ЭФФЕКТ ДЖАНИБЕКОВА – ВЫНУЖДЕННАЯ ПРЕЦЕССИЯ СВОБОДНОГО ГИРОСКОПА

Томилин А.К.[1], *Алеев Д.С.*[2]
[1]*НИ ТПУ, ИШНПТ, профессор,*
E-mail: aktomilin@tpu.ru
[2]*НИ ТПУ, ИШНПТ, 4А21, студент,*
E-mail: dsa28@tpu.ru

В 1985 году во время полёта на космической станции космонавт Владимир Джанибеков при распаковке груза, с некоторым усилием стукнул по «ушку» гайки-барашка и та, после схода с винтовой резьбы, устремилась по горизонтальной прямой, но при этом, пролетев, примерно, 20 сантиметров, развернулась на 180° ушками назад и продолжала так переворачиваться через равные промежутки времени (рис. 1). Поскольку научного объяснения этого непонятного феномена не было, информация о нем в СССР была засекречена. В 90-х годах, когда об эффекте Джанибекова (ЭД) стало широко известно, некоторые конспирологи стали предсказывать возможный «кувырок» Земли. Адекватной теории, объясняющей ЭД, до сих пор нет.

Цель настоящего исследования – анализ описанных выше экспериментов и попытка объяснения ЭД на основе теории Н.Е. Жуковского о вынужденной прецессии гироскопа, а также определение условий его проявления.

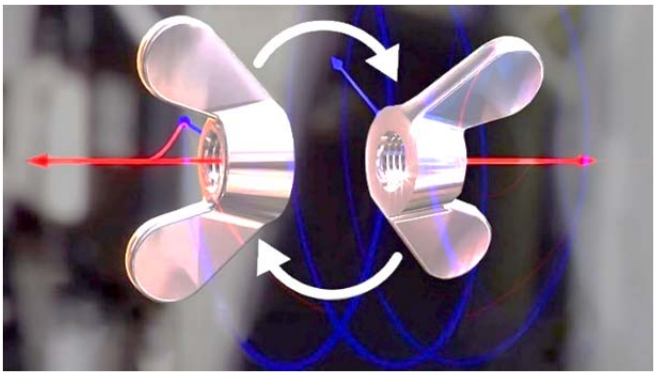

Рис. 1. Демонстрация эффекта Джанибекова

В Интернете размещено несколько видеороликов, заснятых в космосе, с демонстрацией ЭД. Отметим, что эффект наблюдается только на космической станции. В условиях невесомости, созданной в самолете при свободном падении, эффект не возникает. Следовательно, невесомость – необходимое, но не основное условие для возникновения ЭД.

Рис. 2. Вращение теннисной ракетки

Наиболее распространенным является объяснение ЭД на основе теоремы Пуансо о промежуточной оси инерции [1]. Ее часто называют «теоремой теннисной ракетки», поскольку ракетка, подброшенная вверх и закрученная вокруг оси x, обязательно переворачивается еще и вокруг оси y (рис. 2). Теорема содержит утверждение о неустойчивости вращения твёрдого тела относительно главной оси Ox с промежуточным значением момента инерции: $J_y > J_x > J_z$. Вращение объекта относительно главных осей с наибольшим и наименьшим моментами инерции является устойчивым.

Проанализируем доступные видеоролики с экспериментами, произведенными на космической станции. В ролике (https://www.youtube.com/watch?v=LzVItPwiQyI) заснятом членами экипажа МКС-30 Антоном Шкаплеровым и Дэниелом Бёрбэнком демонстрируются эксперименты с телами различной формы. Вначале космонавты экспериментируют с кубической коробкой и консервной банкой – эффект в этих случаях не наблюдается при закручивании вокруг любой оси. Заметим, что этим телам сообщаются очень малые угловые скорости собственного вращения и время наблюдения ограничивается несколькими оборотами. Можно предположить, что эти две причины, не позволяют эффекту проявится. Затем демонстрируются эксперименты с коробкой в виде параллелепипеда и с книгой. Эффект наблюдается при вращении тел вокруг оси со средним моментом инерции.

В другом видеоролике (https://youtu.be/I6PBM4En-6o) Джанибеков демонстрирует эксперимент с пластилиновым шариком, у которого все три осевых момента инерции практически одинаковые. При этом вращающийся шарик периодически переворачивается, что противоречит теореме о промежуточной оси инерции. Следует также отметить, что эта теорема не объясняет периодическое изменение (колебания) оси вращения, наблюдаемое в ЭД.

Поскольку вращающийся объект находится на космической станции и вместе с ней движется по круговой орбите, то возникает случай вынужденной прецессии. Имеется две угловых скорости: собственного вращения тела $\boldsymbol{\omega}_1$ и вынужденной прецессии $\boldsymbol{\omega}_2$ за счёт движения по круговой орбите. С космической станцией свяжем подвижную координатную систему в виде естественного трёхгранника $O\xi\eta\zeta$. Пусть вектор $\boldsymbol{\omega}_1$ лежит в плоскости $O\xi\eta$, а $\boldsymbol{\omega}_2$ расположен на оси $O\eta$. Векторы $\boldsymbol{\omega}_1$ и $\boldsymbol{\omega}_2$ образуют произвольный угол φ, который откладывается от оси $O\eta$, сохраняющей свою ориентацию в пространстве (рис. 3). При этом, в соответствии с правилом Н.Е. Жуковского [2] ось собственного вращения стремится совместиться с осью прецессии за счёт гироскопического момента:

$$\mathbf{M}_{\text{гир}} = J_1\left(\boldsymbol{\omega}_1 \cdot \boldsymbol{\omega}_2\right), \tag{1}$$

где J_1 – момент инерции тела относительно оси собственного вращения.

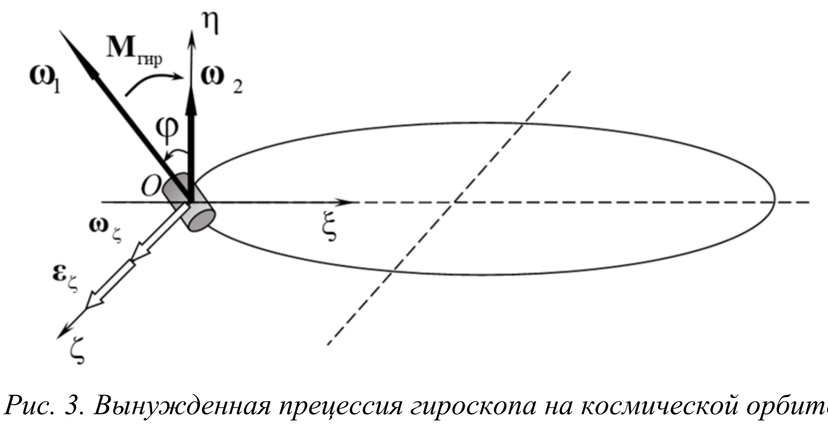

Рис. 3. Вынужденная прецессия гироскопа на космической орбите

При этом вращение гироскопа вокруг оси $O\zeta$ определяется дифференциальным уравнением:

$$J_\zeta \dot{\omega}_\zeta = -J_1\omega_1\omega_2 \sin\varphi\,. \tag{2}$$

Представим (2) в виде:

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{J_1}{J_\zeta}\omega_1\omega_2 \sin\varphi = 0. \tag{3}$$

Дифференциальное уравнение (3) описывает нелинейные колебания маятниковой системы [3]. Колебания соответствующего линеаризованного маятника происходят с периодом

$$T_0 = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_1 \omega_2 J_1 / J_\zeta}}.$$

Период колебаний нелинейной системы, как показано в [4], определяется по формуле:

$$T = T_0 \frac{2\sin\left(\varphi_0^2/4\right)}{\pi} = \frac{4}{\sqrt{\omega_1 \omega_2 J_1 / J_\zeta}} \sin\left(\varphi_0^2/4\right). \quad (4)$$

Пусть, например, колебания происходят с амплитудой $\varphi_0 = \pi/2$, а соотношение моментов инерции гайки $J_1/J_\zeta = 2$. Собственную угловую скорость вращающейся гайки можно оценить значением

$$\omega_1 = 2\pi \cdot 30 = 188{,}5\, c^{-1}.$$

Космическая станция совершает полный оборот по своей по своей орбите за 90 минут, поэтому угловая скорость ее движения по орбите

$$\omega_2 = \frac{2\pi}{90 \cdot 60} = 1{,}16 \cdot 10^{-3} c^{-1}.$$

При этих значениях из (4) получаем период колебаний оси гайки $T \approx 3{,}5c$, что хорошо согласуется экспериментами, представленными на видеороликах. Дополнительно заметим, что поступательное движение гайки и расстояние, пройденное ей при этом, значения не имеют.

Колебания оси гироскопа в эффекте ЭД можно объяснить и из энергетических соображений. Под действием гироскопического момента тело приобретает угловую скорость $\boldsymbol{\omega}_\zeta$ и соответствующую кинетическую энергию. В момент совпадения осей собственного вращения и прецессии кинетическая энергия имеет максимальное значение, поэтому тело продолжает вращение вокруг оси $O\zeta$. Далее происходит преобразование кинетической энергии в потенциальную энергию гироскопического момента. Затем движение происходит в обратном направлении.

Полученный результат подтверждается экспериментами со свободным волчком, заснятыми космонавтами в видеоролике: https://youtu.be/9LfXZsQyr1o. На нем представлены два случая ориентации оси собственного вращения волчка. В первом случае переворот волчка не наблюдается, а во втором – он периодически «кувыркается». Это объясняется ориентацией оси собственного вращения волчка по отношению к оси прецессии. В первом случае ось собственного вращения совпадает с осью прецессии (переворота нет), во втором случае векторы $\boldsymbol{\omega}_1$ и $\boldsymbol{\omega}_2$ расположены ортогонально (происходит переворот).

При рассмотрении задачи об эволюции земной оси требуется учесть много факторов, связанных с силовым воздействием космических тел, а также природные явления. ЭД, как один из факторов, очевидно, нужно учитывать в таких задачах. Земля вращается вокруг оси с наибольшим моментом инерции, которая составляет с угловой скоростью вынужденной прецессии угол $23{,}5^0$. Оценочный расчет периода колебаний Земли под действием гироскопического момента составляет примерно 9,6 часов. Этого не происходит, поскольку на Землю воздействуют и другие моменты, возникающие при взаимодействии с Солнцем, Луной, а также в результате приливных явлений. Сумма всех моментов, воздействующих на земную ось равна нулю, поэтому она находится в устойчивом положении.

ЭД нужно учитывать в работе гироскопических систем на космических спутниках и станциях [4–5]. Например, для высокоточной стабилизации космических аппаратов используются гиродины – это гироскопы, обеспечивающие правильную ориентацию космических аппаратов в полёте и предотвращающие их беспорядочное вращение. Принцип работы гиродина заключается в создании гироскопического момента, действующего на космический аппарат через опоры гироскопа. Как следует из представленной выше теории, в гиродине может возникать дополнительный гироскопический момент за счет ЭД. Этого можно избежать, расположив угловую собственного вращения гиродина по оси орбитальной прецессии.

Список литературы:

1. Ashbaugh M.S., Chicone C.C., Cushman R.H. The twisting tennis racket // Journal of Dynamics and Differential Equations. 1991, Vol.3, p.67–85. DOI: https://doi.org/10.1007/BF01049489

2. Сивухин Д. В. Общий курс физики. – М.: Наука, 1979. – Т. I. Механика. – 520 с.

3. Гусев А.Ф., Новоселова М.В. Прикладная теория колебаний: учебное пособие – Тверь: Тверской государственный технический университет, 2017. 160 с.

4. Лысов А.Н., Лысова А.А. Теория гироскопических стабилизаторов. Учебное пособие. – Челябинск. Издательский центр ЮУрГУ. – 2009. – 117 с.

5. Авербух В.Я., Вейнберг Д.М., Верещагин В.П. и др. Электромеханические устройства космических аппаратов и ракет-носителей. Электрооборудование для космических аппаратов и ракет. –2001. – Т. 100 – С. 89–96.