

УДК 539.2, 541.18

Б. А. Алтоиз*, Ю. М. Поповский**

*Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова

**Одесская государственная морская академия

КАПИЛЛЯРНЫЙ ВИСКОЗИМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОНКИХ НЕОДНОРОДНЫХ ЖИДКИХ ПРОСЛОЕК

Рекомендовано до друку науковим семінаром
кафедри фізики твердого тіла та твердотільної електроніки ОНУ 26.06.2001 р.

Описана конструкція капілярного віскозиметра для дослідження реологічних властивостей тонких ($20 \div 50$ мкм) прошарків рідини. Досліди з рядом органічних немезогенних рідин свідчать про просторову неоднорідність таких прошарків – існування у них пристінного структурованого шару, товщина якого з течією зменшується. У рамках моделі «жорсткого шару, що зрізується течією», проведена оцінка цієї товщини.

Описана конструкція капілярного віскозиметра для дослідження реологічних властивостей тонких ($20 \div 50$ мкм) прослоек жидкости. Опытты с рядом органических немезогенных жидкостей свидетельствуют о пространственной неоднородности таких прослоек – наличия в них пристенного структурированного слоя, толщина которого с течением уменьшается. В рамках модели «срезаемого течением жесткого слоя» проведена оценка этой толщины.

The construction of capillary viscosimeter for investigation of reological properties of thin ($20\text{-}50$ microns) liquid is described. The experiments with the number of different nonmesogenic of liquids testify the spatial unhomogeneity of these interlayers – the widens of the wall-adjacent structured layer these. The thickness of the layer decreased with the flow the estimation of this later was carried out in the frames of the model of rigid “later cut with flow”.

Введение. Из оптических исследований прослоек ряда немезогенных органических жидкостей алифатического ряда [1,2] установлено, что на металлической подложке эти жидкости образуют структурированные эпитропные жидкокристаллические (ЭЖК) слои, толщина которых может достигать $d_s \sim 5 \div 10$ мкм. Вследствие анизотропии этих слоев их вязкость должна отличаться от вязкости объемной жидкости. Очевидно, что реологические исследования ЭЖК слоев весьма актуальны для решения теоретических и прикладных задач, связанных с эксплуатацией узлов трения.

В ранних исследованиях слоев, образованных на диэлектрических подложках, неоднократно отмечалось [3–4] возрастание вязкости, однако, в этих работах малые толщины слоев ($d_s \sim 0,01 \div 0,1$ мкм) затрудняли проведение вискозиметрических измерений и заставляли исследователей применять изощренную экспериментальную технику [3] или ограничиваться косвенной оценкой вязкости пристенных слоев [4]. Для изучения вязкости ЭЖК слоев, образованных на металлических поверхностях, вследствие их больших толщин можно при соответствующей модификации использовать более грубые традиционные методики, принятые в реологии.

1. Устройство капілярного віскозиметра. С этой целью нами был сконструирован капілярний віскозиметр со щелевим зазором переменной толщины, схема которого показана на рис. 1.

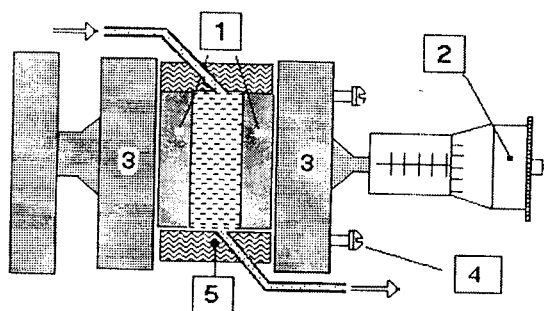


Рис.1. Схема капиллярного вискозиметра для исследования реологических свойств тонких прослоек жидкости

Щелевой зазор создавался между двумя плоско полированными стальными пластинами 1, которые с помощью микрометрического устройства 2 могли перемещаться и фиксироваться на заданном расстоянии. Полированные, обработанные по 14-му классу точности, стальные пластины закреплялись на латунных основаниях 3, в которых размещались установочные болты 4, позволявшие в случае необходимости устранять клиновидность щелевого зазора. Герметизация зазора осуществлялась боковыми и верхними резиновыми прокладками 5, покрытыми тонкой тефлоновой пленкой.

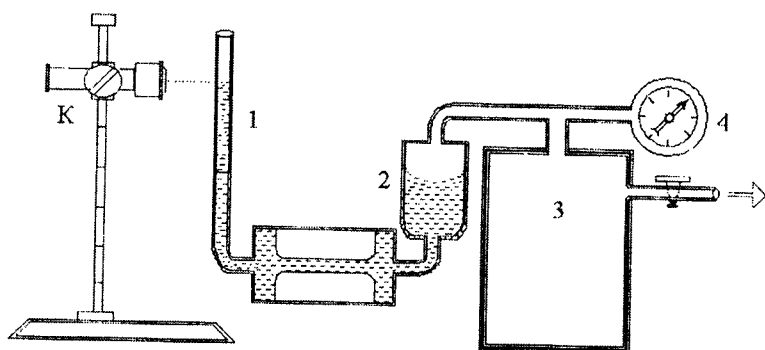


Рис.2. Схема создания перепада давлений в капиллярном вискозиметре

Для определения объема жидкости, протекающей через щелевой зазор, использовалась (рис.2) калиброванная измерительная трубка 1, высота столба жидкости в которой фиксировалась катетометром K с точностью 0,01 мм. Для создания перепада давлений вискозиметр через балластную трубку 2 подсоединялся к ресиверу 3 с манометрическим устройством 4. При измерении давлений $P \sim 10^2 + 10^4$ Па использовался водяной, а для больших давлений (до 20 КПа) – образцовый механический манометр. Для уменьшения объема пленки жидкости, остающейся за опускающимся мениском, диаметры измерительной трубки выбирались небольшими (~ 1 мм). По-

верхности пластин, образующих зазор, и другие металлические детали, входящие в контакт с исследуемой жидкостью, перед сборкой вискозиметра для очистки от органических загрязнений промывались растворителем и просушивались.

После установки заданной величины зазора D он герметизировался. Изотермичность и малость градиентов температур ($\Delta T/l \leq 50$ К/м) контролировались системой термопар, а постоянство температуры ($\Delta T \leq 0,5$ К) в рабочей ячейке обеспечивалось воздушным термостатом. Для устранения ошибки, связанной с возможным шунтированием потока жидкости, ее протечкой через неплотности резиновых прокладок, предварительно проводился контрольный опыт, при котором через вискозиметр прокачивался воздух и определялась объемная скорость его протекания. Рассчитанные в таких опытах значения вязкости воздуха сравнивались с табличными данными, и в дальнейших измерениях вводилась соответствующая поправка. При зазорах $D \geq 50$ мкм поправка не превышала нескольких процентов, а при меньших зазорах становилась значительной.

После заполнения вискозиметра исследуемой жидкостью в ресивере создавалось разрежение, и при различных фиксированных перепадах давлений ΔP в диапазоне $\Delta P = 10^2 \div 10^4$ Па проводились измерения интервала времени τ протекания через прибор заданного объема жидкости Q . Разброс отсчетов времени в пределах серии измерений был $\sim 1\%$, однако, воспроизводимость последовательных серий достигала 10% , что связано, по-видимому, с возможным попаданием в зазор отдельных частиц твердых примесей*. Расход жидкости в единицу времени определял экспериментальную объемную скорость течения $q_v = Q/\tau$ ($\text{м}^3/\text{с}$), где Q – объем протекшей через капиллярный зазор жидкости за время τ , и среднюю (по сечению зазора S) линейную скорость $\langle v_s \rangle = q_v/S$. Режимы течения во всех проведенных опытах были ламинарными ($Re \leq 1$). «Объемная» вязкость исследовавшихся жидкостей измерялась стандартными вискозиметрами и сравнивалась с литературными данными.

2. Экспериментальные результаты. В работе были проведены измерения вязкости тонких ($D = 30 \div 50$ мкм) прослоек индивидуальных органических жидкостей и углеводородных технических смесей, образованных между металлическими пластинами. В случае ламинарного потока средняя скорость $\langle v_n \rangle$ течения ньютоновской жидкости через щелевой зазор толщиной D (рис.3) определяется формулой:

$$\langle v_n \rangle = \frac{D^2}{12\mu_0} p, \quad (1)$$

где $p = \Delta P/l$ (Па/м) – градиент давления по длине зазора l , а μ_0 (Па·с) – величина коэффициента вязкости жидкости.

Существование на боковых поверхностях щелевого зазора пристенного слоя с иными реологическими характеристиками, чем объемная жидкость, было установлено в опытах с описанным вискозиметром при анализе характера возрастания скорости течения жидкости $\langle v_n \rangle$ с повышением перепада давления, и сравнением таких зависимостей с теоретическими, рассчитываемыми по (1). Для исследуемых жидкостей при зазорах заведомо больших чем $2d_s$, т.е. в отсутствие перекрытия пристенных слоев, в области малых перепадов давления наблюдается уменьшение вязкости с рос-

* Исследуемые жидкости перед экспериментом очищались от механических примесей центрифугированием в режиме, позволявшем удалять частицы размерами более 1 мкм.

том давления и поэтому нелинейное возрастание скорости течения жидкости, а при давлениях $(0.5 \pm 1) \cdot 10^4$ Па вязкость становится равной вязкости объемной жидкости.

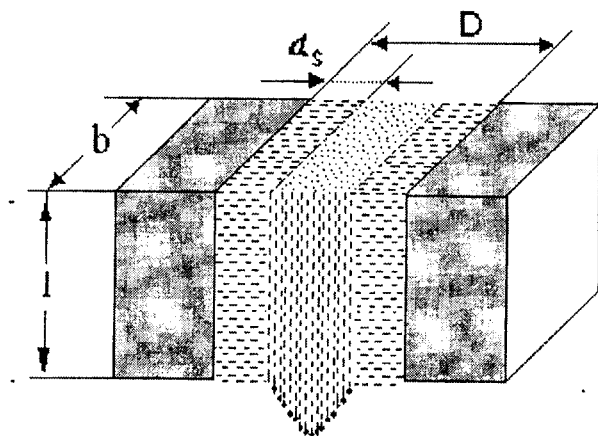


Рис.3. Геометрия щелевого зазора вискозиметра и схема течения в нем жидкости с приповерхностным «жестким» слоем

Как пример приведем результаты (рис.4) опытов с технической углеводородной жидкостью МРХ-30. Для тонких ($D \sim 30 \pm 40$ мкм) прослоек этого масла при

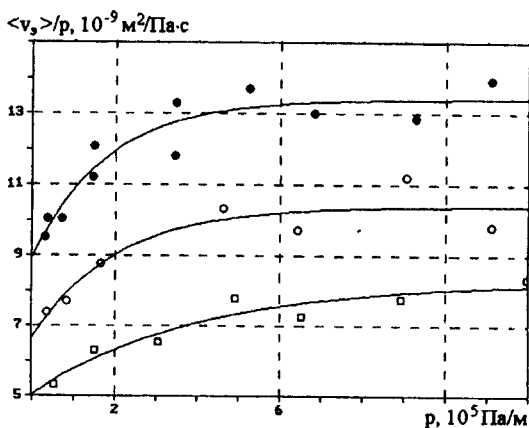


Рис.4. Зависимость отношения $\langle v_s \rangle / p$ – относительной (по отношению к градиенту давления p) экспериментальной средней скорости течения масла МРХ-30 через щелевые зазоры вискозиметра от градиента давления p . Величина зазоров: $D_1 = 39,7$ мкм (•), $D_2 = 35$ мкм (○) и $D_3 = 30$ мкм (□). $T = 294$ К. Сплошные линии – аппроксимация зависимостью (2)

небольшой скорости течения зависимость (1) не выполняется – величина $\langle v_s \rangle$ возрастает не пропорционально градиенту давления p . Экспериментальные результаты

трех серий вискозиметрических опытов (при температуре $T = 294$ К) с истечением этой жидкости через зазоры трех фиксированных толщин ($D_1 = 39,7$ мкм, $D_2 = 35$ мкм и $D_3 = 30$ мкм) представлены на рис.4 в виде зависимости относительной (по отношению к градиенту давления p) скорости течения – величины $\langle v_s \rangle / p$, $\text{м}^2/\text{Па}\cdot\text{с}$ от p . Экспериментальные данные аппроксимированы (сплошная линия) функцией:

$$\langle v_s \rangle / p = u_\infty - u_0 \cdot \exp(-p / p_\infty), \quad (2)$$

где u_∞ , u_0 и p_∞ – параметры аппроксимирующей зависимости (приведены в табл.1).

Таблица.1

Параметры аппроксимации (2) экспериментальной зависимости относительной (по отношению к градиенту давления p) средней скорости $\langle v_s \rangle / p = f(p)$ течения масла МРХ-30 от градиента давления p в щелевых зазорах вискозиметра трех фиксированных толщин D . $T = 294$ К.

Толщина зазора D , мкм	Параметры аппроксимации		
	$u_\infty \cdot 10^{-9}$, $\text{м}^2/\text{Па}\cdot\text{с}$	$u_0 \cdot 10^{-9}$, $\text{м}^2/\text{Па}\cdot\text{с}$	$p_\infty \cdot 10^5$, Па/м
39,7	13,4	4,41	1,81
35	10,4	3,74	2,02
31	8,3	3,24	4,04

Из рис.4 видно, что в области малых градиентов давления $p < 0,5$ МПа/м величины отношения $\langle v_s \rangle / p$ с увеличением давления растут и лишь при градиентах ($p > 0,5$ МПа/м) с повышением давления практически не изменяется. При этом экспериментальная скорость истечения жидкости $\langle v_s \rangle$ меньше расчетной $\langle v_n \rangle$, а при больших перепадах давления становится равной ей.

Обсуждение результатов и модель «жесткого, срезаемого» пристенного слоя. Наблюдаемый характер зависимости $\langle v_s \rangle / p = f(p)$ объясняется существованием в прослойке пристенных слоев толщиной $2d_s$. Их наличие приводит к тому, что реальное проходное сечение зазора s , по которому протекает жидкость, меньше, чем геометрическое $S = bD$ (рис.3). С ростом приложенного давления и соответственно скорости течения равновесная толщина слоя на каждой из подложек уменьшается и, начиная с какого-то значительного перепада давления, проходное сечение зазора совпадает с геометрическим.

Поэтому для расчета параметров слоя рассмотрим его простейшую реологическую модель: на поверхностях обеих пластин, ограничивающих зазор, существует неподвижный (гидродинамически «жесткий») слой, периферийная часть которого «срезается» течением (рис.3). При постепенном увеличении скорости течения (за счет повышения перепада давления ΔP) толщина пристенного слоя убывает вплоть до нуля.

В такой модели, в соответствии с (1), рассматриваемая величина отношения $\langle v_s \rangle / p$ может быть представлена в виде:

$$\langle v_s \rangle / p = \frac{(D - 2d_s)^2}{12\mu_0}, \quad (3)$$

что позволяет по полученным экспериментальным зависимостям $\langle v_s \rangle / p = f(p)$ считать как начальную толщину слоя d_0 , (ее значение при $p = 0$), так и ее текущее

значение – величину d_s в функции градиента давления или возрастающей с ним скорости течения жидкости $\langle v_s \rangle$.

Рассчитанные таким образом значения толщины d_s «жесткого, срезаемого» слоя в зависимости от средней линейной скорости $\langle v_s \rangle$ течения жидкости в данном зазоре для каждой из трех серий экспериментов приведены на рис.5. В принятой модели пристенного слоя для количественного описания явления его «срезания» течением зависимость $d_s = f(\langle v_s \rangle)$ аппроксимировалась функцией:

$$d = d_{0s} \cdot \exp(-\langle v_s \rangle / v_0). \quad (4)$$

Здесь d_{0s} (мкм) – толщина пристенного слоя при отсутствии течения, ($\langle v_s \rangle$) – средняя (по сечению зазора) линейная скорость течения жидкости, v_0 (мм/с) – параметр, характеризующий «жесткость» слоя, его способность к «срезанию» течением. Значения параметров d_{0s} и v_0 аппроксимирующей зависимости (4) приведены в табл.2.

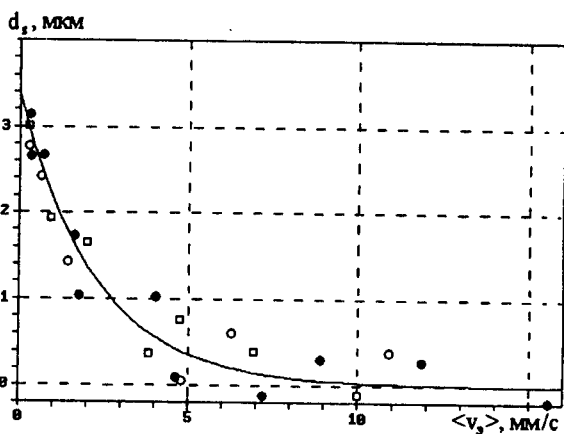


Рис.5. Зависимость толщины пристенного слоя d_s масла МРХ-30 ($T = 394$ К) на стальной подложке в модели «жесткого, срезаемого течением слоя» от средней (по сечению) линейной скорости течения жидкости $\langle v_s \rangle$ в зазоре. Обозначения те же, что и на рис.4. Сплошная линия – аппроксимация $D_1 = 39,7$ мкм (○) функцией (4)

Таблица.2

Реологические характеристики пристенного слоя масла МРХ-30 ($T = 294$ К) на поверхности стали в модели гидродинамически «жесткого, срезаемого слоя»

ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ	ТОЛЩИНА ЗАЗОРА D , МКМ		
	39,7	35,0	31,0
d_{0s} , мкм	3.4	3.2	3.1
v_0 , мм/с	2.2	1.9	2.6

Как следует из рис.5 и табл.2, при отсутствии течения пристенный слой масла МРХ-30 на стальной подложке имеет толщину $d_{0s} \approx 3$ мкм. «Прочность» слоя на «срезание» сравнительно невелика – уже при скоростях течения $\langle v_s \rangle = v_0 \sim 2$ мм/с толщина слоя $d_s \sim 1$ мкм, а при $\langle v_s \rangle \sim 10$ мм/с ничтожно мала. Рассчитанная величина d_{0s} близка, но несколько меньше значений равновесной толщины ЭЖК слоя ($d_{0s} \approx 7 +$

9 мкм) алифатических углеводородов и масел, полученных в оптических измерениях [2,5].

Расхождение с результатами таких измерений по толщине d_{0s} можно объяснить несовершенством модели слоя, принятой для расчетов этого его параметра. В частности, не в пользу модели гидродинамически неподвижного слоя, о его «не жесткости» свидетельствует то, что даже при наименьших зазорах в наших измерениях не было отмечено предельного напряжения сдвига.

По-видимому, модель ЭЖК слоя, участвующего в течении жидкости, более адекватно может описать его реологические свойства. Для развития такой модели представляется необходимым одновременно с вискозиметрическим опытом проведение независимого измерения (оптическими или иными способами) структурных характеристик (толщины, однородности и др.) ЭЖК слоя прослойки при ее течении.

1. Алтоиз Б.А., Поповский А.Ю. Метод клиновидной кюветы в исследованиях ориентационно упорядоченных пристенных слоев сформированных вблизи непрозрачных подложек // Вісник Одеськ. держ. ун-ту.– 1999.– Т. 4., вип.3. Фіз.–мат. науки.– С. 22–26.
2. Поповский Ю.М., Бериикова Н.Б. Исследование оптической анизотропии граничных слоев полидиметилсилоксилана и его смесей с тетрадеканом. // Вопросы физики формообразования и фазовых превращений.– Калинин: КГУ. – 1983. – С.25–32.
3. Derajguin B.V., Karasev V.V. Study of boundary viscosity of organic liquids by the blow-off method // Surface and Colloid Sciences. – N.J: Phenum Press: – 1993. – V.15. – P.221–264.
4. Зорин З.М., Чураев Н.В., Новикова А.В. Вязкость полимолекулярных пленок воды и декана на поверхности кварца // Вопросы физики формообразования и фазовых превращений. – Тула:– 1993. – Вып.3. – С.42–49.
5. Алтоиз Б.А., Поповский Ю.М. Физика приповерхностных слоев. – Одесса: Астропринт, 1995.– 153 с.