

Управление образования города Пензы
МКУ «Центр комплексного обслуживания и
методологического обеспечения учреждений образования» г. Пензы

МБОУ СОШ №66 г. Пензы
имени Виктора Александровича Стукалова

XXV научно-практическая конференция школьников г. Пензы
«Я исследую мир»

Исследовательская работа

«Загадка волчка Томсона»

Работу выполнил:

обучающийся 9 «И» класса

Борчуков Алексей

Научный руководитель:

Щипалкин Денис Валерьевич,

учитель физики

г. Пенза, 2020

Оглавление

1. Введение.....	3
2. История происхождения.....	4
3. Механика вращающегося волчка.....	5
3.1 Общие исходные данные.	5
3.2 Китайский волчок в процессе переворота.....	5
4. Заключение	11
5. Библиографический список.....	12

1. Введение

Цель: Исследовать механику вращающегося волчка Томсона.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Изучить историю происхождения волчка Томсона
2. Выяснить причины его «странного» движения
3. Произвести математические расчеты движения волчка

Объект исследования: гидравлический манипулятор.

Методы исследования: Теоретический: изучение актуальности выбранной темы, анализ литературы и сайтов, определение основных этапов работы, формулировка вопросов и выводов. Эмпирический: Создание 3D модели волчка

2.История происхождения

Как у Вас еще нет такого волчка? Значит, Вы многое упустили в детстве ... Немедленно приобретайте! Голову заморочит, кому хочешь ... Кручу, верчу, многое узнать хочу ... например, о динамических свойствах этого своенравного переворачивающегося волчка. Посмотрите только на этих знаменитых физиков В. Паули и Н. Бора. Как Вы думаете, чем они увлечены? ...



Рис. 1

Никто не знает, когда впервые был запущен китайский волчок, и кто его придумал. Но известно, что впервые необычными свойствами китайского волчка при вращении заинтересовался великий физик лорд Кельвин. Позднее китайский волчок приобрел еще одно название "волчок Томсона" по имени ученого, занимавшегося изучением гироскопов. С тех пор такие волчки "крутят" во всем мире!

Китайский волчок - это шарик со срезанной верхушкой, на поверхности среза в центре расположена ножка-ось. Чтобы увидеть во вращении этого волчка что-то отличающее его от обычного волчка, нужно при его изготовлении соблюсти одно правило: центр масс волчка не должен совпадать с геометрическим центром шара-заготовки.

По одной из легенд прототип данного волчка появился в древнем Китае и был изготовлен из личи. Исходя из этой легенды, первый волчок был изготовлен из половинки косточки этого фрукта, но он был очень маленьким и неудобным. Потом уже его стали делать не из косточки, а из кожуры этого фрукта, предварительно набив её глиной.

3. Механика вращающегося волчка

3.1 Общие исходные данные.

1. Неподвижная система координат $Ox_0y_0z_0$ изображена на рисунках лиловым цветом. Центром этой прямоугольной системы координат является точка O , являющаяся геометрическим центром шарика (центром кривизны сферической наружной поверхности).

2. Подвижная система координат $Oxyz$ показана на рисунках синим цветом. Оси этой системы участвуют во всех движениях волчка. Чтобы было понятнее, можно сказать, что оси x, y, z – это спицы, проткнувшие твердое тело волчка. Ось z всегда жестко связана (совпадает) с прямой, проведенной через точки O и C . Точка C – это центр тяжести волчка, который в начальный момент расположен ниже центра кривизны опорной поверхности точки O . Ось y всегда находится в плоскости действия векторов внешних сил – силы тяжести G , силы инерции F и силы реакции опоры P .

3. Вектора сил и направления моментов показаны на рисунках зеленым цветом. Цветом близким к фиолетовому на рисунках выделены направления и вектора угловых скоростей ω_i , а коричневым цветом – вектора кинетических моментов $H_i = \omega_i * I_i$. (I_i – вращательный момент инерции волчка вокруг i -ой оси.)

4. Волчок имеет массу m и вес $P = m * g$, где g – ускорение свободного падения.

3.2 Китайский волчок в процессе переворота

1. Волчок в состоянии покоя находится в устойчивом положении, касаясь опорной поверхности точкой K_1 . Если приглядеться к нему внимательней, то мы узнаем знакомую с детства игрушку «ванька-встанька» (рис.2).

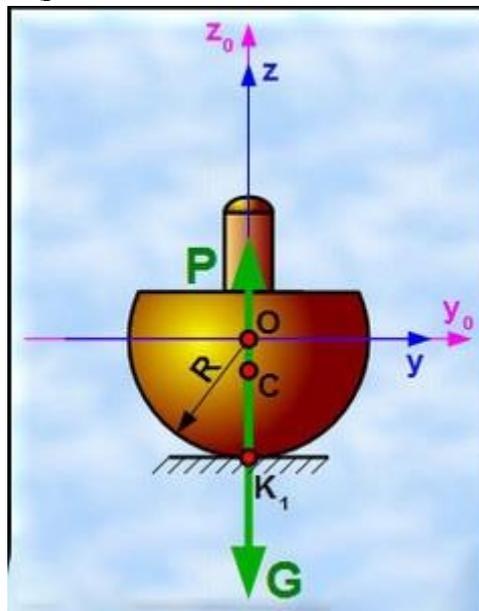


Рис. 2

2. Запустим волчок, придав ему вращение вокруг оси z против часовой стрелки, если смотреть сверху.

3. Китайский волчок вращается не на острой ножке, как обычный классический волчок, а на шаровой поверхности с радиусом R . Поэтому из-за малейшего отклонения оси z от вертикали z_0 волчок, вращающийся вокруг оси z с угловой скоростью $\omega_{отн}$, сразу же начинает

осью своей симметрии z описывать вокруг вертикали z_0 конус с незначительным углом α и вершиной в центре радиуса кривизны опорной поверхности шарика точке O (рис.3).

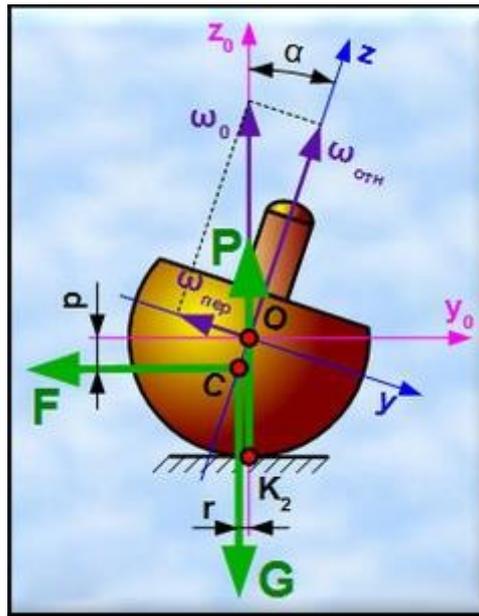


Рис. 3

4. Запустить волчок без отклонения невозможно, минимальное (микронное) отклонение будет на практике всегда из-за трения в точке (точнее – пятне) K_1 , из-за трения об воздух, из-за неоднородности материала волчка и – как следствие — небольшого смещения центра масс C от геометрической оси симметрии z .

5. При возникновении даже малого угла рассогласования α центр тяжести волчка C тут же сместится относительно вертикали z_0 на расстояние r .

6. Это смещение мгновенно вызовет возникновение центробежной силы инерции F

которая, как понятно из формулы, прямо пропорциональна массе волчка m , расстоянию смещения r центра масс точки C от вертикали z_0 и квадрату абсолютной угловой скорости ω_0 вокруг оси z_0 , которую получил волчок при придании ему вращения.

7. Возникшая сила F и вес волчка G создают момент внешних сил M

$$M = F * r - G * r, (M > 0)$$

который стремится повернуть волчок вокруг оси x (точки O) по часовой стрелке, если смотреть спереди.

8. Появление момента внешних сил рождает гироскопический эффект и прецессию!!! Китайский волчок начинает прецессировать! Гироскопический момент M_{Γ} пытается, противодействуя моменту внешних сил M , уравновесить его. Волчок по закону прецессии поворачивается вокруг оси y , пытаясь совместить вектор своего относительно оси z кинетического момента $H_{отн}$ с вектором момента внешних сил M по самому короткому пути (то есть – вокруг оси y) (рис.4).

$$H_{отн} = I_z * \omega_{отн} = m * r^2 * \omega_{отн}$$

$$M_{\Gamma} = H_{отн} * \omega_{пер} = M$$

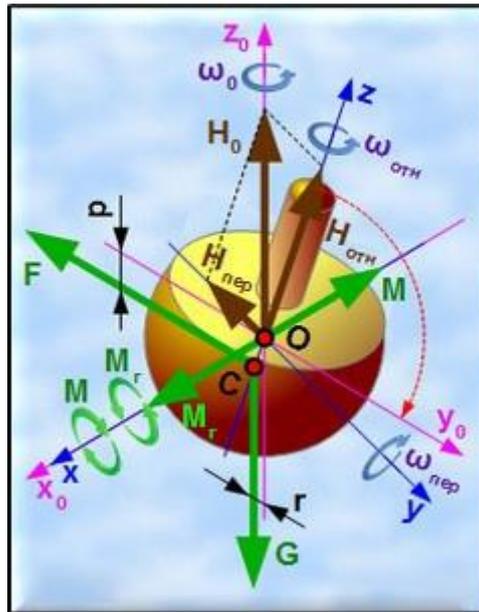


Рис. 4

9. Скорость прецессии (скорость поворота волчка вокруг оси y) $\omega_{\text{пер}}$ вычисляется по формуле:

$$\omega_{\text{пер}} = M/H_{\text{отн}} = m \cdot r \cdot (\omega_0^2 \cdot p - g) / (m \cdot r^2 \cdot \omega_{\text{отн}})$$

$$\omega_{\text{пер}} = (\omega_0^2 \cdot p - g) / r \cdot \omega_{\text{отн}}$$

10. Если пренебречь трением в точке касания шариком поверхности и сопротивлением воздуха, то можно принять, что момент количества движения H_0 вокруг вертикальной и неподвижной оси z_0 , полученный волчком при запуске, будет оставаться постоянным:

$$H_0 = I_0 \cdot \omega_0 = \text{const}$$

11. В связи с вышесказанным модули угловых скоростей $\omega_{\text{отн}}$ и $\omega_{\text{пер}}$ относительного и переносного движений будут определяться в процессе поворота, как катеты прямоугольного треугольника, подчиняясь теореме Пифагора:

$$I_0 \cdot \omega_0 = ((I_y \cdot \omega_{\text{пер}})^2 + (I_z \cdot \omega_{\text{отн}})^2)^{0,5} = \text{const}$$

12. Следовательно, при увеличении наклона оси z от вертикального положения переносная угловая скорость $\omega_{\text{пер}}$ (скорость прецессии) будет расти, а относительная угловая скорость вращения $\omega_{\text{отн}}$ будет падать.

13. Рост угловой скорости прецессии $\omega_{\text{пер}}$ означает, что поворот волчка вокруг оси y будет непрерывно ускоряться, и в итоге прецессия довольно быстро «завалит» волчок в положение, когда ручка и связанная с ней ось z окажутся в горизонтальной плоскости (рис.5).

14. В этот момент произойдет удивительная и в то же время закономерная метаморфоза. Китайский волчок прекратит на миг свое вращение вокруг оси z , он остановится. При этом он будет продолжать вращение со скоростью ω_0 вокруг оси y , которая совместится с неподвижной вертикальной осью z_0 ! На языке формул это выглядит так:

$$\omega_0 = \omega_{\text{пер}}$$

$$\omega_{\text{отн}} = 0$$

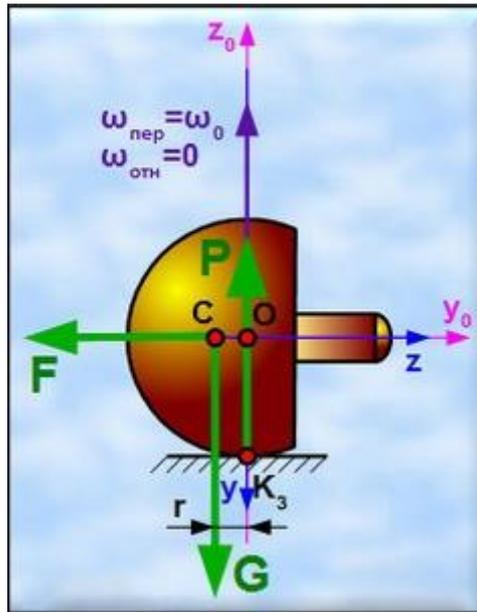


Рис. 5

15. Длиться эта остановка будет долю мгновения. По аналогии с начальным моментом волчок, вращаясь вокруг оси z_0 , начнет образовывать конус с очень малым углом α при вершине точке O вследствие шарообразности опорной поверхности (рис.6). Прецессия (поворот вокруг оси y) продолжится.

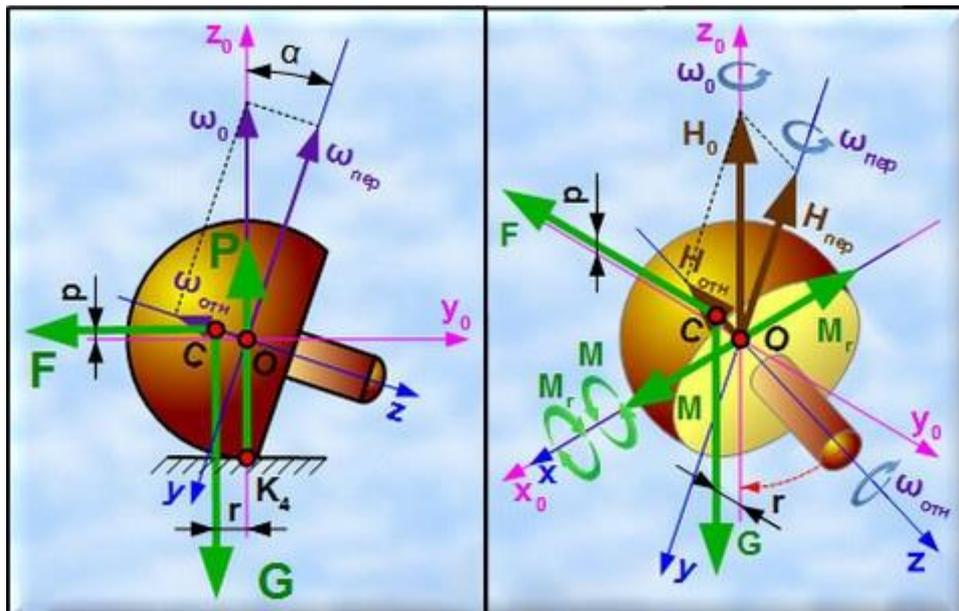


Рис. 6

16. Момент внешних сил M изменит направление своего действия и сила инерции F «возьмет в союзники» силу тяжести G для «совместной борьбы» с гироскопическим моментом M_r .

$$M = F \cdot p + G \cdot r$$

17. Гироскопический момент M_r изменит свое направление в ответ на изменение направления момента внешних сил M . Китайский волчок начнет вращение вокруг оси z в направлении противоположном своему начальному вращению!!!

18. Пока описанные выше моменты противодействуют друг другу, прецессия и сила трения качения сферической поверхности волчка по опорной плоскости продолжают

«провоцирование опрокидывания» до момента совмещения оси z с отрицательным направлением оси z_0 (рис.7).

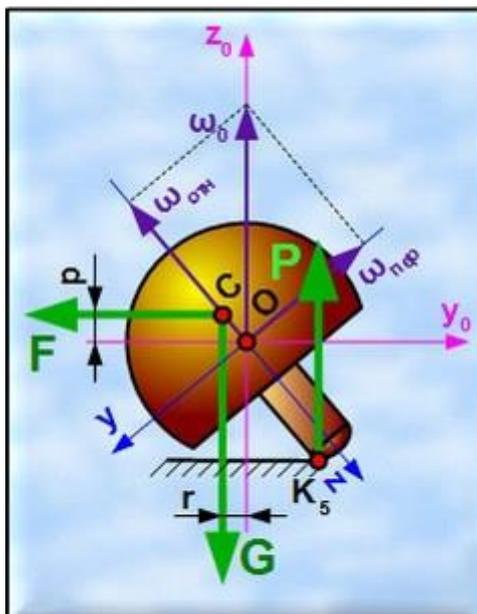


Рис.7

19. Заняв вертикальное положение ручкой вниз, китайский волчок будет находиться в устойчивом положении и продолжит вращение до момента «исчерпания» кинетического момента H_0 (рис.8).

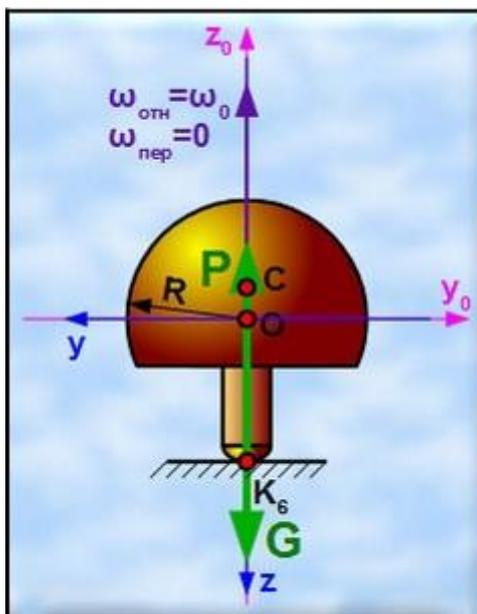


Рис. 8

20. Из-за того, что китайский волчок в отличие от классического, перекачиваясь при вращении, постоянно меняет точку опоры, конец его ручки повторяет траекторию перемещения точки опоры. В период переворота эта траектория — не конус классического волчка! Если на опорную поверхность насыпать тонкий слой муки (или пудры, или талька) и запустить волчок, то после окончания вращения на поверхности шарика можно увидеть спиралевидный след (Рис.9).

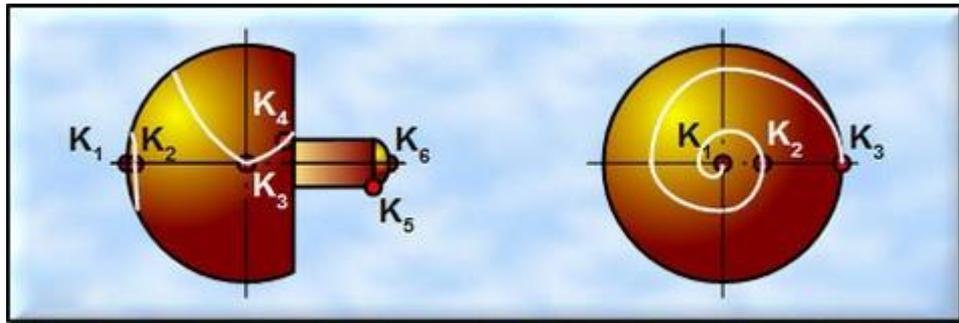


Рис. 9

Это и есть траектория перемещения точки опоры по поверхности шарика. Спиралевидный след вначале раскручивается в одну сторону (по часовой стрелке на рисунке), затем закручивается в обратную сторону.

4. Заключение

Я рассмотрел завораживающее проявление физических законов в интересном движении волчка Томсона. Оказалось с позиции физики это движение описать не так то и просто. Если сравнить волчок Томсона с обычным волчком, то можно прийти к следующим выводам

Обычный волчок после раскручивания (в любую сторону) обладает следующими тремя свойствами:

- направление вращения постоянно
- в процессе вращения точка на волчке, касающаяся плоскости, не изменяется
- расстояние от центра тяжести до точки опоры в процессе остается тем же

На первый взгляд, кажется, что эти три свойства должны наблюдаться у любого волчка (не содержащего внутри источника энергии). Однако необычная форма и неравномерное распределение массы по телу волчка может привести к иному характеру вращения —

на первый взгляд, противоречащему законам сохранения: через некоторое время после начала вращения волчок переворачивается и начинает вращаться, касаясь плоскости другой своей точкой; направление вращения изменяется на противоположное, а центр тяжести поднимается. Такие волчки называют китайский волчок или волчок Томсона.

В дальнейшем я хочу создать 3D модель данного волчка и напечатать его на 3D принтере

5. Библиографический список

Источники:

1. https://studref.com/504824/matematika_himiya_fizik/pretsessiya_nutatsiya_giroskopa -, курс лекций по физики
2. http://vmede.org/sait/?page=9&id=Medbiofizika_remizov_2012&menu=Medbiofizika_remizov_2012 - учебник / А. Н. Ремизов
3. http://meh.samgtu.ru/sites/meh.samgtu.ru/files/kinematika_tverdogo_tela.pdf - пособие по кинематике твердого тела

Литература:

4. Научно-популярный физико-математический журнал "Квант", 1971г, № 10

Рецензия на проектную работу по физике

Тема: «Загадка волчка Томсона», которую выполнил обучающаяся 9и класса Борчуков Алексей Валерьевич

Данная работа направлена на исследования явления переворота волчка Томсона, основанного на явлении прецессии. Работа имеет четкую структуру и состоит из введения, основной части, заключения, списка литературы.

Работа написана грамотным научным языком. Оформление работы в целом соответствует предъявленным требованиям.

Во введении Борчуков Алексей объяснил актуальность работы. Четко сформулировал цель, заострил внимание на постановке конкретных задач. В результате четкого изложения цели работы в изложении основной части научно-исследовательской работы присутствует логичность, четкость, последовательность. В своей работе Алексей рассматривает механику вращающегося тела и объясняет сам процесс перевода данного волчка. Он разобрался с явлением прецессии. Кратко сформулировала основные выводы и поставлены задачи на продолжение работы.

В целом работа заслуживает положительной оценки. Данную работу можно рекомендовать к участию конкурса.

Рецензент: Щипалкин Денис Валерьевич

Директор



И.Э. Авдонина

