

## ОПИСАНИЕ ВИБРАЦИОННЫХ ВЕСОВ КАК ПРИБОРА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СВОЙСТВ ВРЕМЕНИ И АНАЛИЗ ИХ РАБОТЫ

Вибрационные весы представляют собой обычные равноплечные рычажные весы, у которых опора центральной призмы коромысла присоединена к вибрационному механизму. Этот механизм может создавать вертикальные вибрации опоры. Ускорение вибрации существенно меньше ускорения силы тяжести. Поэтому призма не отрывается от опоры и получается лишь переменное давление. Таким образом расстояние центра тяжести от острия призмы остается неизменным и весы не меняют своей чувствительности. Расположенные на стойке весов вертикальные направляющие исключают возможность горизонтального раскачивания опоры коромысла. Один из грузов подвешен к коромыслу на жестком подвесе, другой же груз на эластичном, легко растягиваемом подвесе. Здесь усилие при подъеме коромысла будет составлять лишь несколько процентов от усилия, необходимого для подъема груза на жестком подвесе. Поэтому при вибрациях устанавливается устойчивая кинематика коромысла, при которой точка коромысла  $O$  с жестким подвесом не участвует в вибрации, точка же  $A$  с эластичным подвесом имеет максимальные вибрации, с амплитудой в два раза большей, чем амплитуда центральной призмы  $C$ . Поскольку дополнительная нагрузка при вибрациях лишь на несколько процентов больше статической, коромысло весов должно оставаться жестким, без собственных колебаний, т.е. без изгибов, в соответствии с требованиями статического взвешивания.

В вибрационном режиме были испытаны весы различных конструкций, разной чувствительности при разнообразных подвесах – резина, пружина и пр. приведем конкретные данные для весов, на которых сейчас проводится работа. Это технические весы второго класса на 1 кг. Отклонение у них конца стрелки, скрепленной с коромыслом, на 1 мм отвечает нагрузке порядка 10 мг. Этой чувствительности соответствует положение центра тяжести коромысла приблизительно на 1 см ниже точки опоры центральной призмы. Длины плеч  $OC = CA = l = 16$  см. Прочное закрепление призмы в коромысле обеспечивает постоянство этой длины. Вибрации осуществляются с частотой от 10 до 20 гц. Амплитуда  $a \approx 0,2$  мм. Таким образом максимальная скорость центральной призмы  $v = \frac{2\pi}{T} a \cong 2$  см/сек, а ее максимальное ускорение  $w = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 a = 2 \cdot 10^2$  см/сек<sup>2</sup>, т.е. порядка 20% от ускорения силы тяжести. Обычно применяются грузы весом около 700 г. Один из грузов подвешен на резине, растяжение которой на 1 см получается при изменении нагрузки на 100 г. Таким образом при вибрациях дополнительное усилие на коромысле меньше 10 г, что, разумеется не может нарушить жесткость коромысла. Вибрации поглощаются резиной и груз, практически, не вибрирует.

На этих весах, как и на всех других испытанных системах, неизменно получается поворот коромысла, соответствующий утяжелению груза с эластичным подвесом. Эта дополнительная сила  $\Delta Q$  пропорциональна весу груза  $Q$ , причем  $\Delta Q/Q = 3 \cdot 10^{-5}$ . Следовательно, при  $Q = 700$  г,  $\Delta Q = 21$  мг и соответствующий момент сил, поворачивающий коромысло наших весов, равен 300 дин·см.

Докажем теперь, что возможность появления указанных сил совершенно исключается классической механикой.

1. Отвлекаясь от весов, рассмотрим сначала силу, с которой действует груз весом  $Q$  на точку подвеса, которая совершает ограниченные колебания любого типа. В этой задаче кинематика определяет динамику. Поэтому, применяя теорему о том, что среднее по времени значение производной любой ограниченной функции равно нулю, следует, что среднее ускорение точки подвеса и всех точек системы равно нулю. Значит сила, действующая на точку подвеса, остается такой же как и в статике, на нее действует вес груза  $Q$

и ничего больше. Следовательно и на весах, любые растяжения резины не могут создать при вибрациях дополнительную силу, способную повернуть коромысло весов.

2. Остается рассмотреть возможность появления момента сил, действующих на коромысло относительно опоры центральной призмы. Необходимый момент могут создать только силы, действующие вдоль коромысла. Если даже допустить несимметричность горизонтального воздействия опоры на стойку весов, то и тогда силы в коромысле будут ориентированы этой несимметричностью и должны исключиться переменной местами подвесов грузов.

Только центробежное ускорение  $\overline{v^2}/\rho$  может создать необходимый момент, направленность которого зависит от расположения подвесов. На первый взгляд может показаться, что коромысло при вибрациях совершает повороты около неподвижной точки  $O$ . На самом же деле движение точек коромысла более сложное. Дело в том, что центральная призма не отрывается от опоры, она с ней связана и поэтому движется только прямолинейно. Поэтому в центральной части коромысла, где сосредоточена главная часть его массы, не будет центробежного ускорения. Что касается точки  $O$ , то она грузом на жестком подвесе закреплена только в вертикальном направлении, но может свободно перемещаться горизонтально. Эти горизонтальные смещения точки  $O$  очень малы. Действительно, они равны  $a^2/(2l)$  и, следовательно, имеют значение порядка 0,1 микрона. Тем не менее, из-за возможности таких смещений возникает своеобразная кинематика коромысла. Каждая точка коромысла описывает при вибрациях дугу эллипса, малая ось которого направлена вдоль оси коромысла, при его среднем положении. На участках коромысла от  $O$  до  $C$  и от  $C$  до  $A$  вогнутости этих дуг имеют противоположную ориентацию и будут создавать центробежные силы противоположного направления. Однако, из-за большого значения  $\overline{v^2}$  на участке  $C-A$ , компенсация будет далеко не полной и на коромысле будет действовать центробежная сила, направленная в сторону  $A$ , т.е. к точке подвеса груза на эластичном креплении. В точке  $A$  центробежное ускорение будет наибольшим. Для этой точки  $\overline{v^2} = \frac{2\pi^2}{T^2} \cdot a = 6 \text{ см}^2/\text{сек}^2$ . Легко сосчитать, что для нее радиус кривизны эллипса  $\rho = 4l = 60 \text{ см}$ . Отсюда центробежное ускорение получается равным  $0,1 \text{ см}/\text{сек}^2$ . Масса половины плеча коромысла порядка 20 г. Следовательно, мы получаем оценку максимально возможной центробежной силы, действующей на коромысло порядка 2 дин. Вся ширина интересующей нас части коромысла порядка 1–2 см. Поэтому момент центробежных сил, способный повернуть коромысло, получается не большим, чем 1–2 дин/см. Следовательно, величина этого момента составляет лишь долю процента от той величины, которая в действительности наблюдается на весах, а направление его должно зависеть от формы коромысла.

3. Эффект утяжеления груза на эластичном подвесе не объясняется и особенностями сухого трения между центральной призмой и опорой в вибрационном режиме. В этом можно убедиться, смазав острие призмы и опору жидким машинным маслом. При этом точность взвешивания не ухудшается и эффект утяжеления груза при вибрациях остается прежним.

Приведенный анализ показывает, что на весах в вибрационном режиме появляются силы, которые не могут быть объяснены классической механикой. Эти силы направлены по оси вращения Земли и вызваны давлением времени на причинные связи. Поэтому наблюдаемые на весах эффекты их отклонения зависят от географической широты, что и было показано проведенной экспедиционной работой, отчет о которой был представлен в ГАО.