

УДК 621.891

**КОСОЛАПОВ В.Б.**, к.т.н., ХНАДУ  
**ЛИТОВКА С.В.**, ас., ХНТУСХ

### **РАСЧЕТ ТОЛЩИНЫ СМАЗОЧНОЙ ПЛЕНКИ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ НА МИКРОНЕРОВНОСТЯХ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ ГИДРОПРИВОДА**

Наведено модель взаємодії молекули поверхнево-активної речовини з мікронерівністю поверхні тертя. Визначено, що товщина мастильної плівки залежить від величини поля адсорбуючої поверхні й енергії теплових коливань молекул поверхнево-активної речовини. Показано, що при збільшенні температури робочої рідини товщина мастильної плівки зменшується.

**Введение.** Ресурс аксиальнопоршневых насосов гидроприводов мобильных машин во многом определяется интенсивностью изнашивания их узлов трения. Поэтому смазочные материалы, в том числе и рабочие жидкости объёмных гидроприводов, должны предотвращать непосредственный контакт поверхностей трения путём образования на них плёнки способной выдерживать возникающие контактные давления.

Трение в условиях граничной смазки является наиболее часто встречаемым для работы элементов гидропривода [1]. Этот режим смазки возникает в условиях высоких контактных нагрузок, температур, а также при низких скоростях перемещения поверхностей относительно друг друга.

В условиях граничной смазки происходит частичное разрушение граничного слоя, приводящее к появлению непосредственного контакта отдельных микронеровностей поверхностей трения и сопровождающегося процессом их изнашивания. Отсюда вытекает значение качества, как поверхностного слоя, так и применяемых масел, влияющих на прочность и износостойкость элементов гидропривода.

Качество поверхностей определяется совокупностью физических свойств — микрогеометрией, микроструктурой, степенью деформации поверхностного слоя и его напряженностью. Выбор необходимого качества поверхности элемента трибосопряжения определяется условиями ее работы и зависит от нагрузки и температуры в контакте, скорости перемещения поверхностей друг относительно друга, характера трения и применяемой рабочей жидкости РЖ [2].

В свою очередь применяемые масла, в процессе работы трибосопряжения, должны обладать способностью образовывать на поверхностях трения прочный смазочный слой. Способность масел образовывать на поверхностях трения защитные адсорбционные слои во многом определяется как свойствами поверхностно-активных веществ (ПАВ), входящих в их состав, так и свойствами поверхностей трибосопряжения. В процессе образования поверхности возникает неуравновешенность атомарных сил поверхностного слоя, вызывающая изменение в порядке расположения атомов и межатомных расстояний [3]. Следствием этого является образование силового поля поверхности – поля атомного (молекулярного) притяжения, характеризующегося свободной поверхностной энергией [4].

Физическая адсорбция молекул ПАВ на поверхностях трибосопряжений происходит, главным образом, под действием этого поля [5]. Как мономеры молекул ПАВ, так и их агрегаты, попадая в действие поля, притягиваются к поверхности,

образу на ней граничные смазочные слои, имеющие квазикристаллическую структуру [4, 6].

При этом известно, что чем больше поле поверхности, тем прочнее адсорбционный слой и, как результат, такой слой выдерживает большую контактную нагрузку, предотвращая непосредственный контакт во избежание повышенного износа поверхностей. Переход от умеренного к повышенному изнашиванию существенно зависит от микрорельефа поверхностей трения [7]. Кроме того, известно, что поле поверхности металла является функцией многих переменных, среди которых, при прочих равных условиях, значительную роль играет её микрорельеф [4, 8]. Таким образом, определение величины поля поверхности трения является ключевым звеном при описании механизма формирования граничных смазочных слоев.

**Цель работы и постановка задачи.** Целью настоящей работы является определение толщины адсорбированного слоя молекул ПАВ на микронеровностях поверхностей трения.

Задачами исследования является: установление функциональной связи между величиной поля микронеровности поверхности трения и параметрами её микрогеометрии; определение максимального расстояния, на котором поле поверхности микронеровности способно адсорбировать молекулу ПАВ; определение толщины адсорбционного слоя молекул ПАВ с учетом величины поля микронеровности поверхности трения.

**Модель взаимодействия.** Рассмотрим строение единичной однородной микронеровности моделируемой полусферическим сегментом, поверхность которого представлена ступеньками вицинальных граней (рис. 1).

Минимальный период микроступенек  $s$  для металла будет равен периоду его кристаллической решетки  $a_0$ . К примеру, для железа  $a_0 = 2,4...3 \text{ \AA}$ .

Потенциал, создаваемый элементом заряженной поверхности (рис. 1) в точке, характеризуемой  $r$ , равен

$$d\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{\sigma R^2 \sin\theta d\theta d\alpha}{\rho}, \quad (1)$$

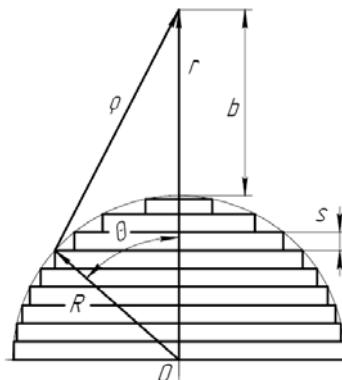


Рисунок 1 – Схема представления микронеровности

где  $R^2 \sin\theta d\theta d\alpha$  – элемент поверхности полусферы в сферических координатах, полярная ось которых совпадает с вектором  $\mathbf{r}$ ; угол  $\alpha$  – аксиальный угол;  $\sigma$  –

поверхностная плотность заряда, Кл/м<sup>2</sup>,  $\sigma = q_i / a_0^2$ ;  $q_i$  – заряд одного ионного остова, Кл;  $a_0$  – период кристаллической решетки, м;  $\rho$  – расстояние от точечного заряда  $q_i$  до точки, в которой вычисляется напряженность, м;  $R$  – радиус кривизны микронеровности, м;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость рабочей жидкости;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная, Кл<sup>2</sup>/(Н·м<sup>2</sup>).

Из рисунка 1 видно, что  $\rho = R - r$ . После возведения обеих частей равенства в квадрат, находим  $\rho^2 = R^2 + r^2 - 2Rr \cos \theta$ . Взяв дифференциалы от обеих частей этого равенства, имеем  $2\rho d\rho = 2Rr \sin \theta d\theta$ , откуда следует, что  $R^2 \sin \theta d\theta = (\rho R / r) d\rho$ . Тогда формула (1) преобразуется к виду

$$d\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0} \frac{\sigma R}{r} d\rho d\alpha. \quad (2)$$

Интегрируя (2) по всей поверхности полусферы, находим

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0} \frac{\sigma R}{r} \int_0^{2\pi} d\alpha \int_{r-R}^{\sqrt{r^2+R^2}} d\rho = \frac{\sigma R}{2\varepsilon\varepsilon_0 r} \left( \sqrt{r^2 + R^2} - r + R \right). \quad (3)$$

Напряженность электрического поля заряженной полусферы, с учетом выражения (3), можно представить в виде

$$E_r = -\frac{\partial\varphi}{\partial r} = \frac{\sigma R^2}{2\varepsilon\varepsilon_0 r^2} \left( 1 + \frac{R}{\sqrt{r^2 + R^2}} \right). \quad (4)$$

Расстояние взаимодействия молекулы ПАВ с поверхностью микронеровности, согласно рисунка 1 равен

$$b = r - R. \quad (5)$$

Подставляя формулу (5) в (4) получаем

$$E_b = \frac{\sigma R^2}{2\varepsilon\varepsilon_0 (b+R)^2} \left( 1 + \frac{R}{\sqrt{(b+R)^2 + R^2}} \right). \quad (6)$$

По напряженности поля, определим энергию взаимодействия диполя ПАВ, лежащего на оси с полем микронеровности

$$W_{ПАВ} = -p \cdot E_b, \quad (7)$$

где  $p$  – дипольный момент молекулы ПАВ, Кл·м.

Адсорбционный слой молекул ПАВ будет иметь максимальную толщину при отсутствии каких-либо механических воздействий на него. В этом случае условием адсорбционно-десорбционного равновесия является равенство энергии взаимодействия

молекулы ПАВ с поверхностью трения и тепловой энергией молекулы

$$W_{ПАВ} \geq W_T, \quad (8)$$

где  $W_T$  – тепловая энергия молекулы ПАВ, Дж.

В соответствии с работой [9] тепловая энергия молекул может быть определена из выражения

$$W_T = k \cdot T, \quad (9)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана, Дж/К;  $T$  – температура РЖ вблизи поверхности трения, К.

Таким образом, для описания механизма формирования адсорбционного слоя молекул ПАВ необходимо определить функцию изменения энергии  $W_{ПАВ}$  от расстояния между молекулой и поверхностью.

Вычисляем уравнение (8), осуществляя подстановку формул (7) и (9) и определяем значимые корни, тогда, максимальное расстояние, на котором происходит удержание молекулы ПАВ полем поверхности выразиться как

$$b = R \sqrt{\frac{1 - \frac{k \cdot T \cdot \varepsilon_{РЖ} \cdot \varepsilon_0}{p \cdot \sigma} + \sqrt{\left(\frac{k \cdot T \cdot \varepsilon_{РЖ} \cdot \varepsilon_0}{p \cdot \sigma}\right)^2 + \frac{2 \cdot k \cdot T \cdot \varepsilon_{РЖ} \cdot \varepsilon_0}{p \cdot \sigma}}{\frac{2 \cdot k \cdot T \cdot \varepsilon_{РЖ} \cdot \varepsilon_0}{p \cdot \sigma}}} - R. \quad (10)$$

Расчет выполняем для трибосопряжений гидроприводов сельскохозяйственных машин (СХМ). В качестве масла принимаем РЖ на нефтяной основе, а молекулы ПАВ – олеиновую кислоту. Для расчета по характерным параметрам неровностей поверхности гидропривода выбираем радиус кривизны микронеровности  $R$ . При этом, в первом приближении, предполагаем, что радиус кривизны микронеровности  $R$  равен среднеарифметическому отклонению профиля  $R_a$ . Так для аксиальнопоршневого насоса НП 90 шероховатость при изготовлении гильзы блока цилиндров –  $R = 0,63 \cdot 10^{-6}$  м, сферы сопряжения гильзы с распределителем –  $R = 0,16 \cdot 10^{-6}$  м, поверхности сферы сопряжения распределителя с блоком цилиндров –  $R = 0,04 \cdot 10^{-6}$  м. Вычисления производим исходя из того, что заряд одного ионного остова равен величине элементарного электрического заряда,  $q_i = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл; период кристаллической решетки,  $a_0 = 3 \cdot 10^{-10}$  м.

Результаты расчета приведены на рисунке 2.

Как видно из графика, представленного на рисунке 2, зона силового взаимодействия молекул ПАВ с полем микронеровности, приводящего к их адсорбции на поверхности, незначительно зависит от температуры РЖ, пропорционально зависит от радиуса кривизны микронеровности и изменяется в диапазоне  $10^{-7} - 10^{-5}$  м для данных параметров микрогеометрии поверхности. Таким образом, в соответствии с предложенной моделью, процесс формирования адсорбционной пленки ПАВ происходит не из всего объема РЖ, а из определенной зоны – зоны силового взаимодействия диполя молекулы ПАВ с полем поверхности.

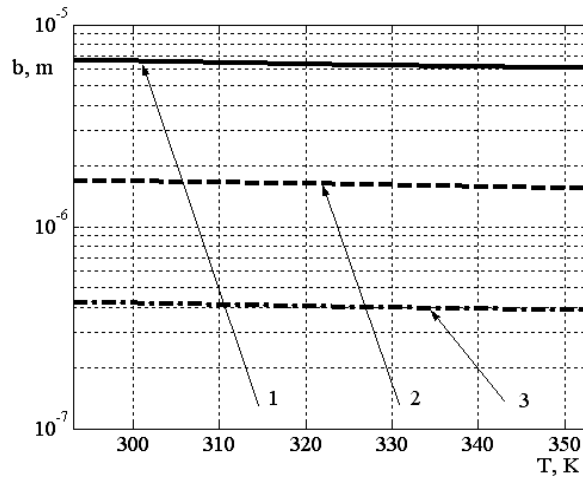


Рисунок 2 – Зона силового взаимодействия молекулы ПАВ с микронеровностью  
(1 –  $R = 0,63 \cdot 10^{-6}$  м, 2 –  $R = 0,16 \cdot 10^{-6}$  м, 3 –  $R = 0,04 \cdot 10^{-6}$  м)

При оседании молекул ПАВ на поверхность формируется адсорбционный слой, состоящий из плотно расположенных молекул, ориентированных параллельно друг другу и перпендикулярно к поверхности [10]. Рассматриваемый слой имеет электрические характеристики отличные от объема РЖ, тогда, в первом приближении, можно представить, что взаимодействие молекулы ПАВ с микронеровностью происходит через адсорбционный слой. В этом случае, расстояние взаимодействия будет описывать толщину адсорбционного слоя ПАВ на поверхности микронеровности. Тогда формула (10) преобразится к виду

$$h = R \sqrt{\frac{1 - \frac{k \cdot T \cdot \varepsilon_{\text{ПАВ}} \cdot \varepsilon_0}{p \cdot \sigma} + \sqrt{\left(\frac{k \cdot T \cdot \varepsilon_{\text{ПАВ}} \cdot \varepsilon_0}{p \cdot \sigma}\right)^2 + \frac{2 \cdot k \cdot T \cdot \varepsilon_{\text{ПАВ}} \cdot \varepsilon_0}{p \cdot \sigma}}{2 \cdot \frac{k \cdot T \cdot \varepsilon_{\text{ПАВ}} \cdot \varepsilon_0}{p \cdot \sigma}}} - R} \quad (11)$$

где  $h$  – толщина адсорбционного слоя ПАВ, м.  
Результаты расчета приведены на рис. 3.

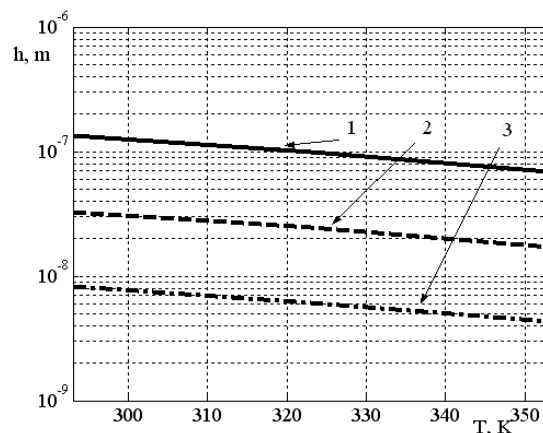


Рисунок 3 – Толщина адсорбционного слоя ПАВ  
(1 –  $R = 0,63 \cdot 10^{-6}$  м, 2 –  $R = 0,16 \cdot 10^{-6}$  м, 3 –  $R = 0,04 \cdot 10^{-6}$  м)

Анализуя график (рис. 3), видно, что толщина смазочного слоя ПАВ на микронеровности растёт с увеличением радиуса кривизны последней. Повышение температуры среды приводит к уменьшению адсорбционной пленки. В исследуемом диапазоне температур толщина адсорбционной пленки снижается в 1,85 – 1,9 раз и изменяется для данных радиусов кривизны микронеровностей поверхности в диапазоне  $10^{-9} - 10^{-7}$  м, что коррелируется с ранее проведенными исследованиями [4, 6, 10].

Необходимо подчеркнуть, что полученные зависимости (10) и (11) рассматривают идеализированную картину и не учитывают процессы изменения микрорельефа в процессе работы пары трения, экранирование поля поверхности окислами либо модифицированными слоями, возникающими в результате трения, взаимодействие молекул ПАВ между собой и с молекулами базового масла.

### Выводы

Таким образом, толщина смазочной пленки РЖ зависит, главным образом, от величины поля адсорбирующей поверхности, дипольного момента, энергии тепловых колебаний молекул (температуры РЖ), а также, от диэлектрической проницаемости адсорбционного слоя молекул ПАВ. В образовании смазочной пленки участвует ограниченный объем РЖ вблизи поверхности, обусловленный зоной силового взаимодействия молекулы ПАВ с полем поверхности, которая увеличивается при увеличении радиуса кривизны микронеровности и достигает  $10^{-7} - 10^{-6}$  м для приведенных значений радиуса. С увеличением температуры РЖ расстояние взаимодействия и толщина адсорбционного слоя молекул ПАВ с полем поверхности микронеровности уменьшается. Толщина адсорбционного слоя молекул ПАВ для приведенных радиусов кривизны микронеровностей поверхности и рабочего диапазона температур РЖ изменяется в диапазоне  $10^{-9} - 10^{-7}$  м.

**Список литературы:** 1. *Войтов В. А.* Конструктивная износостойкость узлов трения гидромашин. Часть II. Методология моделирования граничной смазки в гидромашинах. – Харьков: Центр Леся Курбаса, 1997. – 152 с. 2. *Грозин Б. Д.* и др. Повышение эксплуатационной надёжности деталей машин. – М.: Машгиз, 1960. – 296 с. 3. *Литвинов А. А.* Физико-химические основы применения смазочных материалов в узлах трения авиационной техники: Учебное пособие. – Киев: КИИГА, 1985. – 80 с. 4. *Чичинадзе А. В., Берлинер Э. М., Браун Э. Д.*, и др. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника). – Москва: Машиностроение, 2003. – 576 с. 5. *Литвинов А. А., Добровольская М. Ф.* Физико-химические взаимодействия углеводородных жидкостей с металлами в условиях трения // Вопросы авиационной химмотологии: Сб. науч. тр. – Киев: КИИГА. – 1984. – С. 19–32. 6. *Ахматов А. С.* Молекулярная физика граничного трения. – М.: Физматгиз, 1963. – 471 с. 7. *Sundh J., Skytte af Satra U.* Influence of surface topography and surface modifications on seizure initiation in lean lubricated sliding contacts // *Wear.* – 2007. – Vol. 262. – P. 986-995. 8. *Косолапов В. Б., Рукавишников Ю. В.* Влияние параметров микронеровностей поверхности на процесс адсорбции // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – Харьков: Изд-во ХНАДУ. – 2004. – Вып. 29. – С. 49–51. 9. *Кондаков Л. А.* Рабочие жидкости и уплотнения гидравлических систем. – М.: Машиностроение, 1982. – 216 с. 10. *Гаркунов Д. Н.* Триботехника. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.