

Научная статья  
УДК 539.621  
doi: 10.30987/2223-4608-2022-6-27-32

## **Аналитическое представление зависимостей коэффициента трения от температуры при фрикционном взаимодействии стального шара с термопластами**

**Александр Джалюльевич Бреки**<sup>1,2</sup>, Д.Т.Н.,  
**Сергей Георгиевич Чулкин**<sup>2,3</sup>, Д.Т.Н.,  
**Михаил Геннадьевич Шалыгин**<sup>4</sup>, Д.Т.Н.

<sup>1</sup> Санкт-петербургский политехнический университет, г. Санкт-Петербург, Россия,

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

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, г. Санкт-Петербург, Россия,

<sup>4</sup> Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

<sup>1</sup> albreki@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4452-3896>

<sup>3</sup> sergej.chulkin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7291-3958>

<sup>4</sup> migshalygin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8102-9918>

**Аннотация.** Предложена математическая модель, описывающая зависимость коэффициента трения от температуры при фрикционном взаимодействии стального шара с термопластами. Реализована проверка разработанной математической модели посредством обработки экспериментальных данных, полученных при фрикционном взаимодействии ползуна из стали ШХ15 по таким термопластам как полиэтилен низкого и высокого давления, полипропилен, полиформальдегид, полиметилметакрилат, полистирол. Введён ряд новых триботехнических характеристик, которые позволяют более детально охарактеризовать фрикционное взаимодействие в системе «металл-термопласт».

**Ключевые слова:** математическая модель, трение, термопласты, температура, фрикционное взаимодействие

**Для цитирования:** Бреки А.Д., Чулкин С.Г., Шалыгин М.Г. Аналитическое представление зависимостей коэффициента трения от температуры при фрикционном взаимодействии стального шара с термопластами // научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №6 (132). – С. 27-32. doi: 10.30987/2223-4608-2022-6-27-32

Original article

## **Analytical representation of the dependences of the coefficient of friction on temperature during the frictional interaction of a steel ball with thermoplastics**

**Alexander Dzhalyulevich Breki**<sup>1,2</sup>, Dr.Sc.Tech,  
**Sergey Georgievich Chulkin**<sup>2,3</sup>, Dr.Sc.Tech,  
**Mikhail Gennadievich Shalygin**<sup>4</sup>, Dr.Sc.Tech,

<sup>1</sup> St. Petersburg Polytechnic University Peter the Great, St. Petersburg, Russia,

<sup>2</sup> Institute of Problems of Machine Science of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia,

<sup>3</sup> St. Petersburg State Maritime Technical University, St. Petersburg, Russia,

<sup>4</sup> Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

<sup>1</sup> albreki@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4452-3896>

<sup>3</sup> sergej.chulkin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7291-3958>

<sup>4</sup> migshalygin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8102-9918>

**Abstract.** A mathematical model describing slip coefficient dependences on temperature in frictional interaction of a steel ball with thermoplastics is given. Testing and verification of the developed mathematical model is implemented by processing experimental data obtained within frictional interaction of a cutter head slide made of steel SHX15 with such thermoplastics as HDP and HPP, polypropylene, polyformaldehyde, polymethylmethacrylate, polystyrene. A number of new tribotechnical characteristics have been introduced, contributing to more detailed characterization of the frictional interaction in the metal-thermoplastics system.

**Keywords:** mathematical model, friction, thermoplastics, temperature, frictional interaction

**For citation:** Breki A.D., Chulkin S.G., Shalygin M.G. Analytical representation of the dependences of the coefficient of friction on temperature during the frictional interaction of a steel ball with thermoplastics. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no.6 (132), pp. 27-32. doi: 10.30987/2223-4608-2022-6-27-32

Известно, что термопласты относятся к полимерным материалам, которые при температурном воздействии способны обратимо переходить из твёрдого состояния в высокоэластичное, либо вязкотекучее состояние. Термопласты активно используются в качестве материалов триботехнического назначения [1]. При этом давно известно, что из-за высокой температуры, возникающей при трении на поверхности пластиков вследствие плохой их теплопроводности, развиваются физические и химические процессы на фрикционном контакте [2]. Коэффициент трения в случае приращения температуры в зоне трения термопласта с металлом изменяется по сложным зависимостям, для которых в настоящее время ещё не создано соответству-

ющих математических моделей. В связи с этим, в границах данной работы, предлагается новая математическая модель, описывающая закономерности влияния температуры на трение скольжения стали по термопластам.

В работах [3, 4] предложена следующая математическая модель, которая была использована для описания динамики изменения силы трения (во времени):

$$F_f(t) = \sum_{i=1} \frac{C_{i,1}x + C_{i,2}}{1 + \exp(-\psi_i \cdot (x - x_i))}. \quad (1)$$

Анализ данных работы [5] позволил предположить, что зависимость коэффициента трения от температуры, может быть представлена в виде (1) при  $n = 3$ , причём, при  $i = 1$ , параметры  $x_i = 0$  и  $\psi_1 = 0$ :

$$f = C_{1,1}T + C_{1,2} + \frac{C_{2,1}T + C_{2,2}}{1 + \exp(-\psi_2 \cdot (T - T_2))} + \frac{C_{3,1}T + C_{3,2}}{1 + \exp(-\psi_3 \cdot (T - T_3))}, \quad (2)$$

где  $\psi_i$  – резкость изменения коэффициента трения при  $i$ -м качественном изменении состояния фрикционного контакта ( $\psi_i = 0$ );  $C_{i,1}$  – эмпирические коэффициенты, характеризующие интенсивность изменения коэффициента трения;  $C_{i,2}$  – эмпирические коэффициенты, характеризующие уровень повышения или снижения коэффициента трения;  $T$  – температура;  $T_i$  – значения температуры, соответствующие максимальной (минимальной) интенсивности изменения коэффициента трения ( $T_i = 0$ ).

В работе [5] В.А. Мустафаевым и Ю.Я. Подольским получены важные зависимости коэффициента трения от температуры при фрикционном взаимодействии ползуна из стали ШХ15 по таким термопластам как полиэтилен низкого и высокого давления, полипропилен, полиформальдегид, полиметилметакрилат, полистирол. Условия испытаний: скольжение

стальной полусферы по плоскости термопласта со скоростью 0,01 см/с, при нагрузке 10 г в процессе постепенного повышения температуры. Авторами [5] установлены зависимости коэффициента трения от температуры в графическом виде, однако не было найдено их аналитического представления.

В данной работе реализована точная оцифровка графиков из работы [5] и осуществлена аппроксимация выявленных точек с использованием формулы (2).

На рис. 1 показаны точки, полученные при оцифровке графиков [5] для полиэтилена низкого (см. рис. 1, а) и высокого (см. рис. 1, б) давления, и соответствующие графики аппроксимирующих функций.

Аналитически, зависимость коэффициента трения от температуры при скольжении стальной сферы по полиэтилену низкого давления (см. рис. 1, а) выражается формулой:

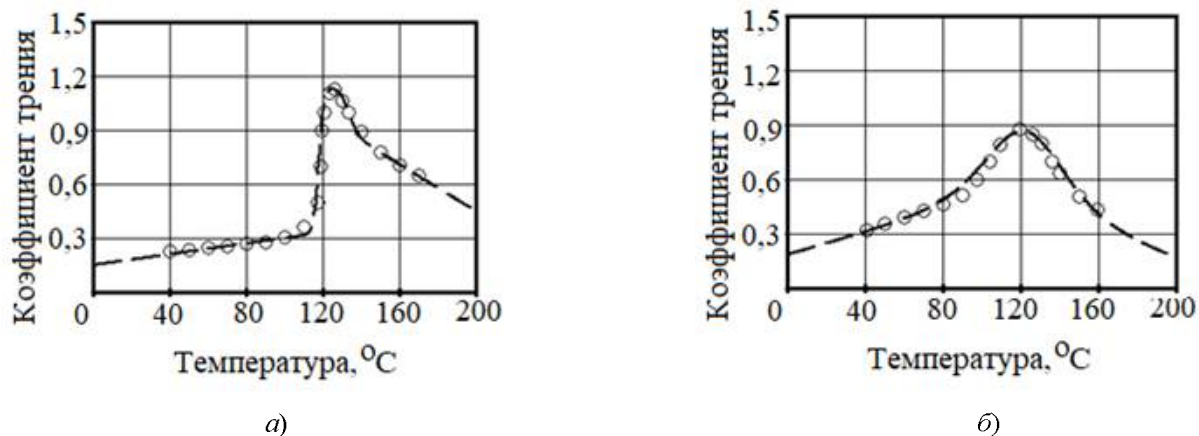


Рис. 1. Зависимости коэффициента трения от температуры при скольжении стальной сферы по полиэтилену низкого (а) и высокого (б) давления

$$f = 0,0015T + 0,15 + \frac{0,8}{1 + \exp(-0,8 \cdot (T - 118))} + \frac{-0,008T + 0,8}{1 + \exp(-0,4 \cdot (T - 133))} \quad (3)$$

Исследование функции (3) показывает, что максимальное значение коэффициента трения составляет 1,127 при температуре приблизительно 125 °С. Интегрирование (3) по всему интервалу от 0 до 200 °С и деление полученного результата на длину данного

интервала температур даёт среднее значение коэффициента трения, равное 0,45.

Аналитически, зависимость коэффициента трения от температуры при скольжении стальной сферы по полиэтилену высокого давления (см. рис. 1, б) выражается формулой:

$$f = 0,0031T + 0,184 + \frac{-0,0031T + 1,95}{1 + \exp(-0,079 \cdot (T - 117))} + \frac{-0,004T + 1,17}{1 + \exp(-0,079 \cdot (T - 128))} \quad (4)$$

Исследование функции (4) показывает, что максимальное значение коэффициента трения составляет 0,87 при температуре приблизительно 121 °С. Интегрирование (4) по всему интервалу от 0 до 200 °С и деление полученного результата на длину данного интервала температур также даёт среднее значение коэффициента трения, равное 0,45. На рис. 2 показаны точки, полученные при

оцифровке графиков [5] для полипропилена (см. рис. 2, а) и полиформальдегида (см. рис. 2, б), и соответствующие графики аппроксимирующих функций.

Аналитически, зависимость коэффициента трения от температуры при скольжении стальной сферы по полипропилену (см. рис. 2, а) выражается формулой:

$$f = 0,0005T + 0,08 + \frac{1,01}{1 + \exp(-0,3 \cdot (T - 155))} + \frac{-0,0063T + 0,8}{1 + \exp(-0,4 \cdot (T - 170))} \quad (5)$$

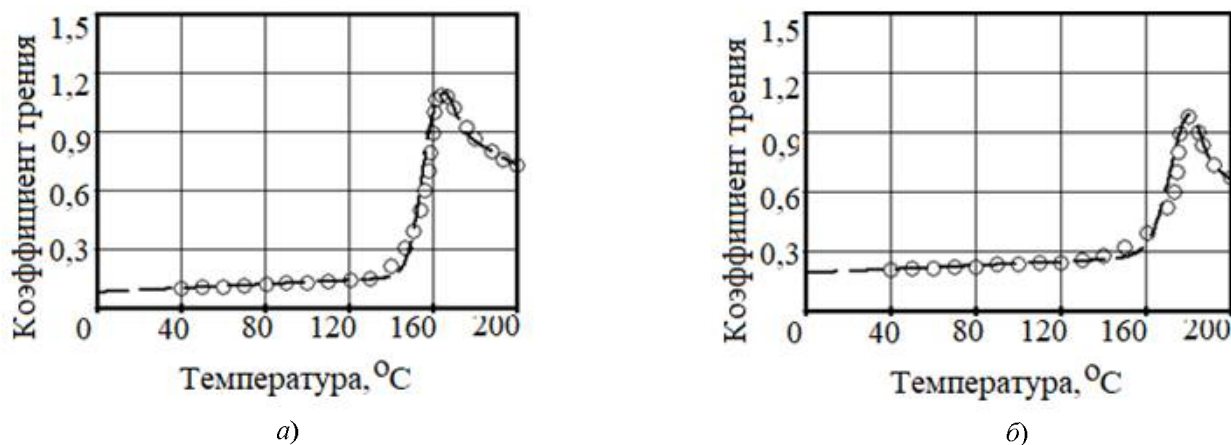


Рис. 2. Зависимости коэффициента трения от температуры при скольжении стальной сферы по полипропилену (а) и полиформальдегиду (б)

Исследование функции (5) показывает, что максимальное значение коэффициента трения составляет 1,097 при температуре приблизительно 165,5 °С. Интегрирование (5) по всему интервалу от 0 до 200 °С и деление полученного результата на длину данного интервала

температур даёт среднее значение коэффициента трения, равное 0,3.

Аналитически, зависимость коэффициента трения от температуры при скольжении стальной сферы по полиформальдегиду (см. рис. 2, б) выражается формулой:

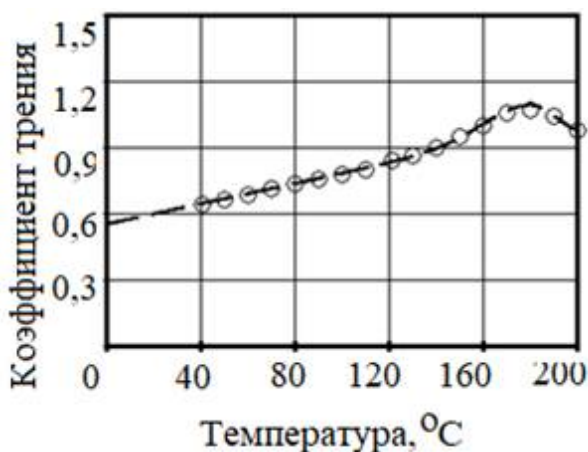
$$f = 0,00047T + 0,19 + \frac{0,89}{1 + \exp(-0,21 \cdot (T - 172))} + \frac{-0,008T + 1,09}{1 + \exp(-0,4 \cdot (T - 185))}. \quad (6)$$

Исследование функции (6) показывает, что максимальное значение коэффициента трения составляет 0,99 при температуре приблизительно 181 °С. Интегрирование (6) по всему интервалу от 0 до 200 °С и деление полученного результата на длину данного интервала температур даёт среднее значение коэффициента трения, равное 0,33.

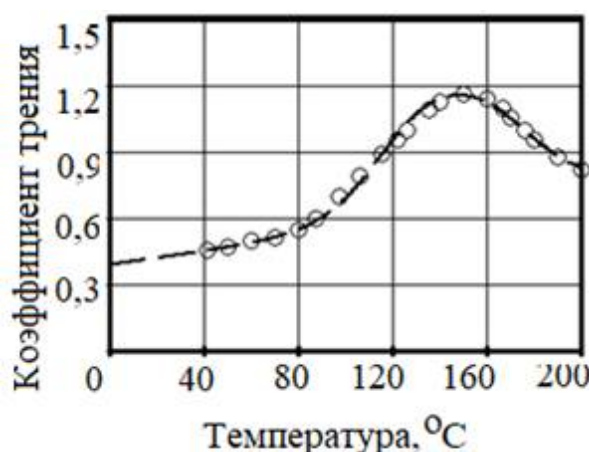
На рис. 3 показаны точки, полученные при оцифровке графиков [5] для полиметилметакрилата (см. рис. 3, а) и полистирола (см. рис. 3, б), и соответствующие графики аппроксимирующих функций.

Аналитически, зависимость коэффициента трения от температуры при скольжении стальной сферы по полиметилметакрилату (см. рис. 3, а) выражается формулой:

$$f = 0,0023T + 0,55 + \frac{0,17}{1 + \exp(-0,1 \cdot (T - 160))} + \frac{-0,0023T + 0,23}{1 + \exp(-0,19 \cdot (T - 190))}. \quad (7)$$



а)



б)

Рис. 3. Зависимости коэффициента трения от температуры при скольжении стальной сферы по полиметилметакрилату (а) и полистиролу (б)

Исследование функции (7) показывает, что максимальное значение коэффициента трения составляет 1,09 при температуре приблизительно 180 °С. Интегрирование (7) по всему интервалу от 0 до 200°С и деление полученного результата на длину данного

интервала температур даёт среднее значение коэффициента трения, равное 0,8.

Аналитически, зависимость коэффициента трения от температуры при скольжении стальной сферы по полистиролу (см. рис. 3, б) выражается формулой:

$$f = 0,0015T + 0,39 + \frac{-0,0015T + 0,87}{1 + \exp(-0,079 \cdot (T - 117))} + \frac{-0,49}{1 + \exp(-0,079 \cdot (T - 175))}. \quad (8)$$

Исследование функции (8) показывает, что максимальное значение коэффициента трения составляет 1,157 при температуре приблизительно 148 °С. Интегрирование (8) по всему интервалу от 0 до 200 °С и деление полученного результата на длину данного интервала температур даёт среднее значение коэффициента трения, равное 0,739.

Следует отметить, что первые два слагаемых в формулах (3) – (8) описывают линейный участок изменения коэффициента трения, при этом множитель  $C_{1,1}$  представляет собой интенсивность изменения коэффициента трения, а слагаемое  $C_{1,2} = f_0$  есть коэффициент трения при 0 °С.

На рис. 4 показан график интенсивности изменения коэффициента трения с ростом температуры для полиэтилена низкого давления.

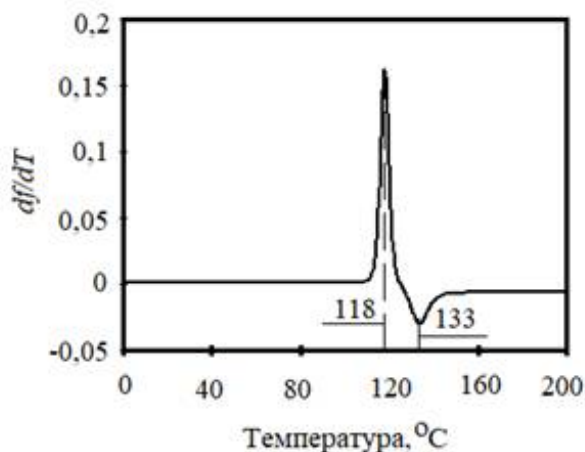


Рис. 4. Зависимости коэффициента трения от температуры при скольжении стальной сферы по полиметилметакрилату (а) и полистиролу (б)

Из рис. 4 видно, что значения температур, стоящие в формуле (3), в знаменателях третьего и четвертого слагаемого, есть температуры, соответствующие максимальной и минимальной интенсивности изменения коэффициента трения. Приведенный характер интенсивности изменения коэффициента трения (см. рис. 4) имеет место для всех рассмотренных термопластов.

Можно предположить, что на участке постоянной интенсивности изменения коэффициента трения реализуется внешнее трение твердых тел, на участке роста интенсивности реализуется трение высокоэластичного тела по твердому телу, а на участке падения интенсивности полимер переходит в вязкотекучее состояние и реализуется уже процесс внутреннего трения.

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Проведенный анализ экспериментальных результатов показывает справедливость предложенной формулы (2), описывающей зависимость коэффициента трения от температуры при фрикционном взаимодействии стального шара с термопластами.

2. В разработанной математической модели введен ряд новых триботехнических характеристик, которые позволяют более детально охарактеризовать фрикционное взаимодействие в системе «металл-термопласт».

3. Предложенная модель описывает как внешнее, так и внутреннее трение, при этом анализ интенсивности изменения коэффициента трения позволяет выявлять условия изменения состояния термопласта при фрикционном взаимодействии.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сравнительные исследования вязкоупругих и трибологических характеристик углепластиков на основе теплостойких полимерных связующих / В.Е. Юдин, В.М. Светличный, В.В. Кудрявцев и др. // Вопросы материаловедения. – 2009. – №1 (57). – С. 132-140.
2. Теория трения и износа [Текст]: [Сборник статей] // Акад. наук СССР. Науч. совет по трению и смазкам. – М: Наука, 1965. – 365 с.
3. Бреки, А.Д. Триботехнические характеристики материалов пар трения и смазочных сред в условиях самопроизвольных изменений состояний фрикционного контакта: диссертация ... д.т.н.: 05.02.04 / Бреки Александр Джалюльевич; [Место защиты: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»]. – Санкт-Петербург, 2021. – 378 с.

4. Мустафаев, В.А., Подольский, Ю.Я. Сравнительное исследование трения термопластов в широком диапазоне изменения основных параметров трения / Теория трения и износа [Текст]: [Сборник статей] // Акад. наук СССР. Науч. совет по трению и смазкам. – М: Наука, 1965. – 365 с.

## REFERENCES

1. Comparative studies of viscoelastic and tribological characteristics of carbon fiber plastics based on heat-resistant polymer binders / V. E. Yudin, V. M. Svetlichny, V. V. Kudryavtsev [et al.] // Questions of materials science. – 2009. – № 1(57). – pp. 132-140.

2. Theory of friction and wear [Text]: [Collection of articles] / Academy of Sciences of the USSR. Sci. advice on friction and lubricants. - Moscow: Nauka, 1965. - 365 p.

3. Breki A.D. Tribotechnical characteristics of materials of friction pairs and lubricants in conditions of spontaneous changes in the states of friction contact: dissertation... Doctor of Technical Sciences: 05.02.04 / Alexander Dzhalyulevich Breki; [Place of defense: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University]. - St. Petersburg, 2021. - 378 p.

4. Mustafaev V.A., Podolsky Yu.Ya. Comparative study of the friction of thermoplastics in a wide range of changes in the basic parameters of friction / Theory of friction and wear [Text]: [Collection of articles] // Academy of Sciences of the USSR. Sci. advice on friction and lubricants. - Moscow: Nauka, 1965. - 365 p.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 28.03.2022; одобрена после рецензирования 21.04.2022; принята к публикации 25.04.2022.

The article was submitted 28.03.2022; approved after reviewing 21.04.2022; assepted for publication 25.04.2022.

