

03;12

## Сдвиговое течение гетерофазной жидкой прослойки и ее структурно-реологическая модель

© Б.А. Алтоиз, С.К. Асланов, С.В. Кириян

Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова,  
65082 Одесса, Украина  
e-mail: altba@mail.ru; kiriyans@ukr.net

(Поступило в Редакцию 1 ноября 2010 г.)

Ротационным вискозиметром исследовано сдвиговое течение микронных прослоек *n*-гексадекана. Его вязкость в таких прослойках отличается от вязкости жидкости в „объеме“, определяемой капиллярными вискозиметрами. Это объясняется тем, что в тонких прослойках проявляется роль приповерхностных структурированных слоев с иной вязкостью. Для описания особенностей течения включающей такие слои неоднородной прослойки рассмотрена ее реологическая модель, в которой молекулы в слоях переориентируются течением и соответственно их вязкость зависит от скорости деформации. В рамках модели определены параметры структурированного слоя.

### Введение

Известно, что в тонких прослойках ряда немезогенных индивидуальных алифатиков и ароматиков может проявиться структурная неоднородность, связанная с образованием на ограничивающих прослойку подложках приповерхностных эпитропно-жидкокристаллических (ЭЖК) слоев [1]. Благодаря им такие прослойки частично анизотропны. Для них характерны двулучепреломление (ДЛП) [2], дихроизм интенсивных полос поглощения [3], неньютоновское течение с вязкостью  $\eta_{\text{эф}}$ , отличной [4] от вязкости „объемной“ жидкости  $\eta_0$  (определяемой в капиллярных вискозиметрах „большого“ диаметра  $\sim 1$  мм).

Аналогичные особенности присущи и микронным прослойкам смазочных жидкостей — моторных масел на минеральной и синтетической основе [5]. Наличие ЭЖК слоев в прослойке масла триады трения тесно взаимосвязано с противоположными характеристиками трибосопряжения [6,7]. Основной износ поверхностей трения, как известно [7], приходится именно на режимы смазки, в которых толщина масляной прослойки соизмерима с толщиной структурированного слоя ( $d_s \sim 0.1-1 \mu\text{m}$ ), свойства которого во многом и определяют так называемую „маслянистость“ [8] смазочной среды. В измерениях ДЛП было установлено [5], что толщина ориентированных слоев на металлических подложках в прослойках углеводородных масел (как и ароматиков [9]) может достигать существенной величины ( $d_s \sim 5 \mu\text{m}$ ). В реологических исследованиях таких структурно-неоднородных масляных прослоек в напорном [10] и сдвиговом течении [11] установлена их повышенная вязкость, обусловленная гомеотропной ориентацией молекул приповерхностных структурированных слоев. Аналогичные результаты были получены и для сдвигового течения тонких прослоек нормальных алканов [11,12] — представителей предельных углево-

дородов, в большом количестве входящих в смазочные жидкости.

Для анализа результатов измерений реологии прослоек, содержащих структурированные слои, и получения информации о последних необходимо применение определенной структурно-реологической модели. В качестве последней ранее [12] была использована модель течения прослойки с ЭЖК слоями, вязкость которых постоянная по слою и не зависит от интенсивности течения. В рамках такой модели проведены оценка начальной (в отсутствие течения) толщины структурированных слоев  $d_0$ , алифатических смазочных жидкостей и „срезание“ слоя течением. Характер утончения слоя и снижение его „гидродинамической прочности“ [12], определяющей скорость „срезания“ ЭЖК сдвиговым течением, свидетельствовали о разрушении его структуры и переходе в изотропное состояние.

Однако следуемая из измерений ДЛП прослоек моторных масел размытость межфазной границы ЭДК—изотропная жидкость [5] указывает на несовершенство представления слоя как структурно однородного. Неоднородностью слоя объясняется и зависимость его „гидродинамической прочности“ от толщины прослойки [12]. Таким образом, модель однородного приповерхностного ЭЖК слоя не вполне адекватно соответствует результатам не только оптических, но и реологических опытов. Это связано с уменьшением ориентационной упорядоченности в слое по мере удаления от подложки и с переориентацией течением дитектора мезофазы, вследствие чего изменяется вязкость слоя.

Поэтому для объяснения вискозиметрических опытов необходима реологическая модель прослойки, содержащей пристеночные слои с зависящими от интенсивности течения и изменяющимися по мере удаления от стенки упорядоченностью и чувствительным к последней коэффициентом вязкости.

## Постановка задачи

Соответствующая гидродинамическая модель структурированного слоя была использована для анализа результатов измерений вязкости жидкости, протекающей в напорном течении через тонкий — микронный — щелевой зазор, существующие на стенках которого приповерхностные слои уже сказывались на профиле скорости напорного течения [9].

Однако в прослойках смазки в трибосопряжениях, как правило, реализуется ненапорное, а сдвиговое течение. Поэтому приведем результаты реологических опытов по такому течению гетерофазных прослоек одного из углеводородов, а для их обсуждения применим подобную структурно-реологическую модель прослойки (с „переменной вязкостью“ ЭЖК слоев в ней) и для сдвигового течения.

## Экспериментальные результаты

Прослойки жидкости размещались в коаксиальном зазоре  $D$  ротационной пары вискозиметра [12] между „внешним“ цилиндром (с отверстием радиуса  $R$ ), вращающимся с угловой скоростью  $\omega$  относительно „внутреннего“ неподвижного цилиндра (радиуса  $R - D$ ). По закручивающему последнему измеряемому моменту сил трения  $M_0$ , при дискретных задаваемых скоростях сдвиговой деформации прослоек  $\gamma^* = \omega R/D = V^*/D$  рассчитывалась их вязкость (для содержащих ЭЖК слои прослоек — их эффективная  $\eta_{\text{эф}}$  или кажущаяся). Отличительной особенностью прибора [12] является возможность измерения вязкости ( $\eta = 0.001 - 0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ) микронных (толщиной  $D = 1 - 50 \mu\text{m}$ ) прослоек в диапазоне скоростей сдвиговых деформаций  $\gamma^*$ , равных  $10^2 - 10^4 \text{ s}^{-1}$ . Контроль толщины зазора  $D$  между коаксиальными цилиндрами проводился путем калибровочных вискозиметрических опытов с прослойками жидкости известной вязкости, в которых приповерхностные структурированные слои на ограничивающих подложках не образуются. Возможные изменения зазора ( $\delta_D \leq 5\%$ ) в процессе измерения контролировались емкостным методом. Температура прослойки жидкости измерялась ( $\Delta T = \pm 0.03 \text{ K}$ ) электрическим термометром сопротивления. Им же в изотермических опытах по измерению вязкости прослойки контролировалось и простоянство ее температуры. Влияние незначительного изменения температуры (не более  $0.4 \text{ K}$  за время проведения опытов) прослойки на ее вязкость учитывалось при обчете результатов эксперимента. Погрешность в измерении величины коэффициента вязкости  $\eta_{\text{эф}}$  прослоек составляла  $\delta_\eta \sim 5\%$  и в основном обусловлена погрешностью в определении их толщины.

Измеряемая — „эффективная“ вязкость  $\eta_{\text{эф}}$  микронных прослоек жидкости сравнивалась с ее вязкостью  $\eta_0$  в „объеме“, определяемой капиллярными вискозиметрами

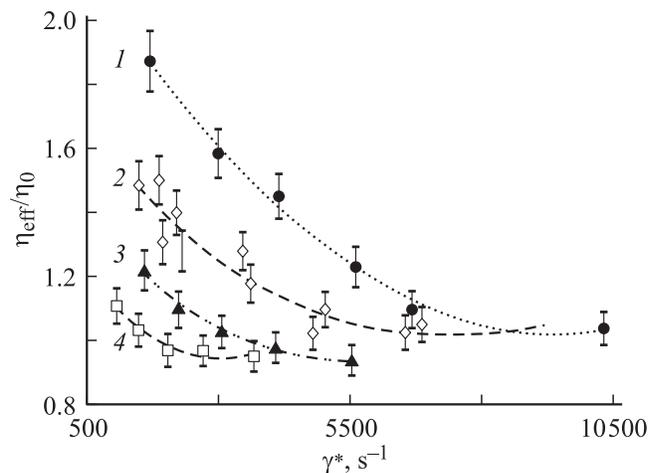


Рис. 1. Зависимость относительной вязкости  $\eta_{\text{эф}}/\eta_0$  прослоек  $n$ -гексадекана от скорости деформации  $\gamma^*$ . Толщина прослойки  $D$  ( $\mu\text{m}$ ). 1 — 1.5, 2 — 4.5, 3 — 10.5, 4 — 15.  $T = 294 - 297 \text{ K}$ .

диаметром 0.99 и 2.62 mm. Различие  $\eta_{\text{эф}} \neq \eta_0$  свидетельствовало о проявлении структурной неоднородности в тонкой прослойке, а зависимость  $\eta_{\text{эф}}$  от задаваемых скоростей сдвига  $\gamma^*$  — от изменении структуры с течением.

В качестве объекта исследования был выбран представитель гомологов нормальных алканов —  $n$ -гексадекан<sup>1</sup> ( $\text{C}_{16}\text{H}_{34}$ ), для которого при измерениях ДЛП установлено [3] наличие ЭЖК слоев в его сверхтонких прослойках. На рис. 1 представлены реологические зависимости относительного коэффициента вязкости  $\eta_{\text{эф}}/\eta_0$  его прослоек дискретной толщины — в зазорах ротационной пары  $D = 1.5, 4.5, 10.5$  и  $15 \mu\text{m}$  от скоростей сдвиговых деформаций  $\gamma^*$ .

Как следует из рис. 1, повышенные в сравнении с „объемными“  $\eta_0$  значения „эффективной“ вязкости  $\eta_{\text{эф}}$  микронных прослоек  $\text{C}_{16}\text{H}_{34}$  подтверждают наличие в них структурированных пристеночных ЭЖК слоев.

С увеличением скорости сдвиговой деформации  $\gamma^*$  вязкость прослоек уменьшается и стремится к „объемному“ значению  $\eta_0$ , что может быть объяснено разрушением структурированных слоев и переходом их в изотропную фазу. Уменьшение толщины прослойки приводит также к смещению реокривых в область более высоких значений вязкости  $\eta_{\text{эф}}/\eta_0$ . По-видимому, с утончением прослойки возрастает вклад в общую вязкость прослойки структурированных слоев (с отличным от „объемного“ значением вязкости).

Для установления их параметров рассмотрим реологическую модель течения прослойки с приповерхностными слоями „переменной вязкости“.

<sup>1</sup> Препарат производства НЗСП квалификации „ХЧ“.

## Модель течения прослойки со структурированными слоями „переменной вязкости“

При построении такой модели учтем, что величина зазора ( $D \sim 1-50 \mu\text{m}$ ) ротационной пары вискозиметра мала в сравнении с радиусами цилиндров ( $R \sim 3 \text{mm}$ ),  $D/R \ll 1$ . Это позволяет использовать представление течения коаксиальной прослойки жидкости как плоскопараллельного (между „подвижной“ ( $V^*$ ) и „неподвижной“ ( $V = 0$ ) стенками), см. рис. 2.

Систему координат свяжем с неподвижной стенкой, вдоль которой направлена ось  $x$ , а ось  $y$  — поперек потока. Последний состоит из трех областей: центрального III ( $d_s \leq y \leq D - d_s$ ), объемно-вязкого течения жидкости с постоянным коэффициентом вязкости  $\eta_3 = \eta_0 = \text{const}$  и двух структурированных пристеночных слоев I ( $0 \leq y \leq d_s$ ) и II ( $D - d_s \leq y \leq D$ ) „переменной вязкости“  $\eta_1 = \eta_2 = \eta_s$  каждый толщиной  $d_s$ .

Установившийся при каждой задаваемой  $\gamma^*$  профиль скорости в них (распределение  $V(y)$ ,  $0 \leq y \leq D$ ) обусловлен соответствующим распределением по слою величины коэффициента вязкости  $\eta(y)$ . Это распределение, в свою очередь, определяется переменной по толщине слоя структурой, которая зависит и от интенсивности течения. Аналитическую связь профилей скорости  $V(y)$  с локальным коэффициентом вязкости представим (с учетом симметрии, см. рис. 2), как и ранее [10], в виде степенной зависимости:

$$\eta_1(y) = C_1/[V_1(y) - V_1(0)]^\varepsilon \quad (\text{в слое I}) \quad \text{и}$$

$$\eta_2(y) = C_2/[V_2(D) - V_2(y)]^\varepsilon \quad (\text{в слое II}) \quad (1)$$

с неизвестной величиной показателя  $\varepsilon$ , определяющего степень принятой функциональной связи профиля вязкости с профилем скорости течения по прослойке. В отсутствие структуры для изотропной жидкости  $\eta(y) = \text{const} = \eta_0$ , профиль  $V(y)$  — линейный и  $\varepsilon = 0$ . Для структурированной жидкости  $\eta(y) \neq \text{const}$  и из предложенной связи (1) установившихся  $\eta(y)$  и  $V(y)$  следует, что  $\varepsilon \neq 0$ . Введенный таким образом показатель  $\varepsilon$  характеризует степень структурированности ЭЖК слоя, являясь аналогом параметра ориентационного порядка [13]. При приближении к стенкам ( $y \rightarrow 0$ ,  $y \rightarrow D$ ) скорость жидкости относительно них уменьшается, при этом из (1) видно, что структурированность и соответственно коэффициент вязкости  $\eta(y)$  возрастают. В рамках такого подхода в гидродинамическом моделировании отражается и то, что на стенках индуцированный поверхностью слой максимально структурирован. Здесь при  $\varepsilon > 0$  будут обеспечены бесконечные значения соответствующих коэффициентов вязкости ( $\eta_{1,2} \rightarrow \infty$ ), определяющие жесткое кристаллическое состояние жидкости на стенке.

Непрерывность коэффициента вязкости на границах между пристеночными слоями I и II и центральной

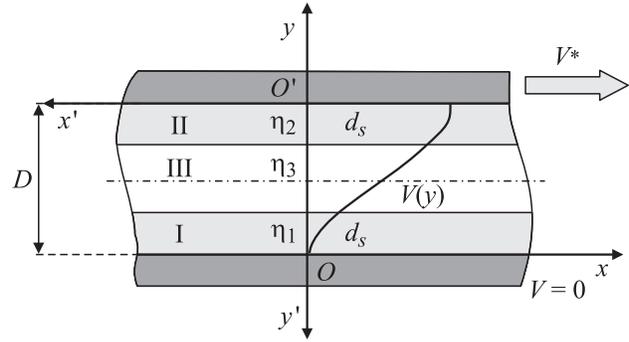


Рис. 2. Профиль скорости плоскопараллельного течения неоднородной (со структурированными пристеночными слоями толщиной  $d_s$  и вязкостью  $\eta_{1,2}$ ) жидкой прослойки.

областью объемно-вязкого течения III обеспечивается условиями:

$$\eta_1(y) = d_s = \eta_0, \quad \eta_2(y = D - d_s) = \eta_0, \quad \eta_3 = \text{const} = \eta_0, \quad (2)$$

благодаря которым окончательные зависимости для коэффициентов вязкости структурированных слоев I и II принимают вид:

$$\eta_1 = \eta_0 \left[ \frac{V_1(d_s)}{V_1(y)} \right]^\varepsilon, \quad \eta_2 = \eta_0 \left[ \frac{V^* - V_2(D - d_s)}{V^* - V_2(y)} \right]^\varepsilon. \quad (3)$$

В результате приходим к математической постановке следующей сопряженной краевой задачи для профиля скорости  $V_j(y)$  в плоском канале ( $j = 1, 2, 3$ ). Уравнение для вязкого напряжения имеет вид:

$$\frac{d\tau_j^{(\varepsilon)}}{dy} = \frac{d}{dy} \left[ \eta_j(V_j) \frac{dV_j}{dy} \right] = 0 \quad (4)$$

с общим интегралом для всего зазора, т.е. для совокупности областей  $j = 1, 2, 3$ :

$$\tau_j^{(\varepsilon)} = \eta_j \left( \frac{dV_j}{dt} \right) = C_0^{(\varepsilon)} = \text{const}. \quad (5)$$

Тем самым выполняются условия силового сопряжения решения (4) — непрерывность этих касательных напряжений на границах  $y = d_s$  и  $y = D - d_s$ . Непрерывность коэффициентов вязкости (3) на указанных границах влечет за собой и непрерывность градиента скорости ( $dV_j/dy$ ), т.е. гладкое сопряжение скоростных профилей  $V_j(y)$  между собой.

Для центральной зоны III объемно-вязкого течения, в которой  $\eta_3 = \eta_0 = \text{const}$ , из интеграла (5) получаем прямолинейный профиль скорости  $V_3(y)$  с постоянным наклоном:

$$\frac{dV_3}{dy} = \frac{C_0^{(\varepsilon)}}{\eta_0} \quad \text{или} \quad V_3(y) = \frac{C_0^{(\varepsilon)}}{\eta_0} y + C_1. \quad (6)$$

Постоянная  $C_1$  определяется из симметрии относительно  $y = D/2$ , т.е.  $V_3(D/2) = (V^*/2)$ , и окончательно

решение в области III имеет вид:

$$V_3(y) = \frac{V^*}{2} + \frac{C_0^{(\varepsilon)}}{\eta_0} \left( y - \frac{D}{2} \right). \quad (7)$$

Интегрируя общее уравнение (4) для структурированного пристеночного слоя I с использованием соотношения (3), получим:

$$\frac{C_0^{(\varepsilon)}}{\eta_0} V_1^{-\varepsilon}(d_s)y = \frac{V_1^{1-\varepsilon}(y)}{1-\varepsilon} + C_2, \quad (8)$$

где с учетом граничного условия  $y = 0$ :  $V_1 = 0$ ,  $C_2 = 0$ .

Второе крайнее условие — непрерывность сопряжения скоростных профилей  $V_1(y)$  и  $V_3(y)$  на границе  $y = d_s$  между областями I и III позволяет определить неизвестную постоянную  $C_0^{(\varepsilon)}$ :

$$C_0^{(\varepsilon)} = \frac{V^* \eta_0}{D - 2\varepsilon d_s}. \quad (9)$$

Так что решение задачи в пристеночном слое I и области объемно-вязкого течения III, а значит, с учетом условия симметрии и в II, т.е. во всем зазоре, выразится в виде:

$$V_1(y) = \frac{V^*(1-\varepsilon)}{(D/d_s) - 2\varepsilon} \left( \frac{y}{d_s} \right)^{1/(1-\varepsilon)} \quad \text{и}$$

$$V_3(y) = V^* \left[ \frac{1}{2} + \frac{y/d_s - D/2d_s}{(D/d_s) - 2\varepsilon} \right]. \quad (10)$$

Из (10) следует, что значение параметра  $\varepsilon$  не может превышать и быть равным единице ( $0 < \varepsilon < 1$ ).

Решение  $V_2(y)$  структурированного слоя в области II может быть записано на основании упомянутой симметрии профиля течения в канале. Связывая систему отсчета с подвижной стенкой преобразованием координат (рис. 2):

$$x' = -x, \quad y' = D - y, \quad V^* - V_2(y) = V_2'(y'), \quad (11)$$

замечаем, что слой II в системе  $(x', y')$  идентичен слою I. Следовательно, вид выражения  $V_2'(y')$  будет совпадать с  $V_1(y)$  из (10), т.е.

$$V_2'(y') = \frac{V^*(1-\varepsilon)}{(D/d_s) - 2\varepsilon} \left( \frac{y'}{d_s} \right)^{1/(1-\varepsilon)}, \quad V_2'(0) = 0, \quad V_2(D) = V^*. \quad (12)$$

Окончательно решение в области II:

$$V_2(y) = V^* \left[ 1 - \frac{1-\varepsilon}{(D/d_s) - 2\varepsilon} \left( \frac{D}{d_s} - \frac{y}{d_s} \right)^{1/(1-\varepsilon)} \right]. \quad (13)$$

Его сопряжение с  $V_3(y)$  из (10) на границе  $y = D - d_s$  раздела II и III будет обеспечено при  $V_2(D - d_s) = V_3(D - d_s)$ . При уменьшении зазора  $D$  между стенками канала в предельном случае, когда достигается  $D/2 = d_s$ , область объемно-вязкого течения III исключается из рассмотрения. При толщине прослойки  $D \leq 2d_s$  постоянная (9) становится

$C_0^{(\varepsilon)} = (\eta_0 V^* / (1 - \varepsilon))$ , а решения (10) и (13) принимают вид:

$$V_1(y) = \frac{V^*}{2} \left( \frac{2y}{D} \right)^{1/(1-\varepsilon)},$$

$$V_2(y) = V^* \left\{ 1 - \left[ 2^\varepsilon \left( 1 - \frac{y}{D} \right) \right]^{1/(1-\varepsilon)} \right\}. \quad (14)$$

Так что в соответствии с геометрической симметрией профиля скорости  $V_1(D/2) = V_2(D/2) = (V^*/2)$ .

В рамках асимптотического подхода  $D/R \ll 1$  значения напряжения вязкого трения  $\tau^{(\varepsilon)}$ , согласно (5), везде одинаково, так что суммарный момент этого напряжения на неподвижной плоскости  $y = 0$  и закручивающий внутренний цилиндр ротационной пары:

$$M_0^{(\varepsilon)} = 2\pi R^2 l \tau^{(\varepsilon)}|_{y=0}, \quad (15)$$

где  $\tau^{(\varepsilon)}|_{y=0} = \eta_1 (dV_1/dy)|_{y=0} = C_0^{(\varepsilon)}$ , а  $l$  — длина образующей цилиндра.

В случае отсутствия структурированных пристеночных слоев, когда объемно-вязкое течение заполняет весь зазор  $D$  целиком, что равносильно  $\varepsilon = 0$  и  $\eta_0 = \text{const}$ , аналогичный момент вязкого напряжения выражается в виде

$$M_0^{(0)} = 2\pi R^2 l \tau^{(0)}|_{y=0}, \quad \tau^{(0)}|_{y=0} = C_0^{(0)}. \quad (16)$$

Подставив найденную выше постоянную  $C_0^{(\varepsilon)} = V^* \eta_0 / (D - 2\varepsilon d_s)$  и ее объемно-вязкий аналог  $C_0^{(0)} = V^* \eta_0 / D$ , получим для отношения  $M_0^{(\varepsilon)} / M_0^{(0)}$ :

$$M = \frac{M_0^{(\varepsilon)}}{M_0^{(0)}} = \frac{C_0^{(\varepsilon)}}{C_0^{(0)}} = \frac{1}{1 - \varepsilon \frac{2d_s}{D}}. \quad (17)$$

Ввиду того что момент вязких сил пропорционален вязкости ( $M \sim \eta$ ), выражение (17) представим в виде:

$$\frac{\eta_{\text{eff}}(\gamma^*)}{\eta_0} = \frac{1}{1 - \varepsilon \frac{2d_s}{D}}, \quad (18)$$

где  $\eta_{\text{eff}}(\gamma^*)$  — эффективная, при заданной  $\gamma^*$ , вязкость слоистой (с пристеночными структурированными слоями) прослойки общей толщиной  $D$ ,  $\eta_0$  — вязкость однородной прослойки (изотропной жидкости). Здесь, как и ранее,  $\varepsilon$  — введенный параметр ЭЖК слоя, а  $2d_s$  — его удвоенная толщина.

## Структурные параметры модельного ЭЖК слоя n-гексадекана

Полученное соотношение (18) позволяет по представленным результатам реологических опытов с прослойками определить свойства модельных структурированных слоев. Толщина прослойки  $D$  известна, она задается известным зазором ротационной пары. Величина  $\eta_0$  устанавливается в опытах с „толстыми“ прослойками,

в которых наличие микронных структурированных слоев на течении не сказывается, или в капиллярных вискозиметрах. Эффективная вязкость прослойки  $\eta_{\text{eff}}$  экспериментально определяется в ротационном вискозиметре [12]. Очевидно, эта измеряемая вязкость зависит от состава прослойки — соотношений толщины ЭЖК слоев  $2d_s$  и изотропной жидкости ( $D - 2d_s$ ) и их коэффициентов вязкости: интегральной — слоя  $\langle \eta_s(y) \rangle$  (усредненной по его толщине  $d_s$ ) и  $\eta_0$ . С интенсивностью течения  $\gamma^*$  в прослойке изменяется  $d_s$  и в рассматриваемой задаче — распределение по слою его вязкости  $\eta_s(y)$ . При отсутствии течения ( $\gamma^* \rightarrow 0$ ) неподвижный ЭЖК слой характеризуется определенным „предельным“ коэффициентом вязкости неразрушенной структуры  $\langle \eta_{0s} \rangle$  и „начальной“ толщиной  $d_{0s}$ , одной и той же во всех прослойках с  $D \geq 2d_{0s}$ . В таких прослойках их „предельная“ эффективная вязкость изменяется с толщиной  $\eta_{\text{eff}}^0(D)$  только за счет различной доли центральной III области жидкости с коэффициентом вязкости  $\eta_3 = \eta_0$ . Прослойки, начиная с  $D = 2d_{0s}$  и тоньше, содержат только структурированные слои. Вязкость таких прослоек определяется лишь вязкостью слоев  $\langle \eta_{0s} \rangle$ , а в случае структурной неоднородности  $\eta_{0s}(y)$  последних — и их общей толщиной.

Из (18) для искомого  $\varepsilon$  и  $d_s$  следует:

$$\frac{2\varepsilon d_s}{D} = 1 - \eta_0 / \eta_{\text{eff}}(\gamma^*) = E. \quad (19)$$

Эффективная вязкость прослойки  $\eta_{\text{eff}}$  при  $\gamma^* \rightarrow 0$  соответствует „предельному“ значению  $\eta_{\text{eff}}^0$  в отсутствие ее течения, а „начальная“ толщина слоев при этом максимальна и равна  $d_s$ . Тогда в пределе выражение для комплекса  $E$  (19) имеет вид:

$$E(\gamma^* \rightarrow 0) = E_0 = \frac{2\varepsilon d_{0s}}{D}. \quad (20)$$

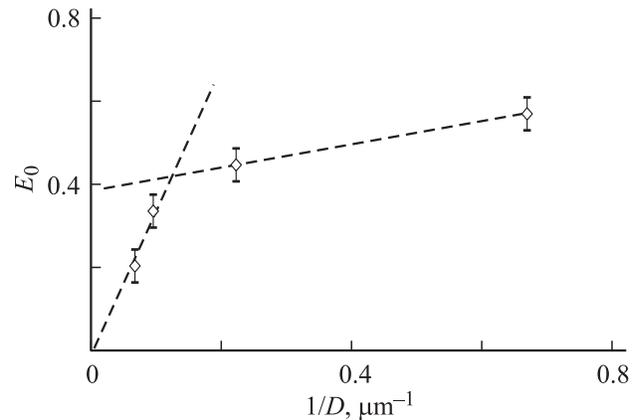
Очевидно, что при достаточном утончении прослойки начиная с  $D = 2d_{0s}$  слои смыкаются, и в более тонких прослойках:

$$E_0 = \varepsilon \text{ при } D \leq 2d_{0s}. \quad (21)$$

Таким образом, экспериментально установленная (см. рис. 1) в прослойках препарата различной толщины величина  $\eta_{\text{eff}}^0 / \eta_0$  (при  $\gamma^* \rightarrow 0$  и одинаковой температуре) позволяет по зависимости  $E_0 = f(1/D)$ , имеющей вид двух прямых, пересекающихся в точке  $1/D = 1/(2d_{0s})$  и  $E_0 = \varepsilon$ , рассчитать искомые параметры ЭЖК слоя  $\varepsilon$  и  $d_{0s}$ . Расчетная зависимость  $E_0 = f(1/D)$  для этих прослоек *n*-гексадекана представлена на рис. 3.

Как следует из рис. 3, точка пересечения двух прямых соответствует удвоенной начальной толщине ЭЖК слоя ( $2d_{0s} \sim 8 \mu\text{m}$ ), а структурный параметр  $\varepsilon$  при температуре  $T = 294\text{--}297 \text{ K}$  составил  $\sim 0.42$ .

В представленной модели этот параметр предполагался неизменным по слою:  $\varepsilon = \text{const}$ . Из рис. 3, однако, следует, что в области прослоек  $D \leq 2d_{0s}$ , в которых различна лишь толщина ЭЖК слоев, параметр не остается



**Рис. 3.** Расчетная зависимость комплекса  $E_0$  от толщины прослойки  $1/D$  *n*-гексадекана в зазоре ротационной пары.  $T = 294\text{--}297 \text{ K}$ .

постоянным, а несколько возрастает:  $\varepsilon \neq \text{const}$  ( $\varepsilon \rightarrow 1$ ). Это может указывать на рост упорядоченности в слое (и его структурную неоднородность) с приближением к подложке вследствие возрастания поверхностных сил последней.

## Заключение

Экспериментально установлена повышенная по сравнению с „объемной“ вязкость микронных прослоек *n*-гексадекана. Это подтверждает наличие в них структурированных ЭЖК слоев. Вязкость прослоек уменьшается со скоростью сдвиговой деформации и стремится к вязкости „объемной“ жидкости, что объясняется разрушением структурированных слоев и переходом их в изотропную фазу. Вклад в „эффективную“ вязкость прослойки ориентационно-упорядоченных слоев с утончением прослойки возрастает. При обсуждении результатов и оценки структурных параметров слоя предложена реологическая модель сдвигового течения прослойки с приповерхностными слоями „переменной вязкости“. В отсутствие течения „начальная“ толщина ЭЖК слоя на металлической подложке составила  $d_s \sim 4 \mu\text{m}$ , а „структурный“ параметр  $\varepsilon \sim 0.4$ .

## Список литературы

- [1] Дерягин Б.В., Поповский Ю.М., Алтоиз Б.А. // Открытия и изобретения. 1991. № 12. С. 1.
- [2] Дерягин Б.В., Силенко Г.П., Поповский Ю.М. // ДАН СССР. 1978. Т. 239. № 41. С. 828.
- [3] Дерягин Б.В., Алтоиз Б.А., Поповский Ю.М. // ДАН СССР. 1991. Т. 317. № 1. С. 130.
- [4] Derajguin B.V., Karasev V.V. // Russ. Chem. Rev. 1988. Vol. 57. N 7. P. 634.
- [5] Кириян С.В., Алтоиз Б.А. // Трение и износ. 2010. Т. 31. № 3. С. 13.

- [6] *Фукс Г.И.* Вязкость и пластичность нефтепродуктов. М.–Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2003. С. 157–160.
- [7] *Гаркунов Д.Н.* Триботехника. М.: МСХА, 2001. С. 100–107.
- [8] *Папок К.К.* Смазочные масла. М.: Воениздат, 1962. С. 10.
- [9] *Derajguin B.V., Altoiz B.A., Nikitenko I.I.* // J. Colloid Interface Sci. 1991. Vol. 145. N 2. P. 441.
- [10] *Алтоиз Б.А., Асланов С.К.* // Докл. НАН Украины. 2003. Т. 9. С. 76.
- [11] *Алтоиз Б.А., Кириян С.В., Шатагина Е.А.* // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 10. С. 37.
- [12] *Алтоиз Б.А., Кириян С.В.* // ИФЖ. 2010. Т. 83. Вып. 3. С. 608.
- [13] *Де Жен П.* Физика жидких кристаллов. М.: Мир, 1977. С. 37. (*de Gennes P.* The Physics of Liquid Crystals. Oxford: Clarendon Press, 1974).