

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

Б. ДЕРЯГИН и А. ТИТИЕВСКАЯ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ ЖИДКОСТИ,
ОСТАВЛЯЕМОГО НА ТВЕРДОЙ СТЕНКЕ ПОЗАДИ
ОТСТУПАЮЩЕГО МЕНИСКА**

(Представлено академиком А. Н. Фрумкинм 15 IV 1945)

Несмотря на большой прикладной интерес данного вопроса для метрологической и лабораторной практики и для ряда технологических процессов, до сих пор нет экспериментальных работ, содержащих измерения толщины остающегося слоя в широком интервале значений. Наибольший интервал покрывают измерения Морья (1). К сожалению, в этой работе основные данные приведены только в графической форме и отсутствуют значения поверхностного натяжения.

Из общей теории вопроса, развитой ранее (2,3), можно, вводя безразмерные параметры $\varepsilon = \frac{h}{\sqrt{\sigma/\rho g}}$ и $x = (\eta U/\sigma)^{\frac{1}{3}}$, получить решение задачи для случая вертикальной стенки в виде

$$\varepsilon = x^{\frac{3}{2}} \varphi(x), \quad (1)$$

где U — скорость отступления мениска (границы смачивания) вдоль стенки (бесконечно удаленной от других стенок), h — толщина остающегося на стенке позади мениска слоя жидкости с вязкостью η , плотностью ρ и поверхностным натяжением σ . Было найдено, что

при $x \rightarrow 0$, $\varphi(x) \rightarrow k\sqrt{x}$, $k = 0,94\dots$; при $x \rightarrow \infty$, $\varphi(x) \rightarrow 1$.

Учитывая профиль пленки, утончающейся кверху вследствие стекания, для средней ее толщины \bar{h} , равной объему пленки, деленному на покрываемую площадь, можно получить (2) формулу

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\bar{h}}{\sqrt{\frac{\sigma}{\rho g}}} = x^{\frac{3}{2}} \varphi(x) \left[1 - \frac{1}{3} \varphi^2(x) \right]; \quad (2)$$

в качестве предельных законов имеем при $x \rightarrow 0$:

$$\bar{h} = 0,94\dots \frac{(\eta U)^{\frac{2}{3}}}{(\rho g)^{\frac{1}{3}} \sigma^{\frac{1}{3}}} \left[1 - 0,293\dots \left(\frac{\eta U}{\sigma} \right)^{\frac{1}{3}} \right], \quad (3)$$

при $x \rightarrow \infty$:

$$\bar{h} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\eta U}{\rho g}}. \quad (4)$$

Формула (4) с неверным числовым коэффициентом [ср. (3)] была предложена Goucher а. Ward (4). Впервые формула (4) была предложена и выведена одним из авторов (5, 6). Вывод этой же формулы с неопределенным коэффициентом из соображений размерности был указан в ряде работ (4, 6). Формула (3) (без второго члена, учитывающего стекание), однако с иным числовым коэффициентом ($k=2,28$), была получена также Левичем и Ландау (6). Было интересно поэтому подвергнуть вопрос экспериментальному изучению с целью проверки формул (3) и (4), включая числовые коэффициенты.

Нами применялись два метода нанесения пленки на стеклянный цилиндр: метод вытаскивания цилиндра из жидкости и метод слива последней. Вытаскивание цилиндра осуществлялось посредством его подвешивания на нити, наматывавшейся на валик, связанный с осью мотора Уоррена. Крутильные колебания цилиндра демпфировались. Цилиндр для менее вязких жидкостей брался без дна, с остро зашлифованными внизу стенками, а для более вязких — с дном заостренной формы (рис. 1). Во втором случае слой жидкости отлагался только на наружной поверхности цилиндра.

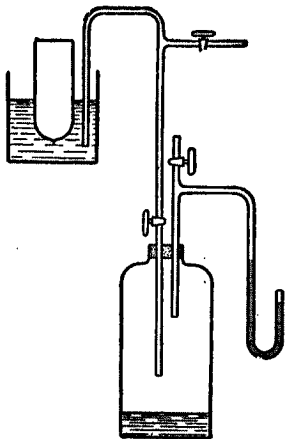


Рис. 1

Для того чтобы исключить влияние нижнего конца цилиндра, в обоих случаях, и при методе вытаскивания и при методе слива, каждый опыт ставился дважды: с погружением цилиндра в жидкость на глубину 2 см и на глубину 12 см. Применяя взвешивание, по разности весов слоев, „осевших“ на цилиндре в обоих опытах, можно было судить об объеме, а следовательно, и средней толщине пленки, расположенной на участке цилиндра длиной в 10 см, достаточно удаленном от его конца. При вытаскивании цилиндра из весьма вязких жидкостей приходилось „подсекать“ тянущийся под цилиндром столбик жидкости, что делалось стандартным образом при достижении

цилиндром определенной высоты над уровнем жидкости, что гарантировало исключение и этого небольшого концевое эффекта. Диаметр цилиндра равнялся 3,5 см, толщина стенок 0,15 см. Диаметр внешнего сосуда 9,5 см.

Для того чтобы при методе слива получать постоянную скорость U в течение всего опыта, нельзя было ограничиваться обычным сифоном с движущей разностью уровней в 1—2 м, так как изменение этой разности за время опыта составило бы 5—10%. Чтобы этого избежать, нижний конец сифона (рис. 1) вводился через трубку в большой (емкостью 20 л) баллон, в котором создавалось разрежение, менявшееся в течение опыта незначительно. Течение жидкости через сифон происходило под действием перепада давления порядка 0,5 атм., ввиду чего изменение верхнего уровня жидкости на скорости течения отражалось незначительно.

Опыты производились всегда после выравнивания температуры жидкости и наружного (комнатного) воздуха. Для сравнения с теорией необходимо было знать при температуре опыта η , ρ и σ . Весьма точные измерения η для каждого масла выполнялись под руководством проф. М. М. Кусакова сначала в нашей лаборатории, а позднее в лаборатории Института горючих ископаемых АН СССР сотрудниками Н. М. Лубман и К. С. Крым при помощи капиллярного вискозиметра Уббелюде с добавочным давлением. Ряд измерений вязкости был по нашей просьбе выполнен в лаборатории проф. М. П. Воларовича К. И. Самариной в ИМАШ АН СССР. Всем указанным лицам приносим за эти измерения искреннюю благодарность.

Для σ всегда бралось значение 35 дин/см, ρ определялось пикнометром. В табл. 1 приведена сводка наблюдаемых значений \bar{h} и вычисленных по формулам (3) или (4). В табл. 2 содержится аналогичная сводка по данным работы Ф. Мореу (1); $h_{\text{эксп}}$ и $\nu U = \eta U$ взяты из помещенных в этой работе графиков. Для образцов I, II и III (масел) положено, что $\sigma = 35$; для IV взято значение $\sigma = 37$. Приводим расшифровку номерных обозначений образцов.

Таблица 1

№ образца	η	U	$h_{\text{эксп}}$	$h_1 = h_{\text{теор}}$ по ф-ле (6)	$h_2 = h_{\text{теор}}$ по ф-ле (7)	$100 \frac{(h_1 - h_2)}{h_2}$	$100 \frac{(h_2 - h_3)}{h_3}$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,968	0,772	0,139	0,141	0,473	+1,4	—
1	0,950	0,245	0,317	0,302	0,1076	-4,7	—
1	0,950	0,517	0,486	0,494	0,155	+1,6	—
2	64,3	0,388	0,139	0,143	0,350	+2,8	—
1	0,95	0,266	0,146	0,144	0,364	-1,4	—
1	1,074	0,125	0,432	0,436	0,081	+0,9	—
7	3,27	0,244	0,134	0,136	0,198	+1,5	—
6	9,03	0,245	0,247	0,259	0,329	+4,9	+33,2
2	72,0	0,294	0,267	0,253	0,322	-5,2	+20,7
2	55,9	0,396	0,276	0,259	0,329	-6,1	+19,2
2	64,9	0,451	0,284	0,307	0,378	+8,1	+33,0
5	12,2	0,245	0,317	0,313	0,383	-1,3	+20,8
3	23,5	0,240	0,429	0,460	0,526	+7,2	+22,6
4	22,6	0,246	0,482	0,456	0,522	-5,4	+8,3
4	55,6	0,221	0,659	0,729	0,775	+10,8	+17,6
4	59,4	0,221	0,674	0,758	0,80	+12,4	+18,7
8	90,7	0,243	0,102	0,100	0,104	-2,0	+1,0
10	885,0	0,240	0,305	0,281	0,323	-7,9	+3,9
10	835,0	0,256	0,335	0,282	0,325	-15,8	-4,8

Таблица 2

№ образца	$\nu U = \frac{\eta U}{\rho}$	$h_{\text{эксп}}$	$h_1 = h_{\text{теор}}$ по ф-ле (6)	$100 \frac{(h_1 - h_2)}{h_2}$
I	0,00279	0,000351	0,000312	-11,1
I	1,01	0,000794	0,000727	-8,4
II	0,0646	0,00257	0,00251	-2,4
II	0,2965	0,00697	0,00677	-2,8
III	0,7345	0,01208	0,01226	+1,5
III	1,122	0,01535	0,01601	+1,0
IV	0,0569	0,00242	0,00237	-2,0

1. Веретенное масло. 2. Цилиндровое масло. 3. Цилиндровое масло 80% + турбинное масло 20%. 4. Цилиндровое масло 80% + турбинное масло 20%. 5. Цилиндровое масло 88% + турбинное масло 12%. 6. Цилиндровое масло 80% + турбинное масло 20%. 7. Цилиндровое масло 60% + турбинное масло 40%. 8. Цилиндровое масло 92% + канифоль 8%. 9. Цилиндровое масло 75% + канифоль 25%. 10. Цилиндровое масло 75% + канифоль 25%.

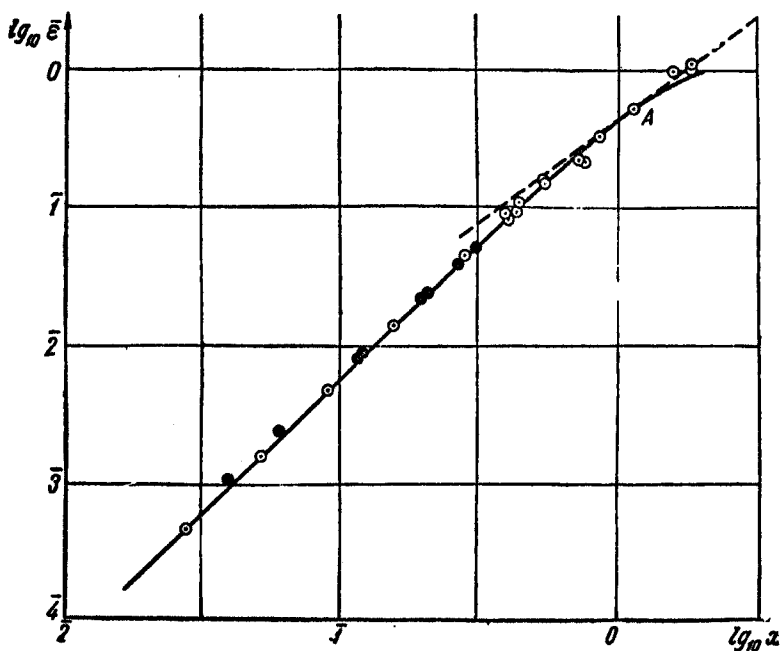
I. Минеральное масло 1. II. Минеральное масло 3. III. Минеральное масло 4. IV. Дибутилфталат.

Для графического сравнения результатов измерений с теорией на рис. 2, согласно (2), по осям отложены логарифм x и \bar{z} (светлые кружки относятся к нашим данным, черные к данным Ф. Мореу). Непре-

рывная кривая соответствует уравнению (3), а прерывистая — (4). Обе кривые взаимно касаются в точке *A*, соответствующей значению

$$x = \frac{1}{3.0,293...} = 1,137...$$

Мы видим, что левее этой точки хорошо приложимо уравнение (3)* а правее — уравнение (4). Таким образом, переходная область, в которой ни та, ни другая формула не приложимы, практически почти отсут-



ствует. В областях же соответственно малых и больших толщин отклонения не превышают возможных экспериментальных погрешностей (3—5%). Исключение составляют данные *F. Morey* для образца I, относящиеся к малым толщинам слоя. Их расхождение как с теорией, так и с нашими данными несомненно следует объяснить систематической экспериментальной ошибкой.

Лаборатория поверхностных сил
Коллоидно-электрохимического института
Академии Наук СССР

Поступило
15 IV 1945

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ *F. C. Morey*, *J. Res. Nat. Bureau Stand.* 25, 385 (1940). ² *Б. В. Дерягин*, *ДАН XXXIX*, 11 (1943). ³ Он же, *ЖЭТФ* 15, № 9 (1945). ⁴ *Goucher a. Ward*, *Phil. Mag.* (6) 44, 1092 (1922). ⁵ Доклады в НИКФИ на коллоквиуме и Ученом совете Ин-та в 1939—1940 гг. ⁶ *L. Landau a. V. Levich*, *Acta Physicochimica URSS*, 17, 41 (1942).

* С числовым значением коэффициента *k*, найденным нами (2). Числовое значение, найденное *Л. Ландау* и *В. Левичем*, ошибочно.



Kc 37a 4°

An international edition of N. S. vol. 50 was never published. Volume 50 of the Russian edition is therefore being reprinted to be supplied with the international edition.

Printed in Germany