

---

---

# НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

---

---

УДК 539.621; 621384.82; 691.175.5/.8  
DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-10-950-955

*Статья посвящена памяти профессора  
Марлена Елизаровича Подольского*

## ПРИБОР ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТРЕНИЯ

А. О. ПОЗДНЯКОВ<sup>1,2</sup>, М. И. ЧЕРНЫШОВ<sup>1,3</sup>, А. В. СЕМЕНЧА<sup>3</sup>,  
В. И. НИКОЛАЕВ<sup>1</sup>, И. А. КОБЫХНО<sup>3</sup>, Ю. А. ФАДИН

<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, 194021, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: ao.pozd@mail.ioffe.ru

<sup>2</sup>Институт проблем машиноведения РАН, 199178, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
195251, Санкт-Петербург, Россия

Представлена и апробирована модель машины трения, основанная на измерении момента трения с помощью тензобалки. Описан способ оценки коэффициента трения в использованной в приборе геометрии упорного цилиндра, вращающегося относительно своей оси по поверхности плоского контртела. На примере экспериментов по трению ряда симметричных пар органических и неорганических контртел (полимеры, кристаллы, металлы) показана работоспособность и оценена точность определения коэффициентов трения с помощью разработанного прибора.

**Ключевые слова:** машина трения, цилиндр по плоскости, тензобалка, момент трения, коэффициент трения, полимер, металл, кристалл

Процессы трения и изнашивания при механическом контакте твердых тел возбуждают широкий спектр колебательных процессов [1], для исследования которых необходимы аналитические приборы. В наших исследованиях интерес представляют процессы трения в вакуумных условиях масс-спектрометра [2]. В работе [3] описано устройство ввода вращения в вакуумную камеру и представлены результаты его использования для анализа газовой выделенности при трении некоторых пар материалов (полимер—полимер, полимер—металл). Устройство ввода представляет собой совершающий осевое вращение сквозной вал с уплотнениями Вильсона из политетрафторэтилена. Важным измеряемым в трибологическом эксперименте параметром является величина момента трения, которая при заданной геометрии контакта может быть пересчитана в коэффициент трения.

В настоящей работе описан разработанный прибор для измерения момента силы трения в атмосферных условиях в той же геометрии узла трения, которая используется в устройстве перевода вращения в вакуум и приведен ряд примеров измерения коэффициента трения некоторых материалов в атмосферных условиях.

На рис. 1, а приведена разработанная установка, расположенная на массивной пластине (1) из дюралюминия. Чертежи выполнялись в программе Autocad Mechanical. Расчитанные в моделях размеры деталей для использованных материалов (дюралюминий, сталь)

оптимизировались с помощью конечно-элементного анализа в программе Comsol Multiphysics с целью минимизации изменения размеров (до 10 мкм) при нагружении. Двигатель (2), в текущей реализации использован трехфазный марки GK-63M2-6, через понижающий редуктор CVR040, ИЕС63В14 (3) приводит во вращение вал. Вал редуктора (4) в этой геометрии направлен вертикально вверх для возможности вертикального нагружения вращающегося контртела, имеющего форму полого цилиндра, закрепленного в центре вершины вала. Второе контртело крепится снизу горизонтальной пластины (5), которая свободно передвигается вдоль направляющих вертикальных стержней. Вертикальное перемещение с минимизированными горизонтальным люфтом и трением реализовано с помощью линейных подшипников (6). Дополнительная к массе пластины нормальная нагрузка (5) прикладывается размещаемым на ней грузом (7) известной массы.

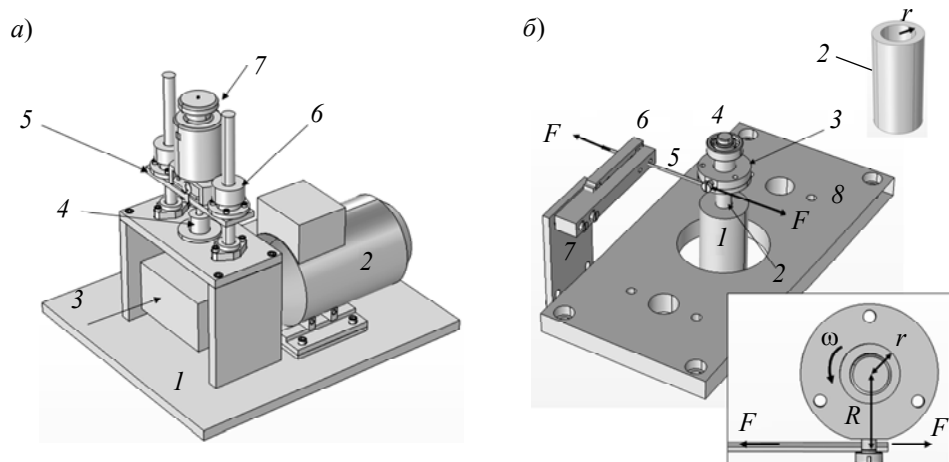


Рис. 1

На рис. 1, б представлен принцип измерения силы трения в разрабатываемом приборе. К поверхности полого цилиндра (2), закрепленного в вершине вала редуктора (1), который совершает осевое вращение с частотой  $\omega$ , грузом 7 (рис. 1, а) прижимается образец. Образец расположен в жестко насаженном на ось держателе образца (3), совершающем свободное вращение в стопорном подшипнике (4). Вращение держателя образца сдерживается фиксирующим стальным цилиндром (5), один конец которого жестко закреплен на вращающемся держателе (на известном расстоянии  $R$  от оси вращения, см. вставку к рис. 1, б), а другой — на тензобалке (6). В описанных экспериментах тензобалка жестко зафиксирована одним из краев на вертикальной стальной пластине 7, закрепленной на неподвижной пластине 8. Измерение изгиба свободного конца балки наклеенными на нее тензодатчиками лежит в основе определения приложенной к балке силы. При приведении в контакт верхней плоскости полого цилиндра со средним радиусом  $r$  и плоскости расположенного над ним образца на ось держателя образца передается момент вращения, который в первом приближении можно оценить как  $M=fr$ , где  $f$  — сила трения. Измеряемая тензобалкой сила, приложенная к фиксирующему цилиндру (5), равна  $F=fr/R$ . Как показали реперные измерения, потери на трение качения в стопорном подшипнике (4) малы, поэтому основной вклад в эту силу вносит сила, создаваемая моментом трения между прижатыми друг к другу нагружающей пластины ( $m_2$ , рис. 1, а) и вращающимся полым цилиндром.

На рис. 2 приведена принципиальная схема управления прибором и регистрации параметров трения. Частота вращения мотора (1) регулируется преобразователем частоты (ПЧ) E401T4BP/E751T4BG-Vector трехфазного питания (2). Частота вращения вала понижающего редуктора (3) меняется в диапазоне  $\sim 0$ —2 Гц. Частота вращения задается при помощи изменения потенциала между входами FIV и GND ПЧ. Для этого используется цифровой потенциометр (4), управляемый через плату Arduino (5). Значение напряжения между контактами варьирует от 0 до 10 В, при которых частота тока питания мотора равна 0—50 Гц.

Для управления потенциометром на его входы подается цифровой сигнал. Необходимое состояние потенциометра задается при помощи консоли, в которую вводится необходимое число шагов цикла подачи сигнала на вход INC. После завершения измерений потенциометр возвращается в исходное состояние. Для измерения и поддержания заданной частоты вращения вала редуктора используется инфракрасный прерыватель (6). При переключении состояния датчика определяется период оборота вала, который затем пересчитывается в частоту. Сигнал от тензобалки передается на прецизионный аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) на микросхеме HX711 (7). Данные извлекаются из цифрового выхода D\_OUT при подаче 25—27 импульсов на вход PD\_SCK. Число импульсов зависит от входного канала и коэффициента усиления. Сигнал от АЦП передается на плату Arduino UNO. Обработка цифрового сигнала реализована с использованием библиотек, взятых из [4]. Описываемая схема может быть дополнительно оборудована различными датчиками, например, термопарой (8) с усилителем сигнала (9). Деформация тензобалки приводит к увеличению сигнала  $\Delta S$ , линейно связанного с силой, приложенной к ней. Массу, соответствующую силе, приложенной к балке, можно определить как  $m_1 = k\Delta S$ . Коэффициент пропорциональности  $k$  определяется тарированием тензобалки с использованием грузов известной массы. При соблюдении модельных условий эксперимента значение коэффициента трения  $\mu = (m_1 R) / (m_2 r)$ .

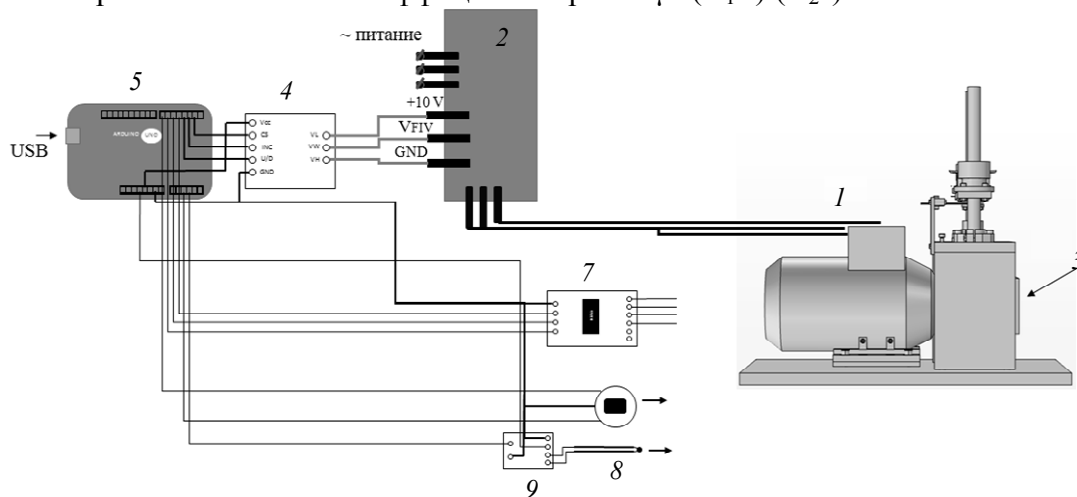


Рис. 2

В экспериментах значениями изменения частоты вращения при трении можно пренебречь, ввиду того что моменты трения на два порядка меньше момента на валу редуктора. Также в установке предусмотрена возможность измерения температуры разогрева образца в процессе износа. Для этого в область контакта образцов подводится термопара, уложенная в желоб, изготовленный на поверхности зажима вращающегося столика. Сигнал от термопары усиливается и передается на Arduino, после чего пересчитывается в значение температуры. Дополнительно прибор может быть оборудован датчиком акустоэмиссии, который приклеивается к анализируемому месту на образце или рабочей части прибора. Сигналы акустоэмиссии регистрируются цифровыми осциллографами типа Tektronix DPO4034, соединенными с компьютером с помощью программы на базе LabView™.

Работоспособность созданного прибора проверена на нескольких симметричных (контртела из одного материала) и асимметричных (контртела из разных материалов) парах трения. На рис. 3 показаны типичные зависимости измеряемых моментов трения. В качестве примера даны временные зависимости момента для пар трения с известными фрикционными параметрами (политетрафторэтилен, ПТФЭ, и полиметилметакрилат, ПММА) при трении в симметричной и асимметричной пара трения (контртело—сталь 20), а также для пары трения сапфир-сапфир. Как видно из рис. 3 (получен для частоты осевого вращения полого цилиндра  $\sim 2$  Гц и  $F=25$  Н), момент трения практически не изменяется со временем. Начальный уча-

сток, на котором момент резко возрастает, может быть связан как с особенностями системы измерения момента, так и с притиркой трущихся поверхностей. Для пары трения ПММА—ПММА (рис. 3, а, 1) наблюдается низкий момент трения, при трении в ПММА—сталь (2) коэффициент трения выше. Видно, что максимальные осцилляции момента наблюдаются для пары трения сапфир—сапфир (рис. 3, б, 1). В случае трения в паре ПТФЭ—ПТФЭ (2) регистрируемый момент трения практически такой же, как в паре ПТФЭ—сталь (3).

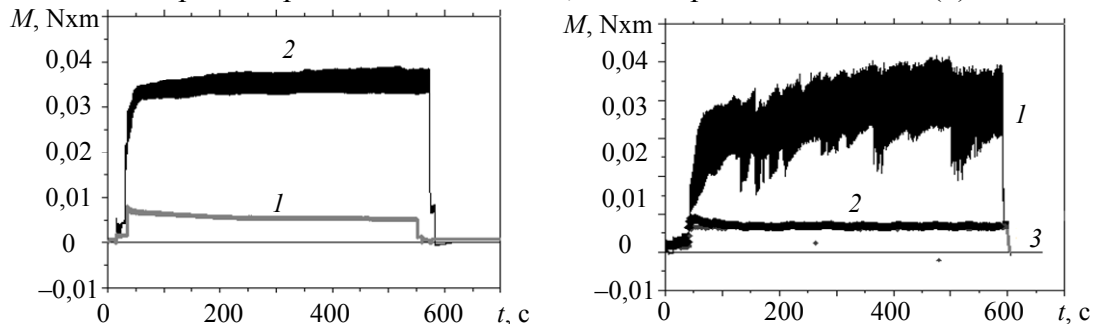


Рис. 3

На рис. 4 приведены зависимости пересчитанных из силы натяжения балки  $F$  коэффициентов трения  $\mu$  для разных пар, в том числе полимеров, перспективных в качестве матриц для создания нанокомпозитов [5] (полиэфирэфиркетон, ПЭЭК, и полиоксиметилен, ПОМ), при разных нормальных нагрузках. Были использованы промышленные коммерческие полимеры. Первым в названии пары трения обозначено неподвижное контртело (лист материала толщиной  $\sim 2$  мм), вторым — контртело в форме полого цилиндра, совершающее осевое вращение с частотой  $\sim 2$  Гц. Полученные данные по зависимости коэффициентов трения от нормальной нагрузки (рис. 4) в основном хорошо согласуются с литературными [5]. В большинстве пар трения (ПЭЭК—ПЭЭК, ПММА—ПММА, ПТФЭ—ПТФЭ) наблюдаются невысокий коэффициент трения и некоторое его снижение с ростом нагрузки, что можно объяснить совершенствованием геометрии контакта при приработке контртел. Для пары трения ПОМ—ПОМ коэффициент трения существенно выше, он несколько возрастает с увеличением нагрузки. Этот эффект может быть связан с тем, что при комнатной температуре ПОМ находится в высокоэластичном состоянии ( $T_g = -30$  °C) и, вероятно, с большим вкладом адгезионной составляющей силы трения в результирующее значение  $\mu$  для пары ПОМ—ПОМ [6]. Отметим, что измеряемый аналитическими весами износ ПОМ в опытах находился ниже чувствительности весов (менее 0,0001 г), однако профилограммы поверхности, определенные профилометром PS-10 Mahr, указывали на наличие кольцевых следов трения глубиной  $\sim 5$  мкм. Коэффициент трения сапфира (ориентация поверхности контртел перпендикулярна базисной плоскости кристалла) также находится в хорошем согласии с литературными данными по трению сапфира в атмосферных условиях.

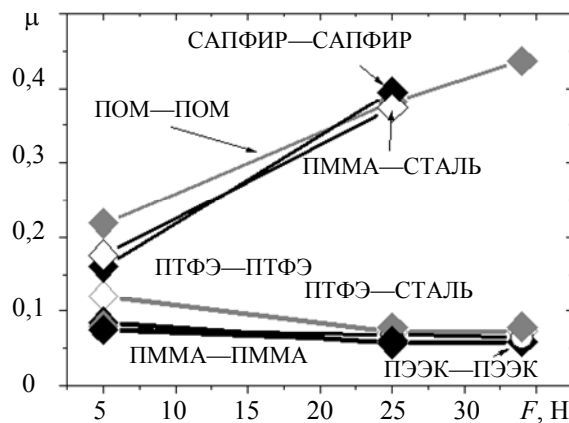


Рис. 4

Чувствительность тензобалки достаточно высока ( $\sim 0,5$  гр, что соответствует  $\mu \sim 0,005$ ), однако отметим, что, как показывают экспериментальные зависимости, амплитуда осцилляций регистрируемого сигнала ( $\mu \sim 0,05—0,15$ ) может превышать это значение. Кроме этого, точность пересчета момента в коэффициент трения может определяться различными экспериментальными факторами [7], например неравномерностью линейной скорости скольжения на кромке цилиндра вдоль его радиуса (толщина кромки в наших опытах  $3 \pm 0,1$  мм), может зависеть от свойств конкретной пары трения (например, твердостью материалов), уровня нагружения, совершенства геометрии контакта. Более детальный учет роли комплекса всех этих взаимосвязанных факторов в расчетах  $\mu$  является предметом текущих технологических разработок.

В заключение отметим, что полученные результаты дают важную информацию о значениях момента трения пар трения, которые необходимо регистрировать в условиях вакуумного эксперимента [2, 3] с использованием масс-спектрометрической регистрации летучих продуктов. Вследствие измеряемых уровней моментов трения к чувствительности тракта предъявляются жесткие требования. Необходимо компенсировать дополнительный момент трения для перевода вращения в вакуум, возможно, за счет разработки аналогичной методики измерения, непосредственно в вакуумной камере масс-спектрометра, малых величин моментов трения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Persson B. N. J. Sliding Friction. Springer, 2000. 515 p.
2. Поздняков А. О., Гинзбург Б. М., Лишевич И. В., Попов Е. О., Поздняков О. Ф. Масс-спектрометрические исследования трения полимеров // Вопр. материаловедения. 2013. № 4(72). С. 265—274.
3. Поздняков А. О., Чернышов М. И., Семенча А. В., Голяндин С. Н., Николаев В. И., Возняковский А. П., Фадин Ю. А. Масс-спектрометрическая методика исследования газовой выделенности при трении в вакууме // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 4. С. 353—358.
4. [Электронный ресурс]: < <https://github.com/bogde/HX711> >.
5. Friedrich K., Schlarb A. Tribology of polymer nanocomposites // Trib. and Interface Engineering Series. 2008. N 55. P. 551.
6. Бартнев Г. М., Лаврентьев В. В. Трение и износ полимеров. Л.: Химия, 1972. 240 с.
7. Stolarski T. A. Friction in a pin-on-disc configuration // Mech. Mach. Theory. 1989. Vol. 24, N 5. P. 373—381.

#### Сведения об авторах

- Алексей Олегович Поздняков** — канд. физ.-мат. наук, доцент; ФТИ им. А.Ф. Иоффе; старший научный сотрудник; E-mail: ao.pozd@mail.ioffe.ru
- Максим Игоревич Чернышов** — магистр; ФТИ им. А.Ф. Иоффе; лаборант, E-mail: chernyshov.maxim31@gmail.com
- Александр Вячеславович Семенча** — канд. хим. наук, доцент; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, директор Высшей школы физики и технологий материалов, E-mail: asemencha@spbstu.ru
- Илья Александрович Кобыхно** — Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, младший научный сотрудник, инженер; E-mail: ilya.kobykhno@gmail.com
- Владимир Иванович Николаев** — канд. физ.-мат. наук; ФТИ им. А.Ф. Иоффе; зав. лабораторией, E-mail: nikolaev.v@mail.ioffe.ru
- Юрий Александрович Фадин** — д-р техн. наук; Институт проблем машиноведения РАН; зав. лабораторией

Поступила в редакцию  
29.06.2020 г.

**Ссылка для цитирования:** Поздняков А. О., Чернышов М. И., Семенча А. В., Николаев В. И., Кобыхно И. А., Фадин Ю. А. Прибор для регистрации параметров трения // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 10. С. 950—955.

## AN INSTRUMENT FOR FRICTION PARAMETERS REGISTRATION

A. O. Pozdnyakov<sup>1,2</sup>, M. I. Chernyshov<sup>1,3</sup>, A. V. Semench<sup>3</sup>,  
V. I. Nikolaev<sup>1</sup>, I. A. Kobychno<sup>3</sup>, Yu. A. Fadin

<sup>1</sup> Ioffe Institute, 194021, St. Petersburg, Russia  
E-mail: ao.pozd@mail.ioffe.ru

<sup>2</sup> Institute for Problems in Mechanical Engineering of the RAS, 199178, St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University  
195251, St. Petersburg, Russia

The paper presents the model of friction machine and its approbation in the friction geometry of thrust cylinder rotating on its axis against the flat counterbody. The paper also presents the principles of the registration of the friction torque by using strain gauge and calculation of friction coefficient in the friction geometry used in the machine. The operability and accuracy of friction coefficient measurements by using the instrument is illustrated by the friction experiments with the symmetric and asymmetric friction pairs of organic and inorganic materials (polymers, crystals, metals).

**Keywords:** friction machine, thrust cylinder, strain gauge, friction moment, friction coefficient, polymer, metal, crystal

### REFERENCES

1. Persson B.N.J. *Sliding Friction*, Springer, 2000, 515 p.
2. Pozdnyakov A.O., Ginzburg B.M., Lishevich I.V., Popov E.O., Pozdnyakov O.F. *Voprosy materialovedeniya*, 2013, no. 4(72), pp. 265–274. (in Russ.)
3. Pozdnyakov A.O., Chernyshov M.I., Semench A.V., Golyandin S.N., Nikolaev V.I., Voznyakovskiy A.P., Fadin Yu.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 4(63), pp. 353–358 (in Russ.)
4. <https://github.com/bogde/HX711>.
5. Friedrich K., Schlarb A. *Trib. and Interface Engineering Series*, 2008, no. 55, pp. 551.
6. Bartenev G.M., Lavrent'yev V.V. *Treniye i iznos polimerov* (Friction and Wear of Polymers), Leningrad, 1972, 240 p. (in Russ.)
7. Stolarski T.A. *Mech. Mach. Theory*, 1989, no. 5(24), pp. 373–381.

### Data on authors

<b>Aleksey O. Pozdnyakov</b>	— PhD, Associate Professor; Ioffe Institute; Senior Scientist; E-mail: ao.pozd@mail.ioffe.ru
<b>Maxim I. Chernyshov</b>	— Magister; Ioffe Institute; Laboratory Assistant; E-mail: chernyshov.maxim31@gmail.com
<b>Alexander V. Semench</b>	— PhD, Associate Professor; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Director of Higher School of Physics and Material Technology; E-mail: asemencha@spbstu.ru
<b>Vladimir I. Nikolaev</b>	— PhD; Ioffe Institute; Head of Laboratory; E-mail: nikolaev.v@mail.ioffe.ru
<b>Ilya A. Kobychno</b>	— Junior Scientist, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; Engineer; E-mail: ilya.kobychno@gmail.com
<b>Yury A. Fadin</b>	— Dr. Sci.; Institute for Problems in Mechanical Engineering of the RAS; Head of Laboratory

**For citation:** Pozdnyakov A. O., Chernyshov M. I., A. V. Semench A. V., Nikolaev V. I., Kobychno I. A., Fadin Yu. A. An instrument for friction parameters registration. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 10. P. 950—955 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-10-950-955