

Ротационный вискозиметр для исследования микронных прослоек

Ротационным вискозиметром исследована зависимость вязкости тонких (4-50 мкм) неоднородных прослоек, включающих пристенные структурированные слои, от скорости сдвигового течения. Рассчитаны основные реологические свойства ЭЖК слоя: коэффициент вязкости, характер «срезания» слоя со скоростью течения и «гидродинамическая прочность» в моделях «жесткого» и «вязкого» слоя.

1. Микронные прослойки смазки и граничное трение. Микронные прослойки смазки в триадах трения играют определяющую роль в процессах граничного и полусухого трения [1,2]. На эти процессы, наблюдаемые в моменты высоких нагрузок – при изменении режимов работы механизма (в частности, его пуска), приходится до 80% интегрального износа. С начала использования минеральных смазочных масел было замечено, что в граничном режиме трения масла, характеризующиеся одними и теми же объемными параметрами (плотностью, вязкостью и др.), обладают различными антифрикционными и противозносными свойствами. Не установив глубокой физико-химической причины таких отличий, инженеры ввели [3] в качестве одного из показателей, характеризующих смазочные материалы при граничной или полужидкостной смазке, новый критерий – «маслянистость», позволяющий ранжировать конкретные масла по указанным свойствам. Добавление «маслянистых» присадок (различных ПАВ - растительных и животных жиров, олеиновой или стеариновой кислоты и т.п.) повышало «маслянистость» масла - его противозносность, позволяя эксплуатацию при высоких нагрузках. Предлагался ряд методов оценки «маслянистости», однако, отсутствие как четких физико-химических параметров, определяющих этот критерий, так и эффективных методов для его оценки, не позволил ввести такой показатель даже в паспорт на масла. Одновременно с этим ряд исследователей [4] обращал внимание на то, что свойства смазочных слоев, определяющие их антифрикционные качества, могут быть связаны с особой структурой граничных - приповерхностных слоев смазки, с существованием в них ориентационной упорядоченности молекул.

Эти идеи нашли свое развитие в открытии возможности образования в ряде случаев на лиофильной твердой поверхности эпиторпных жидкокристаллических (ЭЖК) слоев [5]. Их мезофазность была установлена экспериментально с использованием оригинальных методик: щелевого световода, дихроизма интенсивных полос поглощения, НПВО и др. Структурированность ЭЖК слоев приводит к появлению в неоднородных (с ЭЖК слоями) прослойках расклинивающего давления [6], изменению их вязкости [7] и отражается на особенностях граничного трения [4,8-10]. В настоящее время представления о жидкокристал-

личности граничного «мультимолекулярного» слоя (и даже его смектичности вблизи поверхности твердой фазы) общеприняты [10]. Обусловленные структурой ЭЖК слоя его реологические свойства и определяют «маслянистость» смазки. Добавляемые в масло «маслянистые» присадки - ПАВ-ы способствуют лиофилизации подложки и играют роль традиционных для термотропных ЖК сурфактантов, повышающих степень ориентационной упорядоченности S мезофазы, а для ее эпитропного типа - и толщину d_s слоя ЭЖК [11].

Попытка количественного определения критерия «маслянистость» была предпринята в комплексном исследовании структурных и противоизносных свойств ЭЖК слоев смазки. Тип ориентации, параметр $d_s \cdot \langle \Delta n \rangle$ и «тангенциальная механическая прочность» определялись [12] путем измерения (методом целевого световода переменной толщины) оптической анизотропии – величины Δn . Для триады из тех же материалов проводились трибологические исследования [9] на машине трения. В ней электроимпульсным методом регистрировались прорывы граничного смазочного слоя в триаде. Выбором диапазона скоростей перемещения и контактного давления триада намеренно вводилась в режим тяжелого граничного трения. Износ и параметр $d_s \cdot \langle \Delta n \rangle$ ЭЖК слоя смазочного материала (легированного различным количеством ПАВ – технологической присадкой НИМБ) коррелировали, что позволило авторам рекомендовать величину $d_s \cdot \langle \Delta n \rangle$ в качестве искомого параметра «маслянистости». В этих же работах было замечено, что гомеотропная ориентация молекул в пределах ЭЖК слоя смазки повышает его противоизносные характеристики и сопротивление трению, а планарная - уменьшая силу трения, приводит к возрастанию износа. Таким образом управление (например, с помощью ориентантов) свойствами ЭЖК слоев позволяет непосредственно влиять на характер процесса граничного трения.

2. Реологические исследования ЭЖК слоев. Эти исследования весьма актуальны для понимания механизма граничного трения и позволяют решать теоретические и прикладные задачи, связанные с эксплуатацией узлов трения [8], в частности, повышения противоизносных свойств их смазки. Из данных по вязкости микронных прослоек также можно установить наличие ЭЖК слоев, их свойства и влияние добавок. Основная трудность прямых измерений вязкости ЭЖК слоев связана с малостью их толщины. На диэлектрической подложке она обычно меньше 100 нм, что исключает использование стандартных вискозиметрических методик и заставляет разрабатывать для этой цели специальные устройства. При переходе от диэлектрических подложек к металлическим равновесная толщина ЭЖК слоя значительно возрастает, что, по-видимому, связано с возрастанием в этом случае запаздывающих Ван-дер-ваальсовых сил. Так, в оптических исследованиях прослоек ряда немезогенных органических жидкостей алифатического ряда [13] установлено, что на металлической, соответственным образом подготовленной подложке эти жидкости образуют ЭЖК слои микронной толщины. Это несколько упрощает задачу измерения их вязкости и позволяет для оценки последней использовать традиционные методики с соответствующей их модификацией.

Сконструированным щелевым капиллярным вискозиметром [14] изучалось плоское «ползущее» течение в тонких ($D \sim 20 \div 50$ мкм) прослойках. В таких, заметим достаточно трудоемких, опытах было установлено отличие расчетных по Пуазейлю и измеряемых расходов жидкости (моторного масла МРХ-30) в капилляре при различных градиентах давления. Это свидетельствовало о пространственной неоднородности таких прослоек – наличия в них пристенного структурированного слоя, толщина которого с течением уменьшается. В рамках различных моделей такого «срезаемого течением» слоя: «жесткого» [14], «вязкого» [15] и «переменной» вязкости [1] по результатам измерений в щелевом вискозиметре были проведены оценки «гидродинамической прочности» слоя, его толщины и вязкости.

Для ЭЖК слоя этого масла на стальной подложке оказалось [14], что рассчитанная в модели гидродинамически «жесткого, срезаемого течением слоя» равновесная, в отсутствие течения - "начальная" толщина $d_{0s} \approx 3$ мкм ($T=394$ К), близка, но меньше значений равновесной толщины ЭЖК слоя ($d_{0s} \approx 8$ мкм) алифатических углеводородов и масел, полученных в оптических измерениях [13]. Отмеченное отсутствие предельного напряжения сдвига даже при наименьших зазорах свидетельствовало не в пользу представлений о гидродинамической «жесткости» слоя. Поэтому расхождение с результатами таких измерений по толщине d_{0s} объяснялось [14] несовершенством модели слоя, принятой для расчетов этого его параметра. Лучшим приближением к оптическим измерениям оказалась рассмотренная в [15] модель слоя с повышенной вязкостью. В [1] для анализа использовалась более сложная модель: слой «переменной вязкости». Дело в том, что при течении происходит переориентация директора мезофазы, характеризующего структуру слоя, поэтому коэффициент вязкости последнего зависит от интенсивности течения и не постоянен по толщине. Для более детального установления структурных особенностей ЭЖК слоев необходимы дополнительные исследования их реологических свойств, разработка экспериментальных методик получения количественных оценок величины коэффициента вязкости, определения толщины ЭЖК слоя и влияния на последнюю течения.

3. Ротационный вискозиметр со струнным торсионом. В работе использовался ранее сконструированный [8] ротационный цилиндрический вискозиметр для изучения вязкости тонких неоднородных жидких прослоек. Усовершенствование конструкции прибора позволило исследовать Куэтовское течение тонких ($D \sim 4 \div 50$ мкм) жидких прослоек вязкостью $0,1 \div 0,5$ Па·сек в диапазоне скоростей деформации $\dot{\gamma} = 25 \div 1000$ с⁻¹. Принцип действия прибора основан на определении момента $M_{тр}$ сил вязкого трения, возникающего в прослойке между двумя коаксиальными цилиндрами («ротационной парой») при вращении «внешнего» цилиндра и закручивающего «внутренний» - неподвижный. Таки-ми цилиндрами служат модифицированные элементы прецизионного узла топливной аппаратуры - распылителя форсунки. Высокое качество его плунжерных поверхностей (класс точности 12, параметры шероховатости $R_a = 0,025$ мкм,

и $l=0,25$ мм) позволяет изучать прослойки, по толщине соизмеримые с толщиной ЭЖК слоев в них.

Схема установки показана на рис.1. Роль внешнего цилиндра пары играет отверстие ($\varnothing=6,100$ мм) корпуса распылителя 6, который в помощью шкивных 3 и шестеренчатой передач приводится во вращение в стакане 5 реверсивным асинхронным двигателем Д. В стакане размещены электрические нагреватель и термометр сопротивления R_t . «Внутренним» цилиндром пары служит запорная игла распылителя 7, подвешенная на стальной струне 10 с помощью цангового зажима и центрирующего ролика. На зажиме располагаются грузы 8, обеспечивающие натяжение струнного подвеса и зеркало 9. На зажиме располагаются грузы 8, обеспечивающие натяжение струнного подвеса и зеркало 9.

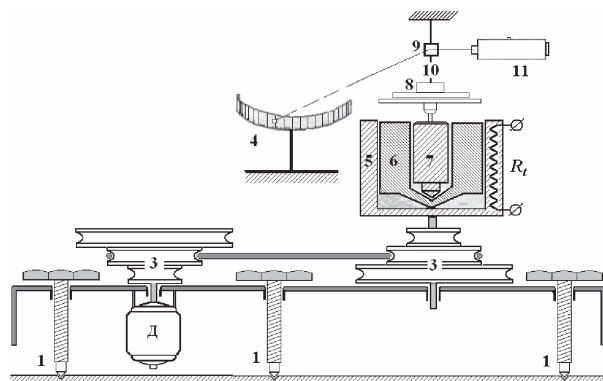


Рис.1. Схема цилиндрического ротационного вискозиметра с упругим струнным торсионом

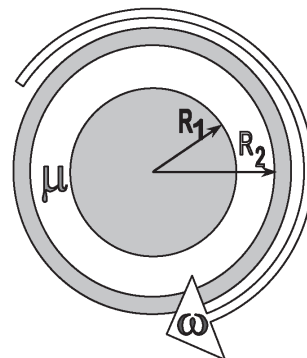


Рис.2. Схема зазора ротационной пары вискозиметра с однородной прослойкой жидкости вязкостью μ в нем.

В отличие от [8], измерителем крутящего момента сил вязкого трения $M_{тр}$, закручивающего «внутренний» цилиндр, служит упругий струнный торсион. По углу 2φ отклонения (на шкале 4) отраженного от зеркала луча лазерного осветителя 11 определяется момент $M_{упр} = k\varphi$, компенсирующий момент $M_{тр}$, закручивающий торсион. Пять положений верхней точки закрепления струны определяют различные, необходимые при измерениях в широком интервале зазоров и скоростей сдвига, чувствительности измерителя. Толщина прослойки жидкости, определяемая зазором пары, задается использованием сменных «внутренних» цилиндров 7 (из набора¹ запорных игл распылителя) различных диаметров.

4. Соотношения для расчета реологических параметров ЭЖК слоя в двух простейших его моделях и методика измерений. Как известно, выражение, связывающее момент $M_{тр}$, действующий на неподвижный цилиндр (радиуса R_1) со стороны «внешнего» (R_2), вращающегося с угловой скоростью ω , с коэффициентом вязкости μ жидкости в зазоре (рис.2) может быть получено из уравнения Навье – Стокса для установившегося осе симметричного течения и имеет вид:

$$M_{тр} = \mu \cdot \frac{4\pi \cdot l \cdot R_1^2 \cdot R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \cdot \omega. \quad (1)$$

¹ Набор изготовлен в цехе топливной аппаратуры Одесского СРЗ №1.

Ввиду специфической, для используемой в приборе ротационной пары, малости зазора ($D \sim 10^{-5}$ м) в сравнении с радиусами ($R_1 \approx R_2 \approx R \approx 3 \cdot 10^{-3}$ м) цилиндров $R_2 = R_1 + D$; $D \ll R$, в приближении первого порядка малости для закручивающего «подвешенный» цилиндр момента сил вязкого трения $M_{\text{тр}}$ получается более простое выражение:

$$M_{\text{тр}} = \frac{2\pi \cdot \mu \cdot l \cdot R^3}{D} \cdot \omega = 2\pi \cdot l \cdot \frac{R^2}{D} \cdot V \cdot \mu = 2\pi \cdot l \cdot R^2 \cdot \mu \cdot \gamma, \quad (2)$$

где $\gamma = V/D$ – скорость сдвиговой деформации (с^{-1}).

При измерениях момент (2) компенсируется экспериментально определяемым (по углу поворота φ «подвешенного» цилиндра) моментом упругих (или квазиупругих) сил «закрученного» подвеса $M_{\text{упр}} = K \cdot \varphi$. Поэтому для расчета коэффициента вязкости однородной прослойки жидкости или «эффективной» $\mu_{\text{эфф}}$ – неоднородной прослойки по известным параметрам зазора (l, D, R), упругим свойствам подвеса: модуля K , линейной скорости $V = \omega \cdot R_2$ вращения «внешнего» цилиндра и измеряемого при этой скорости угла φ , получаем рабочую формулу:

$$\mu_{\text{эфф}} = K \frac{D \cdot \varphi}{2\pi \cdot l \cdot R^2 \cdot V}, \quad \mu_{\text{эфф}} = C \frac{D\varphi}{V} = \frac{C \cdot \varphi}{\gamma}, \quad (3)$$

где $C = \frac{K}{2\pi \cdot l \cdot R^2}$ – постоянная прибора.

Формула (3) позволяет в опыте по измеряемым углам φ_i при соответствующей скорости V_i установить зависимость коэффициента вязкости $\mu_{\text{эфф}}(V; D)$ жидкой прослойки различной толщины D от сдвиговой скорости V (или скорости деформации γ) и может быть использована для оценки реологических характеристик ЭЖК слоя в его различных моделях.

Получим соотношения, позволяющие по измеренной величине $\mu_{\text{эфф}}(V; D)$ установить такие параметры слоя как вязкость μ_s и равновесную толщину d_{0s} , а также – «срезание слоя» течением. В простейшей модели «жесткого срезаемого» слоя ($\mu_s = \infty$) очевидно, как и в [14], в (3) вместо толщины зазора D необходимо использовать толщину слоя текущей жидкости D' равную: $D'(V) = D - 2d_s(V)$. В этом приближении именно в таком зазоре меньшей толщины участвует в сдвиговом течении изотропная жидкость с ее коэффициентом вязкости μ_0 , и поэтому:

$$\mu_0 = C \cdot (D - 2 \cdot d_s) \cdot \frac{\varphi}{V} = \left(1 - 2 \cdot \frac{d_s}{D}\right) \cdot \frac{C \cdot \varphi}{\gamma} \quad (4)$$

Из (3) и (4) следует соотношение для расчета изменяющейся со скоростью толщины ЭЖК слоя d_s как функции определяемой в эксперименте «эффективной» вязкости, которая, в свою очередь, зависит от скорости сдвигового течения $\mu_{\text{эфф}}(V)$:

$$d_s(V) = \frac{D}{2} \cdot \left(1 - \frac{\mu_0}{\mu_{\text{эфф}}}\right) \quad (5)$$

Величина коэффициента μ_0 (и его температурная зависимость) определяется из опытов, в которых наличие приповерхностного слоя не сказывается на вяз-

кости прослойки, в частности, когда $d_s \ll D$, тогда $\mu_0 = \mu_{эфф}$. Условие $d_s \ll D$ очевидно выполняется в больших зазорах ротационной пары, а также при больших сдвиговых скоростях, при которых приповерхностный слой «срезается» и $d_s \rightarrow 0$. Кроме того, величину μ_0 можно, как это было указано, измерять в опытах с помощью щелевого вискозиметра [14,15] и вискозиметра Освальда².

По установленной зависимости $d_s(V)$ определяются такие реологические параметры «жесткого срезаемого слоя» как «начальная» (при отсутствии «срезающего» слой течения) толщина слоя $d_{0s} = d_s(V \rightarrow 0)$ и его «гидродинамическая прочность» U [14] - значение сдвиговой скорости течения, при которой d_{0s} уменьшается в e раз: $d_s(U) = d_{0s}/e$.

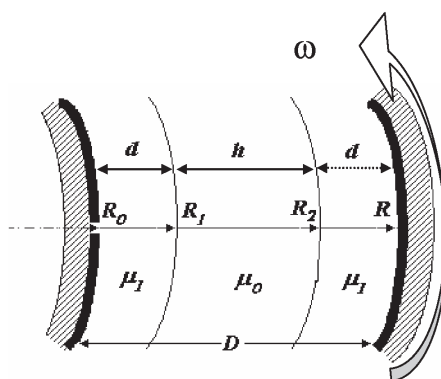


Рис.3. К расчету момента сил, закручивающего «подвешенный» цилиндр, в прослойке ротационной пары вискозиметра, содержащей ЭЖК: слой вязкостью μ_s , а в центральной части - изотропную жидкость с коэффициентом вязкости μ_0 .

В модели «**ЭЖК слой постоянной вязкости**» прослойка жидкости в коаксиальном зазоре (рис.3) содержит пристенные слои толщиной $d_s = d$ с коэффициентом вязкости μ_1 и между ними - слой толщиной h изотропной, «объемной» жидкости с коэффициентом вязкости μ_0 .

Задача (1), (2) для сдвигового течения такой прослойки жидкости в зазоре отличается от задачи для однородной прослойки лишь граничными условиями. Из уравнения Навье-Стокса:

для линейной скорости $V(\rho)$ сдвигового течения жидкости в зазоре получим:

$$\begin{aligned} \mu(\Delta \vec{V})_\varphi &= 0 \\ 0(\Delta \vec{V})_\varphi &= \Delta_\rho V_\varphi - \frac{1}{\rho^2} \cdot V_\varphi \quad \Delta_\rho = \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial}{\partial \rho} \right), \\ V_\varphi'' + \frac{1}{\rho} \cdot V_\varphi' - \frac{1}{\rho^2} \cdot V_\varphi &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

² В капиллярах последнего диаметром $\varnothing \geq 0,5$ мм влияние ЭЖК слоя моторного масла на величину измеряемой вязкости μ_0 не превышает 1%.

Краевые условия этой задачи складываются из требования сцепления текущей жидкости со стенками и условия сопряжения скоростей и вязких напряжений на границах областей:

$$\begin{aligned} V_1(R_0)=0; \quad V_1(R_1)=V_2(R_1); \quad V_3(R_2)=V_2(R_2); \quad V_3(R)=\omega \cdot R; \\ \sigma_1(R_1)=\sigma_2(R_1); \quad \sigma_2(R_2)=\sigma_3(R_2). \end{aligned} \quad (7)$$

Из характеристического для (6) уравнения: $v(v-1)+v-1=0$ и его решения $v^2=1 \Rightarrow v=\pm 1$ следует, что линейная скорость как функции текущего радиуса равна: $V_\varphi = a \cdot \rho + \frac{b}{\rho}$, а в каждой из областей она определяется следующими выражениями:

$$\begin{aligned} V_1 &= a_1 \rho + \frac{1}{\rho} b_1 \quad R_0 \leq \rho \leq R_1, \\ V_2 &= a_2 \rho + \frac{1}{\rho} b_2 \quad R_1 \leq \rho \leq R_2 \\ V_3 &= a_3 \rho + \frac{1}{\rho} b_3 \quad R_2 \leq \rho \leq R, \end{aligned} \quad (8)$$

Напряжение силы вязкого трения, связанное со скоростью: $\sigma_{\rho\varphi} = \mu \cdot \left(\frac{\partial V_\rho}{\partial \rho} - \frac{V_\varphi}{\rho} \right)$,

на границе $\rho=R_0$ равно: $\sigma(R) = \mu_1 \cdot \frac{2b_3}{R_0^2}$ и определяет момент сил трения, действующего на «внутренний» цилиндр с длиной образующей l :

$$M_{\text{тр}}(R_0) = (2\pi \cdot R_0 \cdot l \cdot \sigma) \cdot R_0 = 4\pi \cdot l \cdot b_3 \cdot \mu_1$$

Решение системы (8) дает для константы b_3 выражение, зависящее от соотношения коэффициентов вязкости слоев μ_1/μ_0 :

$$b_3 = \frac{\omega}{1/R^2 - 1/R_0^2 - (\mu_1/\mu_0 - 1) \cdot (1/R_1^2 - 1/R_2^2)}$$

Подставляя последнее в выражение для момента сил $M_{\text{тр}}(R_0)$, получим подобное (2) соотношение:

$$M = \frac{4\pi \cdot \mu_1 \cdot l \cdot \omega}{1/R^2 - 1/R_0^2 - (\mu_1/\mu_0 - 1) \cdot (1/R_1^2 - 1/R_2^2)}.$$

Ввиду того, что в опытах зазор $D=R-R_0 < 50$ мкм и потому $D \ll R$ (см. рис.3), в том же приближении первого порядка малости величины D/R для момента сил вязкого трения $M_{\text{тр}}$, закручивающих «подвешенный» цилиндр, получим (с учетом $h=D-2d$) для рассматриваемой модели также более простое выражение:

$$M_{\text{тр}} = \frac{2\pi \cdot \mu_1 \cdot l \cdot \omega}{(R - R_0) + (\mu_1/\mu_0 - 1) \cdot (R_2 - R_1)} = \frac{2\pi \cdot l \cdot R^2}{2d/\mu_1 + h/\mu_0} \cdot V_R = \frac{2\pi \cdot l \cdot R^2 \cdot \mu_0 \cdot \gamma}{1 - \frac{2d}{D} \left(1 - \frac{\mu_0}{\mu_1}\right)}.$$

Приравнивая последнее измеряемому моменту $M_{\text{тр}}$ (2), получим соотношение, связывающее коэффициент «эффективной» вязкости $\mu_{\text{эфф}}$ (экспериментально определяемый по (3)) прослойки толщиной D с коэффициентами вязко-

сти "объемной" жидкости (μ_o), ее ЭЖК слоя ($\mu_1=\mu_s$) и его общей толщины ($2d_s=2d$) в прослойке (см. рис.4):

$$\mu_{\text{эфф}}(V) = \mu_o \cdot \frac{1}{1 - \frac{2d_s(V)}{D} \cdot \left(1 - \frac{\mu_o}{\mu_s}\right)}.$$

Отсюда искомое соотношение для расчета толщины ЭЖК слоя имеет вид:

$$d_s(V) = \frac{D}{2} \cdot \frac{1 - \frac{\mu_o}{\mu_s}}{\frac{\mu_{\text{эфф}}}{\mu_s}}. \quad (9)$$

Как и следует ожидать, выражение (9), описывающее изменение толщины ЭЖК слоя в его модели «вязкого слоя», включает в себя как частный случай ($\mu_s \gg \mu_o$) модель «гидродинамического жесткого слоя». При известных значениях величин коэффициентов μ_o и μ_s по соотношению (9) из опыта, как и ранее, но уже для модели «вязкого» слоя ЭЖК, также определяются его реологические параметры: равновесная «начальная» толщина и «гидродинамическая прочность». Величина коэффициента μ_s устанавливается в экспериментах со «сверхтонкими» прослойками (в которых находится только ЭЖК фаза³), или в изотермических опытах по измерению вязкости неоднородных прослоек различной толщины D в щелевом вискозиметре.

В области больших зазоров (и малых скоростей) отклонения не велики и поэтому используется измеритель углов высокой чувствительности – струнный торсион по всей своей длине. Необходимость уменьшения (изменением длины струны) чувствительности при малых зазорах и больших скоростях, когда велики углы закрутки, существенно усложняет методику измерений. Кроме того, недостатком струнного торсиона является то, что при значительном его закручивании пропорциональность $M_{\text{упр}}$ углу ϕ несколько нарушается, при этом в (3) приходится учитывать зависимость $C(\phi)$, определяемую градуировкой. Калибровка прибора проводится по жидкостям с известной, измеренной независимыми стандартными методиками, вязкостью.

5. Экспериментальные результаты и их обсуждение. В качестве примера использования описанного вискозиметра и предложенной методики оценки реологических свойств ЭЖК слоев, приведем результаты по особенностям вязкости микронных прослоек моторного масла СAE-30. Масло тщательно очищалось от твердых примесей (бумажным и Шотовским фильтрами) и вискозиметрами Освальда (капилляры $\varnothing=0,82$ мм и $\varnothing=1,12$ мм) определялась температурная зависимость коэффициента вязкости «объемной» жидкости. Как указано выше, изготовителями моторных смазочных материалов для повышения их противоизносных свойств - «маслянистости» в масла, в том числе и в СAE-30, вводят присадки ПАВ. Последние как сурфактанты способствуют образованию на металлической поверхности ЭЖК слоя гомеотропной ориентации. Поэтому в

³ Так, для масла СAE-30, с добавкой (1%) олеиновой кислоты, на металлической поверхности это условие выполняется при малых скоростях в зазорах $D = 4$ мкм и 7 мкм.

предварительных измерениях оптической анизотропии (методом щелевого световода: переменной толщины и клиновидного [11,13]) в тонких ($D \sim 4 \div 30$ мкм) прослойках масла между стальными подложками наблюдалось двулучепреломление (ДЛП), свидетельствующее о наличии такого слоя толщиной $d_{0s} \sim 1 \div 2$ мкм. Проведенное нами дополнительное легирование базового масла ПАВ-ом путем введения 1 об % олеиновой кислоты (ОК) повышало величину ДЛП, что свидетельствовало о возрастании толщины ЭЖК слоя ($d_{0s} \sim 5$ мкм при $T \approx 273$ К) такой композиции.

Результаты вискозиметрических опытов в одной из прослоек ротационной пары ($D=20$ мкм) приведены на рис.5 в виде не традиционных реологических кривых - экспериментальных зависимостей от скорости сдвиговой деформации $\dot{\gamma}$ (с^{-1}) коэффициентов «эффективной» вязкости (Па·с) легированного САЕ-30 и, для сравнения, очищенного базового масла - без добавки ОК.

Наблюдаемое (рис.4 и рис.5) понижение со скоростью деформации величины коэффициентов вязкости естественно связать со структурными изменениями в неоднородных прослойках жидкости, включающих ЭЖК слои с повышенной (в сравнении с «объемной») вязкостью - в силу гомеотропной ориентации молекул.

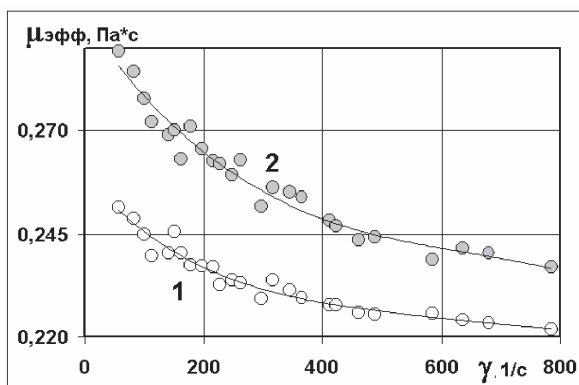


Рис.4. Эфф.вязкость САЕ-30 от скорости деформации. Прослойка $D=20$ мкм. 1- «очищенное»; 2- с присадкой (+1% ОК). $T \sim 291$ К.

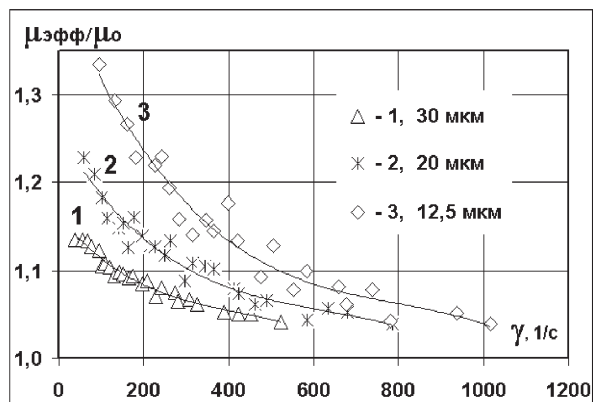


Рис.5. Относительная эфф.вязкость САЕ-30 +1% ОК от скорости деформации. Прослойки D (мкм): 1 – 30; 2 – 20; 3 – 12,5. $T=291,5$ К.

В рассматриваемой простой модели слоя «постоянной вязкости» с ростом скорости деформации уменьшается лишь толщина структурированного слоя⁴, что и приводит уменьшению влияния этого слоя на общую - эффективную вязкость прослойки. В меньшей степени это влияние проявляется в прослойках больших толщин D , что следует из рис.5. На нем приведены зависимости относительной (по отношению к вязкости μ_0 «объемной» жидкости) эффективной

⁴ Ясно, что реально при этом происходят и структурные изменения в слое: например, переориентация анизометричных молекул масла (изменение направления вектора-директора) и обусловленная этим вязкость слоя, что должно учитываться в его более сложной реологической модели.

вязкости легированного масла в трех зазорах вискозиметра. Из рисунков видно также, что при высоких скоростях деформации ($\gamma \sim 500 \div 1000 \text{ с}^{-1}$) коэффициент вязкости $\mu_{\text{эфф}}$ становится равным (рис.4, рис.5) его значению μ_0 ($\sim 0,23 \text{ Па}\cdot\text{с}$, СAE-30+1% ОК и $\sim 0,22 \text{ Па}\cdot\text{с}$, «чистое» СAE-30 при $T=291 \text{ К}$) для объемной жидкости.

Полученные экспериментальные зависимости позволяют по выведенным соотношениям (5) и (9) рассчитать толщину d ЭЖК слоя и ее изменение с течением в простейших моделях слой «гидродинамически жесткий» и «постоянной вязкости», соответственно. Такие расчетные толщины d_s «срезаемого» течением ЭЖК слоя легированного масла (в его прослойке $D=20 \text{ мкм}$) от сдвиговой скорости V (мм/с) приведены на рис.7.

Аппроксимация точек (как и в [9], экспонентой: $d_s = d_0 \cdot \exp(-V/U)$) позволила провести оценку «начальной» толщины ЭЖК слоя в обеих его моделях ($d_0 \approx 1,8$ и $4,6 \text{ мкм}$, соответственно) и такой его «гидродинамической прочности» как скорость сдвига $U=9,4 \text{ мм/с}$, при которой толщина уменьшается в e раз. На рис.7 приведены результаты расчета «срезания» слоя (в его «вязкой» модели)

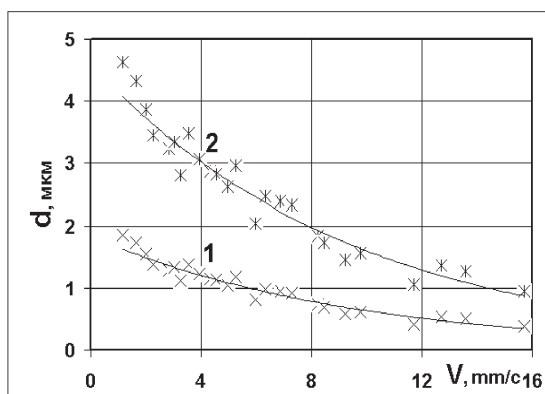


Рис.6. Толщина ЭЖК слоя СAE-30 +1% ОК от скорости сдвига. Модели: 1 – «жесткий», $d_0=1,8$; 2 – «вязкий», $d_0=4,6$. $U=9,4 \text{ мм/с}$. Прослойка $D=20 \text{ мкм}$. $T=290,5 \text{ К}$.

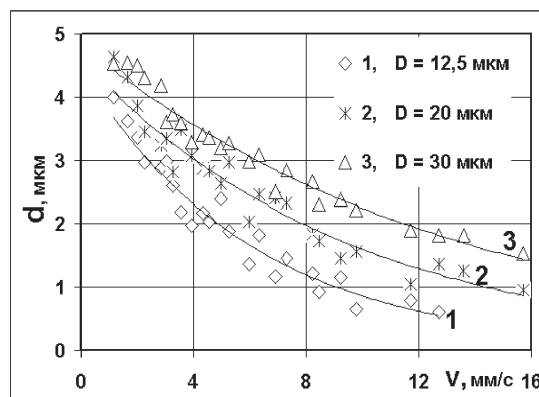


Рис.7. Толщина «вязкого» ЭЖК слоя СAE-30 +1% ОК от скорости сдвига. D (мкм) и «прочность» U (мм/с): 1 – 12,5 и 6,1; 2 – 20 и 9,4; 3 – 30 и 13,9. $\langle d_0 \rangle = 4,5$. $T=291,5 \text{ К}$.

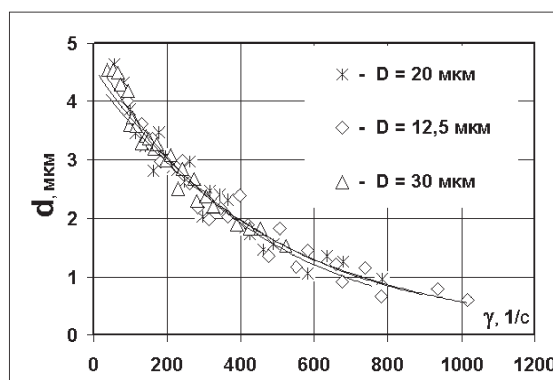


Рис.8. Толщина «вязкого» ЭЖК слоя СAE-30 +1% ОК от скорости деформации. D (мкм) и «прочность» γ^* (с^{-1}): 12,5 – 488; 20 – 472; 30 – 433. $\langle d_0 \rangle = 4,5$. $T=291,5 \text{ К}$.

от сдвиговой скорости V (мм/с) уже в трех зазорах D ротационной пары (12,5; 20 и 30 мкм) - по данным экспериментов, показанных на рис.5.

Рассчитанная равновесная толщина d_0 слоя в этих опытах, проведенных при близких температурах ($T \approx 20^\circ\text{C}$, $\Delta T = 0,5^\circ\text{C}$), практически одинакова и в среднем составляет $d_0 \approx 4,5$ мкм. Отметим, что характер «срезания» слоя течением зависит (рис.7) от размера D прослойки. В толстых прослойках крутизна кривой $d(V)$ меньше, а введенная выше «прочность» слоя U , характеризующая эту крутизну, больше.

Напротив, в координатах: толщина слоя « d_s » – скорость деформации « γ » эти зависимости идентичны. На рис.8 приведены результаты соответствующего пересчета тех же экспериментальных (рис.5) и расчетных (рис.7) зависимостей толщины $d_s(\gamma)$ «вязкого» ЭЖК слоя, а также параметры аналогичных экспоненциальных аппроксимаций $d_s = d_0 \cdot \exp(-\gamma/\gamma^*)$. Как видно из рис.8, в прослойках различных толщин D практически совпадают не только начальная толщина «вязкого» ЭЖК слоя (ее среднее значение $\langle d_{0s} \rangle \sim 4$ мкм), но и крутизна кривых. Т.е. величина уже такой «гидродинамической прочности» слоя как скорость деформации сдвига $\gamma = \gamma^*(\text{с}^{-1})$, при которой толщина слоя ($d_s(\gamma^*) = d_0/e$), практически не зависит от размера прослойки D . Из анализа таких же, в прослойках различных толщин D , зависимостей $d_s(\gamma)$ в модели «жесткого» ЭЖК слоя следует, что при ином значении параметра d_0 (~ 2 мкм), величина параметра γ^* остается неизменной. Независимость величины γ^* от условий опыта и, в отличие от d_0 , от принятой модели расчета, позволяет утверждать, что этот параметр может служить реологической характеристикой ЭЖК слоя. Для «вязкого» и «жесткого» слоя САЕ-30 с присадкой ОК при температуре $T = 293$ К средняя величина $\langle \gamma^*_{\text{в}} \rangle \approx 460 \text{ с}^{-1}$. Для препарата без присадки значение этого параметра заметно меньше: $\langle \gamma^*_{\text{ж}} \rangle \approx 310 \text{ с}^{-1}$ (при той же температуре).

Выводы. Измерения вязкости тонких прослоек позволяют, дополнительно к известным методикам изучения структурных свойств ЭЖК слоев, определить их реологические особенности, что актуально для решения теоретических и прикладных вопросов, в частности, задач, связанных с эксплуатацией узлов трения. Ротационным вискозиметром усовершенствованной конструкции установлено, что эффективный коэффициент вязкости $\mu_{\text{эфф}}$ микронных прослоек моторного масла САЕ-30 отличается от его значения μ_0 в «объеме» жидкости и зависит от скорости сдвигового течения V в прослойке и ее толщины D . Это связано с неоднородностью масляных прослоек - наличием в них ЭЖК слоев, толщина которых d_s с ростом V убывает. Получены соотношения, позволяющие по экспериментальным зависимостям $\mu_{\text{эфф}} = F(V; D)$ рассчитать в двух простых гидродинамических моделях слоя - «жесткого» и «вязкого» такие его свойства как вязкость μ_s , равновесную толщину d_{0s} , зависимость $d_s(V)$ – «срезание слоя» со скоростью. Введенный параметр γ^* - скорость сдвиговой деформации, разрушающая слой, характеризует его «гидродинамическую прочность» на «срезание» и может служить реологической характеристикой ЭЖК слоя. Для моторного масла САЕ-30 с присадкой (1 об % олеиновой кислоты) на стальной подложке $d_0 \sim 4$ и 2 мкм (в гидродинамических моделях слоя «вязкий» и «жесткий», соответственно), а $\gamma^* \sim$

460с^{-1} . Рассчитываемая равновесная толщина слоя d_0 и параметр γ^* определяют антифрикционное качество масла. Этим качеством можно управлять путем легирования смазочного материала ПАВ, способствующим образованию ЭЖК слоя и влияющим на его свойства.

Литература

1. Алтоиз Б.А. Асланов С.К. Моделирование структурированного приповерхностного слоя в динамике вязкой жидкости. // Доповіді національної академії наук України. – 2003. – Т.9 – С.76-79.
2. Гулин Е.И., Якубо Д.П. и др. Справочник по горюче-смазочным материалам в судовой технике. -Л.: Судостроение, 1987. – 224 с
3. Папок К.К. Смазочные масла. -М.: Воениздат, 1962. – 256 с.
4. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения. – М.: Наука, 1964. – 541с.
5. Derjaguin B.V., Altoiz B.A. and Nikitenko I.I. Epitropic Liquid Crystal layers of Nonmesogens on Quartz Substrate. // Journal of Colloid and Interface Science. 1991. – Vol.145. N2. – P.441-446
6. Дерягин Б.В., Поповский Ю.М., Алтоиз Б.А. Открытие СССР “Явление образования гомогенной граничной жидкокристаллической фазы немезогенной жидкости”. Диплом N388. // Открытия и изобретения 1991. N12.- С.1.
7. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. -М.: Наука, 1985. – 398 с.
8. Derjaguin B.V., Karasev V.V. Study of boundary viscosity of organic liquids by the blow-off method. // Surface and Coll. Sciences. N.J: Phenum Press. – 1993. – V.15. – P.221-264.
9. Фуртак Э.С., Алтоиз Б.А., Пыжов Е.В. Ротационный вискозиметр для исследования тиксотропии структурированных прослоек жидкости// Международн. период. сб. научн. трудов "Обработка дисперсных материалов и сред". – 2002. – Вып.12. – С.268-271
10. Алтоиз Б.А., Пыжов Е.В., Народицкая Т.В., Ханмамедов С.А. Трибологические особенности граничных смазочных слоев судовых топлив и масел. // Научн. техн. сборник "Судовые машины и механизмы". – Одесса: 2003. – №8 –С.45-49
11. Поповский Ю.М., Ханмамедов С.А., Заблоцкий Ю.В. Связь ориентационной упорядоченности в пристенных слоях со «смазочной способностью». // Вопросы физики формообразования и фазовых превращений. – Калинин: КГУ. –1989. – С.49-57.
12. Сайт <http://www.tribo.ru/new/dictionary.html>. «Граничная смазка» // ТИС (Трение, износ, смазка). Научно-технический электронный журнал. Словарь. 2005.
13. Алтоиз Б.А., Поповский Ю.М. Физика приповерхностных слоев жидкости. – Одесса: Астропринт, 1996. – 153 с.
14. Поповский Ю.М., Берникова Н.Б. Исследование оптической анизотропии граничных слоев полидиметилсилоксилван и его смесей с тетрадеканом // Вопросы физики формообразования и фазовых превращений. – Калинин: КГУ, 1988. – С.25-32.

- 15.Алтоиз Б.А., Поповский А.Ю. Метод клиновидной кюветы исследования ориентационно упорядоченных пристенных слоев, сформированных вблизи непрозрачных подложек. // Вісник Одеськ. держ. ун-ту. – 1998. – № 4. – Фіз.-мат. науки. С. 22 -26;
- 16.Царгородская А.Б., Алтоиз Б.А., Поповский А.Ю. Исследование ориентационной упорядоченности пристенных слоев нитробензола, образованных на металлической поверхности. // Физика аэродисперсных систем. – Одесса: Вища школа, 1998. – В.37. – С.104-107.
- 17.Алтоиз Б.А., Поповский Ю.М. Капиллярный вискозиметр для исследования тонких неоднородных жидких прослоек. // Вісник Одеськ. держ. ун-ту. – 2001. – Т.6 № 3. Фіз.-мат. науки. – С. 191–198.
- 18.Алтоиз Б.А., Дейнега В.Т. Влияние граничного слоя жидкости на эффективность теплообмена в системах с каналами малого сечения. // Научно-технический сборник «Тепловые режимы и охлаждение радиоэлектронной аппаратуры». – Одесса, 2001. – Вып.1. – С.15-18
- 19.Алтоиз Б.А., Даданова Е.Ю., Дейнега В.Т., Макуха Е.В. Измерение параметров граничного слоя теплоносителя влияющих на интенсивность теплообмена. // Там же, – 2003. – Вып. 1. – С.29-33.

Б. А. Алтоіз, С. К. Асланов, А. Ф. Бутенко

Ротаційний віскозиметр для дослідження мікронних прошарків

АНОТАЦІЯ

Ротаційним віскозиметром досліджена залежність в'язкості тонких (4-50 мкм) неоднорідних прошарків, які включають пристінні структуровані шари, від швидкості зсувної течії. Розраховані основні реологічні властивості ЕРК шару: коефіцієнт в'язкості, характер "зрізу" шару зі швидкістю течії та "гідродинамічна стійкість" у моделях "жорсткого" та "в'язкого" шару.

B. A. Altoiz, S. K. Aslanov, A. F. Butenko

Rotational viscometer for measuring of micron interlayers

SUMMARY

Rotational viscometer was used for measuring of the viscosity dependence of thin (4 -50 μm) inhomogeneous interlayer, inclusive structured wall-adjacent layers, on the velocity of shear flow. The main rheological characteristics of ELC layers, such as viscosity index, the character of the layer “shearing” with the velocity flow and the hydrodynamic strength according to the models of “hard” and “viscous” layer were calculated.