

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ  
MATERIAL SCIENCE AND NANOTECHNOLOGIESdoi: 10.17586/2226-1494-2024-24-5-751-757  
УДК 541.64:539.2Влияние качества растворителя  
на трибологические свойства полимерных щетокИван Васильевич Лукиев<sup>1</sup>, Иван Викторович Михайлов<sup>2</sup>, Олег Владимирович Борисов<sup>3</sup><sup>1,3</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация<sup>1,2,3</sup> Институт высокомолекулярных соединений Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199004, Российская Федерация<sup>1</sup> [ivan.lukiev@mail.ru](mailto:ivan.lukiev@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3022-0496><sup>2</sup> [georg\\_om@mail.ru](mailto:georg_om@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-5591-1002><sup>3</sup> [oleg.borisov@univ-pau.fr](mailto:oleg.borisov@univ-pau.fr), <https://orcid.org/0000-0002-9281-9093>

## Аннотация

**Введение.** Полимерные щетки, как модифицирующие покрытия, значительно улучшают трибологические свойства различных контактирующих поверхностей. Трение, которое возникает при наложении внешней нагрузки и латеральном сдвиге полимерных щеток друг относительно друга, определяется их энергией взаимодействия и глубиной взаимопроникновения. Если щетки погружены в низкомолекулярный растворитель, силу трения можно регулировать, варьируя качество растворителя за счет изменения внешних условий: температуры, химического состава раствора и т. п. Отметим, что теоретические исследования, посвященные влиянию качества растворителя на трибологические свойства щеток, практически отсутствуют. **Метод.** Для определения влияния качества растворителя на взаимодействие плоских полимерных щеток использовались два взаимодополняющих подхода: аналитический и численный методы самосогласованного поля. В обоих случаях применялась крупнозернистая модель полимерных щеток. Качество растворителя в модели задавалось через параметр Флори–Хаггинса взаимодействия полимер–растворитель. **Основные результаты.** Проведена количественная оценка ширины зоны перекрытия, распирающего давления и силы трения, возникающей при сближении щеток друг с другом. Предложено теоретическое описание силы трения в режиме малых скоростей сдвига на основе уравнения Бринкмана для двух сжатых щеток, скользящих друг против друга. **Обсуждение.** Показано, что при постоянстве общей степени полимеризации, плотности прививки и скорости латерального сдвига щеток относительно друг друга ширина зоны перекрытия одинаково убывает с увеличением межплоскостного расстояния по степенному закону независимо от качества растворителя. В условиях сильного сжатия плоских полимерных щеток сила трения стремится к определенному предельному значению, в то время как коэффициент трения стремится к нулю в независимости от качества растворителя. В области умеренного давления коэффициент трения существенно возрастает с уменьшением растворимости привитых полимеров при одинаковых приложенной внешней нагрузке и составе плоских полимерных щеток. Аналитический метод показал высокую согласованность с данными проведенного численного моделирования. Полученные результаты позволяют прогнозировать трибологические свойства полимерных щеток в зависимости от качества растворителя и, как следствие, предсказывать влияние внешних условий на силу трения между модифицированными поверхностями.

## Ключевые слова

полимерные щетки, сила трения, метод самосогласованного поля

## Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-13-00174.

**Ссылка для цитирования:** Лукиев И.В., Михайлов И.В., Борисов О.В. Влияние качества растворителя на трибологические свойства полимерных щеток // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 5. С. 751–757. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-5-751-757

## Impact of solvent quality on tribological properties of polymer brushes

Ivan V. Lukiev<sup>1</sup>, Ivan V. Mikhailov<sup>2</sup>, Oleg V. Borisov<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

<sup>1,2,3</sup> Institute of Macromolecular Compounds RAS, Saint Petersburg, 199004, Russian Federation

<sup>1</sup> ivan.lukiev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3022-0496>

<sup>2</sup> georg\_om@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5591-1002>

<sup>3</sup> oleg.borisov@univ-pau.fr, <https://orcid.org/0000-0002-9281-9093>

### Abstract

Polymer brushes, as modifying coatings, significantly improve the tribological properties of various contacting surfaces. The friction that arises when an external load is applied and the polymer brushes laterally shift relative to each other is determined by their interaction energy and the depth of interpenetration. If the brushes are immersed in a low-molecular-weight solvent, the friction force can be controlled by varying the solvent quality through changes in external conditions, such as temperature, chemical composition of the solution, and so on. It should be noted that theoretical studies on the effect of solvent quality on the tribological properties of brushes are practically absent. To determine the influence of solvent quality on the interaction of flat polymer brushes, two complementary approaches were used: analytical and numerical self-consistent field methods. In both cases, a coarse-grained model of polymer brushes was employed. The solvent quality in the model was defined through the Flory-Huggins parameter for polymer-solvent interaction. A quantitative assessment of the overlap zone width, osmotic pressure, and friction force arising when the brushes approach each other was conducted. A theoretical description of the friction force in the low shear rate regime was proposed based on the Brinkman equation for two compressed brushes sliding against each other. It was shown that, with constant total polymerization degree, grafting density, and lateral sliding speed of the brushes relative to each other, the width of the overlap zone decreases following a power law with increasing inter-plane distance, regardless of solvent quality. Under conditions of strong compression of flat polymer brushes, the friction force approaches a certain limiting value, while the friction coefficient tends to zero, independent of solvent quality. In the moderate pressure region, the friction coefficient significantly increases with a decrease in the solubility of the grafted polymers under the same applied external load and the composition of the flat polymer brushes. The analytical method showed high agreement with the data from the numerical simulations. The obtained results allow for predicting the tribological properties of polymer brushes depending on solvent quality and, consequently, predicting the effect of external conditions on the friction force between modified surfaces.

### Keywords

polymer brushes, friction force, self-consistent field method

### Acknowledgements

The work was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 23-13-00174.

**For citation:** Lukiev I.V., Mikhailov I.V., Borisov O.V. Impact of solvent quality on tribological properties of polymer brushes. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 5, pp. 751–757 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-5-751-757

### Введение

Полимерные щетки — нанослой, состоящие из полимерных цепей, одним концом химически привитых к непроницаемой поверхности. Модификация контактирующих поверхностей полимерными щетками позволяет значительно улучшить их трибологические свойства, снижая трение между поверхностями на несколько порядков. Системы, состоящие из двух параллельных взаимодействующих полимерных щеток, привлекают к себе особое внимание [1]. Теоретические [2–4] и экспериментальные [5, 6] работы, а также исследования с помощью компьютерного моделирования [2, 7, 8], преимущественно сосредоточены на изучении взаимодействия полимерных щеток при их сжатии под внешней нагрузкой. Так, например, в работе [7] изучено влияние полидисперсности на взаимопроникновение в сжатых щетках. Установлено, что, в отличие от монодисперсных щеток, где ширина зоны взаимопроникновения увеличивается при сжатии, для умеренно полидисперсных щеток она практически не зависит от межплоскостного расстояния. В случае сильно полидисперсных щеток их взаимопроникновение снижается при уменьшении межплоскостного расстояния. В работе [8] показано, что с увеличением внешнего давле-

ния коэффициент трения между взаимодействующими плоскими полимерными щетками уменьшается в условиях атермического растворителя. Помимо давления, взаимодействие полимерных щеток, и, как следствие, возникающее между ними трение можно регулировать, изменяя химическое строение прививаемых полимеров и качество растворителя, в который они погружены.

Цель настоящей работы — изучение влияния качества растворителя на взаимодействие плоских полимерных щеток, а именно: ширину зоны перекрывания, распирающее давление, силу трения и коэффициент трения. Для реализации этой цели использованы теоретические подходы, разработанные в рамках аналитической теории самосогласованного поля (ССП), и численное моделирование методом Схойтенса–Флира.

### Модель и метод

Рассмотрим полимерную систему, состоящую из линейных полимерных щеток, цепи которых погружены в низкомолекулярный растворитель. Каждая полимерная цепь состоит из  $N$  одинаковых мономерных единиц (в настоящей работе  $N = 500$ ); цепи прививаются к поверхности с плотностью прививки  $\sigma$  ( $\sigma = 0,1$ ), определяемой как количество привитых полимерных цепей

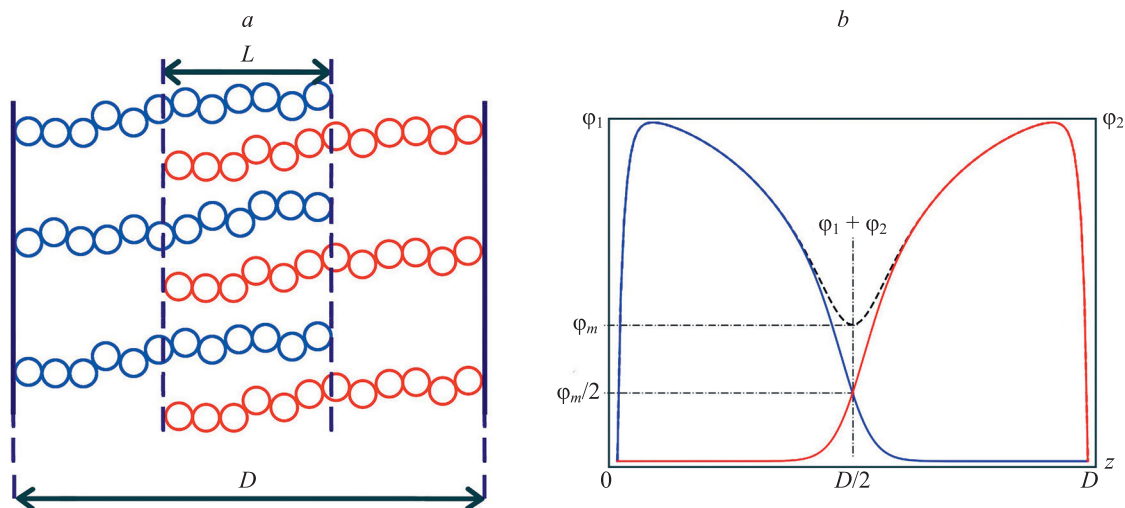


Рис. 1. Схематическое изображение моделируемой системы (а) и пример распределения объемной доли привитых полимеров (b).

$\varphi_{1,2}$  — объемные доли первого и второго полимера соответственно,  $\varphi_m$  — срединная плотность полимерной системы,  $z$  — расстояние от поверхности прививки

Fig. 1. Schematic representation of the modeling system (a) and the example of volume fraction distribution of grafted polymers (b) where  $\varphi_{1,2}$  are the volume fractions of the first and second polymers, respectively,  $\varphi_m$  is the mid-plane density of the polymer system, and  $z$  is the distance from grafting surface

на единицу площади поверхности. Цепи прививались к двум параллельным плоским поверхностям, расположенным на расстоянии  $D$  друг от друга (рис. 1).

Когда полимерные щетки сближаются на достаточное расстояние, привитые цепи противоположных щеток начинают перекрываться. Параметр  $L$  представляет собой ширину зоны перекрывания.

Для описания энергетической несовместимости молекул мономерных звеньев привитых цепей и молекул растворителя использоваться параметр Флори–Хаггинса  $\chi$ , значения которого менялись от 0 до 1 с шагом 0,25.

В качестве инструмента моделирования применен одноградиентный численный метод ССП Схойтенса–Флира. Применение данного метода для исследования полимерных щеток и его алгоритм подробно описаны в работах [9–11].

Метод ССП основан на использовании пространственной решетки, учитывает геометрию и симметрию рассматриваемой системы. В рамках метода блуждание полимерных цепей осуществляется на кубической решетке. В ходе итерационной процедуры происходит расчет статистической суммы по всем возможным конформациям привитых цепей и осуществляется минимизация свободной энергии системы. Размер ячейки решетки принят равным линейному размеру мономерного звена  $a$ . Каждая ячейка может быть занята мономерной единицей или молекулой растворителя. Ячейки решетки организованы в виде плоских слоев, параллельных к поверхности прививки. В пределах одного слоя на расстоянии  $z$  от поверхности прививки объемные доли мономерных звеньев и химический потенциал считаются однородными. В качестве единицы длины в работе использован размер мономерного звена  $a$ , в качестве единицы энергии —  $k_B T$ , где  $k_B$  — константа Больцмана,  $T$  — абсолютная температура.

Расчеты ССП выполнены с помощью программы *sfbox*, разработанной в лаборатории физической и коллоидной химии Вагенингенского университета (Нидерланды).

### Результаты и обсуждение

Коэффициент трения  $\mu$  в общем случае определим как отношение силы трения  $f$  между латерально скользящими друг относительно друга щетками к нормальному давлению  $\Pi$ , при котором поверхности прививки сближаются на расстояние

$$\mu(D) = \frac{f(D)}{\Pi(D)}. \tag{1}$$

Согласно теории Бринкмана [8] для протекаемой модели полимерных щеток, погруженных в низкомолекулярный растворитель, сила трения может быть рассчитана по формуле [8]:

$$f(D) = \eta V \int_0^D \frac{\varphi_1^2(z)\varphi_2^2(z)}{\varphi_1^2(z) + \varphi_2^2(z)} dz, \tag{2}$$

где  $\eta$  — коэффициент трения, приходящийся на один контакт между любыми двумя мономерными звеньями;  $V$  — скорость латерального сдвига поверхностей прививки.

Распределение объемной доли мономерных звеньев в зоне контакта полимерных щеток можно описать с помощью срединной плотности  $\varphi_m = \varphi_{1,2}(D/2)$  (рис. 1, b) [8]:

$$\varphi_{1,2}(z) = \frac{\varphi_m}{2} \left[ 1 \pm \tanh\left(\frac{\varphi_m^2(z - D/2)}{2\Gamma}\right) \right], \tag{3}$$

где  $\Gamma$  — интеграл перекрывания. Подставляя уравнение (3) в уравнение (2), легко показать, что

$$f(D) = \frac{\pi - 2}{4} \eta VT. \quad (4)$$

Интеграл перекрытия  $\Gamma$  определяется как

$$\Gamma = \int_0^D \varphi_1(z) \varphi_2(z) dz. \quad (5)$$

Уравнение (5) может быть записано через срединную плотность и ширину зоны перекрытия щеток:

$$\Gamma = kL\varphi_m^2, \quad (6)$$

где  $k$  — некоторый коэффициент пропорциональности, который зависит от способа определения ширины зоны перекрытия. В настоящей работе в дальнейшем под  $L$  будем понимать удвоенный первый момент распределения объемной доли мономерных звеньев, проникающих в противоположную щетку за срединной плоскостью:

$$L(D) = 2 \frac{\int_0^{D/2} \varphi_1(z) z dz}{\int_0^{D/2} \varphi_1(z) dz}.$$

В работе [12] в рамках аналитической теории ССП было показано, что данная скейлинговая зависимость,

$$L(D) \approx a^{4/3} N^{2/3} D^{-1/3}, \quad (7)$$

не чувствительна к качеству растворителя, что также подтверждается выполненным численным моделированием (рис. 2).

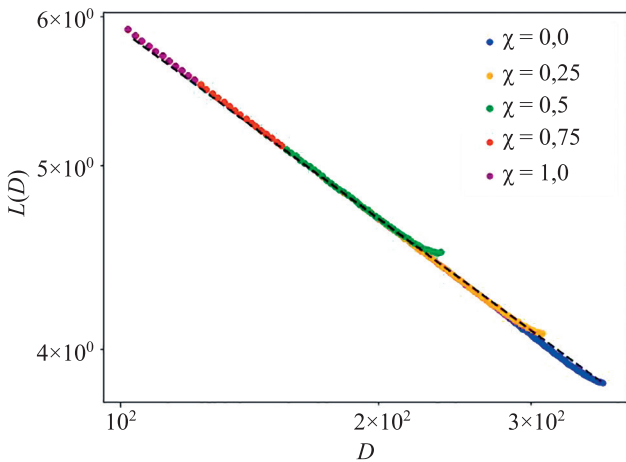


Рис. 2. Ширина зоны перекрытия взаимодействующих щеток, как функция межплоскостного расстояния ( $N = 500$ ,  $\sigma = 0,1$ ) в логарифмических координатах.

$\chi$  отображает энергетическую несовместимость молекул мономерных звеньев привитых цепей и молекул растворителя. Точками обозначены данные численного моделирования.

Пунктирная линия соответствует зависимости  $L(D) = 0,435 N^{2/3} D^{-1/3}$

Fig. 2. Overlapping zone width of interacting brushes as a function of interplanar distance ( $N = 500$ ,  $\sigma = 0.1$ ) in logarithmic coordinates. Dots indicate numerical simulation data.  $\chi$  represents the energetic incompatibility between the monomeric units of grafted chains and the solvent molecules.

The dotted line corresponds to the dependence  $L(D) = 0,435 N^{2/3} D^{-1/3}$

Чтобы определить срединную плотность в работе [7] предложен следующий теоретический прием. Предположим, что одна из щеток сжимается не аналогичной щеткой, а непроницаемой стенкой. Рассчитаем плотность возле этой стенки на расстоянии  $d = D/2$  от поверхности прививки:

$$\varphi_m = \varphi_0(d) + \frac{1}{d} \int_0^{H_0} \varphi_0(z) dz, \quad (8)$$

где  $\varphi_0(z)$  и  $H_0$  — профиль объемной доли и толщина несжатой щетки.

Профиль  $\varphi_0(z)$  найдем на основе профиля химического потенциала  $U(z)$ . При условии «сильного», но при этом гауссового растяжения привитых цепей в [12] показано, что эффективный химический потенциал для полимерных щеток имеет параболическую форму:

$$U(z) = \frac{3\pi^2}{8N^2} (H_0^2 - z^2). \quad (9)$$

По определению химический потенциал — вариация профиля плотности осмотической части свободной энергии  $f_{init}$  по профилю объемной доли:

$$U(z) = \frac{\delta f_{init}[\varphi_0(z)]}{\delta \varphi_0(z)}. \quad (10)$$

Отметим, что осмотическая часть свободной энергии определяется через объемную долю полимера и параметр Флори–Хаггинса:

$$f_{init}(\varphi) = (1 - \varphi) \ln(1 - \varphi) + \varphi(1 - \varphi) \chi - (\chi - 1) \varphi. \quad (11)$$

Совокупность уравнений (8)–(11) позволяет аналитически рассчитать срединную плотность как функцию межплоскостного расстояния. Данная зависимость также демонстрирует высокую согласованность с результатами прямого моделирования (рис. 3, a).

С учетом уравнений (6) и (7) срединная плотность также дает возможность рассчитать интеграл перекрытия по формуле:

$$\Gamma = 0,2 N^{2/3} D^{-1/3} \varphi_m^2. \quad (12)$$

Коэффициент 0,2 отвечает наилучшему соответствию между численным и аналитическим методами (рис. 3, b).

Рассчитаем аналитически зависимость распирающего давления от межплоскостного расстояния [8]:

$$\Pi(D) = \varphi_m(D) \frac{\partial f_{init}[\varphi_m(D)]}{\partial \varphi_m(D)} - f_{init}[\varphi_m(D)]. \quad (13)$$

В численном моделировании распирающее давление может быть напрямую рассчитано через производную свободной энергии на единицу площади прививки  $F(D)$ :

$$\Pi(D) = - \frac{\partial F(D)}{\partial D}. \quad (14)$$

Отметим, что значения распирающего давления, полученные аналитически (13) и на основе численного моделирования (14) согласуются (рис. 3, c).

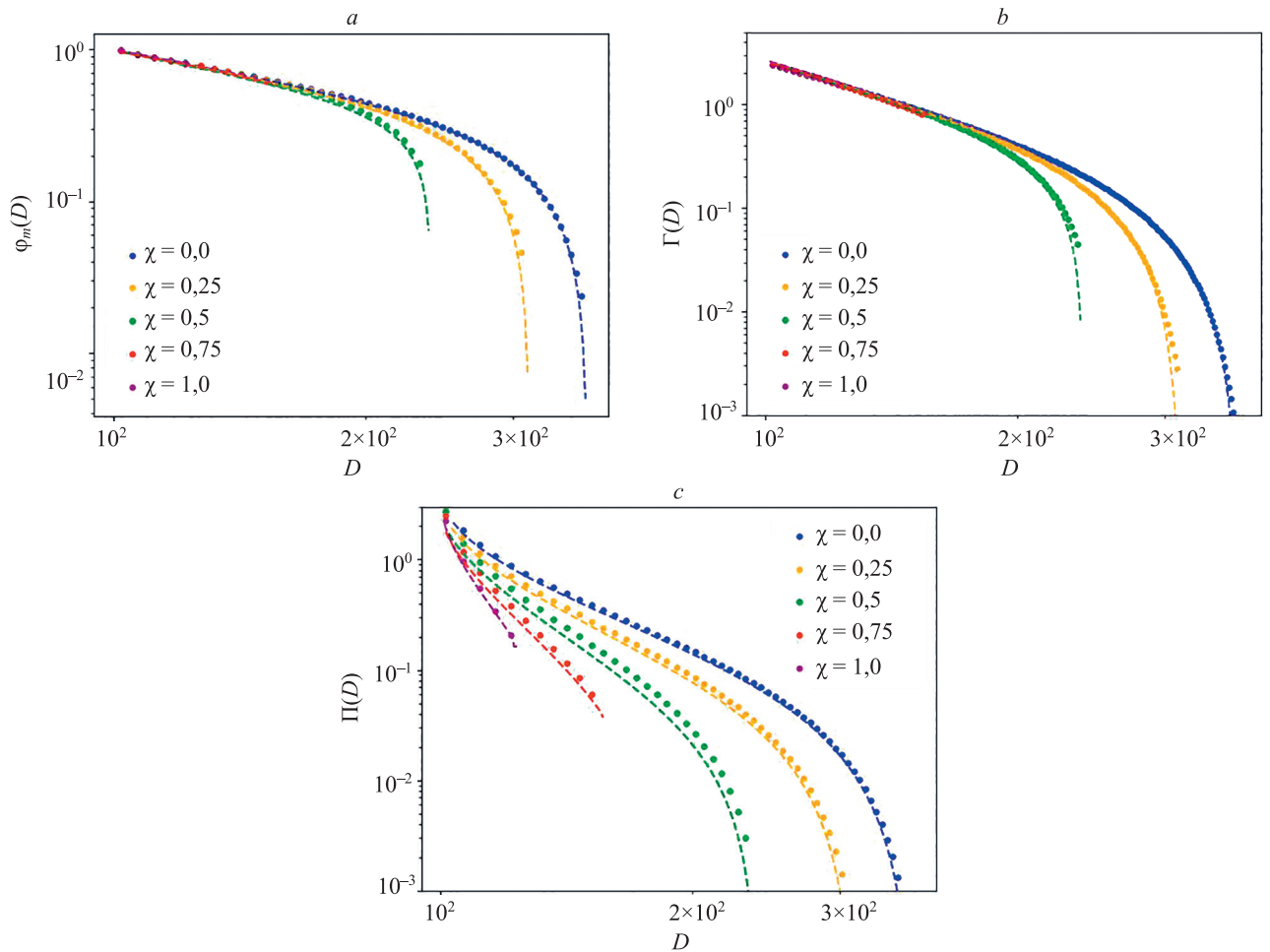


Рис. 3. Серединная плотность (а), интеграл перекрытия (b) и распирающее давление (с), как функции межплоскостного расстояния в логарифмических координатах. Точками обозначены данные численного моделирования, пунктирными линиями — аналитические зависимости,  $N = 500$ ,  $\sigma = 0,1$

Fig. 3. Mid-plane density (a), overlap integral (b), and disjoining pressure (c) as a function of interplanar distance in logarithmic coordinates. Hereinafter, dots indicate numerical simulation data, dotted lines are analytical dependences,  $N = 500$ ,  $\sigma = 0.1$

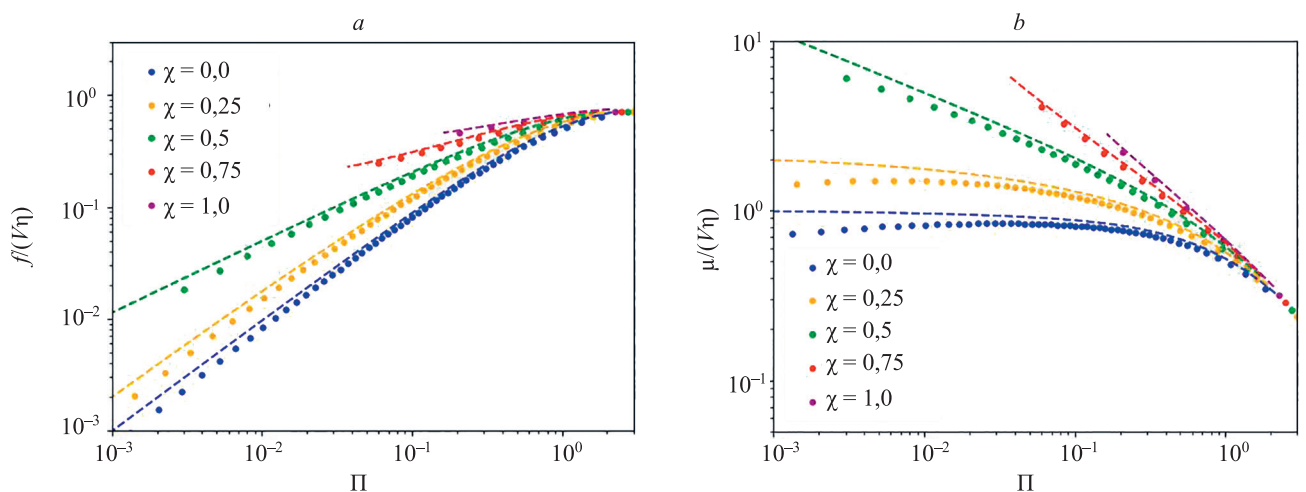


Рис. 4. Зависимости приведенной силы трения, приходящейся на единицу площади поверхности прививки, от приложенной нагрузки (равной нормальному распирающему давлению) в логарифмических координатах (а) и приведенного коэффициента трения от приложенного нормального сжимающего щетки давления в логарифмических координатах (b)

Fig. 4. Dependences of the reduced friction force per unit area of the grafting surface on the applied load (equal to the normal expanding pressure) in logarithmic coordinates (a) and the friction coefficient vs. the applied normal compressive pressure of the brush in logarithmic coordinates (b)

Таким образом, замкнутая система уравнений (1), (4), (8)–(13) позволяет аналитически получить зависимости силы трения и коэффициента трения от приложенной нагрузки. Уравнения (2) и (14) описывают те же данные из численного моделирования (рис. 4).

Исходя из зависимостей (рис. 4), можно сделать вывод, что при сильном сжатии щеток сила трения стремится к некоторому предельному значению, а коэффициент трения к нулю вне зависимости от качества растворителя. В области умеренного сжатия щеток коэффициент трения увеличивается по мере изменения качества растворителя от атермического и далее к тета условиям и условиям плохого растворителя. Данные выводы справедливы при постоянной плотности прививки и степени полимеризации привитых цепей, а также при фиксированной скорости латерального сдвига щеток относительно друг друга.

Для аналитического расчета всех приведенных характеристик взаимодействующих щеток от комбинации параметров  $N$ ,  $\sigma$ ,  $\chi$  была написана библиотека на языке Python<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://github.com/IvanMikhailovIMCRAS/ascf.git> (дата обращения: 10.06.2024).

## Заключение

С помощью метода самосогласованного поля рассмотрено взаимодействие полимерных щеток из линейных макромолекул в растворе при вариации качества растворителя (атермический, хороший, тета и плохой). В условиях постоянства плотности прививки, общей степени полимеризации и скорости относительного латерального сдвига щеток ширина зоны перекрытия одинаково зависит от межплоскостного расстояния  $D$  для всех случаев (убывает по степенному закону  $-1/3$  формула (7)). В области сильного давления сила трения стремится к некоторому предельному значению, а коэффициент трения к нулю вне зависимости от качества растворителя. В области умеренного давления коэффициент трения увеличивается по мере ухудшения качества растворителя (увеличения  $\chi$ ).

Полученные результаты позволяют прогнозировать трибологические свойства полимерных щеток в зависимости от качества растворителя и таким образом открывают возможности управления этими свойствами. Предполагается дальнейшее изучение влияния архитектуры привитых макромолекул на взаимодействие полимерных щеток описанным методом.

## Литература

1. Kreer T. Polymer-brush lubrication: a review of recent theoretical advances // *Soft Matter*. 2016. V. 12. N 15. P. 3479–3501. <https://doi.org/10.1039/C5SM02919H>
2. Wijmans C.M., Zhulina E.B., Fleer G.J. Effect of free polymer on the structure of a polymer brush and interaction between two polymer brushes // *Macromolecules*. 1994. V. 27. N 12. P. 3238–3248. <https://doi.org/10.1021/ma00090a017>
3. Milner S.T. Hydrodynamic penetration into parabolic brushes // *Macromolecules*. 1991. V. 24. N 12. P. 3704–3705. <https://doi.org/10.1021/ma00012a036>
4. Harden J.L., Cates M.E. Deformation of grafted polymer layers in strong shear flows // *Physical Review E*. 1996. V. 53. N 4. P. 3782–3787. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.53.3782>
5. Pelletier E., Stamouli A., Belder G.F., Hadziioannou G. Adsorption kinetics of an asymmetric diblock copolymer: A surface forces apparatus study // *Langmuir*. 1997. V. 13. N 7. P. 1884–1886. <https://doi.org/10.1021/la960884t>
6. Drobek T., Spencer N.D., Heuberger M. Compressing PEG brushes // *Macromolecules*. 2005. V. 38. N 12. P. 5254–5259. <https://doi.org/10.1021/ma0504217>
7. Klushin L.I., Skvortsov A.M., Qi S., Kreer T., Schmid F. Polydispersity effects on interpenetration in compressed brushes // *Macromolecules*. 2019. V. 52. N 4. P. 1810–1820. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.8b02361>
8. Klushin L.I., Ivanova A.S., Polotsky A.A., Skvortsov A.M. Interpenetration and friction of brush-coated surfaces under external load: analytical theory and SCF calculations // *Macromolecules*. 2023. V. 56. N 13. P. 5188–5200. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.3c00458>
9. Fleer G.J., Cohen-Stuart M.A., Scheutjens J.M.H.M., Cosgrove T., Vincent B. *Polymers at Interfaces*. Chapman & Hall, 1993. 502 p.
10. Wijmans C.M., Scheutjens J., Zhulina E.B. Self-consistent field theories for polymer brushes: lattice calculations and an asymptotic analytical description // *Macromolecules*. 1992. V. 25. N 10. P. 2657–2665. <https://doi.org/10.1021/ma00036a016>
11. de Vos W.M., Leermakers F.A.M. Modeling the structure of a polydisperse polymer brush // *Polymer*. 2009. V. 50. N 1. P. 305–316. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2008.10.025>
12. Zhulina E.B., Borisov O.V., Priamitsyn V.A. Theory of steric stabilization of colloid dispersions by grafted polymers // *Journal of*

## References

1. Kreer T. Polymer-brush lubrication: a review of recent theoretical advances. *Soft Matter*, 2016, vol. 12, no. 15, pp. 3479–3501. <https://doi.org/10.1039/C5SM02919H>
2. Wijmans C.M., Zhulina E.B., Fleer G.J. Effect of free polymer on the structure of a polymer brush and interaction between two polymer brushes. *Macromolecules*, 1994, vol. 27, no. 12, pp. 3238–3248. <https://doi.org/10.1021/ma00090a017>
3. Milner S.T. Hydrodynamic penetration into parabolic brushes. *Macromolecules*, 1991, vol. 24, no. 12, pp. 3704–3705. <https://doi.org/10.1021/ma00012a036>
4. Harden J.L., Cates M.E. Deformation of grafted polymer layers in strong shear flows. *Physical Review E*, 1996, vol. 53, no. 4, pp. 3782–3787. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.53.3782>
5. Pelletier E., Stamouli A., Belder G.F., Hadziioannou G. Adsorption kinetics of an asymmetric diblock copolymer: A surface forces apparatus study. *Langmuir*, 1997, vol. 13, no. 7, pp. 1884–1886. <https://doi.org/10.1021/la960884t>
6. Drobek T., Spencer N.D., Heuberger M. Compressing PEG brushes. *Macromolecules*, 2005, vol. 38, no. 12, pp. 5254–5259. <https://doi.org/10.1021/ma0504217>
7. Klushin L.I., Skvortsov A.M., Qi S., Kreer T., Schmid F. Polydispersity effects on interpenetration in compressed brushes. *Macromolecules*, 2019, vol. 52, no. 4, pp. 1810–1820. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.8b02361>
8. Klushin L.I., Ivanova A.S., Polotsky A.A., Skvortsov A.M. Interpenetration and friction of brush-coated surfaces under external load: analytical theory and SCF calculations. *Macromolecules*, 2023, vol. 56, no. 13, pp. 5188–5200. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.3c00458>
9. Fleer G.J., Cohen-Stuart M.A., Scheutjens J.M.H.M., Cosgrove T., Vincent B. *Polymers at Interfaces*, Chapman & Hall, 1993, 502 p.
10. Wijmans C.M., Scheutjens J., Zhulina E.B. Self-consistent field theories for polymer brushes: lattice calculations and an asymptotic analytical description. *Macromolecules*, 1992, vol. 25, no. 10, pp. 2657–2665. <https://doi.org/10.1021/ma00036a016>
11. de Vos W.M., Leermakers F.A.M. Modeling the structure of a polydisperse polymer brush. *Polymer*, 2009, vol. 50, no. 1, pp. 305–316. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2008.10.025>
12. Zhulina E.B., Borisov O.V., Priamitsyn V.A. Theory of steric stabilization of colloid dispersions by grafted polymers. *Journal of*

Colloid and Interface Science. 1990. V. 137. N 2. P. 495–511. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(90\)90423-L](https://doi.org/10.1016/0021-9797(90)90423-L)

*Colloid and Interface Science*, 1990, vol. 137, no. 2, pp. 495–511. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(90\)90423-L](https://doi.org/10.1016/0021-9797(90)90423-L)

#### Авторы

**Лукиев Иван Васильевич** — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; инженер, Институт высокомолекулярных соединений Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199004, Российская Федерация, [sc 57386570500](https://orcid.org/0000-0003-3022-0496), <https://orcid.org/0000-0003-3022-0496>, [ivan.lukiev@mail.ru](mailto:ivan.lukiev@mail.ru)

**Михайлов Иван Викторович** — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт высокомолекулярных соединений Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199004, Российская Федерация, [sc 56288088800](https://orcid.org/0000-0001-5591-1002), <https://orcid.org/0000-0001-5591-1002>, [georg\\_om@mail.ru](mailto:georg_om@mail.ru)

**Борисов Олег Владимирович** — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией, ведущий научный сотрудник, Институт высокомолекулярных соединений Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199004, Российская Федерация; профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 7005214753](https://orcid.org/0000-0002-9281-9093), <https://orcid.org/0000-0002-9281-9093>, [oleg.borisov@univ-pau.fr](mailto:oleg.borisov@univ-pau.fr)

#### Authors

**Ivan V. Lukiev** — PhD Student, ITMO University, 197101, Russian Federation; Engineer, Institute of Macromolecular Compounds RAS, Saint Petersburg, 199004, Russian Federation, [sc 57386570500](https://orcid.org/0000-0003-3022-0496), <https://orcid.org/0000-0003-3022-0496>, [ivan.lukiev@mail.ru](mailto:ivan.lukiev@mail.ru)

**Ivan V. Mikhailov** — PhD (Physics & Mathematics), Senior Researcher, Institute of Macromolecular Compounds RAS, Saint Petersburg, 199004, Russian Federation, [sc 56288088800](https://orcid.org/0000-0001-5591-1002), <https://orcid.org/0000-0001-5591-1002>, [georg\\_om@mail.ru](mailto:georg_om@mail.ru)

**Oleg V. Borisov** — D.Sc. (Physics & Mathematics), Professor, Head of Laboratory, Leading Researcher, Institute of Macromolecular Compounds RAS, Saint Petersburg, 199004, Russian Federation; Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 7005214753](https://orcid.org/0000-0002-9281-9093), <https://orcid.org/0000-0002-9281-9093>, [oleg.borisov@univ-pau.fr](mailto:oleg.borisov@univ-pau.fr)

*Статья поступила в редакцию 19.06.2024*  
*Одобрена после рецензирования 12.07.2024*  
*Принята к печати 21.09.2024*

*Received 19.06.2024*  
*Approved after reviewing 12.07.2024*  
*Accepted 21.09.2024*



Работа доступна по лицензии  
Creative Commons  
«Attribution-NonCommercial»