

изменялась в пределах от  $C = 2 \cdot 10^{-3}$  до  $10^{-1}$  моль/нм<sup>2</sup>. Были получены качественно аналогичные результаты как и в случае Т-Т переноса энергии на поверхности немодифицированного силохрома С-80. Из кинетики тушения фосфоресценции эритрозина антраценом была вычислена константа скорости тушения триплетных состояний донора  $k_{T-T} = 5,4 \cdot 10^9$  моль<sup>-1</sup>нм<sup>2</sup>с<sup>-1</sup>.

Из анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы. Химическое модифицирование поверхности кремнезема Н-алкильными группами увеличивает адсорбционную емкость сорбента. Углеродородные группы равномерно покрывают поверхность кремнезема. Ароматические углеводороды физически сорбируются на поверхности ХМК и могут перемещаться в псевдожидкостном слое.

### Список литературы

1. Turro N.J., Zimmt M.B., Gould L.R. Triplet Energy Transfer as a Probe of Surface Diffusion rates: A Time-Resolved Diffuse reflectance Transient Absorption Spectroscopy Study // J. Amer. Chem. Soc. — 1985. — Vol. 107. — № 20. — P. 5826–5827.
2. Kamat P.V., Ford W.E. Photochemistry on Surface: Triplet-Triplet Energy Transfer on Colloidal TiO Particles // Chem. Phys. Lett. — 1987. — Vol. 135. — № 4–5. — P. 421–426.
3. Паркер С. Фотолуминесценция растворов. — М.: Мир, 1972. — 510 с.
4. Киселев А.В. Межмолекулярные взаимодействия в адсорбции и хроматографии. — М.: Высш. шк., 1986. — 359 с.
5. Эткинс Э. Физическая химия. — М.: Мир, 1980. — Т. 2. — С. 502.
6. Ибраев Н.Х. Люминесценция и динамика электронных возбуждений в молекулярных конденсированных средах. — Алматы, 1998. — 32 с.
7. De Mayo P., Nataryan L.V., Ware W.K. Surface Photochemistry. The Effect of Surface Modification on the Singlet Quenching of Pyrene Adsorbed on Silica Gel by L-bromonaphtalene // Chem. Phys. Lett. — 1984. — Vol. 107. — № 2. — P. 187–192.
8. Лисичкин Г.В., Кудрявцев Г.В., Сердан А.А. и др. Модифицированные кремнеземы в сорбции и катализе. — М.: Химия, 1986. — 237 с.
9. Айлер Р.К. Химия кремнезема: растворимость, полимеризация, коллоидные и поверхностные свойства, биохимия. — М.: Мир, 1982. — Т. 1–2. — 118 с.

УДК 538.95.405

В.М.Юров, С.А.Гученко, Н.Х.Ибраев

Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова

### СУХОЕ ТРЕНИЕ И ПОВЕРХНОСТНАЯ ЭНЕРГИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Мақалада вакуумда үйкеліс күш коэффициентін өлшеудің ерекшеліктері қарастырылады. Үйкеліс коэффициенттері және беттік керілудің температуралық тәуелділігі үшін формулалар алынды. Беттік энергиямен құрғақ үйкеліс коэффициентінің байланысына талдау жасалды. Металл-металл жұбына үйкеліс коэффициенті теориялық есептелінді. Үйкеліс жұбы үшін материал таңдау бойынша ұсыныстар берілген.

In work features of measurement of factors of a friction in vacuum are considered. Formulas for temperature dependence of a superficial tension and for friction factors are received. The analysis of communication of superficial energy with factors of a dry friction is carried out. Friction factors in steam metal-metal are theoretically calculated. Recommendations for choice materials for friction pairs are given.

### Введение

Сила трения — это совокупный эффект, возникающий в результате самых различных физических явлений: упругости, адгезии, вязкости, капиллярных сил, химических особенностей, фонованого и электростатического взаимодействий и др. В зависимости от условий может преобладать то или другое явление.

В случае сухого трения считается, что при скольжении трущихся поверхностей микронеровности задевают друг за друга. При преодолении препятствий возникают атомарные вибрации, кото-

рые в виде фононов рассеиваются, унося энергию. Кроме того, при разрыве адгезионных связей, возникающих между выступами соприкасающихся поверхностей, в металлических образцах образуются пары электрон–дырка, на возникновение которых также затрачивается энергия (этот эффект значительно слабее, чем фононное рассеяние). В случае мягких образцов возможно и разрушение микронеровностей, в этом случае механическая энергия расходуется на разрушение атомарных связей.

Основное уравнение макротрибологии — известный еще в школе закон Амонтона–Кулона. Считается, что макроскопическая площадь соприкосновения тел состоит из элементарных контактов, имеющих гораздо меньшую суммарную площадь.

Сухое трение в элементарном контакте описывается моделью Боудена–Тейбора [1]. Она использует герцевское представление об упругой деформации в месте контакта, а в качестве параметра трения служит напряжение сдвига.

Интенсивное развитие приборостроения в космонавтике, ракетной технике и в ряде других областей выдвигает задачу обеспечения надёжной работы подвижных узлов исполнительных механизмов приборов в экстремальных условиях (вакуум, высокая температура, интенсивное излучение, высокие контактные нагрузки и т. д.).

Проблема повышения надёжности исполнительных механизмов приборов в таких условиях тесно связана с вопросами триботехники, с исследованиями контактного взаимодействия взаимно перемещающихся твёрдых тел, в результате которого в зоне контакта возникают силы трения. Современная трибология располагает рядом фундаментальных теоретических и экспериментальных закономерностей, которые, безусловно, могут позволить в ближайшие годы успешно решать задачи в области сухого трения.

На сегодняшний день особое внимание уделяется таким разделам и направлениям трибологии и триботехники, как:

- разработка научных основ и практических рекомендаций, необходимых для создания износостойких антифрикционных материалов, новых технологий упрочнения и нанесения покрытий;
- создание и оптимальное использование универсальных и целевых установок машин трения при исследованиях по трибологии и в практических задачах триботехники для оценки и выбора оптимальных материалов в конкретных служебных условиях.

В связи с указанными выше направлениями на передний план выдвигаются следующие проблемы:

- повышение работоспособности материалов и узлов трения в широком диапазоне температур;
- обеспечение минимального сопротивления движению деталей подшипников скольжения;
- обеспечение экономически целесообразной долговечности узлов трения или, по возможности, равной износостойкости по сравнению с другими частями приборов при работе в различных средах;
- обеспечение минимальной разницы коэффициентов трения покоя и движения, уменьшение их величины до минимума в конкретных парах трения.

#### *Особенности работы узлов трения в условиях космического вакуума*

Использование обычных смазок в узлах трения, работающих в условиях космического вакуума, неприемлемо. Вследствие высокой упругости паров большинство жидкостей и смазок в вакууме испаряется и теряет свои смазывающие свойства. Действие температуры еще более усугубляет этот процесс.

Работу узлов трения без смазки в вакууме следует рассматривать как взаимодействие поверхностей при сухом трении. В этом случае в отличие от узлов жидкостного трения контактирующие поверхности не разделены искусственно созданной масляной пленкой, частично или полностью устраняющей контакт между ними. Однако нельзя считать, что несмазанные маслом поверхности вступают в непосредственный контакт друг с другом.

В реальных условиях поверхность узлов трения может быть покрыта окисной пленкой, которая возникает при их изготовлении, примесью чужеродных металлов, структурными дефектами и т. д. В космосе начинает играть роль модификация поверхности за счет облучения частицами высокой энергии.

Боуден с сотрудниками измерили коэффициенты трения для чистых металлов [1]. С их поверхности атомы воздуха и окисные пленки были удалены нагреванием в вакууме. Полученные коэффициенты трения колебались от 1 до 5, а для некоторых пар достигали 10 и выше, тогда как в обычных условиях они составляли менее 1. Это указывает на то, что для уменьшения коэффициента трения в вакууме необходимо модифицировать поверхность узлов трения и, в частности, использовать специальные покрытия, полученные также в условиях вакуума [2].

Процесс модификации поверхности должен заканчиваться образованием на поверхностях трения тонких слоев вторичных структур, предохраняющих материал от схватывания и задигов, а также равновесной шероховатости, необходимой для обеспечения стабильного значения коэффициента трения [3].

В этой области наукой еще не вполне раскрыты механизмы самоорганизации в зоне контакта и пути воздействия на способность пар трения к самоорганизации, когда система сама формирует оптимальную микрогеометрию поверхностей, защитные пленки, перестраивает структуру поверхностных слоев металла, меняет твердость в целях сохранения нормального функционирования.

#### *Особенности измерения коэффициента трения в вакууме*

В настоящее время используются многочисленные методы испытания на трение и износ. Большое число методов и установок, среди которых лишь немногие унифицированы, приводит к неоправданным затратам труда и средств из-за несопоставимости получаемых результатов.

Отсутствие унифицированных методов испытаний объясняется сложностью процессов, происходящих при трении и износе материалов, наличием большого числа факторов, влияющих на эти процессы, а самое главное — разноречивостью взглядов и теоретических позиций, с которых рассматриваются процессы трения и износа.

Особенно трудоемки испытания в высоком вакууме, требующие сравнительно дорогого оборудования, высокой квалификации экспериментатора, больших затрат времени. Многочисленные факторы, влияющие на трение и износ, необходимость изучения их действия в совокупности и взаимовлиянии приводят к необходимости проведения большого числа опытов [4].

В таблице 1 мы приводим значения коэффициентов сухого трения в парах трения, взятые из различных литературных источников, и результаты теоретических расчетов, проведенных нами в работе [5].

Таблица 1

#### **Коэффициенты сухого трения для пар наиболее распространенных материалов**

Комбинации материалов		Коэффициент сухого трения	Теоретический коэффициент трения [5]
Алюминий	Алюминий	1,05–1,35	0,3 (1,2)
Алюминий	Низкоуглеродистая сталь	0,61	–
Латунь	Сталь	0,35	–
Кадмий	Кадмий	0,5	–
Кадмий	Хром	0,41	–
Хром	Хром	0,41	–
Медь	Медь	1,0	0,5 (1,3)
Медь	Низкоуглеродистая сталь	0,53	–
Графит	Графит (в вакууме)	0,5–0,8	–
Графит	Графит	0,1	–
Железо	Железо	1,0	0,6 (1,4)
Магний	Магний	0,6	–
Никель	Никель	0,7–1,1	0,8 (1,2)
Никель	Низкоуглеродистая сталь	0,64	–
Платина	Платина	1,2	0,6 (1,4)
Серебро	Серебро	1,4	0,4 (1,2)
Сталь	Сталь	0,8	–
Карбид вольфрама	Карбид вольфрама	0,2–0,25	–
Карбид вольфрама	Медь	0,35	–
Цинк	Цинк	0,6	–
Свинец	Свинец	–	0,1 (0,4)
Олово	Олово	–	0,2 (0,7)

Из таблицы 1 видно различие между экспериментальными и теоретическими значениями коэффициентов сухого трения. Ниже мы обсудим причины указанных различий.

*Температурная зависимость поверхностного натяжения твердых тел*

Поверхностное натяжение — основная термодинамическая характеристика слоя жидкости или твердого тела на границе раздела фаз. Поверхностное натяжение зависит от температуры. Для многих неассоциированных жидкостей (вода, расплавы солей, жидкие металлы) вдали от критической температуры хорошо выполняется линейная зависимость

$$\sigma = \sigma_0 - \alpha(T - T_0),$$

где  $\sigma$  и  $\sigma_0$  — поверхностное натяжение при температурах  $T$  и  $T_0$  соответственно;  $\alpha \approx 0,1$  мН/(м·К) — температурный коэффициент поверхностного натяжения.

Экспериментальное определение поверхностного натяжения твердых тел затруднено тем, что их молекулы (атомы) лишены возможности свободно перемещаться. Исключение составляет пластическое течение металлов при температурах, близких к точке плавления [6].

Недавно нами предложено 3 метода экспериментального определения поверхностного натяжения твердых тел — диэлектриков и магнитных материалов [7–9]. В [5] нами предложен метод экспериментального определения поверхностного осаждаемых покрытий. В [10–12] нами обсуждались некоторые вопросы, затронутые в настоящей работе.

В этой работе мы проводим анализ температурной зависимости поверхностного натяжения твердых тел на основе развитого нами подхода (см., напр., [13, 14]).

Рассмотрим сначала гомогенную поверхность, которая содержит  $\bar{N}$  поверхностных атомов (молекул) и характеризуется термодинамическим потенциалом Гиббса  $G^\circ$ . Возникновение, например, поверхностного тока плотностью  $j$  является откликом системы поверхностных электронов на внешнее электрическое поле  $E$  и имеет вид [13]

$$\Phi = \frac{1}{1 + C_1 \exp \left\{ -\frac{E_m - G^\circ / \bar{N}}{kT} \right\}}, \quad (1)$$

где  $\Phi$  — функция отклика поверхностных состояний;  $C_1 = 2\Delta S k \tau_p / \tau = const$  (смысл входящих в это выражение величин такой же, как и в [13]);  $E_m = eE$ ,  $e$  — заряд электрона.

После линеаризации (1) при  $\Phi = j$  получаем

$$j = \frac{kT}{C_1} \frac{eE}{G^\circ} \cdot \bar{N}. \quad (2)$$

Когда  $\bar{N} = const$ , мы из (2) имеем закон Ома в дифференциальной форме

$$\vec{j} = g \vec{E}, \quad (3)$$

где  $g$  — электрическая проводимость.

Приведенный пример показывает справедливость наших предпосылок, положенных в основу модели.

Если теперь в качестве функции отклика системы поверхностных атомов (молекул) взять поверхностное натяжение  $\sigma$ , то из уравнения (2) следует

$$\sigma = \beta \frac{N_S}{G^\circ}, \quad (4)$$

где  $\beta$  — некоторая постоянная;  $N_S$  — число поверхностных атомов (молекул).

В случае идеальных твердых растворов

$$G_{p-ра}^\circ = X_1 G_1^\circ + X_2 G_2^\circ + \dots + X_n G_n^\circ = \sum_{i=1}^n X_i G_i^\circ, \quad (5)$$

где  $X_i$  — мольная концентрация  $i$ -ой компоненты, причем

$$\sum_{i=1}^n X_i = 1. \quad (6)$$

Из уравнения (4) следует, что чем больше потенциал Гиббса поверхности того или иного материала, тем меньше поверхностное натяжение. А уравнения (5) и (6) совместно с (4) показывают как можно изменять поверхностное натяжение в ту или другую сторону, подбирая компоненты сплава или модифицируя поверхность путем имплантации, азотирования и т.д.

Температурная зависимость энергии Гиббса представлена выражением

$$G^0 = a + bT + cT^2, \quad (7)$$

где коэффициенты  $a$ ,  $b$ ,  $c$  для многих материалов приведены в справочниках.

Подставляя (7) в (4), получим

$$\sigma = \beta \frac{N_s}{a + bT + cT^2}. \quad (8)$$

Из (8) видно, что поверхностное натяжение твердых тел уменьшается с ростом температуры, как и в случае жидкостей или расплавов. Однако зависимость не линейная.

В большинстве случаев —  $bT \gg cT^2$  и уравнение (8) дает гиперболическую зависимость поверхностного натяжения  $\sigma$  от температуры (см. рис. 1). Отметим, что подобная зависимость справедлива для межфазной границы твердое тело — вакуум, когда величина  $N_s = \text{const}$ .

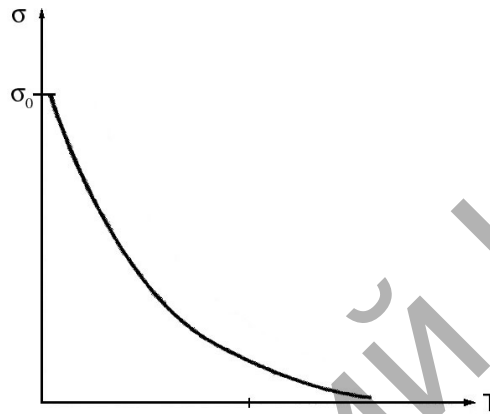


Рис. 1. Зависимость поверхностного натяжения  $\sigma$  от температуры согласно формуле (8)

Если  $N_s \neq \text{const}$ , т.е.  $N_s = f(T)$ , и происходит процесс десорбции поверхностных атомов или молекул, то зависимость поверхностного натяжения  $\sigma$  от температуры становится сложнее.

Различие в зависимости поверхностного натяжения  $\sigma$  от температуры для жидких и твердых тел обусловлено их различием в поверхностной энергии  $\omega$ .

В случае жидкостей  $\sigma$  и  $\omega$  совпадают, а в случае твердых тел — нет; они связаны уравнением Шаттльворта и Херинга [6]

$$\sigma = \omega + \Omega \left( \frac{\partial \omega}{\partial \Omega} \right)_T, \quad (9)$$

где  $\Omega$  — площадь поверхности твердого тела.

Силу сухого трения скольжения в случае молекулярного механизма можно представить в виде

$$F_{mp} = \int_L \sigma dl \approx \sigma L = kN, \quad (10)$$

где  $\sigma$  — поверхностное натяжение твердого тела;  $L$  — длина пройденного при скольжении пути;  $k$  — коэффициент трения;  $N$  — сила нормального давления.

Поскольку теоретические значения коэффициента трения в таблице 1 приведены для температур, близких к точке плавления [11], то и получились заниженные значения. Учет приведенных выше рассуждений и формул позволяет внести температурную поправку в значение коэффициента трения, которые и приведены в скобках в таблице 1.

#### *Поверхностная энергия (натяжение) и коэффициенты сухого трения*

Частицы, расположенные на поверхности, находятся в другом окружении по сравнению с частицами, находящимися в объеме фазы, т.е. взаимодействуют как с однородными частицами, так и с частицами другого рода. Следствием этого является то, что средняя энергия  $g_s$  частицы, находящейся на поверхности раздела фаз, отличается от средней энергии такой же частицы в объеме фазы  $g_v$  (причем энергия частицы на поверхности может быть как больше, так и меньше энергии частицы в объеме). Поэтому важнейшей характеристикой поверхностной фазы является поверхностная энергия  $\omega_s$  — разность средней энергии частицы, находящейся на поверхности, и частицы, находящейся в объеме фазы, умноженная на число частиц на поверхности  $N$ :

$$\omega_s = N_s (g_s - g_v); \quad (11)$$

$$\sigma = \frac{\omega_s}{S}. \quad (12)$$

Очевидно, что общая величина поверхностной энергии фазы будет определяться величиной её поверхности  $S$ . Поэтому для характеристики поверхности раздела, отделяющей данную фазу от другой, вводится понятие поверхностного натяжения (о котором мы говорили выше)  $\sigma$  — отношение поверхностной энергии к площади поверхности раздела фаз; величина поверхностного натяжения зависит только от природы обеих фаз.

Полезная информация о поверхностной энергии металлов может быть получена в рамках метода функционала плотности. При этом наиболее часто в расчетах используется модель «желе», при которой положительный заряд ионов заменяется однородным положительным фоном [15, 16]. В рамках такой модели можно вычислить работу выхода электронов, которая экспериментально определяется с приемлемой точностью. Сравнение теории с экспериментом показало, что для ряда чистых металлов метод функционала плотности действительно дает неплохие результаты [16].

Поверхностная энергия (натяжение) пропорциональна энергии связи двух атомов поверхности. Не углубляясь в тонкости расчетов, приведем известные уже результаты [17].

Т а б л и ц а 2

**Энергия связи (ккал/моль) пар атомов металлов [17]**

Металл	Ag	Cd	Cu	Mg	Sn	Pb	Zn
Ag	29,4	4,6	39,9	6,5	18,7	29,6	4,4
Cd		–	6,7	–	4,8	8,1	–
Cu			36,8	9,7	32,2	36,2	6,8
Mg				–	5,3	4,5	–
Sn					31,3	21,1	5,5
Pb						29,3	8,3
Zn							–

Ряд элементов  $M$ , упорядоченный по относительному средству  $Ag$  к  $M$ , можно представить в виде  $Pb > Sn > (Cu, Mg) > Zn > Cd$  (табл. 2). Данные таблицы позволяют установить соответствующий ряд элементов  $M$ , упорядоченный по относительному средству  $Cu$  к  $M$ :  $Pb > Sn > (Mg, Ag) > Zn > Cd$ . Таким образом, наиболее перспективными для создания антифрикционных пар трения являются сплавы из комбинации серебра или меди со свинцом или оловом.

Приведем теперь данные наших расчетов коэффициентов сухого трения в парах металлов [5].

Т а б л и ц а 3

**Теоретические значения коэффициента трения скольжения в паре металл–металл**

Пара трения	$k$	Пара трения	$k$
Свинец — свинец	0,1	Серебро — серебро	0,4
Олово — олово	0,2	Золото — золото	0,4
Железо — железо	0,6	Медь — медь	0,5
Алюминий — алюминий	0,3	Никель — никель	0,8
Кобальт — кобальт	0,7	Платина — платина	0,6

Сравнение таблиц 2 и 3 показывает полную корреляцию между поверхностной энергией (энергией связи) и коэффициентом сухого трения в паре металл–металл.

Первый вывод, который следует из такого сравнения, — нельзя использовать в антифрикционных парах трения однородные пары металлов.

На практике ситуация оказывается сложнее и в парах трения используются сплавы более сложного состава. Однако и в этом случае рассмотренная нами закономерность «работает».

Получение композиционных сплавов для изготовления пар трения — задача технически непростая, а экономически — невыгодная, поскольку износ даже в несколько микрон нередко приводит к выходу детали из работы. При этом в отходы уходит большое количество дорогостоящих сплавов.

Именно поэтому в большинстве развитых странах идут по пути не увеличения выпуска специальных сплавов, а по пути модификации поверхности пар трения путем нанесения покрытий, азотирования, нитроцементации и т.д.

Одним из приоритетных направлений современной науки и техники является разработка новых материалов, в частности, создание многокомпонентных нанокompозитных покрытий с характерным размером зерна менее 100 нм. Ожидается, что основной движущей силой научно-технического развития к середине XXI века станет нанотехнология. Сущность нанотехнологий состоит в их способности работать на атомном, молекулярном и надмолекулярном уровнях, в интервале размеров от 1 до 50 нм, для того чтобы создавать, обрабатывать и использовать материалы, устройства и системы, обладающие новыми свойствами и функциональными возможностями, благодаря малому размеру элементов их структуры [18]. С физической точки зрения переход к наносостоянию связан с появлением размерных эффектов, под которыми следует понимать комплекс явлений, обусловленных изменением свойств вещества вследствие совпадения размера блока микроструктуры и некоторой критической длины, характеризующей данное явление (длина свободного пробега электронов и фотонов, толщина стенки доменов, критический радиус дислокационной петли и др.).

Размерные эффекты проявляются, когда средний размер кристаллических зёрен составляет менее 50 нм, и наиболее отчетливо наблюдаются, когда размер зёрен приближается к величине менее 10 нм. В этой связи наноматериалы можно классифицировать по геометрической форме и размеру структурных элементов, из которых они состоят. Основными типами наноматериалов по размеру зёрен являются кластерные материалы, волоконные материалы, плёнки и покрытия, многослойные (многокомпонентные) структуры, а также объёмные нанокристаллические материалы, зерна которых имеют нанометровые размеры во всех трёх направлениях.

Необходимо отметить уникальность наноструктурированных и нанокompозитных покрытий, которая заключается в высокой объёмной доле границ раздела фаз и их прочности, в отсутствии дислокаций внутри кристаллитов и возможности изменения соотношения объёмных долей кристаллической и аморфной фаз, а также взаимной растворимости металлических и неметаллических компонентов. Так, например, наличие большой площади раздела фаз (объёмная доля которых может достигать  $\leq 50\%$ ) в нанокompозитных покрытиях и плёнках позволяет существенно изменять их свойства как путем модификации структуры и электронного строения, так и за счет легирования различными элементами [18]. Воеводин и другие (см., напр., в [18]) разработали комбинацию покрытий TiC/C и MoS<sub>2</sub> в системах с малым трением в меняющейся среде, например, в летательных аппаратах и многообразных космических аппаратах. Несмотря на достигнутые успехи, можно сказать, что мы находимся в начале пути и многие процессы, связанные с размерными эффектами, еще далеки от детального теоретического обоснования [15–18].

Второй вывод, который следует из нашего анализа, заключается в следующем: уменьшение коэффициента сухого трения возможно за счет уменьшения поверхностной энергии при использовании пар трения, у которых значительно различается работа выхода электронов. Это приводит к различию в контактной разности потенциалов и, соответственно, к уменьшению поверхностной энергии.

#### *Заключение*

Основной механизм трения в вакууме (при отсутствии смазочных пленок) — это адгезия очень малых контактных поверхностей с последующим разрушением образованных при этом адгезионных мостиков связи при сдвиге одной поверхности относительно другой.

Чрезвычайно низкая скорость восстановления поверхностных пленок в космическом вакууме за счет окисления, вызванная очень низким содержанием кислорода в окружающей среде, увеличивает трение и способствует большему износу материалов.

Вопросы, поднятые в настоящей работе, требуют дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

#### Список литературы

1. Боуден Ф.П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел. — М.: Машиностроение, 1968. — 543 с.
2. Савостиков В.М., Сергеев С.М., Табаченко А.Н. Трибологические исследования ионно-вакуумных композитных покрытий на основе карборидов и сульфидов металлов // 6 International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows: Proceedings. — Tomsk, Russia, 2002. — 23–28 Sept. — P. 606–609.

3. *Savostickov V.M., Sergeev S.M. and etc.* Technological Methods of Gradient Composite Coatings Formation in Conditions of Different Plasma Combination in a Common Vacuum Chamber // 9 International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows: Proceedings. — Tomsk, Russia, 2008. — P. 527–530.
4. *Цимбал И.Р.* Обеспечение эксплуатационных свойств пар трения приборов, работающих в экстремальных условиях: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — СПб., 2009. — 20 с.
5. *Юров В.М., Гученко С.А., Ибраев Н.Х.* Поверхностное натяжение и трение скольжения твердых тел // Вестн. КарГУ. Сер. Физика. — 2009. — № 3(55). — С. 10–18.
6. *Гохштейн А.Я.* Поверхностное натяжение твердых тел и адсорбция. — М.: Наука, 1976. — 256 с.
7. *Юров В.М. и др.* Способ измерения поверхностного натяжения твердых тел: Патент РК № 57691. — Оpubл. 15.12.2008 // Бюлл. № 12.
8. *Юров В.М. и др.* Способ измерения поверхностного натяжения и плотности поверхностных состояний диэлектриков: Патент РК № 58155. — Оpubл. 15.12.2008 // Бюлл. № 12.
9. *Юров В.М. и др.* Способ измерения поверхностного натяжения магнитных материалов: Патент РК № 58158. — Оpubл. 15.12.2008 // Бюлл. № 12.
10. *Юров В.М., Гученко С.А., Ибраев Н.Х.* К вопросу о температурной зависимости поверхностного натяжения твердых тел // Вестн. развития науки и образования. — М.: Наука, 2009. — № 5. — С. 3–10.
11. *Юров В.М., Гученко С.А., Ибраев Н.Х.* Поверхностное натяжение металлов в жидкой и твердой фазах // Научное обозрение. — М.: Наука, 2009. — № 5. — С. 31–40.
12. *Юров В.М., Гученко С.А., Ибраев Н.Х.* Поверхностное натяжение наночастиц // Научная жизнь. — М.: Наука, 2009. — № 5. — С. 14–21.
13. *Юров В.М.* Термодинамика люминесцирующих систем // Вестн. КарГУ. Сер. Физика. — 2005. — № 3(39). — С. 13–15.
14. *Юров В.М.* Магнитная восприимчивость малых частиц ферромагнетиков // Современные проблемы науки и образования. — М.: Изд-во РАЕН, 2009. — № 4. — С. 152–156.
15. *Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А. и др.* Введение в физику поверхности. — М.: Наука, 2006. — 490 с.
16. *Ролдугин В.И.* Физикохимия поверхности. — Долгопрудный: Изд. дом «Интеллект», 2008. — 568 с.
17. *Сергеев Г.Б.* Нанохимия. — М.: КДУ, 2007. — 336 с.
18. *Погребняк А.Д., Шпак А.П., Азаренков Н.А., Береснев В.М.* Структура и свойства твердых и сверхтвердых покрытий // Успехи физических наук. — 2009. — Т. 179. — № 1. — С. 35–64.