициенты при первой, второй, n-1 производных ускорения.

Это соотношение можно назвать *расширенным или уточнённым основным законом механики*.

Второй закон Ньютона является лишь частным случаем расширенного основного закона механики (25).

Таким образом, для решения насущных задач в прикладной науке, необходимо развивать науку фундаментальную.

2007-06-04

Гужеля Юрий Александрович

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ	- 1
2. ВТОРОЕ СВОЙСТВО ГИРОСКОПА (вывод новой формулы)	- 2
3. ПЕРВОЕ ОСНОВНОЕ СВОЙСТВО ГИРОСКОПА (новая формулировка)	- 7
4. ОБЛАСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОРМУЛЫ $\bar{M} = J_y \cdot \bar{\omega} \times \bar{\Omega}$	- 10
5. ЭКСПЕРИМЕНТ	- 12
6. ФИЗИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ГИРОКОМПАСИРОВАНИЯ	-16
7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИН КОМПЕНСИРУЮЩЕГО МОМЕНТА И АНИЗОТРОПНОГО КОЭФФИЦИЕНТА (вывод формул)	-23
8. НАПРАВЛЕНИЕ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ	- 25
9. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ	- 27

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гужеля Ю.А. «Неизвестная механика» журнал «Русская мысль» №1-6 Москва «Общественная польза» 1994 г.
2. Гужеля Ю.А. «Неизвестная механика» (вторая редакция) – 2007 г.
3. А.Ю. Ишлинский, В.И. Борзов, Н.П. Степаненко «Лекции по теории гироскопов», издательство Московского университета 1983 г
4. А.Ю. Ишлинский «Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация» Москва «Наука» 1976 г.
5. Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс, «Фейнмановские лекции по физике»