

03

Эпитропно-жидкокристаллический слой гексадекана в реологической модели гетерофазной прослойки

© Б.А. Алтоиз, А.Ф. Бутенко, С.В. Кириян

Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова,
65082 Одесса, Украина
e-mail: altoiz41@gmail.com

(Поступило в Редакцию 20 июля 2016 г. В окончательной редакции 20 июня 2017 г.)

Гидродинамическая модель гетерофазной прослойки жидкости, включающая эпитропный жидкокристаллический (ЭЖК) слой, дополнена его структурно-реологической моделью. Применение моделей и разработанной методики обработки результатов измерений вязкости прослоек *n*-гексадекана в триаде трения позволило установить детально свойства его ЭЖК слоя и слоя „перекрытого“: равновесную толщину и вязкость, их изменение с температурой, энергии активации вязкого течения.

DOI: 10.21883/JTF.2018.01.45473.2005

Введение

Изучение свойств полимолекулярного ориентационно упорядоченного приповерхностного эпитропно-жидкокристаллического (ЭЖК [1–3]) слоя необходимо для развития теоретических представлений о природе этого состояния [3–6], усовершенствования его количественной физической модели [7] и, в частности ЭЖК слоев *n*-алканов как основ минеральных смазочных масел [8–10], для решения практической задачи управления процессами трения в механизмах [11,12].

Ввиду малой ($\sim 4\mu\text{m}$ и менее) толщины d_s ЭЖК слоев прямое их изучение затруднительно, поэтому в оптических [2,3,5,6,12,13] и реологических [12,14–16] экспериментах обычно исследовались гетерофазные (содержащие ЭЖК слои и пространственно отделенную от них „объемную“ жидкость) прослойки толщиной $D \sim 1.5\text{--}10\mu\text{m}$, а для установления характеристик слоев использовалась определенная структурная модель прослойки, в которой заложены параметры слоя d_s и вязкость μ . При расчете последних в реологических опытах измерялась „эффективная“ вязкость η_{eff} прослойки и менялись дополнительно различные гидродинамические модели слоя с постоянной вязкостью, зависящей от расстояния до подложки, от интенсивности течения и др., но собственно структура ЭЖК слоя при этом не рассматривалась. Предлагаемые [3–6] механизмы организации ЭЖК фазы в должной степени не описывали экспериментально установленные ее свойства.

Механизм образования и структурно-реологическая модель ЭЖК слоя

Согласно последним представлениям [7] об ЭЖК фазе, ее существование обусловлено сцеплением с актив-

¹ От греческого „επιφάνεια“ — поверхность, которой слой обязан своим происхождением.

ными центрами лиофильной подложки приповерхностных флуктуационных ассоциатов [17] жидкости. „Ворс“ таких нитевидных (средней длины d_s) молекулярных ассоциатов вместе с неассоциированной жидкостью между ними и представляет собой ЭЖК слой.² Он существует вблизи температуры кристаллизации жидкости T_{cr} в небольшом интервале $\Delta T = (T - T_{\text{cr}}) \sim 30\text{--}40\text{ K}$. С ростом ΔT происходит процесс десорбции ассоциатов, толщина „ворса“ и доля последних в ЭЖК слое уменьшаются, а доля изотропной жидкости в нем возрастает.³

Это позволяет структурно-реологическую модель собственно ЭЖК слоя (в гетерофазной прослойке толщиной $D > 2d_s$) представить как гомогенную смесь двух компонент: структурированного высоковязкого (μ_s) „ворса“ с его долей (q) и менее вязкой „объемной“ (η_{vol}) изотропной жидкости — с относительным ее содержанием в слое $(1-q)$. Его вязкость μ определяют вязкости компонент и их доли в слое. С возрастанием скорости сдвигового течения γ (s^{-1}) уменьшаются и модельные параметры (q, μ_s), и различие между μ_s и η_{vol} . Величина вязкости слоя μ может быть рассчитана как вязкость смеси [20,21], и в самом простейшем приближении аддитивности текучестей компонент [22] определяется этими параметрами так:

$$\mu = \mu_s \eta_{\text{vol}} / [\mu_s - q(\mu_s - \eta_{\text{vol}})]. \quad (1)$$

В прослойке ($d_s < D < 2d_s$) ЭЖК слои каждой из подложек „перекрываются“, а в прослойке $D \leq d_s$ уже находится лишь „перекрытый“ ЭЖК слой вязкостью μ^* , которая по аналогии с (1) имеет вид

$$\mu^* = \mu_s^* \eta_{\text{vol}} / [\mu_s^* - q^*(\mu_s^* - \eta_{\text{vol}})], \quad (2)$$

где μ_s^* и q^* — параметры, аналогичные использованным в (1), но для „перекрытого“ ЭЖК слоя. Вязкость его

² Интересно, что еще ранее [18] граничный слой смазки был уподоблен „бархатному ворсу“.

³ Таким образом, параметр q — аналог параметра ориентационного порядка S в ЖК [19] и ЭЖК [2,3], который также изменяется от $S = 1$ — максимально упорядоченный ЖК, до $S = 0$ — изотропная жидкость.

более „структурированной“ части $\mu_s^* > \mu_s$, а ее доля $q^* > q$ (за счет частичного „вытеснения“ изотропной жидкости в области перекрытия), поэтому и $\mu^* > \mu$.

Реологическая модель гетерофазной прослойки с ЭЖК слоями

Для установления параметров ЭЖК слоя при обработке результатов вискозиметрии прослоек здесь используется их „реологическая“ модель [14,15], в которой (как и в моделях „оптических“ [3,12]) слой однороден и характеризуется неизменным по всей толщине d_s коэффициентом поглощения и двулучепреломления света). Сдвиговое течение, „срезая“ [15,16] ЭЖК слой, изменяет его толщину: $d_s(y)$.

На рис. 1 показана схема такой прослойки толщиной $D \geq 2d_s$ при отсутствии течения в ней (а) и при течении б).

Между ЭЖК слоями I и III толщиной d_{0s} и вязкостью μ_0 (при течении соответственно d_s и μ) находится „объемная“ жидкость (область II) вязкостью η_{vol} . Представленный на рис. 1, б характер профиля скорости при

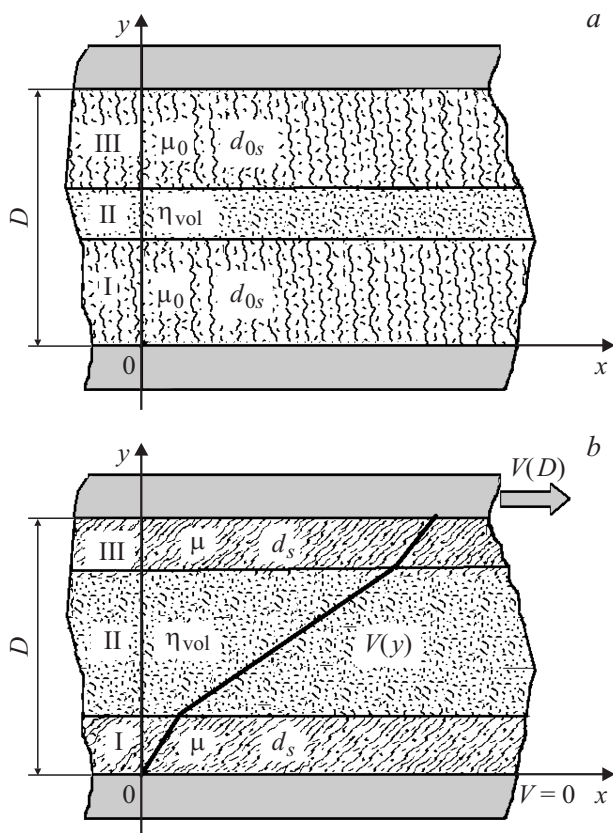


Рис. 1. Модель гетерофазной прослойки $D \geq 2d_s$ в статике (а) и с плоскопараллельным течением жидкости в ней (б). В областях I и III — однородные ЭЖК слои, область II между ними — „объемная“ жидкость. $V(y)$ — профиль скорости течения.

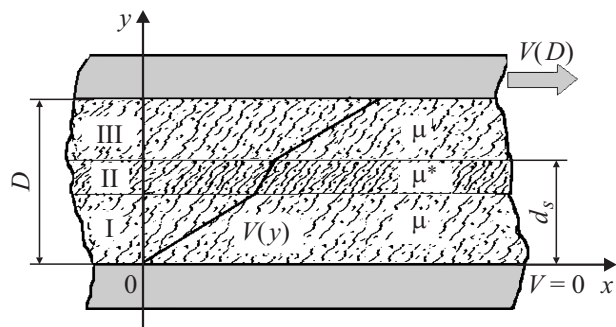


Рис. 2. Плоскопараллельное течение в гетерофазной прослойке $d_s \leq D \leq 2d_s$. I и III — пристеночные однородные ЭЖК слои толщиной $D - d_s$ и вязкостью μ , а II между ними — „перекрытые“ ЭЖК слои вязкостью μ^* . $V(y)$ — профиль скорости течения.

сдвиговом течении следует из решения [14] краевой задачи (уравнение Навье—Стокса с учетом сцепления текущей жидкости со стенками, условия сопряжения скоростей и вязких напряжений на границах областей). Там же [14] для такой реомодели гетерофазной прослойки получено простое соотношение, связывающее d_s и μ с D и η_{eff} :

$$\eta_{eff}(\gamma, D) = \eta_{vol} / \{1 - (1 - \eta_{vol}/\mu)2d_s(\gamma)/D\} \quad (D \geq 2d_s). \quad (3)$$

Очевидное возрастание η_{eff} с уменьшением толщины прослойки D (до $D = 2d_s$) связано с уменьшением в ней при этом в области II (рис. 1) менее вязкой изотропной жидкости. При утончении прослойки (начиная с $D = 2d_s$ и до $D = d_s$) в центральной ее области вместо изотропной жидкости появляется (рис. 2) область II „перекрытых“ ЭЖК слоев толщиной $(2d_s - D)$ и вязкостью μ^* (2).

В этом случае решение аналогичной краевой задачи, но уже с другими вязкостями (рис. 2), имеет вид

$$\eta_{eff}(\gamma, D) = 1 / \{2/\mu - 1/\mu^* - (1/\mu - 1/\mu^*)2d_s(\gamma)D\}, \quad (d_s < D < 2d_s). \quad (4)$$

Зависимость „предельной“ вязкости гетерофазной прослойки от ее толщины

При отсутствии течения ($\gamma \rightarrow 0$) слой характеризуется (рис. 1, а) „равновесной“ толщиной слоя $d_{0s} = d_s(\gamma \rightarrow 0)$, неизменной (при постоянной T) в области толщин прослоек $D \geq 2d_{0s}$. Поэтому „предельная“ эффективная вязкость $\eta_{eff}^0 = \eta_{eff}(\gamma \rightarrow 0)$ таких прослоек в изотермическом течении уже зависит лишь от их толщины D :

$$\eta_{eff}^0(0, D) = \eta_{vol} / \{1 - (1 - \eta_{vol}/\mu_0)2d_{0s}/D\} \quad (D \geq 2d_s). \quad (5)$$

Из (5) следует, что задачу определения искомых модельных параметров d_{0s} , μ_0 (и μ_0^*) можно решить,

экспериментально измеряя „предельную“ вязкость η_{eff}^0 прослойки известной толщины D . В предыдущих работах по реологии гетерофазных прослоек [12,14–16] определение $\eta_{\text{eff}}^0(0, D)$ проводилось экстраполяцией массива экспериментальных данных $\eta_{\text{eff}}(\gamma, D)$ к $\gamma = 0$. Однако из (5) видно, что обратная безразмерная вязкость прослойки $\eta_{\text{vol}}/\eta_{\text{eff}}^0$ зависит от $1/D$ линейно. Это позволяет находить искомые параметры слоя из вида экспериментального графика функции $\eta_{\text{vol}}/\eta_{\text{eff}}^0 = F(1/D)$:

$$\eta_{\text{vol}}/\eta_{\text{eff}}^0(0, D) = 1 - (1 - \eta_{\text{vol}}/\mu_0)2d_{0s}/D \quad (D \geq 2d_s). \quad (6)$$

В самом деле, графически (6) отображает отрезок прямой, соединяющий (для всех ΔT) точки $(0;1)$ и $(1/2d_{0s}; \eta_{\text{vol}}/\mu_0)$. Начиная с последней, уже в области $2d_{0s} \geq D \geq d_{0s}$ (без „объемной“ жидкости) функция $\eta_{\text{vol}}/\eta_{\text{eff}}^0 = F(1/D)$ в соответствии с (4) имеет вид

$$\eta_{\text{vol}}/\eta_{\text{eff}}^0(0, D) = 2\eta_{\text{vol}}/\mu_0 - \eta_{\text{vol}}/\mu_0^* - (\eta_{\text{vol}}/\mu_0 - \eta_{\text{vol}}/\mu_0^*)2d_{0s}/D \quad (2d_s \geq D \geq d_s). \quad (7)$$

Это уравнение, отражая изменение безразмерной вязкости прослойки уже за счет изменения области II (рис. 2) „перекрытых“ ЭЖК слоев, графически в тех же координатах также представляет собой отрезок прямой.

Наконец, начиная с точки $(1/d_{0s}; \eta_{\text{vol}}/\mu_0^*)$ для зависимости от $1/D$ безразмерной ($\eta_{\text{vol}}/\mu_0^*$) вязкости прослойки с „перекрытым“ ЭЖК слоем при однородности последнего, можно также ожидать линейности. Следовательно, определение особенностей (изломов) ломаной $\eta_{\text{vol}}(T)/\eta_{\text{eff}}^0(0, D, T) = F(1/D)$ решает задачу. Очевидно, что необходимые значения $\eta_{\text{vol}}/\eta_{\text{eff}}^0 = F(1/D)$ рациональнее получать экстраполяцией к $\gamma = 0$ тренда $\eta_{\text{vol}}/\eta_{\text{eff}}(\gamma, D) = F(\gamma)$.

Таким образом, измерения величины $\eta_{\text{eff}}(\gamma)$ эффективной вязкости прослойки (при различных ее толщинах и температурах) и описанная методика анализа результатов позволяют провести оценку модельных параметров слоя ЭЖК и установить влияние на них температуры и интенсивности сдвигового течения.

Результаты измерений и их обсуждение

Вискозиметром [12,15] в зазорах D ($\sim 1-10 \mu\text{m}$) его ротационной пары — аналоге триады трения при скоростях сдвиговых деформаций ($\gamma = 100-15000 \text{ s}^{-1}$) в изотермических опытах при нескольких температурах (начиная с малых $\Delta T = T - T_{\text{cr}} = 1-2 \text{ K}$ и в интервале $\Delta T \sim 30 \text{ K}$) измерялась эффективная вязкость $\eta_{\text{eff}}(\gamma, D, T)$ прослоек n -гексадекана⁴ $\text{C}_{16}\text{H}_{34}$ ($T_{\text{cr}} = 291.2 \text{ K}$).

В измерениях для ряда толщин (зазоров пары) прослоек D были получены массивы $\eta_{\text{eff}} = f(D, \gamma)$. Далее в соответствии с (6) и (7) устанавливалась зависимость

⁴ Дополнительно очищенный препарат производства Новочеркасского завода синтетических продуктов квалификации „ХЧ“.

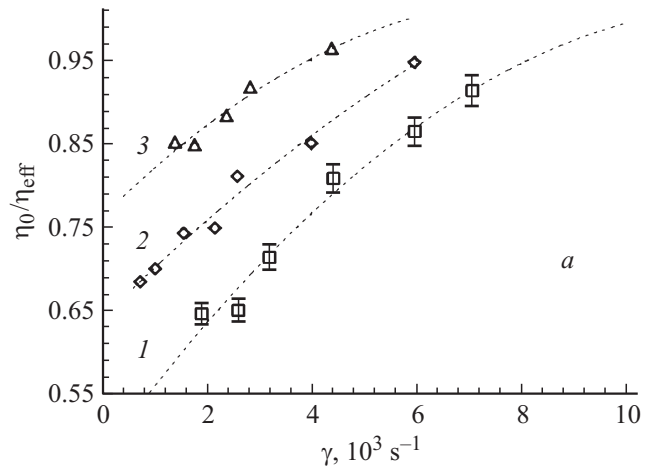


Рис. 3. Реокривые прослоек n -гексадекана (при $\Delta T = 1.5 \text{ K}$) между стальными подложками толщиной $D(\mu\text{m}) \approx 1 - 6, 2 - 4, 3 - 1.5$. Использован график [16, рис. 1, а], перестроенный в координатах $\eta_0/\eta_{\text{eff}}(\gamma_i, D, T) = F(\gamma_i)$.

от γ „относительной“ вязкости: $\eta_{\text{vol}}(T)/\eta_{\text{eff}}(T, \gamma) = F(\gamma)$. В результате ее экстраполяции к $\gamma \rightarrow 0$ определялись необходимые (для построения графиков) значения $\eta_{\text{vol}}(T)/\eta_{\text{eff}}^0(0, D, T)$. Заметим, что в функции $F(\gamma)$ одновременно учитываются температурные зависимости $\eta_{\text{vol}}(T)$ и $\eta_{\text{eff}}(T)$, а благодаря иному виду тренда $F(\gamma)$ его экстраполяция позволяет устанавливать эти значения и более надежно. Так, одна из проведенных в [16] серий измерений вязкости прослоек n -гексадекана ($D \approx 6; 4, \text{ и } 1.5 \mu\text{m}$ при $\Delta T = T - T_{\text{cr}} = 1.5 \text{ K}$), которая была представлена [16, рис. 1, а] в виде $\eta_{\text{eff}}(\gamma, D, T) = F(\gamma)$, здесь пересчитана (рис. 3) в виде зависимостей $\eta_{\text{vol}}/\eta_{\text{eff}}(\gamma, D, T) = F(\gamma)$.

При анализе результатов опытов использовались приведенные выше представления о слое ЭЖК и ожидаемые (из модели гетерофазной прослойки с ним) аналитические зависимости (6) и (7) „предельной“ эффективной вязкости прослойки от ее толщины.

Предельные значения $\eta_{\text{vol}}/\eta_{\text{eff}}^0(0, D, T)$, полученные экстраполяцией к $\gamma \rightarrow 0$ реокривых $\eta_{\text{vol}}/\eta_{\text{eff}}(\gamma, D, T) = F(\gamma)$ всех серий измерений [16], а также [14,15] и других измерений⁵ вязкости прослоек n -гексадекана (при близких температурах), представлены на рис. 4 графиком $\eta_{\text{vol}}/\eta_{\text{eff}}^0 = F(1/D)$. На нем для четырех температур ($T - T_{\text{cr}} = 1.5; 6.5; 12 \text{ и } 18 \text{ K}$) штриховыми линиями показаны тренды отрезков прямых, построенных с учетом того, что абсцисса первого излома графика ($1/D = 1/2d_{0s}$) вдвое меньше второго ($1/D = 1/d_{0s}$). Видно, что после этой точки ($1/d_{0s}; \eta_{\text{vol}}/\mu_0^*$) при $\Delta T = 1.5 \text{ K}$ с уменьшением D безразмерная ($\eta_{\text{vol}}/\eta_{\text{eff}}^0$) вязкость прослойки практически не изменяется.⁶

⁵ Такие измерения выполняли также Н.А. Поляковская, А.А. Шатагина, Е.А. Шатагина и И.А. Шатагин.

⁶ При повышенных ΔT ввиду особой малости D установить это надежно нашим вискозиметром затруднительно.

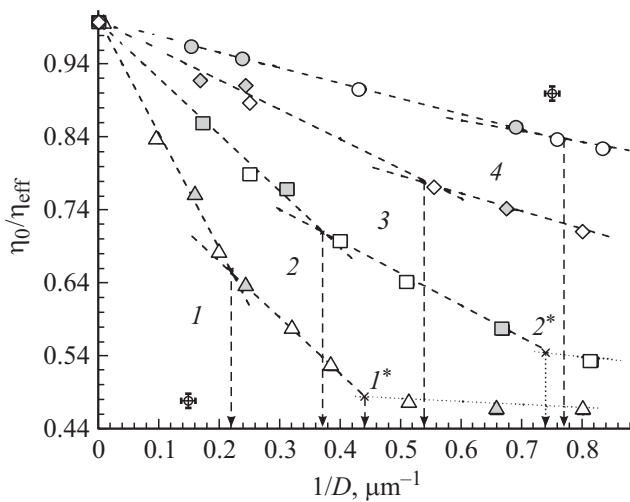


Рис. 4. Экспериментальные зависимости „предельной“ ($\gamma \rightarrow 0$) относительной вязкости $\eta_{\text{vol}}/\eta_{\text{eff}}^0$ прослойки *n*-гексадекана от их обратной толщины $1/D$. 1–4 — значения $\eta_{\text{vol}}/\eta_{\text{eff}}^0 = \eta_{\text{vol}}/\mu_0$ при $D = 2d_{0s}$. 1*, 2* — значения $\eta_{\text{vol}}/\eta_{\text{eff}}^0 = \eta_{\text{vol}}/\mu_0^*$ при $D = d_{0s}$. Измерения проведены при $T - T_{\text{cr}}$ (К): Δ — 1.5, \square — 6.5, \diamond — 12, \circ — 18 соответственно. Залитые маркеры — результаты опытов [16] с *n*-гексадеканом.

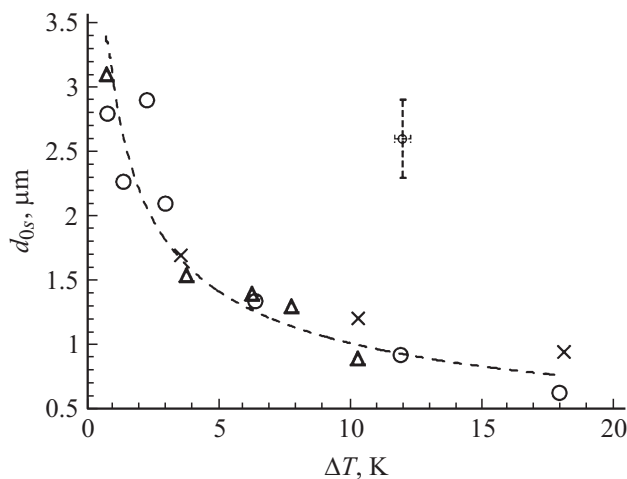


Рис. 5. Экспериментальные зависимости от $\Delta T = T - T_{\text{cr}}$ „равновесной“ толщины d_{0s} ЭЖК слоя *n*-гексадекана на стали из измерений: \circ — вязкости ротационным вискозиметром, Δ — оптической анизотропии (ДЛП) и \times — дихроизма (методом „гость–хозяин“) его прослойки.

Установленные в этих и других измерениях вязкости прослойки *n*-гексадекана значения „равновесной“ толщины d_{0s} (μm , $\delta \approx 10\%$) его ЭЖК слоя на стали показаны на рис. 5. Представленная на нем зависимость d_{0s} от температуры (в интервале $\Delta T \approx 1\text{--}20$ К) построена с учетом и измерений $d_{0s}(\Delta T)$ в гетерофазных прослойках *n*-гексадекана оптической анизотропии (в „щелевом световоде“), и дихроизма (методом „гость–хозяин“) [3].

Как видно из рис. 5, толщина ЭЖК слоя *n*-гексадекана вблизи температуры кристаллизации жидкости состав-

ляет $d_{0s} \approx 3\text{--}4 \mu\text{m}$, уменьшается с повышением температуры — удалением от T_{cr} , а при $\Delta T > 25$ К слоя практически уже нет. Видно также, что результаты измерений этого параметра ЭЖК слоя *n*-гексадекана на стали другими методами в пределах погрешности совпадают.

Отметим, что и для смазочных масел „равновесная“ толщина ЭЖК слоев на стали того же порядка и убывает с температурой, но медленней [12,14,15]. Так, для масла 15W40: $d_{0s} \approx 3 \mu\text{m}$ ($T = 291$ К) и $d_{0s} \approx 2 \mu\text{m}$ ($T = 304$ К) [12]. На диэлектрической же подложке (кварц) их ЭЖК слои значительно ($d_{0s} \approx 0.2 \mu\text{m}$) тоньше [2,3].

Зависимости „предельных“ ($\gamma \rightarrow 0$) коэффициентов вязкости ($\text{mPa}\cdot\text{s}$) ЭЖК слоя *n*-гексадекана — μ_0 ($\delta \approx 7\%$), „перекрытого“ — μ_0^* ($\delta \approx 10\%$) и в „объеме“ — η_{vol} , от температуры ($\Delta T = T - T_{\text{cr}}$, К, $\delta \approx 1\%$)

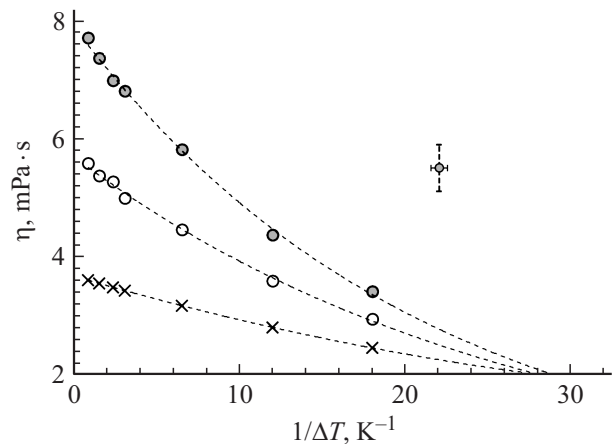


Рис. 6. Зависимости от $\Delta T = T - T_{\text{cr}}$ „предельных“ коэффициентов вязкости ЭЖК слоев *n*-гексадекана на стали. \circ — μ_0 (при $D = 2d_s$), \bullet — μ_0^* „перекрытого“ слоя (при $D = d_s$), \times — η_{vol} вязкость *n*-гексадекана в „объеме“.

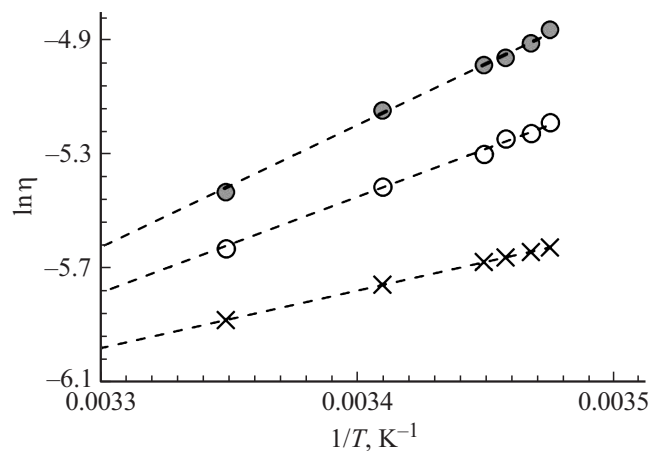


Рис. 7. Зависимость логарифма коэффициентов вязкости $\ln(\eta) = F(1/T)$ *n*-гексадекана в „объеме“ ($\eta = \eta_{\text{vol}}$) — \times , и на стальной подложке его ЭЖК слоя ($\eta = \mu_0^*$) — \circ ; ЭЖК слоя „перекрытого“ ($\eta = \mu_0^*$) — \bullet .

показаны на рис. 6. Последняя зависимость $\eta_{\text{vol}}(\Delta T)$, полученная в наших опытах, близка ($\sim 3\%$) к литературным данным [23] в этом же интервале температур. Как видно из рис. 6, вязкость слоя μ_0 выше объемной η_{vol} , μ_0^* — еще выше, но с ростом температуры и они и их различие уменьшается, а при $\Delta T \approx 30$ К все три коэффициента вязкости уже одинаковы.

Установленные температурные зависимости вязкости $\mu_0(T)$ и $\mu_0^*(T)$ позволили также оценить (как и [16] — аппроксимацией их экспонентами [24]) и величины энергий активации вязкого течения E ЭЖК слоя и слоя „перекрытого“ — E^* . Графики таких аппроксимаций для них и для n -гексадекана в „объеме“ в полулогарифмических координатах $\ln(\eta) = F(1/T)$ представлены на рис. 7. Линии всех трех зависимостей сходятся при $T \approx 325$ К ($\Delta T \approx 34$ К). Заметим, что для гетерофазных прослоек n -гексадекана те же зависимости существенно непрямолинейны [16].

Рассчитанные величины E ($\delta E \sim 10\%$) составляют $E = 3360$ К и $E^* = 4280$ К. То, что энергия активации вязкого течения n -гексадекана в „объеме“ жидкости ($E_{\text{vol}} = 2018$ К) меньше (в 1.7) энергии E ЭЖК слоя, обусловлено структурированностью последнего. С нею связано и то, что величина E^* „перекрытого“ и более структурированного слоя еще (в 2.1 раза) выше.

Заметим, что установленные зависимости $\mu_0(T)$ и $\mu_0^*(T)$ в принципе позволяют установить и соответствующие зависимости модельных параметров ЭЖК слоя $\mu_s(T)$ и $\mu_s^*(T)$. Для этого необходимо измерить (например, методом дихроизма [2,3]) при нескольких температурах величину S ориентационного порядка в ЭЖК слое (и слое „перекрытом“) и, используя отмеченную аналогию S и q , определить μ_s и μ_s^* из соотношений (1) и (2).

Заключение

В предложенной структурно-реологической модели ЭЖК слой состоит из высоко структурированной фазы и изотропной жидкости. Применение модели для анализа результатов измерений эффективной вязкости гетерофазных прослоек (при различных ее толщинах и температурах) позволяет установить влияние температуры на важные эксплуатационные параметры масляной прослойки в триаде трения: определяющую противозносные свойства смазки, толщину ее ЭЖК слоя и особенности вязкости последнего. С использованием модели для одного из n -алканов (основ минеральных смазочных масел) — n -гексадекана уточнен характер уменьшения с температурой равновесной толщины его ЭЖК слоя на стальной подложке. Вязкость его вследствие структурированности выше вязкости „объемной“ жидкости. В тонких прослойках ЭЖК слои от каждой из подложек образуют „перекрытый“ слой еще большей вязкости. Оба слоя отличаются и значительно более высокими энергиями активации вязкого течения.

Список литературы

- [1] Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. М.: Наука, 1985. 398 с.
- [2] Derjaguin B.V., Altoiz B.A., Nikitenko I.I. // J. Colloid Interf. Sci. 1991. Vol. 145. N 2. P. 441–446.
- [3] Алтоиз Б.А., Поповский Ю.М. Физика приповерхностных слоев жидкости. Одесса: Астропринт, 1996. 153 с.
- [4] Lyakhova E. // J. Mol. Liquids. 2001. N 93. P. 203–206.
- [5] Mikhailenko V.I., Popovskii A.Yu., Kuznetsova A.A. // J. Appl. Spectr. 2006. Vol. 73. N 4. P. 443–446.
- [6] Kuznetsova A.A., Mikhailenko V.I., Popovskii A.Y. // J. Appl. Spectr. 2004. Vol. 71. N 5. P. 648–653.
- [7] Алтоиз Б.А., Бондарев В.Н., Шатагина Е.А., Кириян С.В. // ЖТФ. 2014. Т 84. Вып. 7. С. 58–61.
- [8] Петров А.А. Углеводороды нефти. М.: Наука, 1974. 264 с.
- [9] Сюняев З.И. Нефтяные дисперсные системы. М.: Химия, 1990. 226 с.
- [10] Фукс Г.И. Вязкость и пластичность нефтепродуктов. Москва; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 328 с.
- [11] Мур Д. Основы и применения трибоники. М.: Мир, 1978. 488 с.
- [12] Кириян С.В., Алтоиз Б.А. // Трение и износ. 2012. Т.33. Вып. 4. С. 367–372.
- [13] Сайдов Г.В., Юдович М.Е. // Опт. и спектр. 1974. Т. 36. С. 1216–1217.
- [14] Алтоиз Б.А., Кириян С.В., Шатагина Е.А. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 10. С. 37–40.
- [15] Алтоиз Б.А., Кириян С.В. // ИФЖ. 2010. Т. 83. Вып. 3. С. 608–613.
- [16] Шатагина А.А., Шатагина Е.А., Шатагин И.А., Бутенко А.Ф. // Физика аэродисперсных систем. 2015. № 52. С. 22–27.
- [17] Межиковский С.М. Олигомерное состояние вещества. М.: Наука, 2005. 252 с.
- [18] Finch G.I. // Structure and Formation of Thin Films. 1937. Vol. 56. N 28. P. 632–639.
- [19] Жен П. Физика жидких кристаллов. М.: Мир, 1977. 396 с.
- [20] Robert C. Reid, John M. Prausnitz, Thomas K. Sherwood. The properties of gases and liquids. NY.: McGraw–Hill Book Company, 1977. 704 p.
- [21] Boris Zhmud. Viscosity blending equations // The Europ. Lubricants industry magazine. 2014. N 93. P. 1–4.
- [22] Рабинович Г.Г., Рябых П.М., Хохлаков П.А. и др. / Под ред. Е.Н. Судакова. Расчеты основных процессов и аппаратов нефтепереработки: Справочник / 3-е изд., перераб. и доп. М.: Химия, 1979. 568 с.
- [23] Физико-химические свойства индивидуальных углеводородов / Под ред. В.М. Татевского. М., 1960. 412 с.
- [24] Виноградов Г.А., Малкин А.Я. Реология полимеров. М.: Химия, 1977. 439 с.