

УДК 532.614.2:539.612

## ВЛИЯНИЕ ЖИДКОСТНОГО МЕНИСКА НА ВЕЛИЧИНУ ПОВЕРХНОСТНЫХ СИЛ

О. Ю. КОМКОВ

Конденсация жидкости в зазорах между деталями микроэлектромеханических устройств и прецизионных узлов трения связана с присутствием водяных паров в атмосферном воздухе. Помимо возникновения дополнительной силы, наличие жидкостного мениска существенно влияет на величину других поверхностных сил. Численным моделированием определены величины менисковой и ван-дер-ваальсовых сил в зависимости от расстояния между телами. Теоретические зависимости используются для интерпретации экспериментальных данных, полученных с помощью контактного адгезиометра. Обсуждаются факторы, влияющие на взаимодействие поверхностей, а также использование предложенного подхода в микро- и нанотрибологии.

**Ключевые слова:** адгезия, жидкостный мениск, конденсация, ван-дер-ваальсовы силы, микроэлектромеханические системы, адгезиометр.

**Введение.** Миниатюризация подвижных узлов современных устройств, в частности, микроэлектромеханических систем (МЭМС) связана с рядом известных проблем [1—5]. Это слипание подвижных деталей в датчиках ускорения и давления, гироскопах, адаптивных зеркалах, высокочастотных ключах; повышенный коэффициент трения в электростатических преобразователях перемещений, микротурбинах и др. В большинстве случаев детали МЭМС имеют относительно большую площадь поверхности при малом расстоянии между ними, а также низкую жесткость пружинящих элементов. Как в процессе изготовления, так и при эксплуатации таких устройств на открытом воздухе в зазорах между деталями возможна конденсация жидкости с образованием менисков. Возникающая капиллярная сила, сопоставимая по величине с ван-дер-ваальсовыми и другими поверхностными силами, может стать причиной частичной или полной неработоспособности МЭМС. Конденсация жидкости между микронеровностями шероховатых поверхностей рассматривается как один из факторов, существенно влияющих на силу трения при малых нагрузках [6—10]. Для уменьшения влияния эффекта конденсации жидкости на работоспособность узлов МЭМС и прецизионных узлов трения разработан ряд самоорганизующихся мономолекулярных покрытий (СМП). Угол смачивания СМП превышает  $100^\circ$  и практически не изменяется в широком диапазоне температур [11—14]. Результаты трибологических испытаний демонстрируют высокую износостойкость таких покрытий. Недостатками СМП, связанными с их малой толщиной ( $\approx 2,5$  нм), являются деградация при повышенных температурах, а также разрушение при химическом взаимодействии с веществами, содержащимися в окружающей среде.

Другое перспективное направление работ в данной области — создание гидрофобных структур, аналогичных существующим в живой природе (лотос-эффект) [15—18]. Увеличение углов смачивания достигается за счет формирования микрорельефа с контролируемой шероховатостью поверхности. В сочетании с использованием водоотталкивающих материалов таким способом удается создавать покрытия, называемые супергидрофобными [19].

Прогнозирование работоспособности прецизионных узлов трения, эффективности разрабатываемых покрытий и поверхностных структур требует совершенствования теоретической базы, описывающей процессы образования и разрушения мениска, а также величину возникающих сил. В настоящее время предложено аналитическое описание формы поверхности мениска в зависимости от геометрии контактирующих поверхностей, расстояния между ними и условий окружающей среды [20—24]. Получены приближенные формулы для расчета силы мениска [25—27]. Рассмотрено демпфирующее действие жидкости, находящейся между сферическими поверхностями, при их малых перемещениях [28—32]. Произведена оценка времени конденсации паров жидкости [33—36]. Известны работы по исследованию влияния гравитации на форму и устойчивость мениска [37—39], имеющие

непосредственное отношение к рассматриваемой проблеме. Рядом авторов проводилось комплексное изучение сил, возникающих при образовании жидкостного мениска [40, 41].

Основными инструментами экспериментального исследования капиллярной и других поверхностных сил в настоящее время являются аппарат для измерения поверхностных сил, разработанный Израелашвили и Адамсом [42], а также атомно-силовой микроскоп (АСМ). Ранние исследования проводились с помощью высокоточных весов с обратной связью [43]. Известно, что система ортогонально расположенных перекрещивающихся цилиндров (изготовление атомарно гладкой сферы является чрезвычайно сложной задачей), используемая в аппарате поверхностных сил, при  $D \ll R$ , где  $D$  — расстояние между цилиндрами,  $R$  — радиус цилиндров, эквивалентна системе сфера — плоскость [42], характерной для АСМ. Это обстоятельство позволяет сопоставлять экспериментальные данные, полученные на различных приборах, а также использовать при расчетах известные теории контактного взаимодействия тел (Герца, Джонсона—Кендалла—Робертса, Дерягина—Муллера—Топорова). Схема сфера—плоскость наиболее часто используется при описании геометрии жидкостного мениска и определении капиллярной силы.

**Цель работы** — создание приближенной модели для расчета менисковой и ван-дер-ваальсовых сил в зависимости от расстояния между контактирующими телами при различных параметрах окружающей среды. Величина и направление ван-дер-ваальсовых сил описываются с помощью постоянной Гаммакера, зависящей как от природы контактирующих материалов, так и от свойств находящейся между ними среды [42]. Таким образом, ван-дер-ваальсовы силы для участков поверхностей, погруженных в жидкость и находящихся снаружи, должны быть различны, а суммарная сила может зависеть от размеров мениска.

**Методика эксперимента.** Экспериментальное определение величины поверхностных сил проводилось с помощью контактного адгезиометра [44—46], принцип действия которого основан на использовании крутильных весов с обратной связью. Изменение расстояния между взаимодействующими телами производится с помощью пьезоэлектрического привода, обеспечивающего субмикронное разрешение. В качестве образцов использовались полированные бронзовые цилиндры диаметром 5 мм, обладающие высокой теплопроводностью. Цилиндры были покрыты с помощью клея слоем слюды толщиной  $< 0,1$  мм. После скалывания верхнего слоя слюдяные пластины представляют собой атомарно гладкую поверхность. Слой клея заполняет зазоры между микронеровностями цилиндров, уменьшая влияние их шероховатости на состояние поверхности слюдяных пластин. Один из цилиндров был соединен с нагревательным элементом, что позволило изменять температуру в зоне контакта. Угол между скрещивающимися цилиндрами составлял  $90^\circ$ .

Фотографии жидкостного мениска были получены с помощью оптического микроскопа МБС-1, совмещенного с цифровой фотокамерой. Объем жидкости, помещенной в зазор между стальным диском и стальной сферой радиуса 2,5 мм, был искусственно увеличен. Изменение расстояния между телами производилось с помощью микрометрического винта с шагом 10 мкм.

**Факторы, определяющие характеристики мениска.** Рисунок 1 иллюстрирует взаимодействие в контакте сфера—плоскость в случае, когда поверхности обоих тел являются гидрофильными (угол смачивания  $\theta < 90^\circ$ ). Сфера 1 имеет радиус  $R$  и угол смачивания  $\theta_1$ . Угол смачивания плоской поверхности 3 —  $\theta_2$ .

Размер и форма мениска 2 характеризуются величинами  $r_1$  и  $r_2$ , называемыми основными радиусами. Соотношение между  $r_1$  и  $r_2$  описывается следующим выражением:

$$\left( \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_1} \right) = \frac{1}{r_k}, \quad (1)$$

где  $r_k$  — т. н. радиус Кельвина, определяемый из уравнения Кельвина [42]:

$$r_k = \frac{\gamma V_m}{kT \ln(p/p_s)}. \quad (2)$$

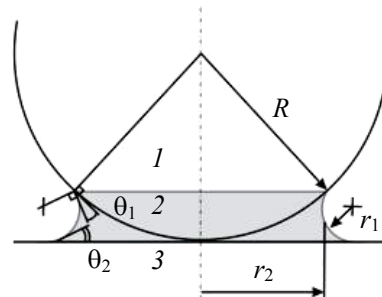


Рис. 1. Схема контакта сферы с плоскостью с образованием жидкостного мениска: 1 — сфера; 2 — мениск; 3 — плоская поверхность

Здесь  $\gamma$  — поверхностное натяжение жидкости;  $V_m$  — молярный объем жидкости (для воды  $V_m = 1,8 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>);  $k = 8,31$  Дж/(моль·К) — универсальная газовая постоянная;  $T$  — абсолютная температура в зоне контакта;  $p$  — давление паров жидкости;  $p_s$  — давление насыщенных паров.

Считая  $r_2 \gg r_1$ , принимают  $r_1 = r_k$ .

Угол  $\theta_1$  образован касательными к окружностям радиуса  $r_1$  и радиуса  $R$  в точке их пересечения. Угол  $\theta_2$  образован касательной к окружности радиуса  $r_1$  и плоскостью 3. Для рассматриваемой схемы величина  $r_2$  определяется как [9]

$$r_2 = \sqrt{2Rr_k(\cos \theta_1 + \cos \theta_2)}. \quad (3)$$

Перепад давления на границе мениска описывается уравнением Юнга—Лапласа [42]:

$$P = \gamma \left( \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_1} \right). \quad (4)$$

В рассматриваемом случае  $r_1 < 0$  и уравнение (4) запишется как

$$P = \gamma \left( \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right). \quad (5)$$

Знак величины  $P$  определяется тем, что атмосферное давление снаружи мениска превышает давление жидкости внутри мениска. С этим обстоятельством связана отрицательная кривизна его боковой поверхности. За счет перепада давлений возникает сила притяжения взаимодействующих поверхностей, равная произведению  $P$  на площадь поперечного сечения мениска в горизонтальной плоскости [22]:

$$F_m = P\pi r_2^2. \quad (6)$$

При рассмотрении системы уравнений (1), (3) и (4) была получена приближенная формула [25], позволяющая определить максимальную силу мениска при расстоянии между телами  $D = 0$ :

$$F_m = 2\pi R\gamma(\cos \theta_1 + \cos \theta_2). \quad (7)$$

Согласно данным работ [9, 42], в которых приводится уравнение (7), капиллярная сила не зависит от  $r_k$ . Так, согласно уравнениям (3)—(5), одновременно с увеличением размера мениска (в частности,  $r_2$ ) при изменении влажности происходит уменьшение  $P$ . Таким образом, сила остается неизменной. Следует заметить, что результаты АСМ экспериментов [47, 52] свидетельствуют о существенном влиянии  $r_k$  на капиллярную силу. Видимые противоречия указывают на несовершенство имеющихся в настоящее время моделей и необходимость продолжения работ в данном направлении. Выражение (7) не может быть использовано для определения поверхностных сил при изменении расстояния между контактирующими телами. В связи с этими ограничениями дальнейшие вычисления производятся с использованием выражений (2), (3) и (6) при условии  $r_2 \ll R$  [9].

Поверхностное натяжение жидкости зависит от температуры окружающей среды. Экспериментально полученная зависимость для воды (рис. 2, а) может быть аппроксимирована следующим выражением [48]:  $\gamma = (75,6 - 0,16T) \cdot 10^{-3}$  Дж/м<sup>2</sup>.

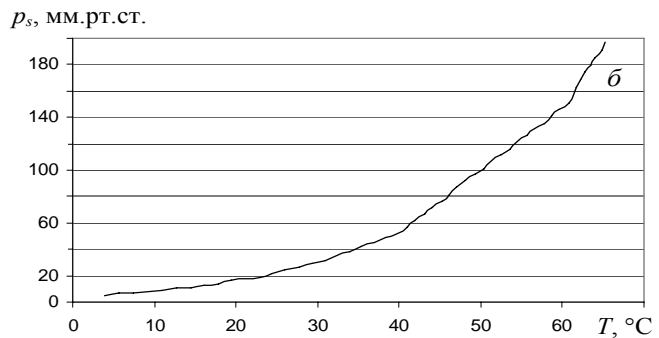
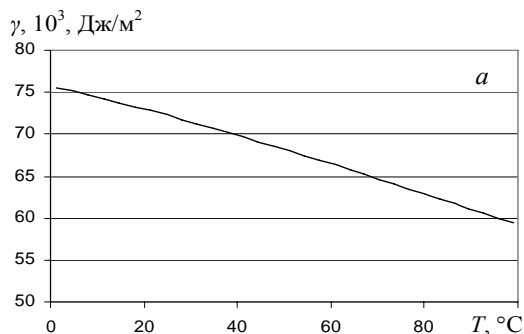


Рис. 2. Поверхностное натяжение (а) и давление насыщенных паров воды (б) при различной температуре

Другой характеристикой, зависящей от условий окружающей среды, является относительная влажность воздуха, определяемая как  $RH_{env} = p/p_s$  [49—51]. Как правило, при вычислении капиллярной силы используется значение, полученное с помощью датчиков влажности. В случае, когда температура в зоне возникновения мениска отличается от температуры окружающей среды, требуется определить локальную относительную влажность  $RH_{loc}$ , отличную от  $RH_{env}$  [52]. Алгоритм нахождения  $RH_{loc}$  следующий:

1) определяется величина  $p_s(T_{env})$  при температуре окружающей среды с использованием графика, приведенного на рис. 2, б, и аппроксимируемого выражением

$$p_s(T_{env}) = 0,0005T^3 + 0,0072T^2 + 0,1545T + 5,5656;$$

2) находится давление паров при температуре и влажности окружающей среды:

$$p = RH_{env}p_s(T_{env}); \quad (8)$$

3) определяется величина  $p_s(T_{loc})$  при температуре в области мениска.

4) рассчитывается локальная относительная влажность в зоне мениска, которая и используется в дальнейшем:

$$RH_{loc} = p/p_s(T_{loc}). \quad (9)$$

При понижении температуры в зоне мениска относительно температуры окружающей среды расчетная  $RH_{loc}$  может приближаться к единице и даже превышать это значение, что свидетельствует о конденсации сплошного слоя в зоне контакта тел. Данное явление хорошо известно как “запотевание” поверхностей, имеющих пониженную температуру. Максимальная сила мениска [27] может быть определена в этом случае как

$$F_m = 2\pi R\gamma(1 + \cos \theta_1). \quad (10)$$

В данном случае предполагается, что:

- 1) сплошной слой жидкости отсутствует ( $RH_{loc} < 1$ );
- 2) соблюдается условие  $\cos \theta_1 + \cos \theta_2 > 0$  (выражение (3));
- 3) при изменении расстояния  $D$  между телами объем жидкости в зоне контакта остается неизменным:  $dV/dD = 0$  [30]. При выполнении данного условия  $r_2$  уменьшается с увеличением  $D$  (рис. 3, а) [26], что приводит к снижению  $F_m$ ;
- 4) продолжительность нахождения тел в контакте достаточна для конденсации максимально возможного объема жидкости в зазоре между телами;
- 5) скорость изменения  $D$  достаточно мала и жидкость перераспределяется в зазоре, что приводит к изменению формы мениска. Не учитываются инерционный и демпфирующий эффекты;
- 6) не рассматривается возможность разрыва мениска под действием гравитации;
- 7) не учитывается деформация взаимодействующих тел под действием поверхностных сил [53];
- 8) не учитывается изменение формы мениска за счет возможного испарения жидкости при увеличении  $D$ ;
- 9) не учитывается изменение краевых углов  $\theta_1$  и  $\theta_2$  в зависимости от температуры (в действительности углы смачивания зависят от поверхностного натяжения жидкости).

**Капиллярная сила как функция расстояния между телами.** В целях приближенной оценки высоты мениска можно пренебречь кривизной боковой поверхности и рассматривать его как набор объемных фигур простой формы (рис. 3, б). Это цилиндр 1, имеющий объем  $V_1 = \pi r_2^2 D$ , цилиндр 2 объемом  $V_2 = \pi r_2^2 h$  и шаровой сегмент 3 объемом  $V_3 = \frac{1}{3} \pi h^2 (3R - h)$  [54]. Расстояние  $z$  определяется как  $z = \sqrt{R^2 - r_2^2}$ , тогда  $h = R - \sqrt{R^2 - r_2^2}$ . Объем мениска равен  $V(D) = V_1 + V_2 - V_3$ .

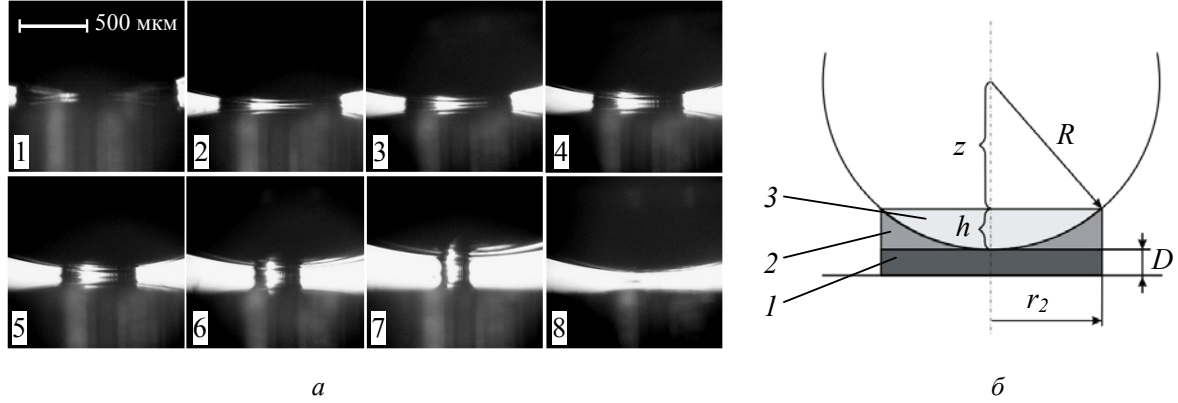


Рис. 3. Стадии изменения формы мениска (а) (на фотографиях виден как сам мениск, так и его отражение на поверхности диска) и упрощенное представление мениска (б): 1 — цилиндр; 2 — цилиндр; 3 — шаровой сегмент

В начальный момент при  $D = 0$  значение  $r_2$  определяется с помощью выражения (3);  $V_0 = V_2 - V_3$ . При увеличении зазора  $D$   $r_2$  уменьшается с шагом  $dr$  до тех пор, пока выполняется условие  $V(D) \geq V_0$ . Сила мениска определяется по формуле (6).

**Ван-дер-ваальсово взаимодействие.** Для вычисления ван-дер-ваальсовых сил при увеличении зазора  $D$  (и соответствующем уменьшении  $r_2$ ) воспользуемся подходом, предложенным Дерягиным, и представим сферу в виде набора колец равной ширины  $dr$  (рис. 4). При нахождении сил, действующих на часть сферы, погруженную в жидкость, значение  $r$  выбирается в диапазоне  $0 \leq r \leq r_2$ . Для части сферы, находящейся в воздухе,  $r_2 \leq r \leq R$ .

Расстояние  $z'$  определяется как  $z' = \sqrt{R^2 - r^2}$ , тогда  $h' = R - \sqrt{R^2 - r^2}$ . Длина окружности диаметра  $r$  равна  $l = 2\pi r$ , площадь кольца  $S = ldr = 2\pi r dr$ .

Ван-дер-ваальсовы силы для параллельно расположенных плоскостей (на единицу площади) определяются как [29]

$$F_{vdW} = \frac{AR}{6\pi D^3}, \quad (11)$$

где  $A$  — постоянная Гамакера, описывающая молекулярное взаимодействие тел в среде [24, 42, 48, 55, 56]. В данном случае для участков поверхностей, погруженных в жидкость, имеем

$$A_{sws} = (\sqrt{A_{11}} - \sqrt{A_{ww}})(\sqrt{A_{22}} - \sqrt{A_{ww}}), \quad (12)$$

где  $A_{ww}$  — постоянная Гамакера воды в вакууме;  $A_{11}$  — постоянная Гамакера сферы;  $A_{22}$  — постоянная Гамакера плоской поверхности.

Тогда имеем:

$$F_{vdW1} = \int_{r=0}^{r_2} \frac{A_{sws}R}{6\pi(D + D_0 + R - \sqrt{R^2 - r^2})^3} 2\pi r dr = \int_{r=0}^{r_2} \frac{A_{sws}Rr}{(D + D_0 + R - \sqrt{R^2 - r^2})^3} dr. \quad (13)$$

Для участков, разделенных слоем воздуха, получим:

$$A_{sas} = \sqrt{A_{11}^2 A_{22}^2}; \quad (14)$$

$$F_{vdW2} = \int_{r=r_2}^R \frac{A_{sas}R}{6\pi(D + D_0 + R - \sqrt{R^2 - r^2})^3} 2\pi r dr = \int_{r=r_2}^R \frac{A_{sas}Rr}{(D + D_0 + R - \sqrt{R^2 - r^2})^3} dr. \quad (15)$$

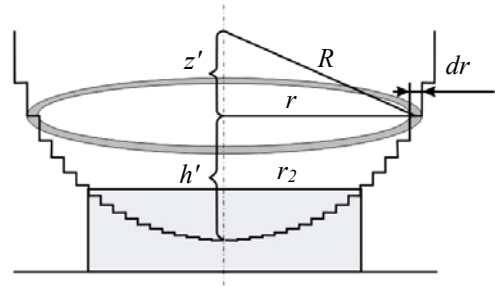


Рис. 4. Упрощенное представление мениска и сфера, представленная в виде набора колец

В рассматриваемой модели считается, что при минимальном расстоянии между телами молекулы жидкости вытесняются за пределы зоны контакта. Структура скола слюды является достаточно сложной, однако, поскольку взаимодействующие объекты являются макротелами, минимальное расстояние между ними равно некоторому усредненному значению. Согласно данным [42, 48],  $D_0$  принимается для твердых тел равным 0,165 нм — несколько меньше межатомного расстояния.

С учетом силы мениска результирующая сила  $F_{tot}$  определяется как:

$$F_{tot} = F_m + F_{vdW1} + F_{vdW2}. \quad (16)$$

**Обсуждение результатов.** Зависимости  $F_{vdW1}$  и  $F_{vdW2}$  от  $D$ , полученные численным интегрированием выражений (13) и (15), приведены на рис. 5. Расчетные значения постоянной Гамакера:  $A_{sws} = 1,41 \cdot 10^{-20}$  Дж;  $A_{sas} = 1,0 \cdot 10^{-19}$  Дж.

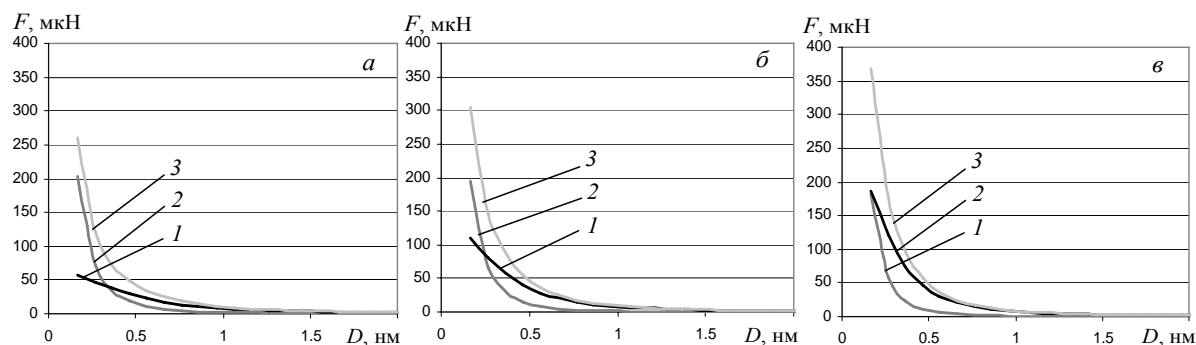


Рис. 5. Зависимость ван-дер-ваальсовых сил от расстояния между телами при различной температуре в зоне контакта: 1 –  $F_{vdW1}$ ; 2 –  $F_{vdW2}$ ; 3 – сумма  $F_{vdW1}$  и  $F_{vdW2}$ ;  $T_{loc} = 32,4$  °C (а); 39,8 °C (б); 48,8 °C (в). Температура окружающей среды 22 °C, относительная влажность воздуха  $RH_{env} = 46\%$

Начальные значения  $r_1$  и  $r_2$  при  $D = D_0$  определены с использованием выражений (1—3): для  $T_{loc} = 32,4$  °C  $r_1 = 0,34$  нм;  $r_2 = 1842$  нм; рассчитанная величина  $RH_{loc} = 0,23$ ; для  $T_{loc} = 39,8$  °C  $r_1 = 0,25$  нм;  $r_2 = 1581$  нм;  $RH_{loc} = 0,15$ ; для  $T_{loc} = 48,8$  °C  $r_1 = 0,19$  нм;  $r_2 = 1377$  нм;  $RH_{local} = 0,09$ . Во всех случаях  $RH_{loc} < 1$  и, предположительно, сплошной слой жидкости на взаимодействующих поверхностях отсутствует.

С увеличением температуры в зоне контакта уменьшаются локальная влажность воздуха и радиус  $r_2$ . Поскольку  $A_{sas} > A_{sws}$ , это приводит к существенному росту  $F_{vdW2}$  при незначительном уменьшении  $F_{vdW1}$ . Суммарная величина составляющих ван-дер-ваальсовых сил растет. При расчете с помощью формулы  $F_{vdW} = AR/6D^2$ , используемой для схемы сфера—плоскость [42], при  $A = A_{sas}$  и  $D = D_0 = 0,165$  нм величина ван-дер-ваальсовых сил найдена равной 1,5 мН, что в четыре раза превосходит значение, полученное в результате моделирования при температуре в зоне контакта  $T_{loc} = 48,8$  °C.

На рис. 6 приведены зависимости  $F_{tot}$  от  $D$ , полученные теоретически с помощью приведенной выше методики при  $D_0 = 1,37$  нм, а также экспериментальным путем. Скорость движения цилиндров составляла 20 нм/с. Перед каждым циклом испытаний образцы были прижаты друг к другу с силой до 200 мкН. Участки кривых, соответствующие уменьшению силы прижатия, не показаны. Данные рис. 6, б получены для времени контакта 10 с. По окончании первого цикла испытаний образцы повторно были приведены в контакт при той же нагрузке на время 1 с. Зависимости, полученные во время второго цикла, показаны на рис. 6, в. Максимальные значения  $F_{tot}$  в этом случае соответствуют расчетным значениям для  $D_0 = 1,67$  нм.

Экспериментальные зависимости достаточно хорошо согласуются с результатами расчетов, однако  $D_0$  значительно превышает минимально возможное значение, что свидетельствует о действии неучтенных в модели факторов. Одним из них является влияние шероховатости бронзовых цилиндров на топографию поверхности слюды. Волнистость взаимодействующих поверхностей может быть причиной увеличения расстояния между ними. Вероятно также, что после проведения очередного цикла испытаний и разрыва жидкостного мениска сконденсированная в зазоре жидкость остается на поверхностях тел. Косвенно это подтверждается результатами исследования трения методом АСМ [58]. Так, пауза в испытаниях приводит к возрастанию силы трения в точке остановки зонда. Предположительно, в течение нескольких циклов скольжения основной объем жидкости либо испаряется, либо вытесняется за пределы дорожки трения, и в дальнейшем сила трения возвращается к исходному уровню. Время стабилизации силы трения сокращается с увеличением температуры. Таким образом, сближению тел может препятствовать слой жидкости, оставшийся на поверхностях после очередного цикла тестирования [33]. Под действием силы предварительного сжатия, а также поверхностных сил слой жидкости между контактирующими телами может сжиматься, однако мономолекулярный слой, толщина которого составляет для воды  $\approx 0,277$  нм, может быть устойчивым к вытеснению. Увеличение минимального расстояния между телами, при котором экспериментальные зависимости, полученные во время первого и второго циклов тестирования, соответствуют теоретическим, также составляет  $\approx 0,3$  нм. Следует отметить, что, в соответствии с результатами моделирования, приведенными на рис. 5, при таком зазоре между телами вклад ван-дер-ваальсовых сил становится незначительным.

Влияние скорости движения образцов на величину поверхностных сил отражено на рис. 7. Данные получены экспериментально при различной температуре в зоне контакта для второго цикла тестирования (время нахождения в контакте 1 с). Предположительно, при больших скоростях движения тел изменение формы мениска происходит следующим образом. На этапе предварительного прижатия жидкость конденсируется в зоне контакта тел и мениск принимает исходную форму, описываемую выражением (1). При увеличении расстояния между телами жидкость перераспределяется в зазоре, смещаясь к осевой линии. В связи с инерционностью и вязкостью жидкости этот процесс требует некоторого времени, и с увеличением скорости движения тел диаметр шейки мениска может уменьшаться, приводя к снижению капиллярной силы (рис. 7, а). Вероятно, что дальнейшее увеличение скорости может приводить к разрыву мениска.

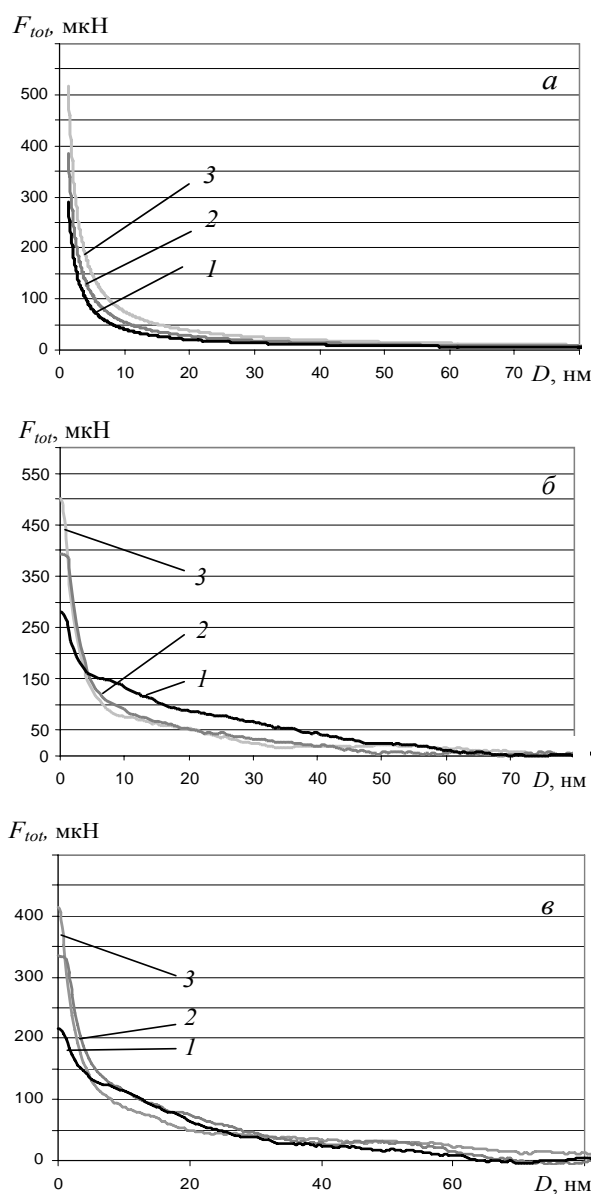


Рис. 6. Зависимости поверхностных сил от расстояния между телами, полученные теоретически (а) и экспериментально (б, в): 1 –  $T_{loc} = 32, 4$  °C; 2 – 39, 8; 3 – 48, 8 °C. Температура окружающей среды 22 °C, относительная влажность воздуха  $RH_{env} = 46\%$

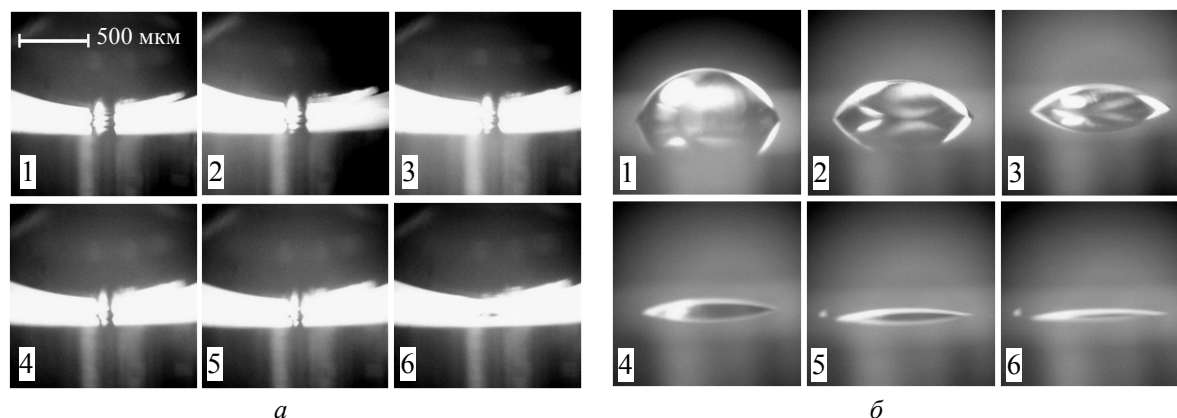


Рис. 8. Изменение диаметра и разрыв мениска за счет испарения жидкости при фиксированном расстоянии между телами (а), испарение капли жидкости, остающейся на поверхности после разрыва мениска (б)

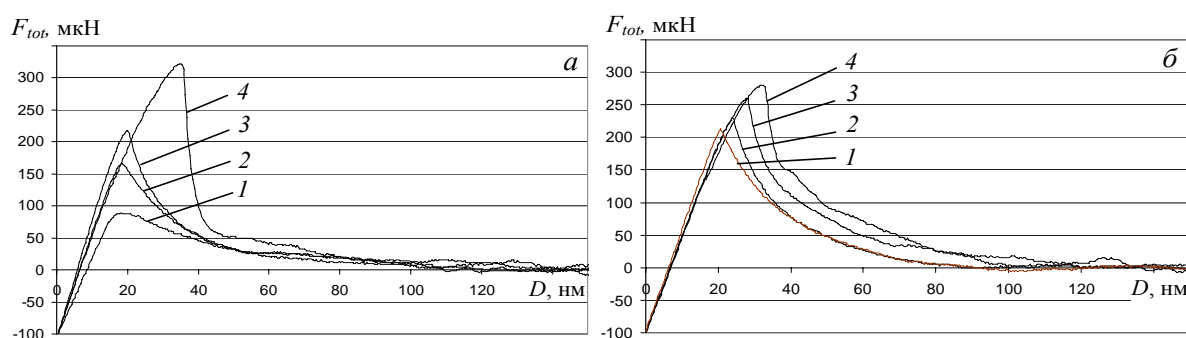


Рис. 7. Зависимости поверхностных сил от расстояния между телами при скорости удаления образцов 80 нм/с (1), 40 нм/с (2), 30 нм/с (3) и 20 нм/с (4).  $T_{loc} = 32,4 \text{ } ^\circ\text{C}$  (а) и  $48,8 \text{ } ^\circ\text{C}$  (б). Температура окружающей среды  $22 \text{ } ^\circ\text{C}$ , относительная влажность воздуха  $RH_{env} = 46\%$

При повышении температуры влияние скорости существенно уменьшается (рис. 7, б). Наблюдается плавное снижение капиллярной силы при увеличении расстояния между телами. Это может быть связано как с уменьшением объема (инерционности) мениска, так и динамической вязкости воды, изменяющейся от  $7,6 \cdot 10^{-4}$  Па·с при температуре  $32,4 \text{ } ^\circ\text{C}$  до  $5,6 \cdot 10^{-4}$  Па·с при  $48,8 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Кроме того, с уменьшением объема мениска возрастает роль ван-дер-ваальсовых сил и снижается роль капиллярной силы, зависящей от скорости движения тел.

Влияние температуры и скорости скольжения на силу трения при сверхмалых нагрузках отмечено рядом исследователей [10, 34, 36, 52, 59—60]. Нанесение гидрофобных покрытий существенно снижает влияние этих факторов.

Наблюдение за поведением мениска увеличенного объема показало, что при фиксированном расстоянии  $D$  происходит уменьшение  $r_2$  с последующим разрывом мениска за счет интенсивного испарения жидкости (рис. 8, а). Таким образом, предположение о том, что при изменении расстояния между телами объем жидкости в зоне контакта остается неизменным, верно только при определенных условиях. Фактически, расстояние между контактирующими телами и скорость его изменения существенно влияют на величину  $r_2$ , а, следовательно, и  $F_{tot}$ .

При рассмотрении трения шероховатых тел в микро- и нанотрибологии считается, что на поверхности присутствует сплошной слой адсорбированной жидкости либо мениск образуется только на время контактного взаимодействия микронеровностей [33, 34]. В действительности, для испарения жидкости, оставшейся на взаимодействующих поверхностях после разрыва мениска (рис. 8, б), требуется некоторое время. Несмотря на отсутствие сплошного адсорбированного слоя, остающаяся после разрыва менисков жидкость может оказывать существенное влияние на трение при малой нагрузке. Во-первых, не успевающая испариться жидкость выступает в роли граничной смазки, попадая в зазор между сближающимися микронеровностями. Во-вторых, объем жидкости может превышать возможный объем мениска, который образовался бы в зазоре. Поскольку значение постоянной Гамакера может существенно отличаться для участков поверхностей, погруженных в жидкость и разделенных слоем воздуха, ван-дер-ваальсовы силы, действующие между микронеровностями, могут изменяться в широких пределах.



**Выводы.** Разработана приближенная модель, позволяющая определять поверхностные силы при изменении расстояния между сферой и плоскостью (перекрещивающимися цилиндрами) в присутствии жидкостного мениска. Актуальность исследуемой проблемы связана с миниатюризацией подвижных узлов современных устройств и, как следствие, влиянием поверхностных сил на их работоспособность. Показано, что сумма ван-дер-ваальсовых сил и капиллярной силы зависит от размеров мениска и, следовательно, от ряда параметров: влажности воздуха, температуры окружающей среды, температуры в зоне контакта. Основным фактором, оказывающим влияние на поверхностные силы, является различие постоянной Гамакера для участков взаимодействующих поверхностей, разделенных слоем жидкости и находящихся за пределами мениска. Результаты расчета поверхностных сил достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными с помощью контактного адгезиометра. Совершенствование предложенного подхода может базироваться на учете инерционности мениска, определении условий его разрыва, использовании более сложной модели формы его поверхности, описании кинетики конденсации и испарения жидкости в зоне контакта, изучении влияния шероховатости взаимодействующих поверхностей.

### Обозначения

$\theta$  — контактный угол;  $\theta_1$  и  $\theta_2$  — углы смачивания поверхностей взаимодействующих тел;  $R$  — радиус кривизны сферы;  $r_1$  и  $r_2$  — основные радиусы кривизны мениска;  $r_k$  — радиус Кельвина;  $\gamma$  — поверхностное натяжение жидкости;  $V_m$  — молярный объем жидкости;  $k$  — универсальная газовая постоянная;  $T$  — температура;  $p$  — давление паров жидкости;  $p_s$  — давление насыщенных паров;  $P$  — перепад давления на границе мениска;  $F_m$  — сила мениска;  $D$  — расстояние между телами;  $RH_{env}$  — относительная влажность воздуха;  $RH_{loc}$  — локальная относительная влажность воздуха;  $T_{env}$  — температура окружающей среды;  $T_{loc}$  — температура в зоне контакта;  $V$  — объем мениска;  $V_1, V_2$  — объемы цилиндров;  $V_3$  — объем шарового сегмента;  $h$  — высота цилиндра и шарового сегмента;  $z$  — расстояние от центра сферы до верхнего края мениска;  $V_0$  — начальный объем мениска;  $r$  — радиус кольца;  $z'$  — расстояние от центра сферы до центра кольца;  $l$  — длина окружности средней линии кольца;  $S$  — площадь кольца;  $F_{vdw}$  — ван-дер-ваальсовы силы;  $F_{vdw1}$  — ван-дер-ваальсовы силы для участков поверхностей, погруженных в жидкость;  $F_{vdw2}$  — ван-дер-ваальсовы силы для участков поверхностей, разделенных слоем воздуха;  $A$  — постоянная Гамакера;  $A_w$  — постоянная Гамакера воды в вакууме;  $A_1$  — постоянная Гамакера материала сферы;  $A_2$  — постоянная Гамакера плоской поверхности;  $A_{sws}$  — постоянная Гамакера для участков поверхностей, погруженных в жидкость;  $A_{sas}$  — постоянная Гамакера для участков поверхностей, разделенных слоем воздуха;  $D_0$  — минимальное расстояние между телами;  $F_{tot}$  — результирующая сила.

### Литература

1. **Mastrangelo C. H.** Adhesion-related failure mechanisms in micromechanical devices // Trib. Lett. — 1997, N 3, 223—238
2. **Niels T., Tonny S., Henri J.** Stiction in surface micromachining // J. Micromech. Microeng. — 1996, N 6, 385—397
3. **Komvopoulos K.** Surface engineering and microtribology for microelectromechanical systems // Wear. — 1996 (200), 305—327
4. **Maboudian R., Howe R. T.** Critical review: adhesion in surface microelectromechanical structures // J. Vac. Sci. Technol. B. — 1997 (15), N 1, 1—20
5. **Mercado Lei L., Kuo Shun-Meen, Tom Lee Tien-Yu, Liu Lianjun.** A mechanical approach to overcome RF MEMS switch stiction problem // Proc. Electr. Comp. and Tech. Conf. New Orleans, USA. — 2003, 377—384
6. **Binggeli M., Mate C. M.** Influence of capillary condensation of water on nanotribology studied by force microscopy // Appl. Phys. Lett. — 1994 (65), N 4, 415—417
7. **Scherge M., Li X., Schaefer J. A.** The effect of water on friction of MEMS // Trib. Lett. — 1999 (6), N 3—4, 215—220
8. **Tian X., Bhushan B.** The micro-meniscus effect of thin liquid film on the static friction of rough surface contact // J. Phys. D: Appl. Phys. — 1996 (29), 163—178
9. **Ando Y.** The effect of relative humidity on friction and pull-off forces measured on submicron-size asperity arrays // Wear. — 2000 (238), 12—19
10. **Riedo E., Palaci I., Boragno C., Brune H.** The 2/3 power law dependence of capillary force on normal load in nanoscopic friction // J. Phys. Chem. B. — 2004 (108), 5324—5328

11. **Houston M., Maboudian R., Howe R. T.** Self-assembled monolayer films as durable anti-stiction coatings for polysilicon microstructures // Proc. Int. Workshop on Solid-state Sens. and Act. Hilton, USA. — 1996, 42—47
12. **Maboudian R., Ashurst W. R., Carraro C.** Self-assembled monolayers as anti-stiction coatings for MEMS: characteristics and recent developments // Sensors and Actuators. — 2000 (**A82**), 219—223
13. **Ashurst W. R., Yau Ch., Carraro C., et al.** Alkene based films as anti-stiction coatings for polysilicon MEMS // Sensors and Actuators. — 2001 (**A91**), 239—248
14. **Ashurst W. R., Carraro C., Maboudian R., Frey W.** Wafer level anti-stiction coatings for MEMS // Sensors and Actuators. — 2003 (**104**), 213—221
15. **http:** // home.wanadoo.nl/scslai/lotus.pdf
16. **http:** // www.botanik.uni-bonn.de/system/bionik flash.html
17. **Persson J., Albohr O., Tartaglino U., et al.** On the nature of surface roughness with application to contact mechanics, sealing, rubber friction and adhesion // J. Phys. Condens. Matter. — 2005 (**17**), 1—62
18. **Tayebi N., Polikarpou A. A.** Reducing the effects of adhesion and friction in microelectromechanical systems „MEMS” through surface roughening: comparison between theory and experiments // J. Appl. Phys. — 2005 (**98**), 073528-1—073528-13
19. **Onda T., Shibuichi S., Saton N., Tsujii K.** Superhydrophobic fractal surfaces // Langmuir. — 1996 (**12**), 2125—2127
20. **De Bisschop F. R. E., Wilfried J., Rigolei L.** A physical model for liquid capillary bridges between adsorptive solid spheres // J. Colloid and Interface Science. — 1982 (**88**), N 1, 117—128
21. **Fortes M. A.** Axisymmetric liquid bridges between parallel plates // J. Colloid and Interface Science. — 1982 (**88**), N 2, 338—352
22. **Aveyard R., Adams M. J., Paunov V. N., Nees D.** Capillary condensation of vapours between two solid surfaces: effect of line tension and surface forces // Phys. Chem. Chem. Phys. — 1999 (**1**), 155—163
23. **Willett C. D., Adams M. J., Johnson S. A., Seville J. P. K.** Capillary bridges between two spherical bodies // Langmuir. — 2000 (**16**), 9396—9405
24. **Stifter T., Marti O., Bhushan B.** Theoretical investigation of the distance dependence of capillary and van der Waals forces in scanning force microscopy // Phys. Rev. B. — 2000 (**62**), N 20, 13667—13673
25. **Orr F. M., Scriven L. E., Rivas A. P.** Pendular rings between solids: meniscus properties and capillary force // J. Fluid Mech. — 1975 (**67**), 723—742
26. **Fisher L. R., Israelachvili J. N.** Experimental studies on the applicability of the Kelvin equation to highly curved concave menisci // J. Colloid and Interface Sci. — 1981 (**80**), N 2, 528—541
27. **Bhushan B.** Adhesion and stiction: mechanisms, measurement techniques, and methods for reduction // J. Vac. Sci. Technol. — 2003 (**21**), N 60, 2262—2296
28. **Matsuoka H., Fukui S., Morishita H.** Dynamics of liquid meniscus bridge of intermittent contact slider // Transactions of Magnetics. — 2002 (**38**), N 5, 2135—2137
29. **Matsuoka H., Matsumoto S., Fukui S.** Dynamic meniscus models for MEMS elements // Microsyst. Technol. — 2005 (**11**), 1132—1137
30. **Crassous J., Charlaix J.-L., Loubet E.** Nanoscale investigation of wetting dynamics with a surface force apparatus // Phys. Rev. Lett. — 1997 (**78**), N 12, 2425—2428
31. **Restagno F.** A new surface forces apparatus for nanorheology // Rev. Sci. Instrum. — 2002 (**73**), N 6, 2292—2297
32. **Pitois O., Moucheront P., Chateau X.** Liquid bridge between two moving spheres: an experimental study of viscosity effect // J. Colloid and Interface Sci. — 2000 (**231**), 26—31
33. **Bocquet L., Charlaix E., Ciliberto S., Crassous J.** Moisture-induced ageing in granular media and the kinetics of capillary condensation // Nature. — 1998 (**396**), N 24, 735—737
34. **Riedo E., Levy F., Brune H.** Kinetics of capillary condensation in nanoscopic sliding friction // Phys. Rev. Lett. — 2002 (**88**), N 18, 185505-1—185505-4
35. **Kohonen M. M., Maeda N., Christenson H. K.** Kinetics of capillary condensation in nanoscale pore // Phys. Rev. Lett. — 1999 (**82**), N 23, 4667—4670
36. **Szozkiewicz R., Riedo E.** Nucleation time of nanoscale water bridges // Phys. Rev. Lett. — 2005 (**95**), 135502-1—135502-4
37. **Mazzone D. N., Tardos G. I., Pfeffer R.** The effect of gravity on the shape and strength of liquid bridge between two spheres // J. Colloid and Interface Sci. — 1986 (**113**), N 2, 544—566
38. **Bayramli E., van de Ven T. G. M.** An experimental study of liquid bridges between spheres in a gravitational field // J. Colloid and Interface Sci. — 1987 (**116**), N 2, 503—510

39. **Boucher E. A., Evans M. J. B., McGarry S.** Capillary phenomena. Fluid bridges between horizontal solid plates in a gravitational field // *J. Colloid and Interface Sci.* — 1982 (**89**), N 1, 154—165
40. **Georges J. M., Millot S., Loubet J. L., Tonck A.** Drainage of thin liquid films between relatively smooth surfaces // *J. Chem. Phys.* — 1993 (**98**), N 9, 7345—7359
41. **Zitsler L., Herminghaus S., Mugele F.** Capillary forces in tapping mode atomic force microscopy // *Phys. Rev. B.* — 2002 (**66**), 155436-1—155436-8
42. **Israelachvili J. N.** Intermolecular and surface forces. — NY: Acad. Press. — 1991
43. **Абрикосова И. И., Дерягин Б. В.** Прямое измерение молекулярного притяжения в функции расстояния между поверхностями // *ЖЭТФ.* — 1951 (**21**), N 8, 945—950
44. **Григорьев А. Я., Дубравин А. М., Ковалев А. В., и др.** Измерение контактной адгезии и аттракционного взаимодействия технических поверхностей // *Трение и износ.* — 2003 (**24**), № 4, 405—412
45. **Myshkin N. K., Grigoriev A. Ya., Dubravin A. M. et al.** Instruments for adhesion and friction measurements at micro/nano scale // *Proc. "Viennano".* — Vienna. — 2005, 213—218
46. **Myshkin N. K., Grigoriev A. Ya., Dubravin A. M. et al.** Experimental equipment for interfacial force and friction measurements of microscale samples // *Proc. 14<sup>th</sup> Int. Coll. Tribology.* — Esslingen. — 2004, 73—78
47. **Fisher L. R., Israelachvili J. N.** Direct measurement of the effect of meniscus forces on adhesion: a study of applicability of the macroscopic thermodynamics to microscopic liquid interfaces // *J. Colloid and Interface Sci.* — 1981 (**3**), 303—319
48. **Merlijn van Spengen W., Puers R., de Wolf I.** A physical model to predict stiction in MEMS // *J. Micromech. Microeng.* — 2002 (**12**), 702—713
49. **Kohonen M. M., Christenson H. K.** Capillary condensation of water between rinsed mica surfaces // *Langmuir.* — 2000 (**16**), 7285—7288
50. **Jang J., Schatz G. C., Ratner M. A.** Capillary force in atomic force microscopy // *J. Chem. Phys.* — 2000 (**120**), N 3, 1157—1160
51. **He M., Blum A. S., Aston D. E., et al.** Critical phenomena of water bridges in nanoasperity contacts // *J. Chem. Phys.* — 2001 (**121**), N 3, 1355—1360
52. **Szozkiewicz R., Riedo E.** Nanoscopic friction as a probe of local phase transitions // *Appl. Phys. Lett.* — 2005 (**87**), 033105-1—033105-3
53. **Zhang B., Nakajima A.** Nanometer deformation caused by the Laplace pressure and the possibility of its effect on surface tension measurements // *J. Colloid and Interface Sci.* — 1999 (**211**), 114—121
54. **Бронштейн И. Н., Семендяев К. А.** Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. — М.: Наука. — 1964
55. **Dahneke B.** The influence of flattening on the adhesion of particles // *J. Colloid and Interface Sci.* — 1972 (**40**), N 4, 1—13
56. **Seemann R., Herminghaus S., Jacobs K.** Gaining control of pattern formation of dewetting liquid films // *J. Phys. Condens. Matt.* — 2001 (**13**), 4925—4938
57. **Attard P., Schulz J. C., Rutland M. W.** Dynamic surface force measurement. I. van der Waals collisions // *Rew. Sci. Instrum.* — 1998 (**69**), N 11, 3852—3866
58. **Дубравин А. М., Комков О. Ю., Мышкин Н. К.** Локальная трибометрия на основе сканирующего зондового микроскопа // *Трение и износ.* — 2005 (**26**), № 3, 269—278
59. **Liu H., Ahmed I.-U., Schergeu M.** Microtribological properties of silicon and silicon coated with diamond like carbon, octadecyltrichlorosilane and stearic acid cadmium salt films // *Thin Solid Films.* — 2001 (**381**), 135—142
60. **Bhushan B., Liu H., Hsu S. M.** Adhesion and friction studies of silicon and hydrophobic and low friction films and investigation of scale effect // *J. of Tribology.* — 2004 (**126**), 583—590

*Поступила в редакцию 02.10.06.*

Komkov O. Yu. **Influence of liquid meniscus on surface forces.**

The condensation of water in gaps between members of microelectromechanical systems (MEMSs) and precision friction units is caused by the presence of water vapors in air. The formation of liquid meniscus induces an additional force and affects considerably other surface forces. Numerical simulation was used to determine the meniscus and Van der Waals forces depending on the distance between the bodies in contact. Theoretical dependencies are used when interpreting experimental data obtained with the contact adhesion meter. Different factors that affect surface interaction and the application of the proposed approach to micro- and nanotribology are discussed.