

где m_c – масса РММ и механизма; c_c – жесткость подвески РММ; k_c – коэффициент демпфирования в подвеске РММ.

Продифференцировав выражения из (3), учитывая, что обобщенная сила в данном случае равна нулю, и выполнив преобразования, получим дифференциальное уравнение колебаний РММ относительно опорной поверхности:

$$\ddot{z} + \frac{k_c(\dot{z} - \dot{z}_c)}{m_c} + \frac{c_c(z - z_c)}{m_c} = 0. \quad (4)$$

Таким образом, для получения характеристик колебаний РММ необходимо:

- из системы ДУ (1) или (1а) определить колебания корпуса УЭС над его передними (z_1) и задними (z_2) колесами;
- из выражения (2) определить z_c и посредством дифференцирования выражения (2) по независимой переменной – t определить \dot{z}_c ;
- решив уравнение (4), найти колебания РММ относительно опорной поверхности.

УДК 531.4.45:778.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТРЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ КИНОКАМЕРЫ

В. И. ПОРТНОВ, Е. С. БОГОМОЛОВА, К. С. АНТОНОВА, П. С. ЧИЛИНОВА
Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва

В нашей работе мы изучали действие трения на движение тел, особенно – сухое трение скольжения и трение качения. В качестве основного инструмента измерения была выбрана кинокамера [1]. Эксперимент был выполнен в достаточно спартанских условиях со встроенной в обычный айфон камерой, в результате чего удалось показать, что эксперименты с кинокамерой достаточно точные и современные, при этом простые и доступные.

Цель работы: исследовать динамику сухого трения с помощью камеры благодаря скатыванию шаров по наклонной плоскости, особое внимание уделить изучению зависимости сил трения от скорости движения.

Описание эксперимента. Три шарика – каучуковый, железный и стеклянный – скатывались с деревянного уголка длиной чуть больше 2 м, размеченного сантиметровой разметкой. Уголок был достаточно прочно закреплён штативом за один из концов, так что образовывалась наклонная плоскость. Высоту крепления можно было варьировать. Кинокамера (iPhone 7+ разрешение 4К, 30 кадров в секунду) крепилась на другом штативе на расстоянии примерно 2 м от уголка под прямым углом к нему.

В каждом скатывании один из шариков устанавливался на отметке 0, и одновременно с началом записи шарик отпускался. Затем полученные видео разбивались на кадры с определением времени в программе Light Alloy, в каждом кадре положение шарика определялись в программе Paint.

Трение. Изучение трения чрезвычайно важно для любого транспортного учебного заведения. В нашей работе мы изучали действие трения (в основном сухого) на движение тел, особенно – сухое трение скольжения и трение качения.

Трение скольжения – хорошо изученное явление. Самым известным законом, описывающим его, является закон Кулона – Амонтона, согласно которому сила трения скольжения описывается формулой $F = A + \mu N$, где N – сила нормального давления, μ – коэффициент трения, а A – фактор, связанный с межмолекулярным сцеплением поверхностей.

Зависимость силы трения от скорости движения многократно исследовалась. Было обнаружено, что следует различать два вида контакта тел: упругий (при небольших силах давления) и пластический (при больших силах давления, когда существенна деформация поверхности). При пластическом контакте зависимость от скорости ярко выражена при низких скоростях: чем больше скорость, тем *меньше* сила трения.

Многократные попытки моделирования трения [2] показали, что расхождение теории и практики связано с наличием пограничного смазочного слоя, который рассеивается только в глубоком вакууме. Обычно считают, что для того, чтобы сдвинуть тело с места, к нему нужно приложить большую силу,

чем для того, чтобы тащить тело. В большинстве случаев это связано с загрязнениями поверхностей трущихся тел. Так, для чистых металлов такого скачка силы не наблюдается. Опыты с движением пули в стволе показали, что с увеличением скорости пули величина силы трения сначала быстро убывает, потом она уменьшается всё медленнее, а затем (при скоростях больше 100 м/с) начинает возрастать. Грубо это можно объяснить тем, что в месте контакта выделяется много тепла [3].

Обработка результатов эксперимента. В результате эксперимента мы получили зависимости координаты от времени. Изображение шарика в кадре выглядело как сильно вытянутый прямоугольник, причём тем более вытянутый, чем больше скорость. За координату шарика мы принимали центр прямоугольника. Из-за того, что ошибки измерения координат довольно велики, мы делали аппроксимацию зависимостей многочленами 2, 3 и 4-й степени по формулам

$$\begin{aligned} x^{[2]}(t) &= a_2(t + t_0)^2, \quad x^{[3]}(t) = a_2(t + t_0)^2 + a_2(t + t_0)^3, \\ x^{[4]}(t) &= a_2(t + t_0)^2 + a_2(t + t_0)^3 + a_2(t + t_0)^4 \end{aligned} \quad (1)$$

по методу наименьших квадратов. t_0 – время начала движения относительно первого кадра съёмки, обычно в пределах 0,02 с. Рассматривались сразу три суммы:

$$D_2 = \sum (x_i - x^{[2]}(t_i))^2; \quad D_3 = \sum (x_i - x^{[3]}(t_i))^2; \quad D_4 = \sum (x_i - x^{[4]}(t_i))^2. \quad (2)$$

Неравенства $D_2 > D_3 > D_4$ выполняются всегда, однако результаты с аппроксимацией многочленом 4-й степени мы принимали лишь при условии $D_4/D_3 < 0,8$.

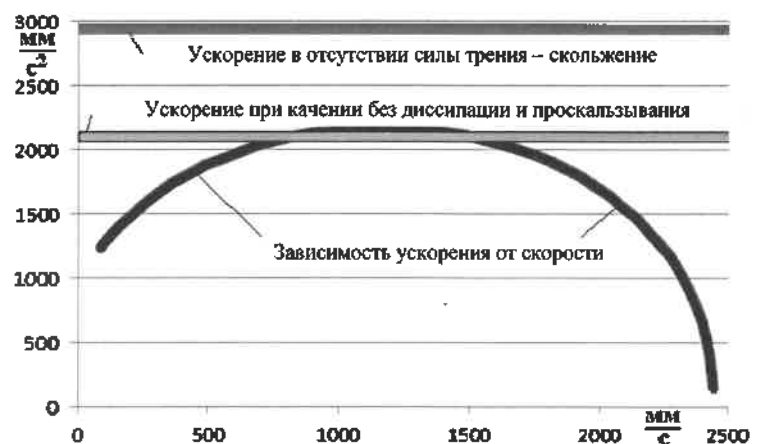
Результаты расчета приведены в таблице 1 и на рисунке 1.

Обнаруженное превышение рассчитанного ускорения над ускорением качения указывает на возможность проскальзывания шарика при движении.

Таблица 1 – Рассчитанные методом наименьших квадратов параметры движения шариков

h	Шарик	t_0	a_2	D_2	t_0	a_2	a_3
60	Металл	0,03	950,37	15538	0,00	1080,1	-66,21
60	Стекло	0,06	706,38	1386	0,07	670,94	19,06
60	Каучук	0,04	726,67	3517	0,045	714,78	4,67
h	Шарик	D_3	t_0	a_2	a_3	a_4	D_4
60	Металл	14203	0,08	485,17	607,62	-230,67	10810
60	Стекло	1244	0,055	760,45	-90,37	40,58	1180
60	Каучук	3486	0,1	396,43	347,04	-115,29	2963

Рисунок 1 – График зависимости ускорений от скорости металлического шарика, рассчитанных по методу наименьших квадратов



Вывод. Благодаря доступным ресурсам – кинокамере (смартфон или фотоаппарат с режимом видеосъёмки), программам Light Alloy и Paint (которые находятся в свободном доступе), можно выполнить эксперимент и провести исследование динамики сухого трения в рамках лабораторной работы по физике в технических вузах.

Список литературы

1 Нельзин, А. Е. Использование фото- и видеотехники в демонстрационном эксперименте / А. Е. Нельзин // Вестник Пермского государственного гуманитарно-педагогического университета. Серия: Информационные компьютерные технологии в образовании. – 2010. – № 6. – С. 42–52.

2 Боуден, Ф. П. Трение и смазка твёрдых тел / Ф. П. Боуден, Д. Тейбор ; пер. с англ. Н. М. Михина и А. А. Силина ; под ред. И. В. Крагельского. – М. : Машиностроение, 1968. – С. – 277–315.

3 Слободещкий, И. Сухое трение / И. Слободещкий // Квант. – 2002. – № 1. – С. 29–31.

УДК 531.4.43:778.5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ТРЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ВИДЕОСЪЁМКИ НА ПРИМЕРЕ КОЛЕСА МАКСВЕЛЛА

В. И. ПОРТНОВ, Е. О. КОЩЕЕВА

Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва

Маятник (колесо) Максвелла представляет собой колесо на оси, подвешенное на нитях. Он прост в обращении, закручивающиеся вокруг оси колеса нити позволяют вращаться колесу и возвращаться в исходное положение. Его используют для наглядной демонстрации закона сохранения энергии. Обычно в процессе демонстрации заметно, что при обратном движении колесо не достигает исходной высоты. Нашей целью является выяснение причины потери энергии в таком эксперименте.

Для детального исследования движения весь процесс записывался на видеокамеру. Было проведено и оцифровано два эксперимента: № 1 – маятник с простым колесом и № 2 – с колесом, к которому были прикреплены лопасти, создающие повышенное трение о воздух. Об использовании видеосъёмки в физическом эксперименте подробно написано в статье [1].

Основываясь на результатах эксперимента № 1, можно сделать вывод о том, что потеря энергии происходит в результате удара, когда центр тяжести колеса резко меняет направление движения (в момент времени 1,9 с). Энергия удара расходуется на колебания перекладины стенда и колебания в плоскости, перпендикулярной стенду, вследствие резко переместившейся точки подвеса.

В эксперименте № 1 линейная регрессия зависимости вертикальной скорости от времени (рисунок 1) показала, что движение в пределах ошибки является равноускоренным, причем ускорения при подъёме и спуске практически одинаковы. Из этого и из основных закономерностей сил трения [2] следует, что основная потеря энергии происходит из-за ударного резкого изменения вертикальной скорости в самой нижней точке положения колеса Максвелла.

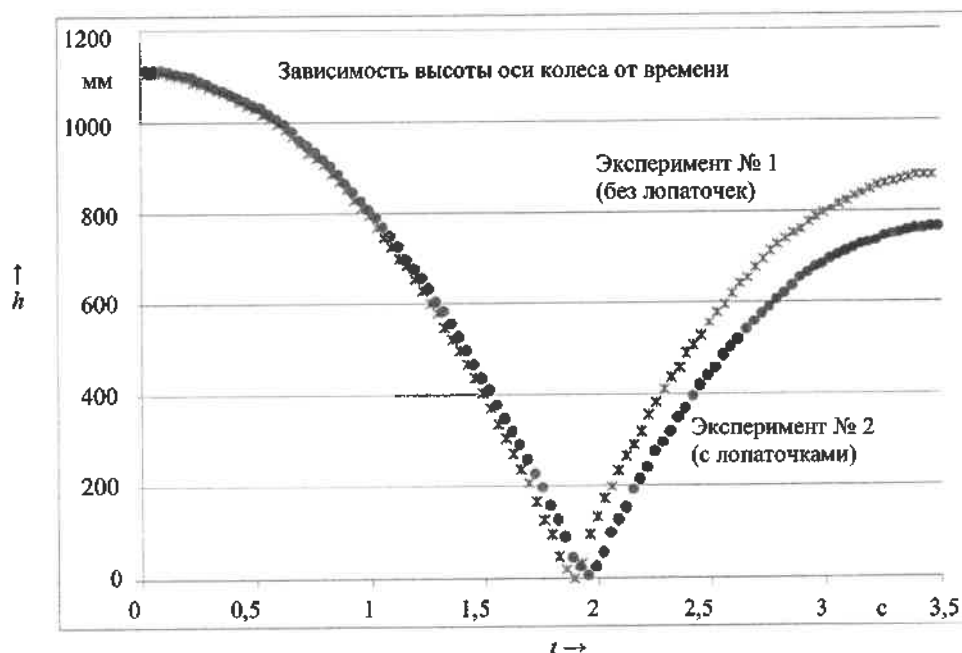


Рисунок 1 – Зависимость координаты от времени колеса Максвелла для простого колеса (№ 1) и колеса с лопаточками (№ 2)