

## Физика 9–11

Публикуемая ниже заметка «Почему кувырывается книга?» предназначена девятиклассникам, заметка «Еще раз о магнитной силе» – десятиклассникам и «Пределы зоркости приборов» – одиннадцатиклассникам.

# Почему кувырывается книга?

В. ЛАНГЕ

ДЛЯ НАЧАЛА ПРЕДЛАГАЕМ ВАМ провести такой нехитрый опыт. Возьмите в руки книгу, обвязав ее шнурком, чтобы не раскрывалась при движении, или прямоугольную картонную коробку. Если вы подбросите книгу (или коробку), сообщив ей одновременно вращательное движение вокруг короткого или длинного ребра, то во время подъема и падения ось вращения будет оставаться параллельной первоначальному направлению. Однако все попытки сохранить ось вращения неизменной у книги, подброшенной с вращением вокруг среднего ребра, окажутся тщетными – в этом случае книга во время движения будет беспорядочно кувыркаться.

Этот опыт всегда удается и неизменно вызывает интерес у зрителей. Можно даже поспорить со зрителями, что никому не удастся бросить книгу без кувыркания, и объявить приз (который так и останется невостребованным). А вот если вас заинтересует объяснение такого поведения книги, вам придется проявить терпение и внимание, знакомясь со следующим далее текстом.

Назовем оси вращения, сохраняющие в отсутствие внешних сил свое направление в пространстве, *свободными*. Возможность их существования вытекает из несложных, но несколько громоздких рассуждений. Пусть два точечных тела с массами  $m_1$  и  $m_2$  находятся на концах весьма легкого (чтобы не учитывать его массу) стержня, скрепленного в точке  $O$  с осью, способной вращаться в подшипниках  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  (см. рисунок). При вращении системы с угловой скоростью  $\omega$ , с точки зрения наблюдателя во вращающейся системе координат, на концы стержня будут действовать *центро-*

*бежные силы инерции*, равные

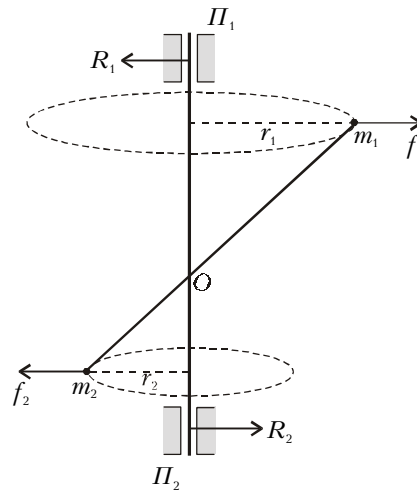
$$f_1 = m_1 \omega^2 r_1 \text{ и } f_2 = m_2 \omega^2 r_2.$$

Эти силы стремятся, во-первых, повернуть ось вращения в направлении, указанном стрелками, и, во-вторых, переместить систему в сторону большей по модулю силы. Разумеется, этому препятствуют подшипники, действующие на ось с силами  $\vec{R}_1$  и  $\vec{R}_2$ , уравновешивающими силы  $\vec{f}_1$  и  $\vec{f}_2$ .

Однако ось вращения не будет менять своего направления и без подшипников, если алгебраическая сумма моментов сил  $\vec{f}_1$  и  $\vec{f}_2$  относительно точки  $O$  окажется равной нулю и при этом будет равна нулю алгебраическая сумма самих этих сил. Первое условие реализуется, когда ось вращения перпендикулярна оси стержня, так как в этом случае плечи обеих сил относительно точки  $O$  равны нулю. Второе условие выполняется, если

$$m_1 \omega^2 r_1 = m_2 \omega^2 r_2, \text{ или } m_1 / m_2 = r_2 / r_1.$$

Стало быть, любая ось, проходящая



через центр масс системы двух точечных тел перпендикулярно соединяющему их невесомому стержню, окажется свободной.

Рассмотрим далее систему из шести масс  $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5$  и  $m_6$ , укрепленных на концах трех чрезвычайно легких стержней, которые пересекаются попарно под прямыми углами в такой точке  $O$ , что расстояния тел от нее удовлетворяют условиям

$$m_1 r_1 = m_2 r_2, \quad m_3 r_3 = m_4 r_4, \quad m_5 r_5 = m_6 r_6,$$

т.е. центр масс системы совпадает с точкой  $O$ . При вращении вокруг любого стержня алгебраическая сумма центростремительных сил инерции и их моментов будут равны нулю, так что эти оси являются свободными. А вот любая другая ось уже не будет свободной.

Можно показать, что в каждом теле существует *только три* взаимно перпендикулярные свободные оси, проходящие через центр масс тела. Их называют *главными осями инерции*. У однородного прямоугольного параллелепипеда (как наша книга или коробка) они проходят через центры противоположных граней.

Если тело приведено во вращение вокруг одной из главных осей и внешние воздействия отсутствуют, то направление оси вращения в пространстве должно оставаться неизменным. Однако закрутить тело абсолютно точно вокруг главной оси практически невозможно, к тому же неизбежные случайные толчки сразу же нарушают это движение. Поэтому длительное вращение вокруг свободной оси можно наблюдать только в том случае, когда при небольших отклонениях от этого движения появляются силы, возвращающие тело к вращению вокруг главной оси.

В отсутствие внешних сил устойчивым оказывается вращение лишь вокруг осей, которым соответствуют наибольшее или наименьшее значения момента инерции. Главная же ось, соответствующая промежуточному моменту инерции, является неустойчивой, поскольку при любом случайном отклонении от заданного вращения возникают силы, увеличивающие это отклонение. Именно это явление и наблюдается в опытах с кувыркающей книгой.

Если вращение не абсолютно свободно (существуют силы трения или оказывает влияние сила тяжести), то устойчивой обычно оказывается одна главная ось, которой соответствует наибольший момент инерции. Это мож-

но продемонстрировать, например, с помощью палочки, подвешенной на нити к оси центробежной машины: при постепенном увеличении скорости вращения наступает момент, когда палочка поднимается, переходя из вертикального положения (которому соответствует наименьший момент инерции) практически в горизонтальную

плоскость (т.е. вращается вокруг главной оси с наибольшим моментом инерции).

«Предпочтение», оказываемое вращающимся телом свободным осям с наибольшим моментом инерции, используется в технике. Чтобы нагрузки на подшипники были минимальными, нужно, как мы видели, возможно точ-

нее совместить ось вращения со свободной осью тела. Однако абсолютно точно сделать это нельзя. Поэтому в машинах с большой частотой вращения применяются гибкие, или самоцентрирующиеся, валы. В нормальном режиме они изгибаются так, чтобы вращение происходило как раз вокруг свободной оси.