

13. ODonaghie I. P., Cameron A. Friction and Temperature in Rolling Sliding Contacts, ASLE Transactions, v. 9, 1966.

14. Смит Ф. Смазка при контакте качения. Применение упруго-гидродинамической теории. Теоретические основы инженерных расчетов, № 1, 1965.

15. Коднир Д. С. Контактно-гидродинамическая теория смазки. Куйбышевское книжное издательство, 1963.

16. Коднир Д. С., Садыков В. А. Расчет несущей способности упорных гребней редукторов. Судостроение, № 3, 1971.

17. Коднир Д. С., Салуквадзе Р. Г., Бакашвили Д. Л., Шварцман В. Ш. Смазочный слой в шарикоподшипнике и в нестационарном контакте шарика с плоскостью. Машиноведение № 2, 1973.

18. Petrusevitch A. I., Kodnir D. S., Salukvadze R. G., Bakashvili D. L., Schwarzman V. Sh. The Investigation of oil film Thickness in Lubricated Ball-Roll Rolling Contact, Wear, v. 19, N. 4, 1972.

19. Иоффе А. Ф. Основные представления современной физики. Гостехиздат, 1949.

20. Fein R. S., Possible Role of Compressional Viscoelasticity in Concentrated. Contact Lubrication Journal of Lubrication Technology, April, 1967.

21. Коднир Д. С., Рузянова А. И. Контактно-гидродинамическая теория смазки для жидкости, находящейся в неьютоновском состоянии. Труды I Всероссийской конференции по контактно-гидродинамической теории смазки, вып. 1, КуАИ, 1973.

22. Коднир Д. С. Контактно-гидродинамическая теория смазки применительно к деталям машин. Применение контактно-гидродинамической теории смазки к исследованию деталей машин. Труды КуАИ, вып. 40, 1969.

А. П. СТАРОСТИНА Б. П. ДЬЯЧЕНКО,

АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТЕЙ ВЯЗКОСТИ МАСЕЛ ОТ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ

В процессах, связанных с режимами жидкостного и граничного трения, рабочие жидкости подвержены действию высоких давлений, температур, больших скоростей и частот деформаций. Знание зависимостей вязкости масла от давления и температуры позволяет предопределить их эксплуатационные характеристики в конкретных условиях применения. Ввиду ограниченности данных по вязкости под давлением в расчетной практике приходится либо интерполировать в диапазоне температур, либо при данных в малой области давлений приходится экстраполировать в область высоких удельных нагрузок в зонах контакта.

Для оценки эффективности различных методов расчета вязкости при повышенных давлениях и температурах нами было рассмотрено несколько уравнений, предложенных различными авторами (см. табл. 1).

Это, во-первых, обычный экспоненциальный закон Баруса $\eta = \eta_0 \cdot e^{\alpha p}$, применяемый почти всеми исследователями, в котором для пьезокоэффициента α удобная корреляция предложена Уостером

$$\alpha = [0,6 + 0,965 \lg \eta_0] \cdot 10^{-3}$$

Таблица 1

Автор	Барус	Уостер	Роланд, Флюгтер, Ватерман	Камерон, Чу	Блок
Расчетное уравнение	$\tau_i = \tau_{i0} e^{aP}$	Пьезокоэффициент $a = [0,6 + 0,965 \lg \tau_{i0}] \cdot 10$	$\tau_i = \tau_{i0} e^{a'P^{1/2}}$	$\log \tau_i = m^{1/3} \times (p + a)^{2/3}$	$\log \tau_i / \tau_{i0} = K \times \log \left(1 + \frac{P}{c} \right)$
Примечание		Для масел на нефтяной основе (с точки аннилина не менее 90°)		Для масел с точкой аннилина выше 90°	
Автор	Камерон, Чу	Роланд	Коузел	Роланд	
Расчетное уравнение	$\tau_i = \tau_{i0} (1 + c \cdot P)^n$ $c = 0,062 \cdot 10^{+a} \cdot \tau_i^{-0,062}$ $a = \left(0,4 + \frac{F}{400} \right)$ $n = 15 = 17$	$\log \frac{\tau_i}{\tau_{i0}} = \frac{K}{P^{-1} + c}$	$\log \frac{\tau_i}{\tau_{i0}} = P \cdot 10^{-4} \times (3,398 + 2,398 \tau_i^{0,278})$	$\lg \tau_i + 1,200 = (\lg \tau_{i0} + 1,200) \times \left(1 + \frac{P}{2000} \right)^z$	
Примечание			Для давлений до 350 атм.	Для всех типов масел и жидкостей при температур. до 200°С	
Автор	Роланд	Роланд	Аллен, Таунсенд, Зарцкий		
Расчетное уравнение	$\log \tau_i + 1,200 = G_0 \cdot \frac{\left(1 + \frac{P}{2000} \right)^z}{\left(1 + \frac{t^\circ C}{135} \right)^{S_0}}$ где $G_0 = \log \tau_{i0,0} c + 1,200$	$\log \tau_i + 1,200 = G \frac{\left(1 + \frac{P}{2000} \right)^{-c \log v_i \left(1 + \frac{t^\circ C}{135} \right) + D}}{\left(1 + \frac{t^\circ C}{135} \right)^{S_0}}$	$\tau_i = \tau_{i0} e^{[aP_1 + \beta(P - l_1)]}$		
Примечание	Упрощенное полное уравнение вязкость—температура. Давление	Полное уравнение вязкость—температура—давление с 4 характеристическими параметрами	Для давлений выше точки перегиба P_1 —давление в точке перегиба		

Она хорошо применима для масел на нефтяной основе, как и сам показательный закон. Поскольку показательный закон дает завышенные значения вязкости при высоком давлении, предпринимались попытки найти более точную и простую зависимость

вязкости от давления. Часто эти уравнения получены лишь при определенном классе жидкостей. Так, для масел с точкой анилина выше 90° Камероном и Чу [1] предложен так называемый закон двух третей

$$\lg \eta = m^{2/3} \cdot (p + a)^{2/3}$$

Очевидно, что попытка получить общий закон, применимый ко всем смазочным маслам, идет в ущерб точности. Тем же авторами предложена следующая зависимость, имеющая общий характер

$$\begin{aligned} \eta &= \eta_0 (1 + c \cdot p)^n, \\ c &= 0,062 \cdot 10^{+a} \cdot \eta_0^{-0,062} \\ -a &= 0,4 + \frac{eF}{400}; \quad n = 15 \div 17 \end{aligned}$$

p — давление в тыс. фунтов/кв. дюйм; η — вязкость в сантипуазах. Или

$$\log \frac{\eta_p}{\eta_0} = 16 \log \left[1 + \frac{0,882 \cdot 10^{+a} \cdot p \cdot 10^{-3}}{\eta_0^{0,062}} \right]$$

Это уравнение, содержащее всего один параметр, удобно для практических расчетов, оно проще, чем обычный показательный закон. Однако оно имеет особенности, противоречащие практике: пьезокоэффициент, согласно этому общему закону, уменьшается с увеличением начальной вязкости η_0 ; кроме того, все масла, имеющие одинаковую начальную вязкость, будут соответственно иметь одинаковую вязкость при высоком давлении, что также не всегда подтверждается опытом. Одним из наиболее точных уравнений вязкость — давление, содержащим два параметра, является модифицированная экспоненциальная зависимость, предложенная Роландом, Флюгтером и Ватерманом [2].

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{a' p^b}$$

Параметры a и b здесь не имеют своей корреляции и определяются на основании экспериментальных данных.

Но наиболее удобным и не уступающим ему в точности является следующее однопараметрическое уравнение, предложенное Роландом [3] и проверенное им на 400 жидкостях

$$\lg \eta + 1,200 = (\lg \eta_0 + 1,200) \left(1 + \frac{p}{2000} \right)^z$$

Здесь η — вязкость в спз при давлении p кг/см²; η_0 — вязкость в спз при атмосферном давлении; z — характеристический параметр для данной жидкости, аналогичный пьезокоэффициенту α в уравнении Баруса.

Следует отметить, что все рассмотренные уравнения справедливы лишь до некоторого определенного значения давления, зависящего от природы масла, его начальной вязкости, температуры.

Причем для всех рассмотренных уравнений эта граница примерно одинакова. Численное значение этого давления может значительно отличаться от масла к маслу и увеличивается с повышением температуры. Так, для масла SAE-50 при 21° это примерно 2000 атм, а для синтетического масла ЛНМЗ—36/1—К и $t^\circ=122^\circ$ это ≈ 14000 атм. Изменение закономерности взаимосвязи вязкость—давление при некотором предельном давлении отмечается многими исследователями и свидетельствует о происходящих в масле структурных изменениях, возможно даже химических и физических. Использование нами экспериментальные данные содержат значения вязкости под давлением вплоть до точки стеклования. Вблизи этой точки наступают структурные изменения масла, и рассмотренные уравнения дают значительное расхождение с экспериментом.

Для этого второго участка кривой η — p Аллен, Таунсенд, Зарецкий [6] предложили следующую модифицированную экспоненциальную зависимость

$$\eta = \eta_{10} \cdot e^{[\alpha p_1 + \beta (p - p_1)]},$$

где p_1 — давление, соответствующее точке перехода; α — пьезокоэффициент вязкости в уравнении Баруса, характеризующий масло до переходной точки p_1 ; β — пьезокоэффициент вязкости второго участка кривой после точки перехода.

Затруднением при использовании данного уравнения является необходимость точного знания величины давления p_1 в точке перегиба кривой. Расчет вязкости в переходной зоне вблизи точки перегиба не дал удовлетворительных результатов ввиду переменного значения пьезокоэффициента в этой области.

Из известных нам имеющихся в литературе зависимостей, связывающих вязкость, температуру, давление, нами не рассматривались те из них, которые получены для какого-либо ограниченного класса жидкостей, или имеют небольшой диапазон применимости (сотни атмосфер по давлению), либо являются сложными для практических целей.

Представленные в табл. 1 формулы различных авторов, аппроксимирующие изотермы вязкости, были применены для обработки экспериментальных данных, полученных в диапазоне давлений до точек затвердевания для 13 отечественных масел (минеральных, синтетических, маслосмесей и американского масла SAE-50 (Mobilgard-570). При сравнении теоретических результатов с экспериментальными совпадение было менее удовлетворительное при низких температурах. В этом случае диапазон применимости по давлению представленных в табл. 1 формул оказался ниже, чем при высоких температурах, где изотерма вязкость—давление более спрямлена.

В качестве примера в табл. 2 приведены результаты количественного сравнения экспериментальных изотерм вязкость—давление

с теоретическими, полученными на основании формул табл. 1 для масла Веретенное-2.

Таблица 2

Автор		Камерон, Чу		Барус		Роланд, Флюгтер, Ватерман		Роланд		Роланд	
Формула		$\eta = \eta_0 (1 + cP)^n$		$\eta = \eta_0 e^{\alpha P}$		$\eta = \eta_0 e^{\chi' P H}$		$\log \frac{\eta}{\eta_0} = \frac{K}{P - 4C}$		$H = Z \cdot P + H_0$	
Давление кгс/см ²	$\eta_{\text{эксп}}$ пуаз	η расч. пуаз.	Расхожд. с эксп. в %	η расч. пуаз.	Расхожд. с эксп. в %	η расч. пуаз.	Расхожд. с эксп. в %	η расч. пуаз.	Расхожд. с эксп. в %	η расч. пуаз.	Расхожд. с эксп. в %
1020	0,0696	0,0603	15	0,081	16,4	0,065	6,9	0,0678	2,6	0,0701	0,85
1880	0,157	0,130	20,8	0,20	27,4	0,156	0,32	0,159	1,3	0,163	3,8
2900	0,395	0,309	27,6	0,557	41	0,443	12	0,41	3,8	0,407	3,0
3920	0,917	0,705	50	1,49	62	1,25	37	0,99	8	0,954	4,0
5060	2,36	1,68	40	4,32	83	4,01	70	2,5	6	2,34	0,85
6130	5,38	3,66	46,8	11,9	127	11,4	113	5,6	4,2	5,18	3,8
7050	11,8	6,94	70	30,5	159	26,1	121	10,8	9,4	9,97	18,4
8060	25,2	13,6	85	85,5	240	63,6	152	21,3	18,5	20	26
9950	57,5	29,1	98	288	400	178	210	45	27,6	44	31,0
10340	115	56,6	103	876	661	460	300	86	34	89	30,5
11870	346	138	151	4167	1104	1662	320	200	73	226	53

Как следует из табл. 2, для масла Веретенное-2 ($t^{\circ} = 120^{\circ}\text{C}$) уже при давлении 5060 атм расхождение с экспериментом при расчете по простому показательному закону и по формуле Камерона, Чу составляет соответственно 83 и 40%; модифицированный экспоненциальный закон (формула Роланда, Флюгтера, Ватермана) дает при этом же давлении 70% расхождения.

Проведенный анализ формул показывает, что наилучшее приближение к реальным зависимостям вязкости от давления дают формулы Роланда. Поэтому в дальнейшем ограничимся только их рассмотрением.

Уравнения

$$\log \frac{\eta_p}{\eta_0} = \frac{k}{p^{-1} + c} \quad (1)$$

$$\log(\log \gamma_1 + 1,200) = z \cdot \log\left(1 + \frac{p}{2000}\right) + \log(\log \gamma_{10} + 1,200) \quad (2)$$

дают отклонения от эксперимента при давлении 10 000 атм $\sim 30\%$, тогда как при расчетах по другим формулам, представленным в табл. 1, — сотни процентов.

Для более подробного рассмотрения нами была взята зависимость (2), предложенная Роландом, в связи с тем, что она является в отличие от (1) однопараметрической. В более простой форме уравнение (2) можно представить следующим образом

$$H = z \cdot \Pi + H_0,$$

где $H = \log(\log \gamma_1 + 1,200)$ — функция вязкости; $\Pi = \log\left(1 + \frac{p}{2000}\right)$ — функция давления; $H_0 = \log(\log \gamma_{10} + 1,200)$ — функция вязкости исходной вязкости; γ_1 — вязкость в спз; p — давление в кгс/см².

Уравнение (3) содержит всего один параметр, характеризующий зависимость η от p ; оно также дает возможность получить график линейной зависимости функции вязкости H и функции давления Π , причем это уравнение хорошо описывает все виды изотерм —

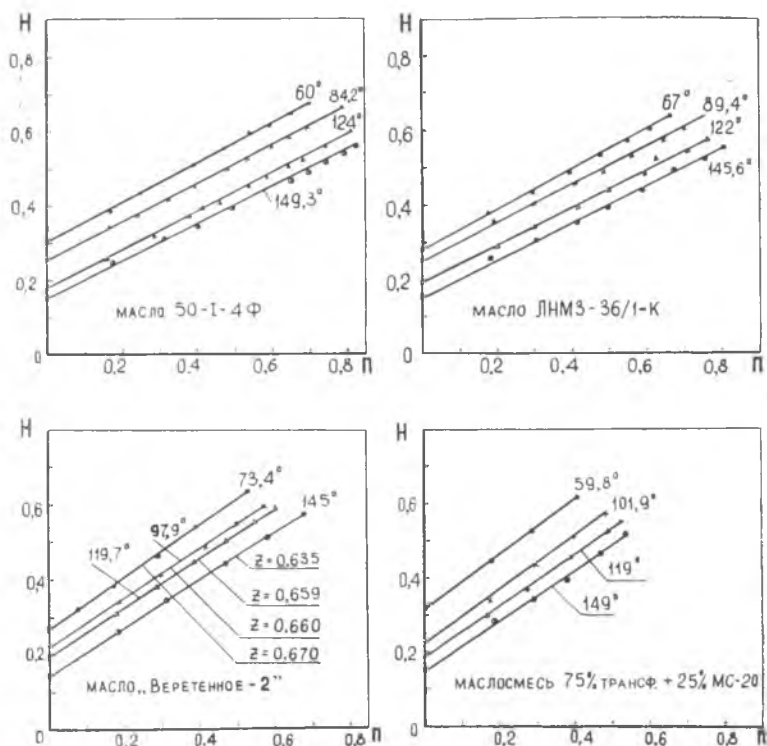


Рис. 1. Семейства изотерм для 4 отечественных масел.

выпуклые, вогнутые и прямолинейные. Справедливость этого уравнения нами была проверена на 14 маслах. Семейства изотерм, показанные на рис. 1 и построенные в соответствии с уравнением (3), представляют собой параллельные или почти параллельные линии с показателем наклона, равным параметру z в уравнении (3). В случае параллельности семейства изотерм знание параметра z дает возможность, исходя из одного значения вязкости при какой либо температуре, определять вязкость при повышенном давлении и этой же температуре. Установлено, что параметр z меняется незначительно и часто его можно принимать постоянным в широком диапазоне температур. Полученные значения z для интервала $20^{\circ}\div 150^{\circ}\text{C}$ даны в таблице 3. Таким образом, величина z может

Таблица 3

Масло	$t^{\circ}\text{C}$	P_{max}	z
Велосит	40,7	4050	0,77
	54,9	6000	0,86
	70,2	6500	0,80
Веретенное-2	73,4	5000	0,67
	99,9	5525	0,66
	119,7	9500	0,65
	145°	10000	0,64
Смесь 75% транс. + + 25% МС-20	59,8	3500	0,74
	102	6300	0,73
	119	10000	0,68
	149		0,67
Mabilgard-570	24	1875	0,59
	51,4	3770	0,60
	75,6	4900	0,63
МС-14	120		0,70
МС-20С	100		0,666
	120		0,666
50-1-4Ф	60	7000	0,510
	84,2	9000	0,500
	124	9550	0,497
	149,3	10500	0,490

Масло	$t^{\circ}\text{C}$	P_{max}	z
ЛНМЗ-36/1—К	67	7500	0,502
	89,4	10000	
	122	14000	
МН-7,5	59,9	2500	0,566
	82,4		
	126,7		
Б-3В	65°	6000	0,45
	106,5	11100	0,48
	137,5	14600	0,49
ЦНИННП-7	60	5500	0,54
	80	7000	0,535
	132	12500	0,53
	140		0,51
Жидкость-5 (полисилаксановая)	20	4700	0,38
	40	5000	0,36
	60	5660	0,35
ПМС-109	60	4600	0,47
	80	5540	0,46
ПМС-20	20	3500	0,52
	80	7100	0,57

служить характеристикой поведения масла при высоком давлении и использоваться для сравнительной оценки. Аппроксимация уравнением Роланда изотерм вязкость — давление испытанных 14 масел показала, что это уравнение справедливо в диапазоне тем-

ператур до 150°C (для более высоких температур отсутствуют экспериментальные данные). В таблице 3 для температур эксперимента даны значения предельных давлений, до которых уравнение Роланда дает расхождение в значении расчетной и экспериментальной вязкости не более 20%. Предел применимости по давлению зависит от типа масла, температуры, начальной вязкости.

Вязкостно-температурная зависимость

Роландом предложено уравнение изобар вязкость—температура, имеющее вид

$$\log(\log \eta + 1,200) = -S \cdot \log\left(1 + \frac{t^0 c}{135}\right) + \log(\log \eta_0 + 1,200) \quad (4)$$

или
$$H = S \cdot \Theta + \log G_0, \quad (5)$$

где $\Theta = \log\left(1 + \frac{t^0 c}{135}\right)$ — функция температуры; S — показатель наклона вязкостно-температурной кривой; $G_0 = \log \eta_0 + 1,200$ — функция начальной вязкости.

Сравнение экспериментальных и расчетных значений вязкости для масла Веретенное-2 приведено в табл. 4 для $P=0$ и 4860 атм.

Таблица 4

Давление, кгс/см ²	t °С	η расчетное, пуаз	η эксперим., пуаз	Расхождение, %
4680	73,4	13,26	12,75	4,0
	145	0,59	0,53	11,5
0	25	0,27	0,28	3,3
	49	0,112	0,110	1,9
	74	0,055	0,054	2,8
	90	0,039	0,039	1,4
	149,2	0,015	0,0147	1,1

Изобары, построенные в соответствии с уравнением (5), представляют собой семейство прямых с показателем наклона S , часто параллельных или незначительно изменяющих наклон в зависимости от давления. На рис. 2 изображено семейство изобар масла 50-1-4Ф, где уравнение (5) оказалось справедливым в том же диапазоне давлений и температур, что и уравнение (3). Таким образом, табл. 3 может также характеризовать область применимости

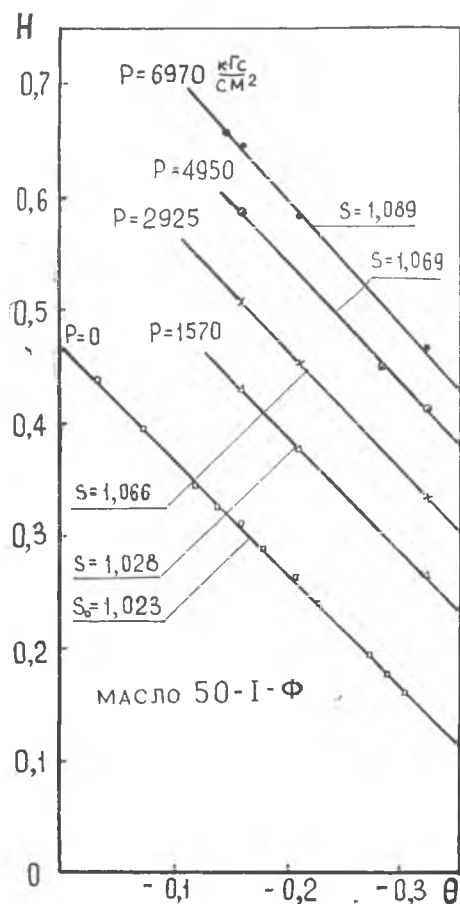


Рис. 2. Семейство изобар масла 50-I-Φ.

Так, для масла Веретенное-2 изотермы сходятся в точке с координатой $\eta_p = 0,06422$ спз, а изобары имеют координату полюса сходимости $\eta_p = 0,0634$ спз (расхождение координат полюса в данном случае 1,588%), (рис. 3).

Таблица 5

Давление P , кг/см ²	η эксперимен., пуаз	η теоретич., пуаз	Расхождение в %
500	0,147	0,145	1,4
1000	0,316	0,289	9,3
1500	0,590	0,564	4,6
2000	1,149	1,086	5,8
2500	2,03	1,85	9,7
3000	3,39	3,61	6,6
3500	5,83	6,04	3,6
4500	16,9	15,3	10,6

вязкостно-температурной зависимости по уравнению (5). Хорошее соответствие расчетных и экспериментальных значений вязкости можно получить, зная показатель наклона S при $p = \text{const}$. В табл. 5 приведены, результаты расчета вязкости масла МС-14 при $t^\circ = 120^\circ$, исходя из значений S , определенных экспериментально до $t^\circ = 100^\circ$ и при том же давлении.

Применение уравнений Роланда для экстраполяции дает возможность, зная общий для всех изобар данного масла показатель наклона S , рассчитывать вязкость при повышенном давлении и любой температуре, зная только одно значение вязкости при данном давлении.

Теоретический и некоторый практический интерес представляет та особенность семейства изобар и изотерм, что они имеют единую точку сходимости, так называемый полюс сходимости. Для большинства рассмотренных масел этот полюс расположен в области очень малых вязкостей и отрицательных давлений.

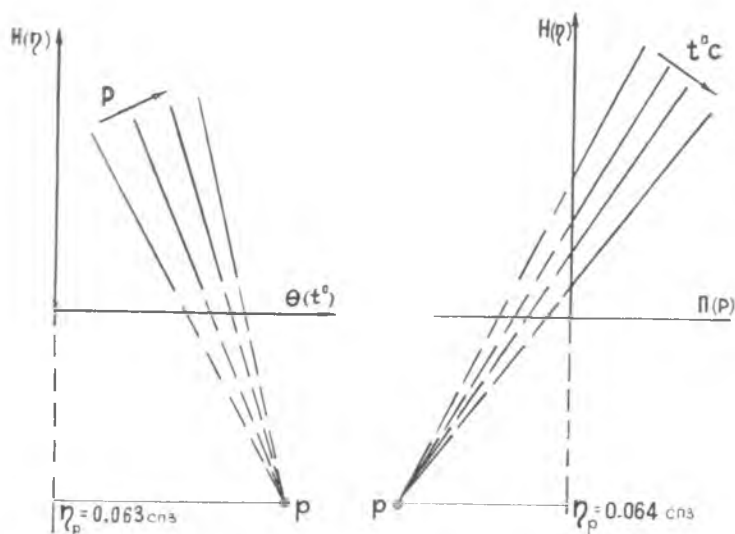


Рис. 3. Полюс сходимости изобар и изотерм масла Веретенное-2

Исходя из единого полюса сходимости изобар и изотерм, легко получить полное обобщенное уравнение вязкость—температура—давление

$$\frac{H - H_0}{H_p - H_0} = \frac{\Pi}{\Pi_p}, \quad (6)$$

предложенное Роландом.

Практический интерес представляет упрощенная форма уравнения (6) для случая параллельных изобар и изотерм, т. е., когда координата полюса — бесконечность

$$H = S_0 \cdot \Theta + z \cdot \Pi + \log G_0 \quad (7)$$

или в развернутой форме

$$\begin{aligned} \log(\log \tau_i + 1,200) = & -S_0 \cdot \log\left(1 + \frac{t^0 c}{135}\right) + \\ & + z \cdot \log\left(1 + \frac{p}{2000}\right) + \log(\log \tau_{i0} + 1,200) \end{aligned} \quad (8)$$

Это уравнение содержит минимально возможное для обобщенного уравнения число параметров — два — S и z . Результаты расчета вязкости в соответствии с уравнением (8) для масла Веретенное-2 приведены в табл. 6.

Наиболее полное уравнение вязкость—температура—давление Роланда, содержащее 4 характеристических параметра, представ-

Давление P , кгс/см ²	t °С	η расчетн. пуаз	η эксперим. пуаз	Расхождение в %
1025	73	0,199	0,176	13
1025	90	0,118	0,121	2,5
4680	110	1,79	2,09	17,4
5530	99	5,33	5,14	3,6
8400	145	5,38	5,75	6,9
9800	145	11,78	13,4	13,8

ляет большой теоретический интерес, но является менее удобным для практических целей, т. к. требует определения координат полюса сходимости, для чего нужен большой экспериментальный материал.

Поскольку было бы удобным знать вязкостно-температурную характеристику масла и его свойства под давлением, исходя из простых физических или химических констант, естественно стремление исследователей получить аналитические выражения, связывающие эти параметры. Но чаще предлагается графическое определение вязкости, исходя из других характеристик масла [8, 9, 10, 11]. Единственное аналитическое выражение, связывающее вязкость при любой температуре (до 200°C) и молекулярный вес, предложено Роландом

$$M = 317 \cdot 10^{-5} (\log \eta_{40^\circ\text{C}} + 1,200)^{2,63} \quad (9)$$

Как показали наши расчеты, точность, даваемая этим уравнением, является вполне удовлетворительной (см. табл. 7). Молекулярный вес определялся криоскопическим методом. Большой интерес представляет корреляция по плотности ρ_4^{20} и показателю преломления n_D^{20} , т. к. определение молекулярного веса являясь более трудоемкой задачей, чем определение ρ и n_D^{20} . Нами таким образом был рассчитан коэффициент S наклона вязкостно-температурной кривой, исходя из M , ρ_4^{20} и n_D^{20} для ряда минеральных масел, пользуясь предлагаемыми Роландом графиками [3].

В качестве примера в табл. 7 приведены значения S , рассчитанные по M , ρ_4^{20} и n_D^{20} для масел велосит и Веретенное-2; получено хорошее соответствие расчетных и экспериментальных значений.

Исходя из приведенного анализа, можно прийти к следующим выводам:

1. Все рассмотренные формулы применимы только до точек затвердевания. Диапазон применимости ограничен для минеральных масел давлениями 2000—8000 атм при температурах 20°—150°C. Для синтетических масел диапазон применения этих формул может быть расширен до 8000—12000 атм при температурах 75°—150°C.

Масло	S (по η экспер.)	Молек. вес, M	S_M	σ_{20}^2	S_p	η_D^{20}	S_{η}
Веретенное-2	1,137	325	1,144	0,878	1,206	1,4766	1,197
	Расхождение с S экспер.		0,62%		6%		5,3%
Велосит	1,035			0,866	1,112	1,4809	1,122
	Расхождение с S экспер.				7,4%		8,3%

2. Наибольшее отклонение при аппроксимации изотерм η — P дают формулы Баруса и Камерона. Наряду с этим формула Камерона приводит к неправильному качественному истолкованию зависимости вязкости от давления. Вследствие этого применение этих формул в контактно-гидродинамических расчетах неоправдано.

3. До точек затвердевания наиболее приемлемые зависимости вязкости от температуры и давления — это формулы Роланда. При высокой точности F_0 они содержат минимально возможное количество характеристических параметров, что облегчает их практическое применение; дают линейные графики в координатах вязкость — давление и температура, показатели наклона которых (характеристические параметры) могут служить для сравнительной оценки масел и основой их классификации по пьезо-вязкостно-температурным характеристикам; имеют универсальную применимость как к минеральным, так и к синтетическим маслам, маслам с присадками и маслосмесям. Ввиду вышеизложенного, именно эти зависимости должны применяться для экстраполяции до точек затвердевания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chu P. S. Y. and Cameron A. Pressure-Viscosity Characteristics of Lubricating Oils. J. Inst. of Petroleum, vol. 48, 1962, N 461, p. 147—155.
2. Roelands C. I. A., Vlugter I. C. and Waterman H. I. The Viscosity—Temperature-Pressure Relations of Lubricating Oils and its Correlation with Chemical Constitution. J. of Basic Eng. 85, 1963, N 4, p. 601—610.
3. Roelands C. I. A. Correlational aspects of the viscosity-temperature-pressure relationship of lubricating oils. Dru . V. R. B., 1966.
4. Чжен (Cheng H. S.). Теория изотермической упругогидродинамической смазки, построенная для широкого диапазона значений пьезокоэффициента вязкости. Проблемы трения и смазки, ASME (серия F), № 1, 1972, г., стр. 32—42.
5. Kennel J. W., Bell J. C. Interpretations of the thickness of lubricant films in rolling contact. Trans. ASME, 1971, F. 93, N 4, 478—497.

6. Аллен, Таунсенд, Заредкий. Упругогидродинамическая смазка шарика при верчении в канавке с низким показателем прилегания. Проблемы трения и смазки, № 1, 1970 (NSME серия F).

7. Камерон А. Теория смазки в подшипном деле. Москва, Машгиз, 1962. (Об уравнении вязкости смазочных масел).

8. Piperakis Nikos. Sur l'équation de viscosité des huiles lubrifiantes. (Об уравнении вязкости смазочных масел). Revue univers. mines, 1971, 114, № 1, стр. 17—27.

9. Mahoney C. L., Barnum E. R., Kerlin W. W., Sax K.J. Metal-linked Polyphenyl Ethers as High-Temperature Radiation-Resistant Lubricants.

10. Кусаков М. М., Коновалова Л. А., Авдеева В. П. Влияние давления на вязкость и структурирование масел. Труды Института нефти АН СССР, т. XII, 1959.

11. Venkatesan P. S., Ahmed N., Goldman I. B. Frictional studies, of tool steel against aluminum under high pressure using liquid lubricants. Wear, 1971, 17, N 4, 245—258.

Б. П. ДЬЯЧЕНКО, Н. А. КШНЯКИН

ГЕНЕРАТОР РАДИОИМПУЛЬСОВ ДЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ КВАРЦЕВЫХ ДАТЧИКОВ ВЯЗКОСТИ

Для исследования вязкоупругих свойств жидкостей применяются крутильно-колеблющиеся кварцевые резонаторы [1], механические колебания, в которых обычно возбуждаются с помощью генераторов прямоугольных импульсов [2]. В паузе между импульсами ток в резисторе R (в соответствии с эквивалентной схемой, приведенной на рис. 1) может быть записан в виде

$$i(t) = \frac{U_0 e^{-\frac{t}{RC}}}{R} (1 - e^{-\frac{\tau_u}{RC}}) + \frac{U_0 e^{-\alpha t}}{\omega L_K} [\sin \omega t - e^{-\alpha \tau_u} \sin \omega (t - \tau_u)]. \quad (1)$$

С увеличением вязкости жидкости возрастает коэффициент затухания α , измерение которого затрудняется малой амплитудой отклика $U_0/\omega L_K$ и первым слагаемым в (1), полностью искажающим первый период колебаний датчика.

Для уменьшения погрешности измерения вязкости высоковязких сред или жидкостей, находящихся под высоким давлением, необходимо увеличить амплитуду отклика $U_0/\omega L_K$ в (1) и уменьшить первое слагаемое в (1), что может быть осуществлено возбуждением резонатора радиопульсом с синусоидальным заполнением, частота которого близка к резонансной частоте датчика.

При одинаковых амплитудах возбуждающих импульсов амплитуда колебаний в датчике за время действия радиопульса будет

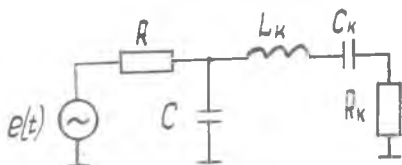


Рис. 1.