

УДК 532.5

В. А. М а т в е е в, О. Ф. О р л о в

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ ВЕЩЕСТВА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ

Приведено термическое уравнение состояния веществ, находящихся в одной из трех фаз (газ, пар, жидкость), которое связывает между собой динамический коэффициент вязкости, давление и температуру. Это уравнение описывает поведение веществ и весьма точно согласуется с данными эксперимента.

Ключевые слова: динамическая вязкость, уравнение состояния, критическое состояние, метиловый спирт, дебит нефтяных скважин.

Для определения зависимости коэффициента динамической вязкости от давления и температуры воспользуемся эмпирической зависимостью

$$\eta = \gamma \exp(\alpha P - \beta T), \quad (1)$$

где η — коэффициент динамической вязкости вещества; P и T — давление и температура; α, β, γ — параметры, которые постоянны для вещества в определенном фазовом состоянии, определяемые экспериментально по результатам трех и более независимых измерений величин η, P, T .

Пусть имеем η_i, P_i, T_i , где $i = 1, 2, 3$ — порядковый номер проведенного эксперимента, тогда

$$\alpha = [(T_2 - T_3) \ln(\eta_1/\eta_2) - (T_1 - T_2) \ln(\eta_2/\eta_3)] / [(T_2 - T_3)(P_1 - P_2) - (T_1 - T_2)(P_2 - P_3)]; \quad (2)$$

$$\beta = [(P_2 - P_3) \ln(\eta_1/\eta_2) - (P_1 - P_2) \ln(\eta_2/\eta_3)] / [(T_2 - T_3)(P_1 - P_2) - (T_1 - T_2)(P_2 - P_3)]; \quad (3)$$

$$\gamma = \sum_{i=1}^3 \eta_i / 3 \exp(\alpha P_i - \beta T_i). \quad (4)$$

Если требуемые измерения выполнять в эксперименте, подчинив их условиям

$$P = P_1; \quad T = T_1; \quad \eta = \eta_1 \quad (\text{измерение } i = 1),$$

$$P = P_2 = P_1; \quad T = T_2 > T_1; \quad \eta = \eta_2 \quad (\text{измерение } i = 2),$$

$$P = P_3 > P_1; \quad T = T_3 = T_2; \quad \eta = \eta_3 \quad (\text{измерение } i = 3),$$

то величины α, β, γ могут быть определены так:

$$\alpha = \ln(\eta_2/\eta_3) / (P_2 - P_3);$$

$$\beta = \ln(\eta_1/\eta_2) / (T_2 - T_1); \quad (5)$$

$$\gamma = \sum_{i=1}^3 \eta_i / 3 \exp(\alpha P_i - \beta T_i).$$

На рис. 1–3 приведены результаты, иллюстрирующие хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных. Когда вещество находится в газообразном состоянии, прежде всего следует иметь в виду положение молекулярно-кинетической теории [5], что вязкость газа не зависит от давления P , т.е. для

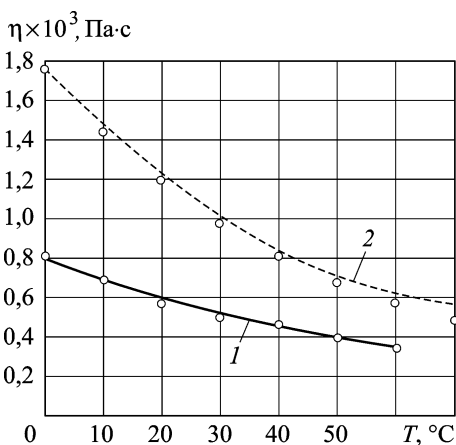


Рис. 1. Изобары жидкостей при атмосферном давлении:

1 – спирт метиловый; 2 – спирт этиловый

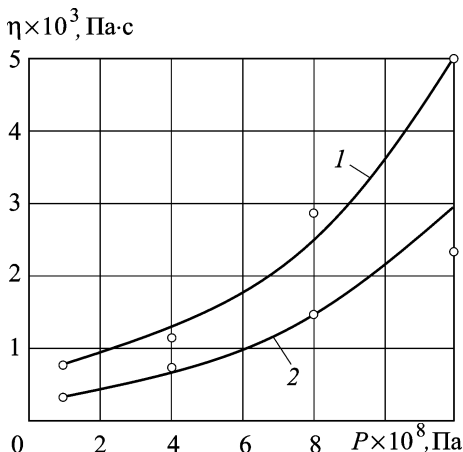


Рис. 2. Изотермы метилового спирта: теоретические (—) и экспериментальные (*, ○) значения для $T = 30$ (1) и 75 °C (2)

газа величина α – бесконечно малая, иными словами, для реальных газов следует полагать $\alpha = 0$.

Непосредственными вычислениями для газов можно показать, что среднее значение $\beta = -2,3 \cdot 10^{-3}$ град $^{-1}$. Это подтверждает вывод, следующий из формулы Сезерленда [4], о том, что вязкость газов η увеличивается с ростом T .

Есть еще один случай состояния вещества, заслуживающий особого рассмотрения – критическое состояние [5], которое характеризуется тем, что здесь исчезает всякое различие между жидкостью и ее насыщенным паром (газом).

Выше отмечалось, что для жидкости параметр $\beta > 0$, для газа $\beta < 0$ и для вещества в критическом состоянии $\beta = 0$. Из (1) следует, что для веществ в критическом состоянии параметр γ строго равняется коэффициенту η динамической вязкости этих веществ в критической точке.

В приложениях теории вязкости смесей известен найденный эмпирически и хорошо согласующийся с данными опыта закон Кендалла [2]. С его помощью устанавливается связь между значениями вязкости η_Σ раствора, эмульсии, суспензии и значениями η_j отдельных j -х компонентов ($j = 1, 2, \dots, N$). Закон Кендалла обычно представляют в форме

$$\ln \eta_\Sigma (P, T) = \sum_{j=1}^N x_j \ln \eta_j (P, T), \quad (6)$$

где под коэффициентом x_j понимают молярную массу, весовую концентрацию или относительный объем j -го компонента смеси. Если теперь полагать (1) справедливым в общем случае, то все коэффициенты вязкости η_j могут быть заданы в форме

$$\eta_j (P, T) = \gamma_j \exp (\alpha_j P - \beta_j T). \quad (7)$$

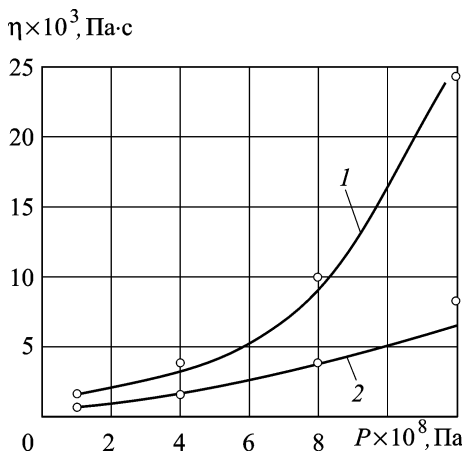


Рис. 3. Изотермы этилового спирта: теоретические (—) и экспериментальные (*, ○) значения для $T = 30$ (1) и 75 °C (2)

В этой же форме в силу предполагаемой общности соотношения (1) может быть определен и коэффициент $\eta_{\Sigma}(P, T)$, причем это уже должно следовать из соотношения (6). Действительно, выражения (1), (6) и (7) совместно дают

$$\ln \eta_{\Sigma}(P, T) = \ln \prod_{j=1}^N \gamma_j^{x_j} + P \sum_{j=1}^N x_j \alpha_j - T \sum_{j=1}^N x_j \beta_j; \quad (8)$$

$$\eta_{\Sigma}(P, T) = \gamma_{\Sigma} \exp(\alpha_{\Sigma} P - \beta_{\Sigma} T),$$

где

$$\gamma_{\Sigma} = \prod_{j=1}^N \gamma_j^{x_j}; \quad \alpha_{\Sigma} = \sum_{j=1}^N x_j \alpha_j; \quad \beta_{\Sigma} = \sum_{j=1}^N x_j \beta_j. \quad (9)$$

Тем самым доказывается всеобщий и объективный характер закона Кендалла. Соотношения (1), (8) и (9) открывают новые возможности для решения многих проблем смазки.

Например, в заявке на изобретение № 2007 126 534 от 12.07.2007 приводится соотношение для расхода жидкости Q , текущей в цилиндрической трубе:

$$Q = \pi r^4 (\eta_l - \eta_0) / 8 \alpha l \eta_l \eta_0, \quad (10)$$

где r — радиус сечения; η_0, η_l — коэффициенты вязкости жидкости в начальном и конечном сечениях трубы.

Выражение (10) подобно другому, аналогичному ему, и известному в гидродинамике как формула Пуазейля [3]. Разница между этими двумя соотношениями заключается в том, что соотношение (10) в отличие от формулы Пуазейля учитывает зависимость коэффициента вязкости η жидкости от давления (при выводе формулы Пуазейля полагается $\eta = \text{const}$).

Соотношение (10) служит основой оперативного и экономичного способа определения дебита нефтяных скважин [6]. Таким образом, полученные уравнения определяют фактически состояние вещества, находящегося в одной из трех фаз — газ, пар, жидкость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Б а з а р о в И. П. Термодинамика. — М.: Физматлит, 1961.
2. М е н з е л Д. Основные формулы физики. — М.: Изд-во иностранной литературы, 1957.
3. Л а н д а у Л. Д., Л и в ш и ц Е. М. Механика сплошных сред. — М.: Изд-во технико-теоретической литературы, 1953.
4. К е й Д ж., Л э б и Т. Таблица физических и химических постоянных. — М.: Физматлит, 1962.
5. Ш т р а у ф Е. А. Молекулярная физика. — М., Л.: Изд-во технико-теоретической литературы, 1949.
6. М а т в е е в В. А., О р л о в О. Ф., Б е р г В. И. Измерение вязкости при больших давлениях жидкости // Измерительная техника. — 2005. — № 10.

Статья поступила в редакцию 12.03.2009

Валерий Александрович Матвеев родился в 1939 г., в 1961 г. окончил Тульский механический институт. Д-р техн. наук, профессор, руководитель НУК “Информатика и системы управления” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных трудов и 23 научных патентов в области гироскопии.

V.A. Matveev (b. 1939) graduated from the Tula Mechanical Institute in 1961. D. Sc. (Eng.), professor, head of "Information Technology and Control Systems" scientific and educational complex of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications and 23 patents in the field of gyroscopy and medical instrument engineering.

Олег Федорович Орлов — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана.

O.F. Orlov — Ph. D. (Eng.), assoc professor of the Bauman Moscow State Technical University.