

УДК 681.2.082:531.45

ДИНАМИКА СВОБОДНЫХ КАЧАНИЙ ФИЗИЧЕСКОГО МАЯТНИКА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ НАГРУЗКАХ**Ризноокая Н.Н.¹, Касьмин В.Ю.²**¹Белорусский национальный технический университет²Республиканское унитарное предприятие «Научно-производственный центр многофункциональных беспилотных комплексов» Национальной академии наук Беларуси

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Разработана конструкция маятника с различной массой при постоянных габаритных размерах и изготовлена с использованием 3D печати. Проведен анализ влияния нагрузки на трение качения. Проведены экспериментальные исследования трения качения в режиме предварительного смещения при различной нагрузке для одинаковых пар трения.

Ключевые слова: трение качения, нагрузка, момент трения качения, предварительное смещение.

A PHYSICAL PENDULUM FREE SWINGING DYNAMICS UNDER DIFFERENT LOADS**Riznookaya N.N.¹, Kasmin V.Y.²**¹Belarusian National University of Technology²Republican Unitary Enterprise "Research and Production Center for Multifunctional Unmanned Complexes" of the National Academy of Sciences of Belarus

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. A pendulum structure of variable mass with constant overall characteristics has been developed and manufactured using 3D printing. The influence of load on rolling friction was analyzed. Experimental studies of pre-rolling friction were carried out at various loads for the same friction pairs.

Key words: rolling friction, load, rolling friction moment, pre-displacement.

Адрес для переписки: Н.Н. Ризноокая, пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: Riznookaya@bntu.by

Маятниковый метод измерения трения качения является одним из наиболее чувствительных методов исследования поверхности материалов [1]. Однако, применение этого метода для исследования физико-механических параметров поверхности материалов в области предварительных смещений сдерживается отсутствием методов и средств, позволяющих разделить механизмы трения качения, связанные с упругим гистерезисом материала (нагрузка), силами адгезии и наличием проскальзывания в опорах качения.

В данной работе авторами использовался ранее разработанный маятниковый метод [1] позволяющий измерить несколько параметров трения качения в режиме предварительного смещения и таким образом исследовать динамику данного процесса.

Целью данного исследования являлось исследование динамики свободных качаний физического маятника при различных нагрузках.

Трение как физический процесс. Исторически, при исследовании и описании трения скольжения и качения рассматривалось движение тел с постоянной скоростью. И в рамках данной модели «коэффициент трения качения» определяется как

$$f_k = \frac{M_{ск}}{P}, \quad (1)$$

где $M_{ск}$ – момент сопротивления качению, P – нормальная сила.

Момент сопротивления качению для режима предварительного смещения в соответствии с [1] определяется по формуле

$$M_{ск}(\varphi) = \left[-mgR(c + b\varphi^p) \operatorname{sign}\left(\frac{d\varphi}{dt}\right) \right] + \left[2\gamma a^2 R |\varphi|^{n+1} \left(\frac{\pi}{2} - \frac{R}{a}\varphi\right) \cdot \operatorname{sign}(\varphi) \right] \quad (2)$$

где φ – угол отклонения маятника от положения равновесия, m – масса маятника; g – ускорение свободного падения; R – радиус шарика; c , b , p – параметры аппроксимации, определяемые из экспериментальной зависимости амплитуды от времени, a – радиус пятна контакта; γ , n – параметры аппроксимации, определяемые из экспериментальной зависимости периода от амплитуды.

Конструкция маятника. Основным критерием для проведения исследований являлось создание маятника с возможностью изменения массы при постоянстве габаритных размеров конструкции.

Изменение массы конструкции без изменения габаритных размеров достигнуто при помощи 3D печати с технологией послойного наложения материала (FDM) за счет полостей в маятнике. В конструкцию заложен массив шестигранных полостей, что позволило исключить провисание пластика при печати и упростило регулировку массы.

Было изготовлено 3 вида маятника с массами, указанными в таблице 1.

Таблица 1

	Масса основания, грамм	Масса маятника, грамм
Маятник 1	49,98	77,38
Маятник 2	40,53	67,93
Маятник 3	38,55	65,95

Результаты измерений и расчетов. В экспериментах использовались маятники различной массы, в которых в качестве опоры использовался шарик радиусом $R = 5$ мм, выполненный из нитрида кремния ($E_{ш} = 3,1 \cdot 10^{11}$ Н/м², $\nu_{ш} \approx 0,26$). Исследования проводились на плоских образцах, выполненных из стекла К8 ($E_{обр} = 806,5 \cdot 10^8$ Па, $\nu_{обр} \approx 0,209$).

Радиус пятна контакта шарика и образца, вычисленный по формулам Герца a , глубина внедрения шарика в образец δ , значения контактного угла β приведены в таблице 2

Таблица 2

	a , мкм	δ , мкм	β , угл. мин.
Маятник 1	32,7	0,21	22,5
Маятник 2	33,4	0,22	22,9
Маятник 3	34,8	0,24	23,9

Результаты измерения амплитуды колебания от времени и периода от амплитуды при различных массах маятника представлены на рисунках 1 и 2.

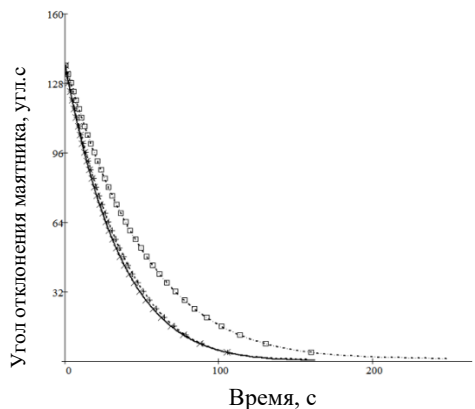


Рисунок 1 – Зависимость амплитуды колебаний маятника от угла отклонения маятника: 65,95 гр (+); 67,93 гр (x); 77,38 гр (□)

Коэффициент трения качения и момент трения уменьшаются с ростом массы маятника, при этом зависимость носит характер близкий к линейному (рисунок 3).

В результате расчета коэффициента трения качения по формуле (1) с учетом (2) для $\alpha = 138$ угл. с представлены в таблице 3.

Следует отметить, что при уменьшении массы маятника возрастает разброс результатов, что говорит о возрастании влияния свойств поверхности на маятник с уменьшением массы последнего.

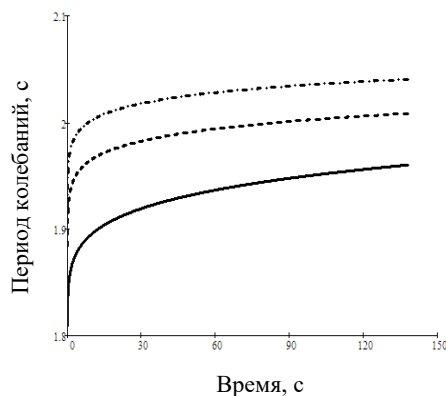


Рисунок 2 – Результаты измерений зависимости периода колебаний маятников от амплитуды: 65,95 гр (-); 67,93 гр (- -); 77,38 гр (-•-•)

Таблица 3

	Коэффициент трения качения, м, 10^{-8}	Масса маятника, грамм
Маятник 1	$5,7 \cdot 10^{-8}$	77,38
Маятник 2	$7,4 \cdot 10^{-8}$	67,93
Маятник 3	$8,6 \cdot 10^{-8}$	65,95

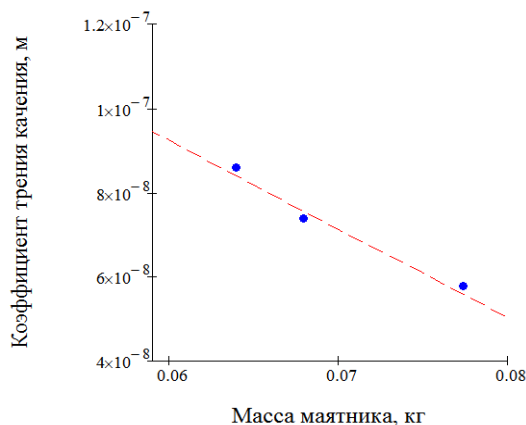


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента трения качения от массы маятника: – экспериментальные данные (•); аппроксимирующая кривая (- - -)

Заключение. Зависимость коэффициента трения качения от массы маятника и зафиксированный эффект возрастания разброса результатов при уменьшении массы маятника, говорят о возрастании влияния свойств поверхности на маятник с уменьшением массы последнего, что свидетельствует о зависимости параметров трения от массы маятника в режиме предварительного смещения.

Литература

1. Джилавдари, И.З. Устройство и методика измерения моментов сил сопротивления качению на пятне контакта / И.З. Джилавдари, С. Мекид, Н.Н. Ризноокая // Приборы и методы измерений. – 2019. – Т. 10, № 4. – С. 308–321.