

БЕГУЩАЯ ЦЕПОЧКА

(Экспериментальный этюд от Театра Занимательной Науки)

Я познакомился с ней в Брянском Доме Занимательной Науки, будучи ещё школьником, и она меня очаровала. Спустя 37 лет в роли Ведущего, я рассказываю об этом чуде свою историю.



– У физиков СВОИ игрушки. Желаете убедиться? Тогда присоединяйтесь!

Под песенку «...До чего же хочется, братцы,
На живом жирафе покататься!
Время проведем вполне приятно мы,
Будем вместе петь и танцевать...»¹

в руках Ведущего оживает фигурка игрушечного жирафа: забавно шевелит ножками, кланяется, кивает головой, дрыгается в танце. Нетрудно догадаться, что ноги и шея, состоящие из разноцветных подвижных элементов, «расслабляются» и «напрягаются» по воле демонстратора. При нажатии на кнопку в подставке, натяжение лески, проходящей через связанные элементы, ослабляется, и игрушка кланяется; при отпуске кнопки – натяжение восстанавливается.

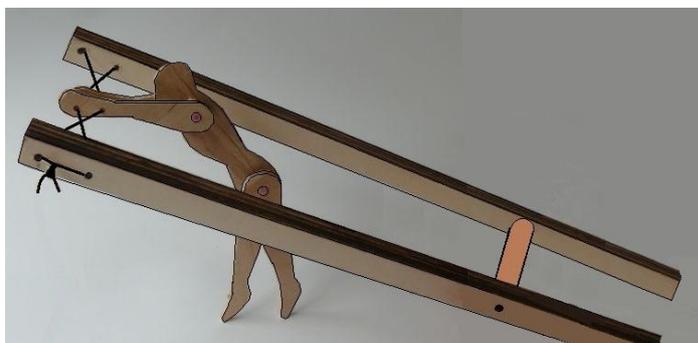
Неожиданный вопрос «Что общего между этой игрушкой и Останкинской башней?» напоминает зрителям, что они находятся на научно-познавательном представлении.

Зрители вспоминают о прочности конструкции башни, которая обеспечивается стальными тросами, натянутыми внутри её корпуса.

– А вот «Гимнаст на турнике», – представляет Ведущий, знакомую многим самоделку.

Обхватив рукой стойки снизу, он располагает их вертикально. Фигурка спортсмена занимает исходное положение в вися на двух скрещенных нитях. Но стоит Ведущему слегка сжать концы стоек и тут же ослабить давление, как гимнаст переворачивается. Всё дело в стремлении перекрученных нитей при натяжении раскручиваться. При этом гимнаст приобретает начальную скорость, а завершает движение уже по инерции. Скрепленные шарнирами части тела, оживляют его перевороты из стороны в сторону. Второй подход к спортивному снаряду в подобном упражнении (для тех, кто не оценил) проделывает ещё один крепыш². Напряжение нитей вновь творит спортивные чудеса.

Ведущий несколько раз пытается поставить по стойке смирно на свою ладонь отрезок металлической цепочки, но та, всякий раз расслабленно падает вниз.



¹ Юрий Чичков «Песенка про жирафа».

² С цельной фигурой из термопластика.

– Вот бы её как-нибудь натячь, – высказывает он своё желание. – Тривиальное натяжение в струнку за концы не предлагать...

И такое решение находится. Вот она, самонапряжённая конструкция: цепочка, растянутая деформированными упругими пластинами, и стоящая одним концом «на ладони».

– А можно ли отказаться от вспомогательных пластин?

– Ещё не время. Сначала соревнование...

В руках у каждого участника по пластиковому сосуду³ с парой металлических шариков внутри.

– Кто быстрее закатит их под крышки?

Справиться с одним несложно. Но при попытке разместить под противоположной крышкой другой шарик, первый покидает своё место. Шарик непослушен! Но, в конце концов, звучит «Эврика!» Присутствующие догадываются, что устройство надо крутануть вокруг вертикальной оси. Они продельывают это на полу, и шарик послушно занимает своё место под крышкой. Головоломка вызывает оживление, кое-кто собирается изготовить её у себя дома. И это здорово, от камня, брошенного в воду, должны расходиться круги.

– Но что принуждает шарик к «послушанию»?

– Центробежная сила!

Хоть реально и не существует⁴, но дело своё знает.

На сцену приглашаются два зрителя, примерно одинакового веса. По команде Ведущего они, скрестив руки, сцепляются кистями, и немного отклонив тела назад, начинают кружиться на одном месте. Всё быстрее и быстрее...

– Достаточно! – обеспокоен Ведущий, – а то руки растянутся.

В каждой шутке, лишь доля шутки. Почему бы не использовать центробежный эффект для натяжения цепочки. При этом каждое звено будет тянуть в стороны соседние звенья. Конец цепочки соединяется с началом, к ней привязывается верёвочка, на которой и раскручивается «лассо»...

Если несильно ударить палочкой сбоку по вращающемуся кольцу, то видно, что



³ Головоломка склеена из обрезанных пластиковых бутылок.

⁴ Центробежная сила – это псевдо сила, действующая на тела в системах, движущихся с ускорением. Сила – это всегда результат ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ двух тел. Вспомните III закон Ньютона и попытайтесь найти силу «противодействия», о которой говорится в нём. Тщетно! Ни тел, с которыми взаимодействуют шарик, ни сил противодействия.

оно проявляет свои упругие свойства и сохраняет форму.

Наигравшись, участники задаются вопросом «Что произойдёт, если раскрутить лассо ещё сильнее, а затем обрезать верёвочный поводок?»

– Если кольцо поставить на пол, то оно может и укатиться, – следует предположение с ноткой сомнения.

– Только если натяжение будет очень большим, – овладевает идея массами.

– Давайте предположим, от чего и как зависит натяжение вращающейся цепочки! – приглашает Ведущий к мозговому штурму и подходит к белому листу.

– Зависит ли натяжение цепочки от её цвета? – следует от него пример-провокация.

«Природа не терпит пустоты», а бумага белизны. Маркер в руке Ведущего размашисто оставляет след, фиксируя кажущиеся очевидности...

• Чем больше частота вращения (n)⁵, тем больше натяжение ($F \sim n$).

– Все видели, как чуть не распалась крутящаяся зрительская пара!

• Чем меньше радиус (R)⁶ окружности лассо, тем больше натяжение. ($F \sim 1/R$).

– Аналогия с машиной: чем круче поворот (и меньше его радиус), тем сильнее на нём заносит!

• Чем массивнее цепочка (M), тем меньше натяжение ($F \sim 1/M$).

– Инертные тела такие ленивые на раскрутку!

Из сказанного получается, что: $F \sim n/(RM)$.

– Не согласны? У Вас своё виденье? Так исправляйте и дополняйте! Всё сказанное, будь то глупость, очевидность или гениальная догадка, будет сначала превращено в гипотезу, а затем проверено. Такова классика научного жанра. Учёные считают, что «отрицательный результат тоже результат», потому что он приближает искателей к истине.

После этих призывов появляется ещё одна запись:

• На натяжение как-то влияет размер звеньев цепи...⁷

Кто-то скажет «Предположения, да и только». Но от них до истины – несколько шажков. Аудитория располагает, поэтому Ведущий приступает к сложной и сомнительной аналитической части. Собеседники могут «выпасть в осадок», ведь не секрет, что многие школьники не любят формул и не понимают, насколько они необходимы. Но есть вызов и соблазн показать, что с помощью формул можно объяснять (и предсказывать) чудеса окружающего мира. Вдруг, после этого, возникнет желание с ними подружиться. А может быть, это проявление учительской привычки «не брать факты с потолка».

– Представляю вам метод размерностей физических величин! – берётся за дело Ведущий.

Суть метода в том, что искомая закономерность представляется в виде произведения степенных функций физических величин, от которых она предположительно зависит.

Так для вращающейся цепочки: $F = kn^a R^b M^c$, где k – коэффициент пропорциональности, а a , b , c – степени функций. Та же зависимость на языке размерностей имеет вид:

$$[F] = [n]^a [R]^b [M]^c.$$

Цвету цепочки в ней нет места. В левой части – сила, она измеряется в Ньютонах⁸ ($\text{кг} \times \text{м}/\text{с}^2$).

⁵ По-другому говоря, больше скорость (линейная и угловая) или меньше период обращения.

⁶ Или её длина.

⁷ И их количество, что возвращает нас к её длине или массе.

⁸ Один Ньютон – это сила, которая действуя на тело массой 1 кг, придаёт ему скорость 1 м/с за 1 с в направлении действия силы.

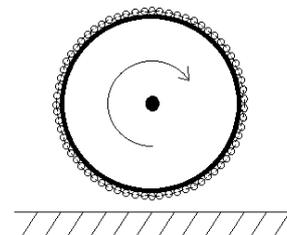
Остаётся только подставить остальные размерности, и определить показатели степеней, при которых обе части равенства придут в соответствие друг другу...

Комбинаторика, да и только⁹. В умелых руках грани виртуального кубика Рубика поворачиваются и размерности правой части складываются в формулу. Составленная по науке, она требует возвращения к сделанным ранее предположениям и их коррекции...

Стараниями присутствующих истина проявилась, но лишь в общих чертах. Значение коэффициента пропорциональности осталось неизвестным.

Ведущий вспоминает анекдот о том, что завещание истинного учителя физики начинается со слова «Дано», после чего предлагает задачу:

На деревянный диск, раскручиваемый электродвигателем, плотно¹⁰ надета замкнутая металлическая цепочка длиной L и массой M . Когда частота вращения диска достигает n , цепочка соскакивает с диска на пол и отправляется в путешествие. Необходимо определить силу натяжения F цепочки в этот момент.

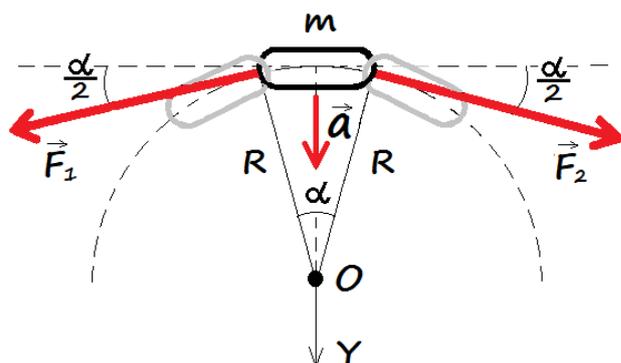


Дано: L, M, n .

Найти: F .

Решение: Каждое звено цепочки движется по окружности и имеет центростремительное ускорение (a), которое создаётся силами, действующими со стороны соседних

элементов ($F_1 = F_2 = F$). Пусть звено занимает дугу окружности радиуса R с центральным углом α и имеет массу m (см. рис.).



Тогда в проекции на ось OY второй закон Ньютона будет иметь вид:

$$2F \sin(\alpha/2) = ma \quad (1).$$

При малых углах:

$$\sin(\alpha/2) \approx \alpha/2 \quad (2).$$

Центростремительное ускорение звена представимо через линейную скорость (V) движения по окружности, период обращения (T) и частоту:

$$a = V^2/R = (2\pi R/T)^2/R = 4\pi^2 n^2 R \quad (3),$$

И ещё одно полезное соотношение, вытекающее из геометрических соображений:

$$2\pi/\alpha = M/m \quad (4).$$

Искомая сила натяжения является решением системы уравнений (1)-(4):

$$F = n^2 2\pi R M.$$

Это подтверждает результат, полученный ранее с помощью метода размерностей. В качестве бонуса за усердие – коэффициент пропорциональности. $K = 2\pi$. В сухом остатке с учётом формулы длины окружности:

$$F = n^2 L M.$$

Это закон!

– Appetitная задача, – сдувая меловую пыль с рук, подытоживает Ведущий.

⁹ $a = 2, b = 1, c = 1$.

¹⁰ Раскрутка цепочки происходит за счёт силы трения покоя.

Не все разделяют его восторг, а он в задумчивости сначала откусывает от кусочка мела половину, а затем съедает и всю оставшуюся часть. Опешившие зрители соглашаются с заявлением Ведущего, а тот умалчивает о розыгрыше¹¹ и предварительно вырезанной из сладкой пастилы меловой копии.

Приходит время решающего эксперимента. Демонстрационная установка стоит на полу. Для разгона диска используется электродрель¹² с плавной регулировкой частоты вращения.

Заручившись помощью закона, участники действия готовы стать повелителями вращающихся цепочек. Они берут один экземпляр¹³ и измеряют его параметры. Масса – 0,1кг. Длина – 0,8м. Предполагаемая частота обращения диска – около 50 оборотов в секунду. Расчёт силы натяжения цепочки в кольце даёт величину в 200Н. Это много больше силы тяжести (1Н), стремящейся изменить его форму. А значит, упругому кольцу быть!

«Когда физики начинают играть – люди эвакуируются». Задумаемся о технике безопасности... Не порвётся ли кольцо?..

Проверено: цепочка обладает достаточным пределом прочности, ведь выдерживает подвешенную к ней двухпудовую гирию (320Н).

Если всё же предположить наличие слабого звена, то после разрыва цепочка полетит в плоскости своего вращения (со скоростью около 40м/с), и будет иметь кинетическую энергию, сравнимую с энергией пули травматического оружия. Именно поэтому Ведущий строит шеренгу наблюдателей в стороне от этой опасной плоскости.

Чтобы кольцо при раскрутке не соскальзывало самопроизвольно, используется достаточно широкий¹⁴ диск. Чтобы спихнуть с него цепочку, придётся постараться. Зато никаких неожиданностей.

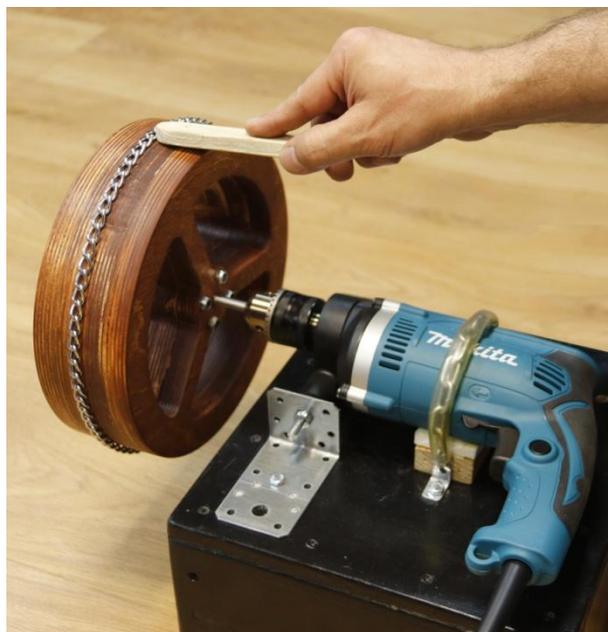
– Тройная защита предусмотрена, можно приступать.

Ведущий нажимает на курок электродрели, двигатель начинает свою песню (и работу), всё быстрее раскручивается диск. И вот уже цепочка превращается в блестящее кольцо, завывания достигают предела. Ведущий аккуратно сталкивает цепочку с вращающегося диска¹⁵: постепенно, слегка ударяя по ней деревянной дощечкой.

Кольцо падает на пол... Оно предсказуемо сохраняет свою скорость и форму! Не стоит на месте, а движется по гладкому полу с заметным проскальзыванием. Упругим кольцом цепочка триумфально прокатывается мимо зрителей, вызывая у них восторг и восхищение. Если бы не трение, убежала бы совсем. Но скорость падает, натяжение уменьшается и к концу своего пути¹⁶ кольцо превращается в горстку обессилевших звеньев.

Звучат заслуженные аплодисменты.

На пути бегущего кольца установ-



¹¹ «Хоть шуткой, хоть смехом, да было бы дело с успехом».

¹² Мощность инструмента – 700Вт, максимальная частота обращения – 3200об/мин.

¹³ В эксперименте используется плоская стальная цепочка со звеньями длиной не более 10мм.

¹⁴ 8-10см.

¹⁵ Прилагаемая к описанию фотография – постановочная, на ней диск находится в покое, а вторая рука не лежит на ручке электродрели.

¹⁶ Кольцо из цепочки пробегает 10-15м.

ливается небольшой трамплин¹⁷. С него цепочка совершает прыжок и, как ни в чём не бывало, катится дальше.

Трамплин заменяется деревянным ящиком¹⁸.

– Каким будет результат столкновения, догадайтесь сами...

Но Ведущий задумался не об этом. Он вспомнил своё первое знакомство с «Бегущей цепочкой». Кто знает, быть может, действие от ТЗН продолжит эстафету, и кто-то другой расскажет свою оригинальную историю.

30.05.18

¹⁷ Наклонная плоскость из листа фанеры.

¹⁸ Высотой 10-20см.