

«Парадокс» кресла Жуковского

или

Куда исчезают четыре Джоуля?

А. В. Аржанников

Мы продолжаем публикации в рубрике «Это может быть интересно» на сайте предприятия НПП ЭнергоЭлектроника. Эта рубрика рассчитана на определенный круг читателей, на тех, кто может себе позволить хотя бы не надолго выйти из замкнутого круга повседневных забот и открыть для себя дверь в новый, совершенно другой мир...

* * *

Всем, кто в детстве не только носился по дворам и закоулкам, но еще и прилежно постигал азы знаний, со школьной скамьи знакомо такое удивительно простое изобретение как «скамья Жуковского».

Также встречается название: «стул Жуковского», реже встречается название: «кресло Жуковского». Но поскольку демонстрация этого изобретения довольно просто получается с помощью обычного офисного кресла, здесь мы будем использовать именно последнее название.

Наш замечательный ученый, профессор Н.Е. Жуковский предложил наглядные демонстрации **закона сохранения момента импульса**, которые вошли в физику, как «опыты на скамье Жуковского» [1]. Схемы опытов и иллюстрации здесь не приводятся, все это можно найти в интернете в самых разнообразных видах — от схем до видеороликов.

Один из этих опытов мы и рассмотрим.

Любитель различного рода опытов и экспериментов, обладающий крепким вестибулярным аппаратом (*это обязательное требование, если есть сомнения, лучше приготовить ведро...*) садится в офисное кресло, берет в руки гантели и разводит руки в стороны. Другой любитель опытов, его помощник, приводит его во вращение (осуществляет внешнее воздействие), т.е. сообщает ему некоторый момент импульса $L = I_1 * \omega_1$.

Напоминаем, момент импульса тела L — это произведение момента инерции тела I на угловую скорость ω : $L = I * \omega$.

Сидящий вращается в кресле практически равномерно (предполагается, что кресло высококачественное, силы трения пренебрежимо малы).

Затем сидящий сводит руки на груди. Поскольку сближение гантелей приводит к уменьшению момента инерции (обозначим его I_2), угловая скорость увеличивается (обозначим ее ω_2). Так как внешних воздействий нет (кроме сил трения, которыми мы пренебрегаем), имеем наглядную демонстрацию закона сохранения момента импульса:

$$I_1 \cdot \omega_1 = I_2 \cdot \omega_2 \quad (1)$$

Если сидящий в кресле опять разводит руки в стороны, угловая скорость вновь уменьшается, если сводит руки — вновь увеличивается. Этим приемом широко пользуются фигуристы, гимнасты, артисты балета и др.

Кто внимательно изучал физику, знают еще и такую формулу:

$$E_k = \frac{I \cdot \omega^2}{2} \quad (2)$$

Это формула кинетической энергии вращающегося тела. Когда сидящий разводит руки в стороны, кинетическая энергия будет равна:

$$E_{k1} = \frac{I_1 \cdot \omega_1^2}{2} \quad (3)$$

Когда сидящий сводит руки на груди, кинетическая энергия будет равна:

$$E_{k2} = \frac{I_2 \cdot \omega_2^2}{2} \quad (4)$$

Поскольку “связи с внешним миром” нет (нет внешних воздействий, кроме сил трения, которыми мы пренебрегаем), ожидается что E_{k1} должна быть равна E_{k2} .

Попробуем провести реальный эксперимент и подставить в формулы более менее адекватные значения. Приведем во вращение сидящего и определим угловую скорость ω_1 .

Для определения угловой скорости нужно взять секундомер и засечь время полного оборота сидящего. Один оборот — это поворот на угол “два пи” радиан. Если оборот совершается за 6,28 с., значит угловая скорость равна 1 рад/с, соответственно, если оборот совершается за 3,14 с., то $\omega_1=2$ рад/с. Эту скорость и примем для расчетов (быстрее раскручивать сидящего не рекомендуется, см. выше про *ведерко*).

Положим, что угловая скорость, когда сидящий сводит руки на груди, увеличивается в два раза (вполне реальное соотношение), т.е. получается $\omega_2=4$ рад/с.

Сделать точный расчет момента инерции вообще говоря не представляет серьезных затруднений, однако это выходит за рамки публикации. Чтобы не загромождать работу, ограничимся приближенным расчетом. Для этого “аппроксимируем” систему тел (тело сидящего + кресло + гантели) сплошным цилиндром массой m и радиусом r , момент инерции которого есть его масса m , умноженная на квадрат его радиуса r пополам [2]. Причем рассчитаем момент инерции, когда сидящий сводит руки на груди, т.е. I_2 (в этом случае масса оказывается более сосредоточенной, “аппроксимация” в этом случае более точна).

Примем $m=50$ кг, $r=0,2$ м, тогда:

$$I_2=50 \cdot 0,2^2/2=1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Это довольно грубый расчет, но в нашем случае будет вполне достаточно.

Теперь нетрудно найти момент инерции, когда сидящий разводит руки в стороны, из формулы (1) следует:

$$I_1 = I_2 * w_2 / w_1 = 1 * 4 / 2 = 2 \text{ кг*м}^2.$$

Проверяем расчет по формуле (1):

$$2 \text{ кг*м}^2 * 2 \text{ рад/с} = 1 \text{ кг*м}^2 * 4 \text{ рад/с}$$

Все верно, так работает **закон сохранения момента импульса**. Далее определим кинетическую энергию, когда сидящий разводит руки в стороны, по формуле (3):

$$E_{k1} = 2 * 2^2 / 2 = 4 \text{ Дж.}$$

И, наконец, определим кинетическую энергию по формуле (4), когда сидящий сводит руки на груди:

$$E_{k2} = 1 * 4^2 / 2 = 8 \text{ Дж.}$$

Значение E_{k2} оказывается *отличным* от значения E_{k1} ! Если сидящий в кресле Жуковского вновь разведет руки в стороны, кинетическая энергия уменьшится на 4 Дж !

Те, кто обладает проницательным умом, и без подстановки данных могут вполне увидеть, что кинетические энергии в том и другом случае будут отличаться (анализируя формулы 1, 3 и 4). Тем не менее здесь приведен практический расчет, явно указывающий на своеобразный “парадокс” кресла Жуковского:

«При отсутствии внешних воздействий изменяется кинетическая энергия вращающегося тела».

Отличительной особенностью указанного “парадокса” явилось то, что его объяснение оказалось весьма затруднительным довольно продолжительное время – ни автору, ни коллегам (даже кто имел ученую степень) не удавалось объяснить его.

Тем не менее все оказалось довольно просто и “парадокс” оказался легко объяснимым в рамках обычного курса физики (собственно почему это слово и заключается в работе в кавычки).

Объяснение “парадокса” по объему вполне сопоставимо с объемом настоящей работы, поэтому планируется в отдельной (следующей) публикации, если конечно найдутся те, кому это будет интересно и если это вообще потребуется. Возможно, обладающие тонким аналитическим мышлением сразу дадут объяснение “парадокса”, как известно, значительная часть ответа содержится в корректно поставленном вопросе (даже если и не совсем корректно — всегда можно подправить)...

12.06.2025 г. **День России.**

г. Екатеринбург

Е-mail: energyel@mail.ru

Лит:

1. Вопросы современной физики. В.В. Стручков, Б.М. Яворский, Москва “Просвещение”, 1973 г., 496 с.
2. Курс физики. Н.Н. Евграфова, В.Л. Каган, Москва, “Высшая школа”, 1984 г., 478 с.