

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. T. B r o w n, Amer. J. Phys. 30 (1), 71 (1962).

#### МАЯТНИК С ЖИДКИМ НАПОЛНИТЕЛЕМ—ПРИБОР ДЛЯ ДЕМОНСТРАЦИИ СУТОЧНОГО ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ

Доказательства вращения Земли основаны на том, что на всякое тело, движущееся относительно Земли, действует сила Кориолиса, которой учитывается влияние вращения Земли на относительное движение тела. Действие силы Кориолиса сводится к тому, что тело, движущееся на вращающейся Земле, будет или отклоняться по направлению, перпендикулярному к мгновенному значению его относительной скорости, или оказывать соответствующее давление на связь. Этот эффект наиболее наглядно проявляется в поведении движущихся жидкостей, производящих давление на соприкасающиеся с ними стенки твердых тел в направлении действия силы Кориолиса (так называемый закон Бэра). Поэтому естественно использование движущихся жидкостей в демонстрационных приборах. Однако в обзоре Граммеля<sup>1</sup> среди многочисленных примеров опытного доказательства суточного вращения Земли имеется единственный пример гидравлического опыта (§ 10, стр. 356) Перо и Комба, основанного на законе площадей в применении к потокам жидкости.

Движение маятника происходит под действием силы тяжести, обусловленной массой Земли. На его движении сказывается также сила Кориолиса, обусловленная суточным вращением Земли. Последняя относительно мала вследствие малой угловой скорости вращения Земли. Движение маятника обуславливается совместным воздействием двух сил, не зависящих от экспериментатора, земного происхождения тяжести и Кориолиса. Для демонстрации суточного вращения Земли задача состоит в создании маятников, чувствительных к действию силы Кориолиса.

Можно предложить маятники с твердым грузом, предложенные Фуко и Пошехоновым<sup>2</sup>. Видимое перемещение маятника относительно Земли наблюдается как вращение плоскости качания с постоянной угловой скоростью (маятник Фуко) или с переменной (маятник Пошехонова).

Для успешного наблюдения эффекта требуются маятники Фуко больших размеров. Так, парижский маятник Фуко имеет длину 67 м и груз 28 кг, ленинградский 96 м и 54 кг. Изготовление уникальных кардановых подвесов демонстрационных маятников позволило сократить их длину до нескольких метров (при грузе около 30 кг). Так, маятник Фуко Московского планетария имеет длину 4,6 м, Волгоградского и Ленинградского планетариев — около 7 м.

Маятник Пошехонова представляет собой штангу с грузами и рамой, могущими вращаться вокруг азимутальной оси в направлении вращения Земли.

Маятники с твердым грузом, предложенные в разное время Фуко и Пошехоновым, из-за конструктивных и эксплуатационных трудностей не получили широкого распространения.

Одним из путей повышения качества маятниковых приборов, предназначенных для демонстрации суточного вращения Земли, является использование в них несмещающих жидкостей со свободной поверхностью. Опыт показывает, что «чувствительность» маятника Фуко к воздействию на него суточного вращения Земли (при неизменных весе груза и длине подвеса) резко возрастает при замене твердого груза составным: твердой колбой, частично заполненной (по мидель) тяжелой несмачивающей жидкостью. Наблюдающееся повышение демонстрационных качеств такого маятника объясняется тем, что его груз состоит из масс, различающихся своим агрегатным состоянием (жидкости и твердого тела), которые под воздействием силы Кориолиса ведут себя по-разному. Это различие состоит в том, что при перемещении центра массы твердого тела, расположение атомов (или молекул) тела относительно него остается неизменным. В жидкости оно может изменяться. Поэтому использование комбинированного жидко-твердого груза в маятнике, предназначенном для демонстрации суточного вращения Земли, позволяет осуществить параметрический маятник с жидким наполнителем, отличающийся доступностью (в сравнении с маятником Фуко) и простотой (в сравнении с маятником Пошехонова).

Под воздействием кориолисовой составляющей силы инерции наполнитель периодически, с частотой колебаний маятника, изменяет свою форму внутри оболочки, сохраняя при этом неизменным свой объем. Форма и объем оболочки остаются при этом неизменными. Наполнитель, следуя движению маятника, перемещается внутри оболочки, стремясь расположить свою свободную поверхность перпендикулярно к мгновенному значению направления геометрической суммы сил тяжести и Кориолиса, и составной груз маятника вследствие периодического изменения распределения масс приобретает ускорение в горизонтальном направлении перпендикулярно к плоскости качания, т. е. в азимутальной плоскости. Иными словами, маятник показывает быстро прогрессирующую деформацию начальной плоскости качания с одновременным ее поворотом вследствие периодического изменения центра масс составного груза.

Для маятника с твердым грузом вводят понятие приведенной длины  $l_0$ , определяемой как

$$l_0 = \frac{J}{Ml}, \quad (1)$$

где  $l$  — расстояние от точки подвеса до центра тяжести,  $M$  — масса маятника и  $J$  — момент инерции маятника относительно оси вращения, определяемый по соотношению

$$J = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2, \quad (2)$$

где  $n$  — число частиц,  $m_i$  — масса  $i$ -й частицы и  $r_i$  — ее расстояние от точки подвеса маятника. Для маятника с твердым грузом величины  $l_0$  и  $J$  не изменяются в процессе его колебания. Для маятника с составным грузом они изменяются в процессе колебания и выражаются соотношениями

$$l_0 = l_{0T} + l_{0C} = \frac{J_T}{Ml} + \frac{J_{п.с}}{Ml} \quad (3)$$

и

$$J = J_T + J_{п.с}, \quad (4)$$

где  $l_{0T}$  и  $J_T$  — их постоянные составляющие, относящиеся к оболочке,  $l_{0C}$  и  $J_{п.с}$  — их переменные составляющие, относящиеся к наполнителю. Если обозначить для

маятника с составным грузом через  $l_{01}$  — приведенную длину при воздействии силы тяжести, через  $l_{02}$  — при воздействии сил тяжести и Кориолиса и соответственно через  $l_{0\text{ п.с1}}$  и  $l_{0\text{ п.с2}}$  — для жидкого наполнителя, то получим, что при воздействии только силы тяжести

$$l_{01} = l_{0\text{ т}} + l_{0\text{ п.с1}} \quad (5)$$

и при воздействии сил тяжести и Кориолиса

$$l_{02} = l_{0\text{ т}} + l_{0\text{ п.с2}} \quad (6)$$

В качестве критерия, характеризующего демонстрационные качества маятника с составным грузом, удобно выбрать разность  $\Delta l_0 = l_{01} - l_{02}$ , которая согласно соотношений (5) и (6) с учетом (3) равна

$$\Delta l_0 = \frac{J_{0\text{ п.с1}} - J_{0\text{ п.с2}}}{Ml}, \quad (7)$$

где  $J_{0\text{ п.с1}}$  — статический момент инерции наполнителя в положении равновесия и  $J_{0\text{ п.с2}}$  — момент инерции наполнителя, форма которого изменена воздействием силы Кориолиса.

Учитывая, что согласно (7) изменение приведенной длины маятника с составным грузом зависит от изменения приведенной длины наполнителя (активный фактор) при неизменной приведенной длине оболочки (пассивный фактор), приходим к заключению, что при изготовлении такого маятника необходимо стремиться к тому, чтобы масса наполнителя оказалась по возможности большой в сравнении с массой оболочки (массой подвеса можно пренебречь).

Таким образом, в результате изменения распределения масс составного груза во время движения маятника последний совершает параметрические колебания под воздействием силы Кориолиса. Параметром является приведенная длина маятника, периодически изменяющаяся под воздействием силы Кориолиса, изменяющей форму движущегося наполнителя со свободной поверхностью, а следовательно, и момент инерции маятника. Именно наличием параметрических колебаний предлагаемый маятник отличается от маятников Фуко и Пошехонова, совершающих в нем незатухающие колебания.

Параметрические колебания, как известно, совершаются тем легче, чем сильнее изменение параметра и чем меньше потери энергии в системе за счет трения или сопротивления. Следовательно, для сокращения времени увеличения эффекта до визуально наблюдаемой величины необходимо стремиться к уменьшению потерь энергии за счет трения и сопротивления подвеса азимутальному перемещению составного груза, а также за счет трения при перемещении жидкости относительно колбы. К тому же наличие трения наполнителя о колбу и запаздывание его перемещения относительно силы может исказить результаты опыта, а несовершенство подвеса может привести к дополнительным его деформациям при качании маятника. В этом случае эффект, наблюдающийся на опыте, может лишь в малой степени зависеть от силы Кориолиса. Поэтому наполнитель должен обладать по возможности большей свободной поверхностью и несмачиваемостью по отношению к материалу оболочки, а подвес должен быть эластично-симметричным относительно вертикали подвеса.

Благоприятным сочетанием является использование ртути, обладающей большим удельным весом, и шариков от настольного тенниса (пинг-понга). Последние имеют малый вес ( $\approx 2,5$  г) при значительном объеме ( $\approx 15$  см<sup>3</sup> жидкости при половинном наполнении) и большой прочности (наполненные водой при падении с высоты 2,4 м не разбиваются). К тому же они легко поддаются механической обработке, не загрязняют наполнитель, дешевы и могут быть получены в любом количестве.

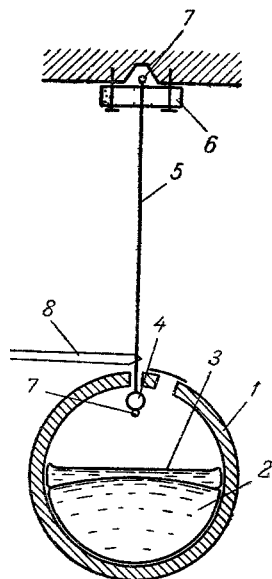
Для изготовления маятника в шарике просверливают или прожигают два отверстия разных диаметров на небольшом расстоянии друг от друга и через большее из них заполняют шарик наполовину (по мидель) несмачивающей жидкостью, лучше всего ртутью. Затем добавляют немного воды (для предотвращения возможного испарения ртути). На одном конце подвеса (струны или другой тонкой металлической проволоки), длиной 0,25—0,5 м, закрепляют резиновый шарик, диаметр которого соответствует диаметру большего отверстия шарика. Затем свободный конец подвеса пропускают последовательно через большое и малое отверстия шарика и большое отверстие заклеивают. Свободный конец подвеса пропускают с помощью иглы через резиновую пластинку толщиной около 1 см (например, через школьную резинку) и, удалив иглу, завязывают его узлом. Если затем резиновую пластинку закрепить горизонтально на высоте большей длины маятника, то нить подвеса, закрепленная узлами в нижней части шарика и в верхней стороне пластинки, будет связывать груз с местом подвеса не жесткими креплениями, а посредством эластичных (резиновых) симметричных буферов, снижающих до минимума дополнительные деформации подвеса, повышая тем самым относительное влияние силы Кориолиса.

Схема маятника с составным грузом приведена на рисунке, где обозначено: 1 — оболочка, 2 — наполнитель (ртуть), 3 — вода, 4 — буферный резиновый шарик, 5 — нить подвеса, 6 — буферная резинка, 7 — узлы нити подвеса. Для пуска маятника пережигают нить 8, которая удерживает его в исходном отклоненном положении. Такой маятник при начальном угле отклонения около  $10^\circ$  через 3—5 минут после пуска на широте около  $60^\circ$  (в Ленинграде) обеспечивает непосредственное наблюдение воздействия на него вращения Земли: плоскость его качания деформируется и поворачивается в одном направлении, стремясь при этом установиться в плоскости географической параллели (в направлении восток — запад) и в этом смысле являясь своеобразным компасом. Эффект проявляется наиболее наглядно при расположении начальной плоскости колебания маятника в направлении, близком к направлению север — юг, при котором смещающее воздействие силы Кориолиса на наполнитель оказывается максимальным.

Такой маятник из шарика от настольного тенниса с ртутным половинным наполнением и указанным буферным подвесом обеспечивает наблюдение эффекта при длине подвеса 0,25—0,5 м.

Наблюдения удобно вести по тени от груза, получаемой под ним на листе бумаги с системой радиальных линий от электроламп, располагаемой у места подвеса маятника.

Таким образом, маятник с жидким наполнением обладает способностью накапливать воздействия малых ускорений Кориолиса, обнаруживая действие силы Кориолиса на жидко-твердый груз маятника, в отличие от маятников Фуко и Пошехонова, демонстрирующих ее действие на твердый груз. Он же является своеобразным компасом, указывающим направление, перпендикулярное к истинному (географическому) меридиану.



*В. Я. Гаврик*

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Граммель, Механические доказательства вращения Земли, УФН 3, 335 (1923).
2. Г. Л. Пошехонов, Авторское свидетельство № 94733, 1950 г.