

ИГРУШКИ ФАРАДЕЯ

Два жука как-то раз пролетали внутри катушки с постоянным током. Один из них был молодой жук, а другой имел протезный дюралюминиевый панцирь. Только ли из-за старости второй жук вылетел из катушки намного позже своего резвого товарища?¹

На сцене Театра занимательной науки Лаборант напоминает Профессору девиз их работы и предлагает сделать акцент на его первом слове.

– Начинаем «ИГРАТЬ! Действовать! Думать!» – соглашается Профессор, – принесите «Игрушки Фарадея»!

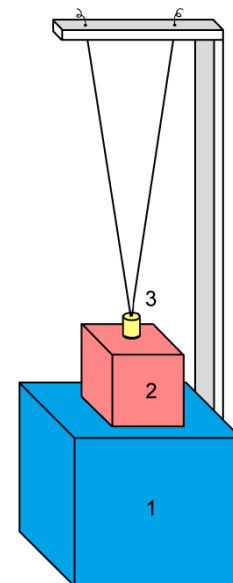
– А Фарадей не будет против? – беспокоится наивный Лаборант.

– Я с ним договорился, – настраивает Профессор своих собеседников на шутливый тон и критичность мышления.

Лаборант выносит загадочное устройство.

– То, в какие игрушки играет в детстве ребёнок, влияет на его будущее... У английского физика Майкла Фарадея были очень своеобразные игрушки. Одна из них – перед вами на демонстрационном столе...

По сути, это конструкция из трёх «чёрных ящиков»², расположенных друг на друге. В основании – большой синий короб-подставка (1) с «Г»-образной стойкой³ на ней. В центре – небольшой⁴ красный кубик (2). Над ним – маятник – маленький жёлтый цилиндр (3) на двойном подвесе, позволяющем ему сохранять плоскость колебаний. Между грузом маятника и кубиком – минимально возможный воздушный зазор⁵.



– И не спрашивайте, почему наши «чёрные ящики» ящики разноцветны. «Чёрные» – по определению те, которые нельзя открывать, даже если очень хочется узнать, что внутри. С ними можно только взаимодействовать, анализируя входные и выходные данные, а заглядывать внутрь только силой мысли.

Профессор запускает маятник и тот долго качается над кубиком. Ничего необычного. Тогда Профессор надевает на правую руку красную перчатку, демонстративно переворачивает красный кубик на угол $\pi/2$ (в радианах звучит загадочнее) и повторяет эксперимент. Маятник делает два неполных колебания и останавливается.

– Не может быть!

Повтор лишь подтверждает результат.

Игра начинается! Зрители задают Профессору любые вопросы, а он правдиво, но односложно («да»/«нет») отвечает. Лаборант отсчитывает десять вопросов. Смогут ли зрители таким образом выяснить причину наблюдаемого парадокса?

– Что спрятано в подставке?

– Да! (Каков вопрос, таков ответ). ☺

– Есть ли что-нибудь внутри синего короба?

– Да! (Честный Профессор имеет в виду воздух).

¹ Из книги А.П. Усольцев. «Задачи по физике на основе литературных сюжетов. Для толковых детей и сообразительных взрослых. 7-11 классы». Екатеринбург, У-Фактория, 2003.

² Термин, употребляемый главным образом в системотехнике для обозначения систем, структура и внутренние процессы которых неизвестны.

³ Из алюминия, высотой 80см.

⁴ С ребром 10см.

⁵ Он заранее отрегулирован за счёт длины подвеса и составляет не более 5мм.

– Влияет ли его содержимое на колебания? (Постепенно вопросы обретают корректность и общность).

– Нет!

– А кубик – это кубик? ☺

– Да, по определению!

– Изменился ли воздушный зазор между маятником (в нижнем положении) и кубиком после его переворота?

– Нет.

– Одинакова ли шершавость сторон кубика?

– Да!

– Цилиндр – железный, а с одной стороны красного кубика – магнит?

– Нет!

– Первоначально маятники были отклонены на разные углы?

– Нет! Примерно одинаковые.

– А можно вернуть кубик в исходное положение и повторить опыт?

– Да. Смотрите!

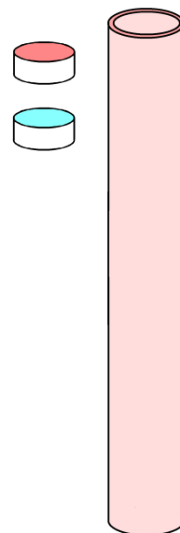
– А без перчатки на руке получится?

– Да!

– Может быть, причина в человеческом факторе? – заходит следствие в тупик.

– Не может! Если Профессора заменить роботом, то фактор станет «негуманоидным», а результат не изменится. ☺

Не доводя игры до нахождения объяснения (следствие зашло в тупик), Профессор предлагает познакомиться с более простыми «Игрушками Фарадея», а к маятнику вернуться позже. И вот уже все рассматривают металлическую трубу⁶. Судя по цвету, медную. Зрители заглядывают внутрь и убеждаются, что стенки у неё ровные и гладкие. В дополнение к трубе идут две разноцветные «таблетки» – металлические диски одинаковых масс и размеров⁷. Их диаметр чуть меньше диаметра отверстия трубы.



Лаборант переводит трубу в вертикальное положение, зритель-помощник располагает под ней, сложенные «лодочкой» ладони, а Профессор подносит к верхнему отверстию синюю таблетку.

– Интересно, как долго груз будет падать внутри вертикально расположенной трубы, не цепляясь за стенки?

Зрители подсказывают, что пройденный путь прямо пропорционален квадрату времени $S = \frac{gt^2}{2}$, и поэтому свободный полёт займёт не

более секунды ($t = \sqrt{\frac{2S}{g}}$; $t \approx 0,5\text{с}$).

– На старт!.. Внимание!.. Марш!.. И таблетка ныряет в колодец трубы.

Лишь глазом моргнуть успели⁸, а груз уже в ладонях помощника.

Затем в трубу отправляется красная таблетка...

Результат её путешествия поражает – путь занимает двенадцать секунд (!).

Эксперимент повторяется, через верхнее отверстие зритель заглядывает внутрь – диск тонет, медленно покачиваясь!

– Машина времени какая-то.

– Может там «кусочек Луны» – пространство с пониженной гравитацией, – фантазирует Лаборант.

– Страшный сон Ньютона! – соглашается Профессор.

⁶ Длиной 1м, с внутренним диаметром 32мм и толщиной стенок 2-3мм.

⁷ Диаметр – 30мм, высота – 10мм.

⁸ Средняя продолжительность моргания глаза человека – от 0,1 до 0,4с.

– А если трубу потрясти?..

Время движения почти не меняется. Мы в тупике.

– Есть ключ к разгадке! – поднимает Профессор над головой, вырезанный из жести дидактический артефакт.

«Ключ» прикладывают к трубе, и вновь роняют в неё таблетку. Через некоторое время, выпущенный из рук ключ, виснет на трубе, как приклеенный.

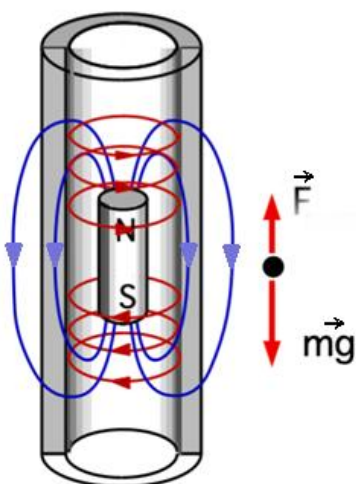
– Потому что... красная таблетка – это магнит⁹, – догадываются все присутствующие.

Казалось бы, решение найдено – падение магнита тормозится металлической трубой, но есть одно существенное «НО»... Медь, из которой она сделана, не является магнитным материалом и не притягивается к магниту¹⁰.

– Смотрите, кто не знал! Магнит на ладони не реагирует на поднесённую к ней трубу.

– И как же объяснить это парадокс? – с надеждой смотрят зрители на Профессора.

– Обратимся к Фарадею, – направляет он к первоисточнику, – который в своё время (1831г) доигрался до того, что открыл явление и закон электромагнитной индукции имени себя¹¹.



В нашем случае закон проявляется следующим образом: постоянный магнит, движущийся рядом с проводящим материалом (медью), заставляет электроны проводимости двигаться внутри металла и создаёт (индуцирует) в нём электрические токи. Но электрические токи сами создают магнитные поля.

В случае падения магнита через вертикальную медную трубку эти индуцированные токи в трубке имеют круговую форму и создают магнитное поле вдоль оси трубки. Индуцированное магнитное поле взаимодействует с магнитным полем самого магнита¹². Благодаря этому формируется тормозящая сила, которое препятствует движению магнита по проводящей трубке.

По мере того, как магнит падает и набирает скорость, магнитное поле в трубке увеличивается. Тормозящая сила увеличивается до тех пор, пока не сравняется с силой тяжести, действующей на падающий магнит. Эта ситуация аналогична воздействию воздуха на падающий объект: сопротивление воздуха увеличивается вместе со скоростью, пока не сравняется с силой тяжести.

– От чего же зависит время движения магнита в трубе? – интересуются зрители, – и можно ли его как-то изменить?

– У нас имеется серебряная труба и сверхсильный магнит, но демонстрацию с ними мы не проводим, – сочиняет Лаборант. – Как вы думаете, почему?

– Чтобы сберечь ценный экспонат?

⁹ В демонстрации используется «таблетка красная» – «неодимовый» мощный постоянный магнит из сплава NdFeB и «таблетка синяя» – из немагнитного металла.

¹⁰ Медь – диамагнитное вещество.

¹¹ Явление ЭМИ состоит в следующем: при всяком изменении магнитного потока, пронизывающего замкнутый контур проводника, в проводнике возникает электродвижущая сила индукции, вызывающая появление электрического тока, который называется индукционным. Согласно закону ЭМИ величина электродвижущей силы пропорциональна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего контур проводника: $\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

¹² Уместно вспомнить правило Ленца, суть которого можно выразить словами Гоголя из «Тараса Бульбы»: «Я тебя породил, я тебя и убью!» и отмеченного в формуле закона ЭМИ знаком «-».

– Из-за того, что зрители не дожидаются завершения демонстрации и уходят, считая, что это конец представления. ☺

– А если говорить серьёзно, то удельное сопротивление трубы и возникающие в ней токи определяются её материалом, длиной и толщиной стенок, – поясняет Профессор и предлагает посмотреть видеотрегмент, в котором медная труба предварительно охлаждается жидким азотом¹³...

Только насладились красотой явления, как раздалось громкое жужжание. На сцену вылетели, соревнуясь друг с другом в фигурах высшего пилотажа, два знакомых всем жука. Хороший повод для того, чтобы разобраться с эпиграфом нашей истории и проверить понимание обсуждаемой темы...

Утомившиеся от полётов в магнитных полях жуки присели отдохнуть на старинный морской компас. Присмотрелись к нему и затеяли спор – зачем магнитную стрелку прибора поместили в медный (латунный) корпус¹⁴?

А у Лаборанта в руках тем временем появилась очередная игрушка – медная труба, внешне похожая на ту, в которую роняли таблетки. Той же длины, диаметра, толщины, но с наклеенной на неё по всей длине узкой красной полосой. Падающий в ней магнит задержался лишь на пять (!) секунд.

– Так было же двенадцать?..

Игра в «Да-Нет» помогает раскрыть тайну – за полосой скрывается вертикальный разрез стенки трубы. Действенный способ уменьшения индукционных токов!

Приходит время повторно качнуть загадочный маятник и раскрыть секрет «чёрных ящиков»...

Всё, как и прежде – поворот красного кубика волшебным образом влияет на продолжительность движения маятника. Но сейчас с нами «знание – сила»!

– Над кубиком подвешен магнит?

– Да!

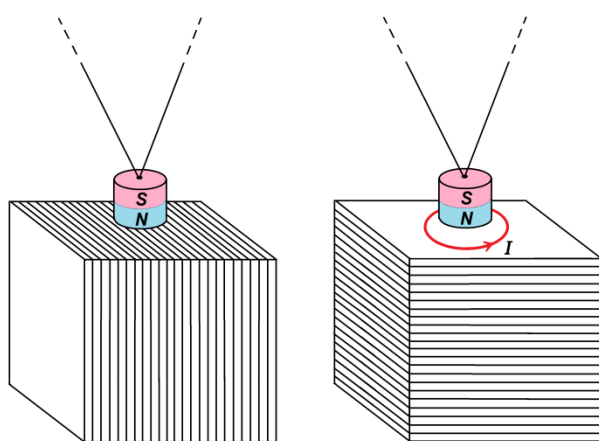
– А в кубике – проводник из немагнитного материала?

– Да!

– Там труба с разрезом?.. (Не зря же нам её показывали). Или несколько порезанных труб?.. Или...

– Думайте! Думайте! Думайте!..

– Эврика!¹⁵ – одновременно восклицают несколько человек.



Лаборант показывает всем кубик без оболочки, скрывающей его тайну. Все видят: – он состоит из множества тонких алюминиевых пластин, разделённых изоляционными прокладками¹⁶. В исходном положении проводник «порезан», и при изменениях магнитного поля индукционных токов в нём почти не возникает. Поворот кубика на девяносто градусов приводит к «сращиванию» проводника и возникновению токов в каждой из пластин.

Остаётся лишь красиво закончить историю.

Профессор показывает зрителям фигурную металлическую пластину: – В детстве я часто находил на улице подобные не-

¹³ При охлаждении сопротивление трубы значительно уменьшается...

¹⁴ Чтобы быстрее успокаивались стрелочные колебания.

¹⁵ Что значит, «нашёл».

¹⁶ В качестве изолятора – двухсторонний скотч, которым склеивались пластины. Для изготовления кубика использована не тяжёлая медь, не дорогое серебро, а лёгкий алюминий средней проводимости.

понятные штучки и думал, что их разбрасывают инопланетяне. А вы знаете, что это такое?

В зависимости от поворота «штучки», зрители видят в ней буквы: «Ш», «Е», «З», «Т».

– Это «Ш»-образная пластина – часть «сердца» трансформатора! – сообщает Профессор. – Кто-нибудь знает, как он работает?..

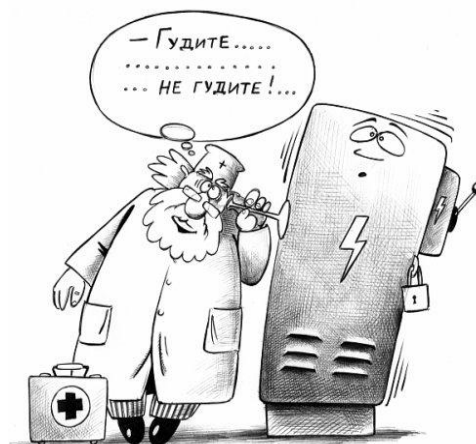
– Когда мне на экзамене задали такой вопрос, – вспомнил Лаборант, – я, получив согласие на пояснение своими словами, уверенно загудел «У-У-У-У...»¹⁷ ☺. Этого оказалось мало. Пришлось подробно объяснять и принципы работы и способ повышения КПД устройства.

Сердечник трансформатора режут на множество «Ш»-образных пластин для уменьшения вредных индукционных токов, приводящих к нагреву железа. (Это только в анекдотах сердечник бывает деревянным, да и то, не раньше сотой страницы дипломной работы, «потому что до неё всё равно никто не дочитает»).

– До пятёрки я тогда не дотянул, – признаётся Лаборант. – Не смог ответить на вопрос: «С какой звуковой частотой трансформатор гудит своё У-У-У-У, если частота подаваемого на него электрического напряжения 50Гц?».

– Занимательная история, – подытоживает Профессор. – Предлагаю нашим друзьям в ней самостоятельно разобраться и найти ответ (даже если придётся заглянуть в учебник дальше сотой страницы). Ведь это так чудесно – знать и понимать!

Продолжаем «ИГРАТЬ! Действовать! Думать!»



25.07.25

¹⁷ Так работают «плохие» трансформаторы со слабо стянутыми пластинами сердечника.