

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

Г. В. ВИНОГРАДОВ и В. П. ПАВЛОВ

**ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ КАЛЬЦИЕВЫХ СМАЗОК  
ОТ НАПРЯЖЕНИЯ СДВИГА**

(Представлено академиком С. С. Наметкиным 7 VII 1947)

Используемый нами для изучения вязкостных свойств смазок капиллярный вискозиметр был построен по принципу постоянства расходов, предложенному М. Арвесоном<sup>(1)</sup>, но допускал еще более широкую регулировку процесса течения смазок, чем у Арвесона. Вискозиметр тарировался по минеральным маслам. Было доказано, что он пригоден для абсолютных измерений вязкости. Ниже даны результаты изучения вязкостных свойств солидола, ранее использованного Г. В. Виноградовым и К. И. Климовым<sup>(2)</sup> для исследования упругих свойств смазок.

Работы Арвесона оставили нерешенными ряд важнейших методических вопросов по капиллярной вискозиметрии смазок, в них не было уделено должного внимания температурной зависимости вязкостных свойств солидолов, и они недостаточны для теоретического рассмотрения процессов течения этих материалов. Последующие работы американцев<sup>(3,4)</sup> в этом направлении известны нам только по рефератам.

Перед загрузкой в вискозиметр смазка фильтровалась через металлическую сетку, затем для гомогенизации ее прогоняли через длинный капилляр.

Влияние тиксотропного восстановления смазки на режим течения несущественно при малых временах ее пребывания в вискозиметре, оно сказывается заметно лишь спустя несколько суток (табл. 1).

Таблица 1

Часы	1	7	25	55	121	145
$\rho_{\text{ати}}$	22,5	22,6	23,1	23,4	24,4	24,4

Капилляр радиуса  $R = 0,254$  мм и длины  $L = 69,35$  мм; расход  $Q = 6,03 \cdot 10^{-2}$  см<sup>3</sup>/сек;  $t = 20^\circ \text{C}$ .

Воспроизводимость режимов течения смазок наихудшая при малых скоростях деформаций ( $D$ ), однако и здесь расхождения давлений при заданном расходе в последовательно проводимых опытах не превосходили  $1\frac{1}{2}$ —2%. Старение смазок приводит к увеличению сопротивления их течению, так что через месяц давления, развивающиеся при заданных (малых) расходах, могут возрасти на 5—10%. При высоких скоростях деформаций эффектом старения можно пренебречь.

Сводка результатов вискозиметрического исследования солидола дана на рис. 1, на котором по оси ординат отложены значения  $\lg D =$

$= \lg \frac{Q}{\pi R^2}$ ; по оси абсцисс отложены логарифмы напряжений сдвига ( $\tau$ )

на стенках капилляров. Этот график показывает, что материал, из которого сделан капилляр, мало влияет на вискозиметрические характеристики смазок. Изменение длины капилляра в три раза совершенно не сказывается на кривых  $\frac{Q}{\pi R^2} = \varphi(\tau)$ . Изменение радиусов капилляров в области их больших значений заметно сказывается на кривых

рис. 1, тогда как изменение малых радиусов в 2 раза мало влияет на

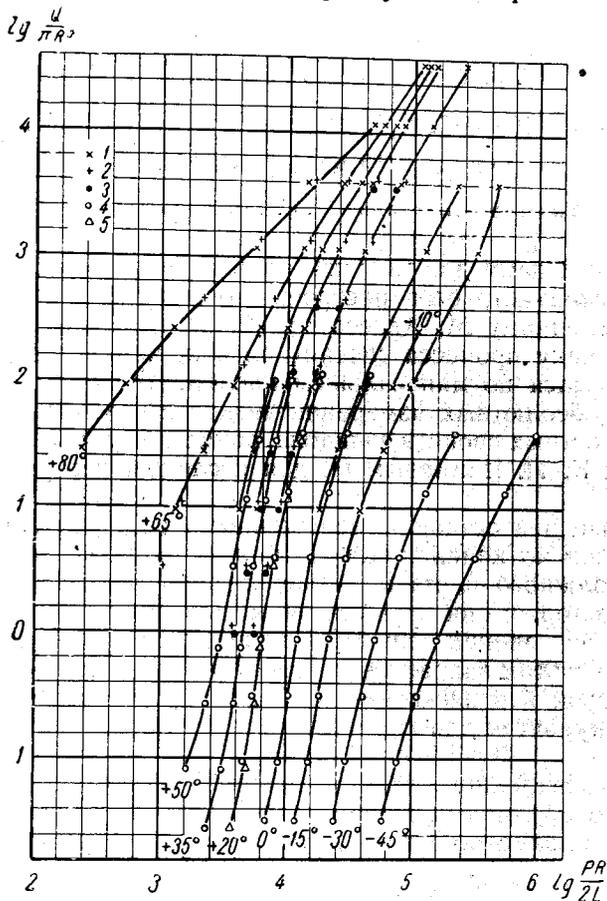


Рис. 1. Зависимость скорости деформаций солидола от напряжений сдвига при различных температурах в разных капиллярах. 1— $R = 0,254$  мм,  $L = 69,35$  мм; 2— $R = 0,518$  мм,  $L = 69,75$  мм; 3— $R = 0,542$  мм,  $L = 206,7$  мм; 4— $R = 1,702$  мм,  $L = 70,00$  мм; 5—металлический капилляр,  $R = 1,786$  мм;  $L = 70,15$  мм

формулу и положение этих кривых. В общем, изменение радиуса капилляра в 7 раз изменяет величину  $\tau$  при заданном  $D$  в самых неблагоприятных случаях на 11,5%. При низких и высоких температурах влияние радиусов капилляров на кривые  $\frac{Q}{\pi R^2} = \varphi(\tau)$  сказывается мень-

ше, чем при средних.

При высоких значениях  $\tau$  выделяется значительное количество тепла в капиллярах, вследствие чего кривые на рис. 1 в верхней части поднимаются более круто. Особое значение выделения тепла имеет при низких температурах, когда приходится работать при высоких

значениях  $\tau$  и когда чрезвычайно возрастают температурные коэффициенты вязкостных характеристик смазок. При измерении температурно-солидола, вытекающего из капилляра, было обнаружено явление, весьма важное для вискозиметрии смазок: после выхода смазки из капилляра ее температура продолжает подниматься так, что при не очень высоких значениях  $\tau$  этот прирост температуры выше такового, имеющего место в капилляре. Зная температуру смазки, выходящей из капилляра, и температурный коэффициент  $\tau$  при данном  $D$ , можно эмпирически внести поправку в данные, изображенные на рис. 1.

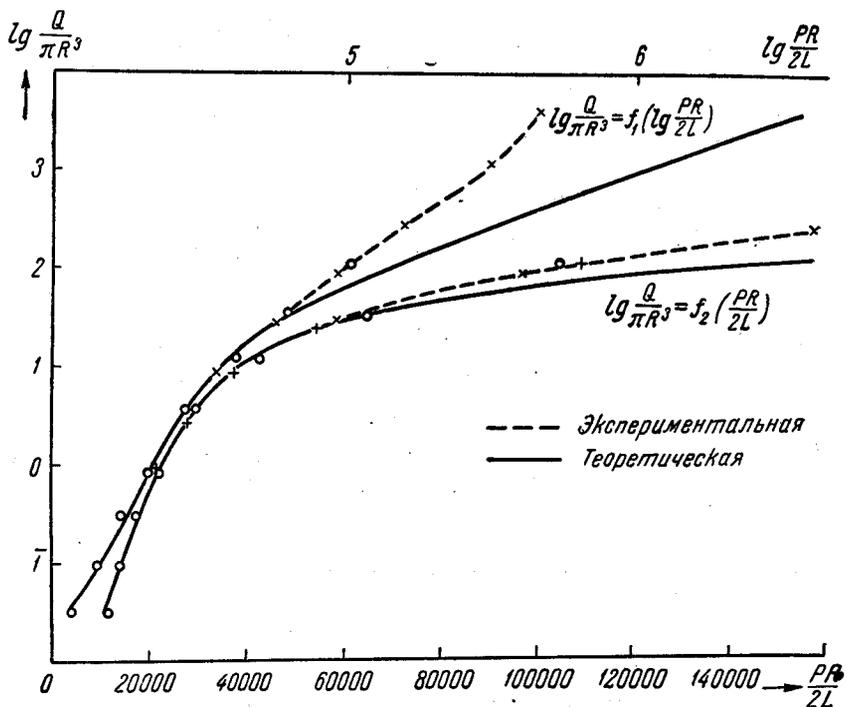


Рис. 2. Проверка приложимости теории Эйринга к описанию пластичного течения солидола при  $-15^{\circ}\text{C}$

При низких значениях  $\tau$  усиливается влияние размера капилляров и возрастают погрешности отсчета давлений. В силу этого и указанного выше теплового эффекта вряд ли целесообразно выходить за пределы изменения  $D$  в  $10^8$  раз и давлений в  $10^3$  раз (до 50—100 ати).

Данные рис. 1 подтверждают результаты исследований Арвесона, они позволяют найти вид функции и ее зависимость от температуры. Исходя из теории Эйринга (<sup>5,6</sup>),

$$\tau = k_1 + k_2 \lg D + k_3 D, \quad (1)$$

где  $k_1, k_2, k_3$  — константы. Это уравнение выводится в предположении, что свободная энергия активации процесса течения и средние размеры кинетической единицы не зависят от  $D$ . На рис. 2 показана проверка уравнения (1). Здесь на оси ординат отложены значения  $\lg D$  (где  $D = \frac{Q}{\pi R^3}$ ), на оси абсцисс — величины  $\tau$  и  $\lg \tau$ , соответственно

чему получаются две опытные и две теоретические кривые. Из рис. 2 видно, что при  $D < 100 \text{ сек.}^{-1}$  имеется согласие теории с опытом. Это же допускает применимость теории пластичности Прандтля (<sup>7</sup>) к описанию поведения солидолов при относительно малых скоростях

их деформации, так как указанная теория приводит к экспоненциальной зависимости  $D$  от  $\tau$ . Подобная зависимость приводит к линейной зависимости  $D$  от  $\tau$  при малых значениях  $\tau$ , что наблюдалось экспериментально Г. В. Виноградовым и К. И. Климовым<sup>(8)</sup>.

При  $D < 100$  сек.<sup>-1</sup> объем кинетической единицы — величина порядка  $10^{-17}$  см<sup>3</sup>, что неправдоподобно, так как меньше среднего объема волокон в кальциевых смазках<sup>(9, 10)</sup>.

Коэффициент  $k_2$  уравнения (1), зависящий от средних размеров кинетической единицы, кроме того, должен линейно зависеть от абсолютной температуры. В действительности, даже при  $D < 100$  сек.<sup>-1</sup> он изменяется с температурой по совершенно другому закону. Так, при температурах  $-15, +20, +50^\circ\text{C}$  коэффициент  $k_2$  соответственно равен 7000, 2000 и 1200. Это заставляет либо считать средние размеры кинетической единицы зависящими от температуры, либо рассматривать уравнение (1) как полуэмпирическое.

Естественно предположить, что при  $D > 100$  сек.<sup>-1</sup> нарушаются допущения, положенные в основу вывода уравнения (1), прежде всего могут изменяться средние размеры кинетической единицы. Согласно теории Эйринга, коэффициент  $k_3$  в уравнении (1) равен вязкости дисперсионной среды, и поэтому вязкость системы при высоких значениях  $D$  должна стремиться к значению  $k_3$ . Для высококонцентрированных систем, к которым относятся изученные нами смазки, это допущение недостаточно обосновано и не подтверждается экспериментально.

Авторы глубоко признательны А. А. Константинову, руководившему проектированием и изготовлением вискозиметра высокого давления, использованного в настоящей работе, и Ю. А. Наумову за постоянную помощь в работе. Мы благодарны также проф. А. С. Ирисову за предоставление возможности выполнения работы и ему и проф. М. М. Кусакову за ее детальное обсуждение.

Военная Академия  
им. Сталина

Поступило  
7 VII 1947

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> M. H. Arveson, *Ind. Eng. Chem.*, **24**, 71 (1932); **26**, 628 (1934). <sup>2</sup> Г. В. Виноградов и К. И. Климов, *ДАН*, **57**, № 9 (1947). <sup>3</sup> *Chem. Abstr.*, **37**, 45567. (1943). <sup>4</sup> *Chem. Abstr.*, **40**, 75843 (1946). <sup>5</sup> *The Chemistry of Large Molecules*, 146 (1943). <sup>6</sup> R. E. Powell and H. Eyring, *Nature*, **154**, 427 (1944). <sup>7</sup> L. Prandtl, *Z. angew. Math. u. Mech.*, **8**, 85 (1928). <sup>8</sup> Г. В. Виноградов и К. И. Климов, *ДАН*, **58**, № 8 (1947). <sup>9</sup> S. G. Ellis, *Can. Journ. Res.*, **A25**, 119 (1947). <sup>10</sup> B. V. Farrington, and D. H. Birdsall, *Oil and Gas J.*, **45**, 268 (1947).