

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКМЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ**НЕСКОЛЬКО ДЕМОНСТРАЦИОННЫХ ОПЫТОВ
ПО ОБЩЕМУ КУРСУ ФИЗИКИ***М. А. Грабовский и В. С. Егоров*

1. Прибор для демонстрации движения центра масс системы — «Падающая доска». Известно, что центр массы любой механической системы движется точно так же, как материальная точка, в которой сосредоточена масса всей системы и к которой приложены все внешние силы, действующие на систему.

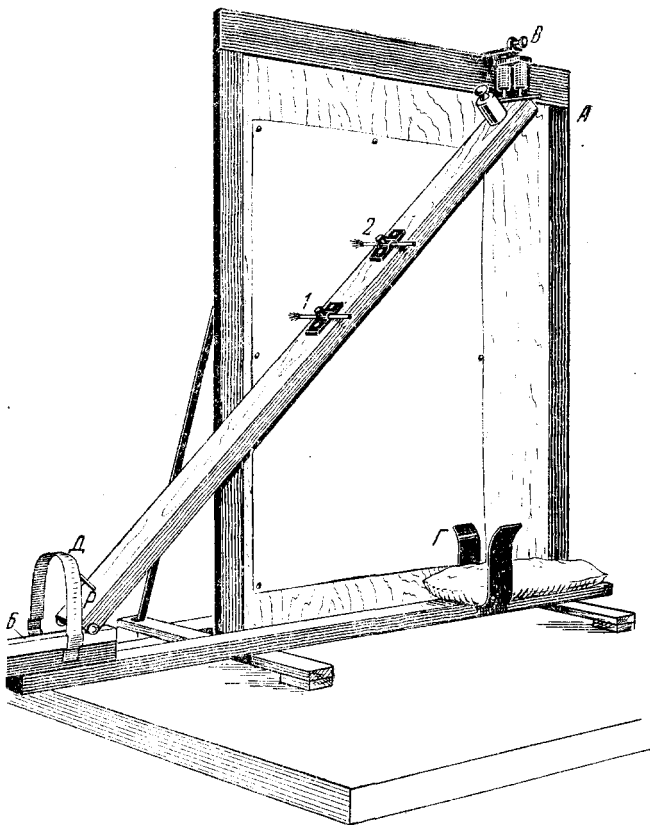


Рис. 1.

Для демонстрации этого фундаментального положения динамики системы предлагается показывать следующий опыт. Доска, центр тяжести которой известен, располагается в наклонном положении и удерживается в нем с помощью электромагнита (рис. 1). В левом конце доски укреплена ось P , на которой запрессованы два шарикоподшипника. В этом случае, при падении доски нижний конец ее будет

катиться по горизонтальной опоре прибора, а развивающиеся здесь силы трения, как показывает опыт, малы и ими можно пренебречь. Следовательно, на падающую доску будут действовать только две вертикальные силы: сила тяжести и реакция опоры, направленная вверх у места касания шарикоподшипниками доски; эти силы определяют движение центра массы системы по вертикали.

Для определения траектории движения центра массы системы к доске сбоку прикреплены две смоченные краской кисточки, которые слегка касаются белого листа бумаги, прикрепленного к вертикальному щиту прибора. Первая кисточка прикреплена в центре тяжести доски, вторая кисточка — несколько выше, ближе к концу доски, удерживаемому электромагнитом.

Если теперь выключить ток из обмотки электромагнита, то доска будет падать, а нижний конец ее с весьма малым трением катиться по горизонтальной опоре прибора. Первая кисточка, укрепленная у центра массы доски, проведет прямую линию по бумаге; вторая кисточка, соответствующая в данном случае произвольной точке системы, вычертит вогнутую кривую, обращенную своей кривизной к центру массы доски. Кривая линия (часть эллипса), вычерченная второй кисточкой, убеждает зрителя, что все точки системы, кроме центра масс, движутся не прямолинейно, а криволинейно, вращаясь вокруг падающего центра массы доски.

Опыт необходимо повторить во втором варианте. Вновь доска располагается наклонно. На этот раз доска нагружается добавочным грузом (примерно, весом в 1 кг), который закрепляется у верхнего конца доски. Теперь центр массы системы поднимается вверх, и новое его положение примерно совпадает с местом крепления второй кисточки (см. рис. 1). При падении доски в этом случае вторая кисточка прочертит прямую линию, а первая кисточка, не связанная теперь с центром тяжести системы, — изогнутую линию, обращенную своей вогнутостью к новому положению центра массы системы. Добавочные грузы можно укреплять в разных местах доски и тем самым повторять опыт в других вариантах.

Практические указания: 1. Все детали установки для демонстрации движения центра массы монтируются на устойчивой вертикальной раме А. К основанию рамы прикреплена гладкая деревянная доска В (рис. 1). Падающая доска имеет примерно следующие размеры: длина 140 см, ширина 90 мм и толщина 30 мм. В соответствии с размерами падающей доски взяты размеры опорной рамы. Рама прибора закрыта деревянным щитом, к которому прикалываются листы бумаги при экспериментировании.

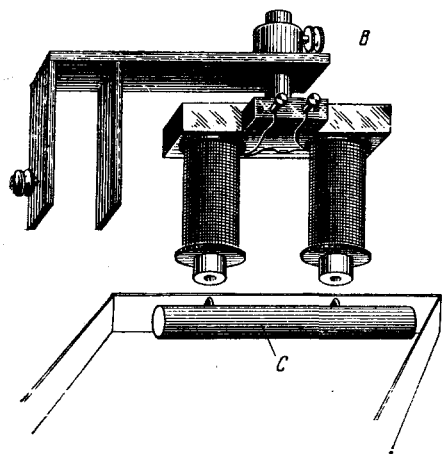


Рис. 2.

2. К верхнему основанию прибора прикрепляется электромагнит (см. рис. 1, 2). К поднимаемому вверх концу доски прикрепляется небольшой стержень С из мягкого железа, снабженный двумя латунными выступами сферической формы (рис. 2). Эти выступы входят в углубления, сделанные в торцах железного сердечника электромагнита. В этом случае начальное положение «падающей доски» строго фиксируется и легко установить доску так, чтобы кисточки слегка касались бумаги, а движение всей доски при выключении тока из обмотки электромагнита происходило бы всегда по определенному направлению. Выключение тока из обмотки электромагнита рекомендуется производить с помощью кнопки выключателя.

3. Перед демонстрацией каждого варианта опыта необходимо показать, где находится центр массы системы. Так как положение первой кисточки соответствует, как мы отмечали выше, центру массы ненагруженной доски, а положение второй кисточки — нагруженной доски, то в конструкции прибора предусмотрены крючки. Привязав нить к крючку, экспериментатор по горизонтальному положению поднятой за нить доски проверяет перед зрителями положение центра массы доски в обоих случаях.

4. В целях устранения подсакивания падающей доски при ударе об опору, что может повлечь за собой искажение вычерченных на бумаге линий и падение доски на пол, прибор снабжен ловушкой Г, укрепленной в основании прибора. «Ловушка» представляет собой две изогнутые большие пружины из нагартованной латуни, между которыми располагается подушка, набитая ватой. В этом случае падающая доска проваливается в ловушку и подсакивание доски полностью устраняется. Для той же цели служит охранная скоба Д, укрепленная на основании прибора.

2. Резонанс мотора, подвешенного на пружине. В технике известны случаи, когда вращающийся двигатель или мотор расшатывает при резонансе фундамент, на котором он укреплен. Опасен резонанс на частоте мотора отдельных частей летящего самолета или всей машины в целом. Известны также случаи разрушения мостов под действием периодических толчков на стыках движущихся по ним поездов или под действием ритмично шагающих солдат по мосту. Весь этот круг вопросов иллюстрируется следующей демонстрацией.

Небольшой мотор постоянного тока подвешивается на цилиндрической пружине к массивному штативу (рис. 3). На оси мотора асимметрично укрепляется небольшой стержень для создания толчков, период которого соответствует частоте вращения мотора. При небольшом числе оборотов, примерно 85 об/мин , появляется первый резонанс, выражающийся в периодическом опускании и поднятии мотора. Этот резонанс определяется деформацией продольного растяжения пружины. Частота, при которой он возникает, зависит от коэффициента упругости пружины и от массы мотора. При увеличении числа оборотов подвешенного мотора первый резонанс исчезает и при частотах примерно 170 об/мин появляется новый резонанс, определяемый поперечными колебаниями пружины. Мотор начнет интенсивно колебаться около горизонтальной оси, проходящей примерно через его центр массы (рис. 4).

При дальнейшем увеличении числа оборотов второй резонанс исчезает, а при нескольких сотнях оборотов мотора в минуту появляется последовательно сначала

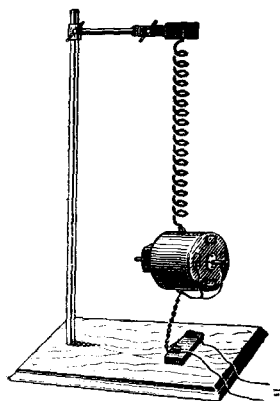


Рис. 3.

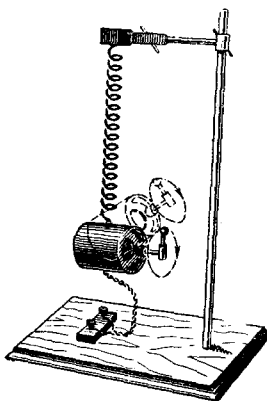


Рис. 4.

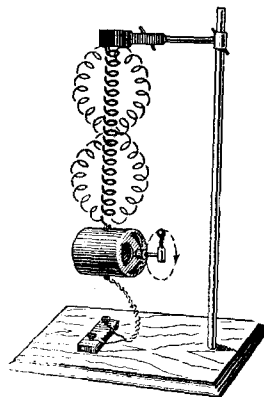


Рис. 5.

третий, а затем четвертый и даже более высокой степени резонансы, связанные с возникновением стоячих поперечных волн на самой цилиндрической пружине.

Картина этого последнего резонанса интересна. Вращающийся мотор остается неподвижным в то время, как сама пружина приходит в интенсивное колебание и по длине ее устанавливается одна, две и более полуволн (рис. 5).

Резонансы, получаемые на такой установке, очень острые и при резком изменении числа оборотов их можно пропустить. Поэтому в цепь мотора необходимо включить несколько реостатов (с большим и малым сопротивлением) с тем, чтобы регулировку числа оборотов производить весьма плавно.

При демонстрировании опыта в большой аудитории рекомендуется проектировать подвешенный мотор в теновой проекции на экран.

Примерные данные прибора:

а) Мотор постоянного тока мощностью $\approx 15 \text{ вт}$, напряжения 120 в , вес мотора 900 г .

б) Цилиндрическая пружина намотана из стальной проволоки, диаметр проволоки $\approx 2,4 \text{ мм}$, диаметр отдельного витка пружины $\approx 22 \text{ мм}$, общая длина ненагруженной пружины $\approx 185 \text{ мм}$; при подвешивании мотора пружина удлиняется на 160 мм , число витков пружины $\approx 70-75$.

в) Подводка тока к мотору от источника постоянного тока производится гибким шнуром.

3. Явления акустического резонанса на резонаторах Гельмгольца. Четыре резонатора Гельмгольца разных размеров располагают по одной линии на демонстрационном столе так, чтобы малые, несколько вытянутые отверстия резонаторов располагались на одной высоте (рис. 6). Перед этими отверстиями располагаются четыре одинаковые вертушки, изготовленные из бумаги (рис. 7).

Со стороны больших отверстий резонаторов располагается репродуктор, соединенный с звуковым генератором. Возбуждая репродуктор переменными токами различной частоты и создавая тем самым сильные звуковые поля, можно добиться явления резонанса, который убедительно проявляется в том, что вращается одна из четырех вертушек и именно та, которая стоит у возбужденного резонатора. Изменяя частоту звука, можно заставить поочередно вращаться все четыре вертушки.

Опыт демонстрируется в резонансном режиме; стоит уменьшить или увеличить на несколько процентов частоту, при которой происходит вращение

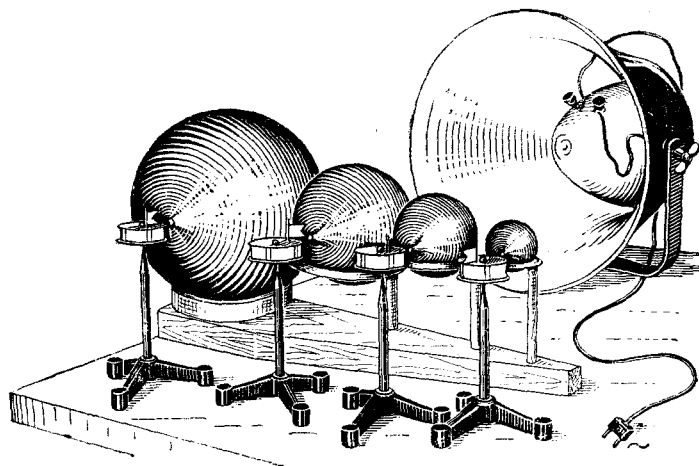


Рис. 6.

бумажного колесика, как через несколько секунд оно остановится. Поэтому рекомендуется весьма медленно изменять частоту звука, останавливаясь на некоторое время

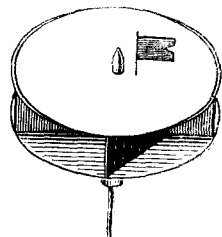


Рис. 7.

на тех частотах, при которых происходит возбуждение того или иного резонатора, и также на промежуточных частотах, когда ни одна из вертушек не вращается.

Для постановки этого опыта были взяты резонаторы следующих размеров: диаметр первого резонатора 60 мм, второго 100 мм, третьего 140 мм и четвертого 250 мм. Частоты, при которых они возбуждались, соответствовали: 800, 400, 300 и 120 гц. Звуковой генератор типа ЗГ-2А. Бумажная вертушка имеет вид небольшого колесика (диаметр 40—50 мм и высота 7—10 мм), опирающегося на иглолку (рис. 7). Между верхней и нижней поверхностями его вклеены 8—10 бумажных лопастей, расположенных под углом 30—35° к направлению радиуса колеса. При таком расположении лопастей по отношению к воздушному потоку, выходящему из резонатора, можно рассчитывать на максимальное пондеромоторное действие звука.

Для устранения трения при вращении вертушки в центре ее вклеивается небольшая стеклянная трубка, запаянная с одного конца. В отверстие этой трубки входит металлическая игла опоры (рис. 7). Общий вес вертушки 2,5—3,5 г.

Возможен такой вариант опыта. Вместо резонаторов Гельмгольца можно взять конические резонаторы, изготовленные из жести или из картона. Возбуждая тем же самым способом конические резонаторы, можно также наблюдать явление резонанса по вращению бумажного цилиндра. В этом случае резонанс менее острый. Однако в таком виде опыт дает возможность наблюдать ряд обертонов, если плавно увеличивать частоту тона, возбуждающего конический резонатор.

Длина наибольшего конического резонатора, который был использован в рассматриваемом опыте, 80 см, диаметр входного отверстия его 120 мм, диаметр выходного отверстия 7—8 мм, длина наименьшего резонатора 21 см, диаметр его входного отверстия 60 мм, выходного 7—8 мм.

Если опыты демонстрируются в большой аудитории, то бумажные вертушки следует спроектировать в теневой проекции на экран.

4. Шарик в струе газа или жидкости. При стационарном течении жидкости или газа по трубе переменного сечения давление внутри струи изменяется: где уже сечение трубы, там давление меньше, и наоборот. Следовательно, у места резкого изменения сечения трубы возникает перепад давления.

Рассмотрим лекционный опыт, который наглядно демонстрирует возникновение подобного перепада давления.

Стеклянная труба, одна половина которой имеет сечение примерно в 16 раз больше, чем вторая, присоединяется с помощью резиновой трубки к баллону, где находится жидкая углекислота под большим давлением. В широкую часть трубы

опускается шарик (целлулоидный, эбонитовый или изготовленный из дюралюминия), диаметр которого на 1—1,5 мм меньше внутреннего диаметра широкой части трубы (рис. 8, а).

Труба переменного сечения располагается сначала вместе с опущенным в нее шариком вертикально так, чтобы широкая часть трубы оказалась сверху. Затем медленно открывается кран редуктора, которым обычно снабжается баллон и пропускается довольно сильная струя газа, направленная вверх. Вследствие перепада

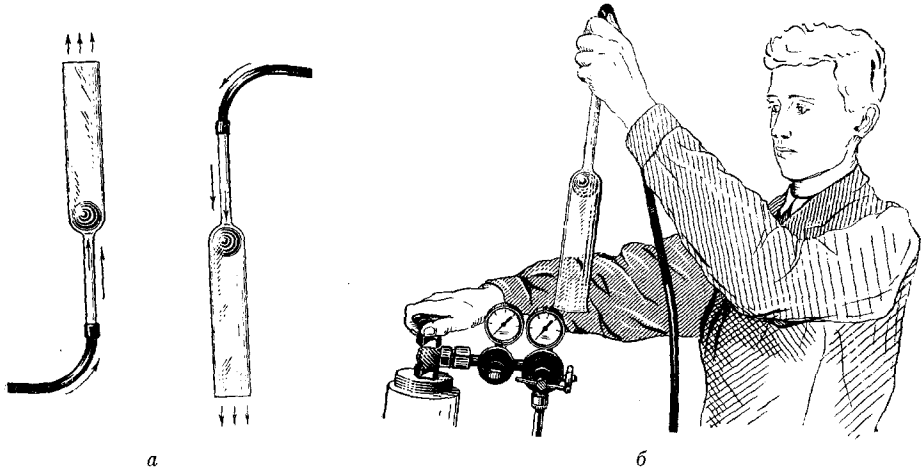


Рис. 8.

давления в струе газа положение шарика у места сужения трубы будет настолько устойчивым, что трубу вместе с шариком можно повернуть на 180° и шарик будет парить в струе, как показано на рис. 8, б. Опыт выглядит особенно эффектно, когда его проводят с металлическим шариком, вес которого примерно равен 90 г.

Опыт можно поставить и с водяной струей.

В этом случае необходимо обеспечить сильный поток воды через трубу. Проще всего для этого опыта взять целлулоидный шарик от игры в настольный теннис. В этом случае внутренний диаметр широкой части трубы должен быть равен — 40 мм, узкой части — 10 мм. Общая длина трубы переменного сечения примерно 400 мм.

5. «Резаный» мяч. Известно, что при игре в теннис кривой удар ракетки по мячу может вызвать вращение мяча. Вследствие этого вокруг «резаного» мяча возникает довольно сложное распределение линий тока воздуха.

На рис. 9, а показано распределение линий тока воздуха вблизи шара, вращающегося вокруг оси, перпендикулярной к чертежу. На рис. 9, б дано распределение

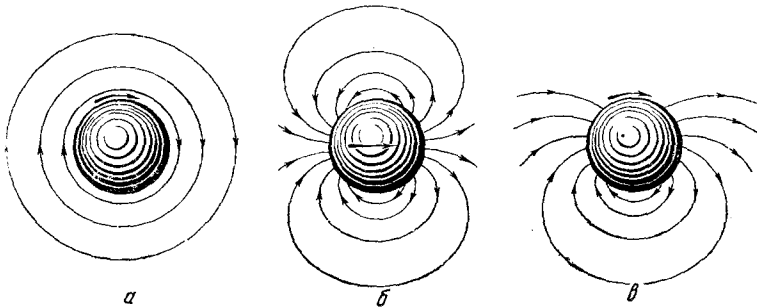


Рис. 9.

линий тока воздуха при одном поступательном движении шара. В этом случае воздух, сжимаемый летящим шаром, обтекает его сверху и снизу. И, наконец, на рис. 9, в изображено распределение линий тока воздуха вокруг шарика, который при своем поступательном движении влево вращается вокруг оси перпендикулярно к чертежу. Вследствие этого под шаром скорость воздуха будет большей, что опре-

делит возникновение области пониженного давления; над шаром скорость воздуха будет меньшей и статическое давление воздуха относительно большим. Поэтому возникает добавочное давление на шар, направленное вниз.

Отбитый мяч при полете может изменить свое движение и приобрести новое направление, которое партнеру предусмотреть трудно; мяч «обманывает» противника.

Для воспроизведения этого явления в аудитории, которое наглядно иллюстрирует эффект Магнуса, предлагается специальный прибор и описание опытов на нем. Небольшой мощности ($W \approx 25 \text{ вт}$) электродвигатель постоянного тока жестко укреплен на массивной стойке таким образом, чтобы ось его располагалась вертикально. На ось мотора плотно насаживается резиновая трубка, длина которой на 1—2 мм больше выступающего конца оси мотора. На конец резиновой трубки кладется целлулоидный шарик от игры «настольный теннис» (рис. 10).

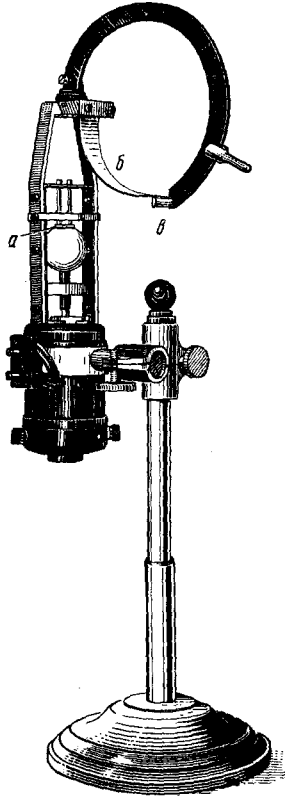


Рис. 10.

Сверху на шарик накладывается небольшой диск *a*, снабженный двумя прижимающими его к шару цилиндрическими пружинами. При вращении мотора целлулоидный шарик увлекается резиновой трубкой и достаточно устойчиво вращается с частотой мотора около прижимающего его диска.

К общей стойке прибора укрепляется сильная стальная пружина *б*, с помощью которой можно выбить шарик как при его вращении, так и в том случае, когда шарик покоится. Задержка пружины и освобождение ее при ударе производится спусковым механизмом *в*, что обеспечивает при каждом спуске пружины одинаковый по силе и направлению удар по целлулоидному шару.

Опыт проводится в такой последовательности. Сначала выбивается несколько раз подряд целлулоидный шарик при невращающемся моторе, и аудитория убеждается в том, что шарик летит всегда по одному направлению примерно на 4—5 м.

Можно поставить на демонстрационном столе какую-либо цель (небольшой щит или корзину), куда падает выбитый шарик. Если же выбить шарик при большой скорости вращения мотора, то шарик полетит по другому направлению и не попадет в цель.

При вращении мотора (и, следовательно, самого шарика) по часовой стрелке, если смотреть сверху на прибор, шарик будет снесен добавочным давлением на 1,5—2 м в правую сторону от цели; при вращении мотора против часовой стрелки — на то же расстояние влево.

Несколько практических указаний.

1) В схеме включения мотора следует предусмотреть: а) переключатель тока для изменения вращения мотора и б) реостат для плавного изменения силы тока в обмотке мотора. Следует иметь в виду, что при некоторых оборотах мотора вращение целлулоидного шарика наиболее устойчиво, при этих условиях и следует выбивать его.

2) На оси мотора следует укрепить небольшой деревянный диск, окрашенный в разные цвета. С помощью этого диска аудитория определяет при малом числе оборотов мотора направление вращения шарика.