

УДК 539.622

## ДИНАМИКА ФИЗИЧЕСКОГО МАЯТНИКА С ОПОРОЙ НА ОДИН ШАРИК НА ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АКТИВНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ КАПИЛЛЯРНЫХ СИЛ

Ризноокая Н.Н.<sup>1</sup>, Касьмин В.Ю.<sup>1</sup>, Матвиевич В.Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>ООО «НефтеХимДиагностика»

Бобруйск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Проведен анализ влияния капиллярных сил на динамику качания маятника в режиме предварительного смещения. Приведены результаты эксперимента с использованием дистиллированной воды и глицерина.

**Ключевые слова:** трение качения, предварительное смещение, капиллярные силы, маятниковый метод.

## A PHYSICAL PENDULUM DYNAMICS WITH A SINGLE BALL SUPPORT ON A PLANE SURFACE UNDER ACTIVE IMPACT OF CAPILLARY FORCES

Riznookaya N.<sup>1</sup>, Kasmin V.<sup>1</sup>, Matvievich V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

<sup>2</sup>LLC “NefteHimDiagnostika”

Bobruisk, Belarus

**Abstract.** The influence of capillary forces on pre-rolling friction is analyzed. The results of an experiment using distilled water and glycerin are presented.

**Key words:** rolling friction, pre-displacement, capillary forces, pendulum method.

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

Изучению состояния поверхности твердых тел в настоящее время уделяется все больше внимания в научных и прикладных исследованиях. Современная микроэлектроника буквально и фигурально базируется на поверхности полупроводникового материала или покрытия.

Одной из тенденций современного приборостроения является создание микромашин. Здесь, по мере уменьшения размеров приборов, состояние поверхностей их элементов оказывает все большее влияние на свойства этих приборов. Однако несмотря на значительные успехи нанотрибология до сих пор не привела к существенному прорыву в понимании макроскопических трибологических процессов, поскольку до сих пор остается незаполненным пробел между классической трибологией и нанотрибологией [1].

Наиболее простым, чувствительным и точным методом для измерения коэффициентов сопротивления качению является маятниковый метод. Данный метод основан на наблюдении затухания амплитуд свободных колебаний физического маятника, который опирается одним шариком на плоскую поверхность исследуемого материала.

Целью данной работы является исследование динамики качаний физического маятника с опорой на один шарик при активном влиянии капиллярных сил на плоской поверхности.

Основным механизмом сопротивления качению являются силы деформации. На пятне кон-

такта имеют место адгезия и проскальзывание. В [2] высказали предположение, что гистерезис силы трения качения возникает именно вследствие проскальзывания.

В работе [3], где изучалось трение качения при малых свободных качаниях физического маятника с опорой на два шарика, также считают, что в области малых перемещений этих шариков в основном работает деформационный механизм сопротивления качению.

Отметим, что вывод о том, что деформация контактирующих тел в процессе предварительного смещения при качении является основным механизмом диссипации энергии, нельзя считать универсальным. Из анализа литературных источников следует, что, по мере уменьшения нагрузки, роль адгезии, как механизма потерь энергии возрастает.

Для решения поставленной цели необходимо проанализировать влияние механизмов взаимодействия на динамику качения при малых нагрузках, а также, экспериментально оценить влияние механизмов взаимодействия на динамику качаний маятника. В работах [4, 5] предложен маятниковый метод определения коэффициента сопротивления качению и предложен метод определения поверхностной плотности работы адгезии на отрыв.

В эксперименте использовался маятник, массой 0,406 кг, который опирался на плоскопараллельный образец одним шариком с радиусом

сом  $R = 6,05$  мм, выполненным из стали. Контактный угол, радиус пятна контакта и глубина внедрения шарика для стекла К8 равны 37 угл. мин, 66 мкм и 0,7 мкм соответственно.

Исследования влияния капиллярных сил на микрокачания маятника проводились на поверхности образца из оптического стекла марки К8.

Первый опыт проводили на «чистой» поверхности (рис. 1).

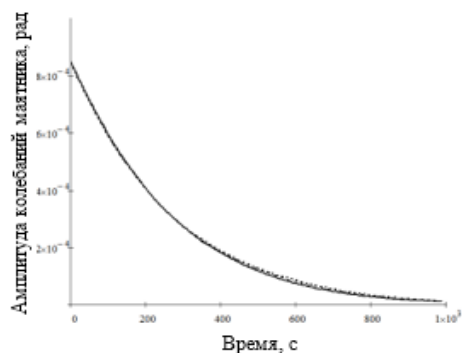


Рисунок 1 – Результаты измерений амплитуд колебаний маятника и соответствующих им моментов времени на поверхности стекла марки К8 с начальной амплитудой  $8,4 \cdot 10^{-4}$  рад

Затем, на поверхность отдельных образцов капли жидкости: дистиллированную воду, раствор глицерина и дистиллированной воды в различной концентрации. После чего, не удаляя жидкость со стекла, проводили измерения. При проведении эксперимента за меру объема раствора принята капля, примерно равная 0,01 мл для дистиллированной воды и 0,005 мл для раствора глицерина.

Результаты измерений амплитуды колебаний от времени и периода колебаний от амплитуды при начальном отклонении  $8,4 \cdot 10^{-4}$  радиан, проведенных при разном объеме дистиллированной воды, показаны на рис. 2 и 3.

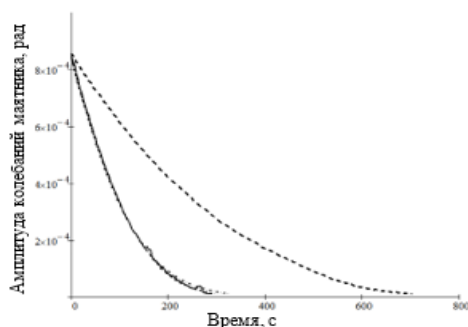


Рисунок 2 – Результаты измерений амплитуд колебаний маятника и соответствующих им моментов времени на поверхности стекла марки К8 с начальной амплитудой  $8,4 \cdot 10^{-4}$  рад в присутствии жидкости на пятне контакта (— — очищенная поверхность с каплей дистиллированной воды, объемом 0,01 мл; - - - — очищенная поверхность с каплей ДВ, объемом  $\approx 0,02$  мл)

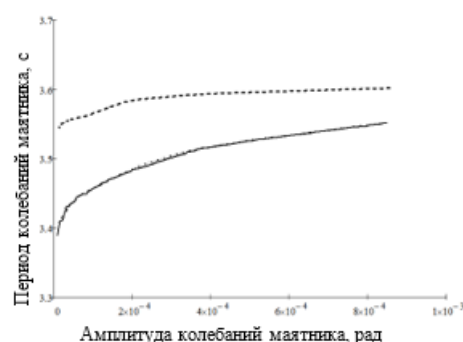


Рисунок 3 – Зависимость периода колебаний маятника от амплитуды на поверхности стекла марки К8 с начальной амплитудой  $8,4 \cdot 10^{-4}$  в присутствии жидкости на пятне контакта (— — очищенная поверхность с каплей дистиллированной воды, объемом 0,01 мл; - - - — очищенная поверхность с каплей дистиллированной воды, объемом  $\approx 0,02$  мл)

Для опыта с одинаковым объемом жидкости использовался раствор глицерина в различной концентрации (21 % р-р глицерина; 42,5 % р-р глицерина; 63 % р-р глицерина; 85 % р-р глицерина). Результаты эксперимента показаны на рис. 4, а результаты измерения коэффициента сопротивления качению в таблице 1.

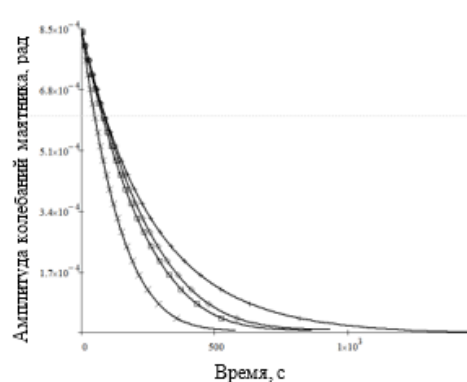


Рисунок 4 – Зависимость амплитуды колебаний маятника от соответствующих им моментов времени на поверхности стекла марки К8 с начальной амплитудой  $8,4 \cdot 10^{-4}$  в присутствии раствора глицерина различной концентрации на пятне контакта ( $\diamond$  21 % р-р глицерина;  $\square$  42,5 % р-р глицерина; + 63 % р-р глицерина;  $\times$  85 % р-р глицерина)

Таблица 1. Коэффициент сопротивления качению

Условие качения	Коэффициент сопротивления качению
Сухая поверхность	$1,5 \cdot 10^{-6}$
Дистиллированная вода	$4,0 \cdot 10^{-6}$
21% р-р глицерина	$1,8 \cdot 10^{-6}$
42.5% р-р глицерина	$2,0 \cdot 10^{-6}$
63% р-р глицерина	$1,5 \cdot 10^{-6}$
85% р-р глицерина	$3,0 \cdot 10^{-6}$

В результате проведенного эксперимента можно отметить, что жидкость оказывает влияние на динамику качаний маятника, более того,

влияет как состав жидкости, так и ее объем. Наличие жидкости в объеме, обеспечивающем граничное трение, приводит к более быстрому затуханию маятника, чем на сухой поверхности.

#### Литература

1. Попов, В. Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений / В. Л. Попов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 352 с.

2. Mekid, S. A non-linear model for pre-rolling friction force in precision positioning / S. Mekid // Proc. Instn Mech. Engrs Part J: J. Engineering Tribology. – Vol. 218 – P. 305–311.

3. Савенко, В. И. Применение маятникового метода для анализа механизмов поглощения энергии при качении / В. И. Савенко [и др.] // Трение и износ. – 1988. – Т. 9, № 2. – С. 212–222.

4. Джиладари, И. З. Методика и средство измерения малых коэффициентов сопротивления качению маятниковым методом / И. З. Джиладари, Н. Н. Ризноокая // Метрология и приборостроение. – 2010. – № 4. – С. 13–17.

5. Gilavdary, I. A new theory on pure pre-rolling resistance through pendulum oscillations / I. Gilavdary, S. Mekid, N. Riznookaya // Proc IMechE Part J: Journal of Engineering /tribology. – 2013. – Vol. 227, № 6 – P. 618–628.

УДК 681.2.084

### ТРИБОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ: ОТ ШКОЛЬНЫХ ОПЫТОВ ПО ФИЗИКЕ ДО НОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ Савич В.В.

*Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** В работе приводится обзор достижений в области использования трибоэлектрического эффекта.

**Ключевые слова:** трение, трибоэлектричество, достижения/

### TRIBOELECTRIC EFFECT: FROM SCHOOL EXPERIENCES IN PHYSICS TO NEW ENERGY SOURCES Savich V.

*The State Scientific Institution "Powder Metallurgy Institute"  
Minsk, Belarus*

**Abstract.** The paper provides an overview of the achievements in the field of using the triboelectric effect.

**Key words:** friction, triboelectricity, achievements.

*Адрес для переписки: В.В. Савич, ул. Платонова, 41, Минск 220005, Республика Беларусь  
e-mail: savich.vadim@gmail.com*

Трибоэлектрический эффект известен со времен изучения физики в средней школе: при трении двух разнородных материалов или веществ (например, с разной плотностью) между ними происходит разделение зарядов [1]. Еще один пример проявления данного эффекта – электрофорная машина – электростатический генератор для демонстрации высоковольтного (до десятков кВ) разряда. Считается, что трибоэлектрический эффект вызван адгезией двух материалов, состоящих из разных молекул. Хотя адгезия не является химической связью между атомами, происходит обмен электронами между различными молекулами, который приводит к электростатическому притяжению между ними. Физическое разделение материалов приводит к трению. Поскольку перенос электронов между молекулами в различных материалах не является немедленно обратимым, избыточные электроны в одном типе молекул остаются позади, в то время как дефицит электронов возникает в другом. Таким образом, в материале может образовываться положительный или отрицательный заряд, который рассеивается после разделения материалов [2].

Механизмы трибоэлектрификации (или контактной электризации) обсуждались много лет, включая перенос электронов, перенос ионов или перенос частиц материала. Недавние исследования 2018 года с использованием зондовой микроскопии Кельвина и трибоэлектрических наногенераторов показали, что перенос электронов является доминирующим механизмом трибоэлектрификации между твердым телом и твердым телом. Модель работы выхода может быть использована для объяснения переноса электронов между металлом и диэлектриком. Модель поверхностных состояний может быть использована для объяснения переноса электрона между двумя диэлектриками. Для общего случая, поскольку трибоэлектризация происходит для любого материала, Ванга предложил общую модель, в которой перенос электрона вызывается сильным перекрытием электронного облака между двумя атомами для пониженного межатомного потенциального барьера за счет сокращения длины связи. На основе модели исследовано влияние температуры и фотовозбуждения на трибоэлектрификацию. Такую модель можно распространить на