

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

НЕСКОЛЬКО ОПЫТОВ ПО ТЕМЕ «ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ»

I. ВРАЩАЮЩАЯСЯ ДВОЙНАЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ СПИРАЛЬ

Две одинаковые цилиндрические спирали, свитые из тонкой металлической трубки, вложены одна в другую так, что витки одной спирали находятся на одинаковом расстоянии одна от другой, образуя собою вертикальные спиральные рельсы (витки рельсов от *Б* до *В* на рис. 1). Шаг верхнего витка рельсов (*АВ*) больше остальных. Этот виток мы будем называть «разгоночным».

Все витки спирали прочно прикреплены к трем вертикальным стержням, которые в свою очередь соединены вверху и внизу с двумя опорными дисками. В верхнем диске имеются два симметричных отверстия, у одного из которых берет начало «разгоночный» виток двойной цилиндрической спирали.

Если опустить металлический или эбонитовый шарик, диаметр которого несколько больше расстояния между витками спирали, через отверстие, связанное с началом двойной спирали, то шарик покатится внутри спирали, обходя один виток рельсов за другим, не падая и не отрываясь от рельсов. Наблюдение за движением шарика по спирали в разных условиях опыта помогает продемонстрировать многие особенности вращательного движения материальной точки и тела.

Укажем некоторые технические и конструктивные данные прибора.

Спираль по отдельности наматываются дюралюминиевой трубкой ($\varnothing 10$ мм) на цилиндрической деревянной оправе, диаметр которой примерно 250 мм; при вложении одной спирали в другую и скрепления их со стержнями выдерживается расстояние между ними в 55 мм; при сборке двойной спирали следует несколько отодвинуть витки от стержней с целью устранения задержки катящегося шарика (на рис. 2 изображен только один стержень). Это разъединение осуществляется с помощью металлических столбиков, прочно прикрепленных заклепками как к стержням, так и к виткам спирали; прочно собранная двойная спираль устанавливается на массивной подставке, вверху и внизу которой установлены два шарикоподшипника (внизу лучше взять подшипник с подпятником). В эти подшипники входят две оси, укрепленные по центрам опорных дисков двойной спирали (рис. 1). Спираль хорошо сбалансирована.

При такой конструкции прибор свободно вращается при сообщении ему незначительного вращательного момента.

Далее, в приборе уложены один «разгоночный» и семь отвесных витков рельсов (см. рис. 1).

Общая высота прибора — 1,1 м; подставка, на которой укреплена двойная спираль, изготовлена из изогнутых водопроводных труб. Опорное кольцо подставки снабжено тремя уравнительными винтами.

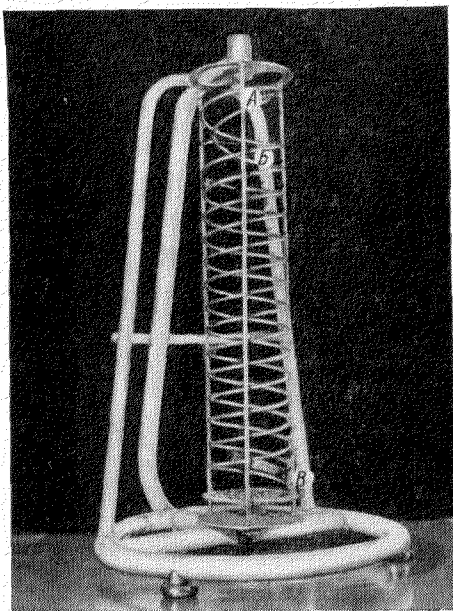


Рис. 1.

а) Демонстрация устойчивого качения шарика по отвесным виткам заторможенной спирали

Затормозив спираль или придерживая ее рукой, опустим через отверстие в верхнем диске металлический или деревянный шарик.

Вначале шарик движется по «разгоночному» витку, как по желобу, углубившись в него и поэтому не выпадая из него (рис. 2). Пройдя первый виток рельсов и развив достаточную скорость, шарик начнет двигаться по отвесным виткам рельсов, устойчиво обходя один виток за другим, хотя момент силы веса, действующий на шарик в этом положении, мог бы вызвать срыв шарика с рельсов, если последний не обладал бы достаточной скоростью (см. рис. 2).

Объяснение этому явлению следующее.

При движении шарик деформирует проволоку, что вызывает соответствующую реакцию рельсов N , действующую на шарик и направленную под некоторым углом вверх. В силу N мы включали и трение, развивающееся при движении шарика по рельсам (см. рис. 2).

Следовательно, на шарик при его движении будут действовать две силы: сила тяжести mg и реакция рельсов N .

Одна из составляющих реакций рельсов N частично компенсирует вес шарика, а другая составляющая этой силы, направленная к оси спирали, определит центростремительное ускорение шарика при его криволинейном движении. Нескомпенсированная силой реакции N составляющая силы веса, направленная по касательной к виткам спирали, вызовет качение шарика по рельсам, как по наклонной плоскости.

По мере движения шарика по виткам скорость его будет увеличиваться, что тем более обеспечит устойчивость его движения по отвесным рельсам.

Если провести этот опыт с шариком большего диаметра, то шарик скатится по спирали за меньший промежуток времени.

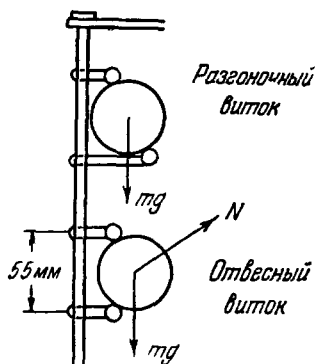


Рис. 2.

б) Демонстрация закона сохранения момента количества движения

1-й вариант. Опускаем через отверстие в верхнем диске прибора стальной шарик, не придерживая при этом рукою спираль. По мере движения шара по спирали он будет увеличивать свой момент количества движения, вызовет вращение всей спирали в обратную сторону. Очевидно, что угловая скорость вращения спирали будет много меньше угловой скорости движения шарика по спирали.

Когда шар прокатится по последнему витку и сорвется со спирали, унося с собой определенный момент количества движения, спираль будет некоторое время вращаться в обратную сторону до тех пор, пока момент количества движения спирали не будет израсходован на преодоление момента сил трения.

2-й вариант. Вновь повторяется опыт скатывания шарика по спирали и наблюдается вращение спирали в сторону, противоположную движению стального шара по спирали. Когда шарик пройдет все витки, он ударится о пружинную ловушку, установленную у конца спирали, и остановится. Остановившийся шар отдаст системе момент количества движения, приобретенный им при движении по спирали, и спираль, согласно закону сохранения момента количества движения, прекратит свое движение.

Для задержки шара у нижнего конца спирали прикрепляется (съёмная) пружинная ловушка, которая мягко задерживает катящийся шар (см. рис. 1).

в) Движение шара по спиральным рельсам при одновременном вращении всей спирали

1-й вариант. Направление движения шара по рельсам совпадает с направлением вращения всей спирали.

Опустим сквозь отверстие в верхнем диске деревянный шар и, когда он пройдет «разгоночный» виток и начнет двигаться по отвесным виткам спирали, приведем рукою во вращательное движение в направлении движения шарика всю спираль. Если спираль будет сообщена достаточная угловая скорость, то шарик перестанет двигаться по отношению к спирали. Спираль и шарик будут только вращаться как одно целое.

Рекомендуется деревянный шарик, используемый для этого варианта опыта, окрасить наполовину белой краской. В таком виде удобнее наблюдать полную оставку шарика по отношению к спирали.

Когда спираль начнет терять свою скорость, шарик начнет двигаться по спиральным рельсам прибора. В этом случае, разумеется, спираль не будет вращаться в противоположную сторону. Момент количества движения, сообщенный спирали экспериментатором вначале, будет настолько большой, что катящийся по спирали шар может только несколько уменьшить угловую скорость вращения спирали.

2-й в а р и а н т. Направление движения шара по рельсам не совпадает с вращением всей спирали. Опыт начинается так же, как и в первом варианте. Когда деревянный шарик начнет двигаться по отвесным виткам спирали, приведем рукою в быстрое вращательное движение всю спираль в [сторону, противоположную движению шарика. В этом случае деформация рельсов настолько уменьшится, что реакция их на шарик не сможет уравновесить даже доли силы тяжести, действующей на шарик. Шарик сейчас же сорвется и упадет.

В целях предохранения прибора от ударов при падении шарика к трем опорным вертикальным стержням прикрепляется веревочная сетка (см. рис. 1). Сетка крепится к опорным стержням ниже последнего витка прибора. В этом случае сетка не мешает демонстрации варианта опыта — срыва шарика со спирали (см. б.1).

Из соображений предохранения прибора от ударов и от сильной деформации спирали при быстрых вращениях ее два последних варианта опытов рекомендуется проводить с деревянными или эбонитовыми шариками.

Если спирали сообщить небольшую угловую скорость вращения в сторону, обратную движению шарика по спирали, то шарик может не сорваться со спирали и описать весь путь по цилиндрическим рельсам.

Следует обратить внимание аудитории на то, что шарик описывает путь по вращающимся рельсам в большее время, когда спираль вращается в ту же сторону, что и шарик; шарик опишет путь в меньшее время, когда спираль вращается с небольшой угловой скоростью в обратную сторону.

Эту разницу легко обнаружить с помощью метронома.

Объяснение явления, наблюдаемого при скатывании шарика по вращающимся цилиндрическим рельсам, можно провести с точки зрения наблюдателя, связанного с вращающейся системой координат; тогда для объяснения их необходимо привлечь силу Кориолиса. На рассмотрении этих вопросов мы не останавливаемся.

II. КОНУСООБРАЗНАЯ ДВОЙНАЯ СПИРАЛЬ

Две одинаковые конусообразные спирали, свитые из тонкой металлической трубки, установлены так, что витки одной спирали находятся под витками другой на одинаковом расстоянии друг от друга, образуя собою отвесные криволинейные рельсы с возрастающим радиусом кривизны (рис. 3). В таком положении спирали прочно скрепляются между собою наклонными металлическими стержнями. Этот прибор, подобно предыдущему, снабжен сверху одним «разгоночным» витком в виде желоба.

При скатывании шарика с верхней точки «разгоночного» витка он приобретает к моменту движения по отвесным рельсам спирали столь большую скорость, что дальнейшее движение шарика по ним становится устойчивым. Шарик бежит, несмотря на возрастающий радиус кривизны витков спирали, все витки, нигде не срываясь с них.

Некоторые конструктивные данные прибора:

1) спирали наматываются на деревянной конусообразной оправе дюралевой трубкой, внешний диаметр которой 10 мм; 2) прибор имеет 3,5 витка рельсов, один из них «разгоночный»; 3) диаметр наименьшего витка — 35 мм; наибольшего — 80 мм; 4) общая высота прибора — 1 м.

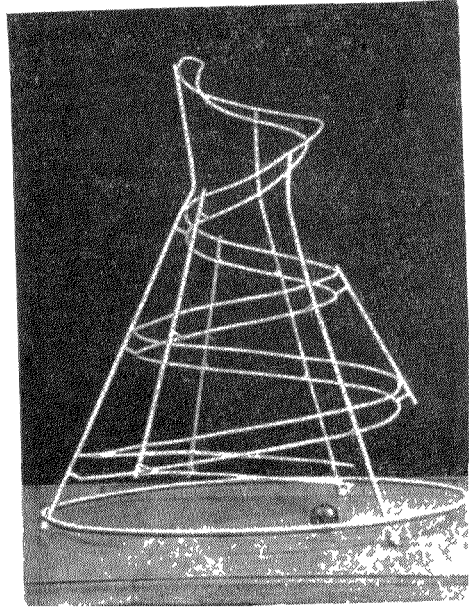


Рис. 3.

Вращение прибора конструкцией не предусмотрено.

Прибор дает возможность демонстрировать некоторые опыты. Шарики разного веса (деревянные, стальные, эбонитовые и др.) и разного диаметра (для нашего прибора в пределах от 50 до 70 мм) устойчиво скатываются по конусообразным рельсам описываемого прибора. Следует обратить внимание на то, что шарики большего диаметра скатываются по спирали быстрее, чем малого.

Это обстоятельство дает возможность показать такой поучительный опыт.

Если опустить с вершины «разгонного» витка одновременно два шара: большой — эбонитовый и немного поменьше — стальной, то эбонитовый шарик, движущийся быстрее, отойдет от стального и опишет весь путь скорее, чем стальной.

Иная картина будет наблюдаться, если сначала будет пущен стальной шарик, а вслед за ним большой эбонитовый. Эбонитовый шарик догонит стальной и ударит его. Вследствие этого удара эбонитовый шарик уменьшает скорость своего движения по спирали, а стальной — несколько увеличивает. После двух — трех таких столкновений эбонитовый шарик настолько уменьшит свою скорость, что вызываемая им деформация рельсов будет невелика, и реакция их, действующая на шарик, не может уже обеспечить устойчивого движения шарика по спирали. В результате этого большой шарик, идущий сзади, срывается с середины своего пути, в то время как стальной шарик полностью опишет свой путь.

М. А. Грабовский и В. С. Егоров