

choice of several technical parameters were shown. It was determined that the total length of the pipe portion with a varied cross-section should not be less than two average diameters of the pipe.

УДК 532.13

Обобщенная функция зависимости динамического коэффициента сдвиговой вязкости от температуры и давления

О. В. Мартынов, Е. П. Тетерин

Ковровская государственная технологическая академия, г. Ковров, Россия

Представлен вывод функциональной зависимости динамического коэффициента сдвиговой вязкости от температуры и давления, основанный на структурной молекулярно-ячеистой модели для неполярной жидкости. Показано хорошее совпадение теоретических и экспериментальных зависимостей динамического коэффициента сдвиговой вязкости от давления при различных температурах для этанола, бензола и жидкого аргона.

Вязкость является одним из важнейших свойств жидкостей, отражающих структуру и характер межмолекулярных взаимодействий. Именно вязкость в значительной мере определяет эксплуатационные и экологические свойства жидкостей. Основной характеристикой вязкостных свойств жидкости является динамический коэффициент сдвиговой вязкости. Его поведение в широком интервале температур и давлений позволяет охарактеризовать потребительские свойства жидкостей и прояснить структурные процессы, которые происходят в них.

Существуют два подхода к оценке этого коэффициента — экспериментальный и аналитический. Имеют место большое разнообразие экспериментальных методов определения сдвиговой вязкости при различных температурах и значительно меньшие возможности по определению сдвиговой вязкости в широком интервале давлений. Что касается аналитических методов, то существуют два подхода — эмпирический и теоретический, основанный на определенных представлениях о молекулярных процессах, происходящих в жидкостях.

Одно из первых теоретических описаний динамического коэффициента сдвиговой вязкости для простых жидкостей в функции температуры и давления было выполнено Я. И. Френкелем на основе дырочной модели строения жидкости [1]. До сих пор это одно из наиболее удачных уравнений динамического коэффициента сдвиговой вязкости, дающих хорошую сходимость теоретических и экспериментальных значений при различных температурах в интервале давлений 0,1—100 МПа. Однако в подборе параметров этого уравнения существует некоторый произвол, что ограничивает его практическое применение.

Другой широко известной моделью механизма сдвиговой вязкости в простых жидкостях, в рамках которой было получено описание динамического коэффициента сдвиговой вязкости в функции температуры и давления, была модель, разработанная Г. Эйрингом с сотрудниками на основе теории свободного объема в жидкости [2]. Полученная модель в описании коэффициента сдвиговой вязкости в широком интервале давлений, по признанию авторов, дает только удовлетворительную сходимость экспериментальных и теоретических значений исследованных жидкостей. Кроме того, определение важнейшего для этой модели параметра — свободного объема (дырок) — требует привлечения экспериментальных данных по ряду других физических параметров, в том числе энергии, затрачиваемой на испарение молекул, и скорости ультразвука.

Другим более поздним подходом в теоретическом описании коэффициента сдвиговой вязкости явилось использование парной функции распределения молекул и потенциалов их парного взаимодействия [3]. Однако и в данном случае не удалось достичь хорошего совпадения экспериментальных и теоретических результатов для коэффициента сдвиговой вязкости простых жидкостей из-за недостаточно точного определения параметров базовых функций в широком интервале давлений.

Таким образом, задача теоретического описания коэффициента сдвиговой вязкости жидкостей в широком интервале температур, и особенно давлений, по-прежнему остается актуальной в связи с существующими трудностями его экспериментального определения.

Предложенная авторами структурная молекулярно-кинетическая модель жидкости [4] позволила объяснить реологические характеристики простых жидкостей и аномальное поведение касательных напряжений и, следовательно, динамического коэффициента сдвиговой вязкости, наблюдаемые для некоторых жидкостей [5]. В рамках этой модели удалось получить хорошую сходимость теоретических значений коэффициента сдвиговой вязкости с экспериментальными данными в широком интервале температур для неполярных жидкостей [6].

В данной статье делается попытка распространить возможности этой модели на описание поведения динамического коэффициента сдвиговой вязкости в широком интервале давлений.

В работе [6] была получена зависимость динамического коэффициента сдвиговой вязкости от температуры

$$\eta_s = \frac{f\delta^2\sqrt{M}}{104\delta_{eff}^2\sqrt{\pi RT}} \exp\left(\frac{5f\delta^2}{9kT}\right), \quad (1)$$

где f — коэффициент упругости, определяющий линейную связь средней силы, действующую на молекулу, и ее смещения из положения равновесия;

δ — расстояния между молекулами в ячейке;

M — молярная масса молекулы;

δ_{eff} — эффективный диаметр молекулы;

R — универсальная газовая постоянная;

k — постоянная Больцмана;

T — абсолютная температура.

Было установлено, что изменение расстояния между молекулами в ячейке с температурой подчиняется закону

$$\delta = \delta_0(1 + \alpha T)^{1/3} \text{ и } \delta_0 \approx 1,12 \sigma,$$

где σ — постоянная потенциала Леннард-Джонса, определяющая ноль потенциала;

α — температурный коэффициент объемного расширения жидкости.

При выводе формулы (1) было принято, что коэффициент сдвиговой упругости f слабо зависит от температуры.

Для жидкостей изменение объема от давления, так же как и от температуры, приближенно подчиняется линейному закону в широком интервале температур и давлений. Следовательно, изменение расстояния между молекулами в ячейке от давления подчиняется закону

$$\delta = \delta(p_0)(1 - \beta(p - p_0))^{1/3},$$

где β — коэффициент объемного сжатия жидкости;

p_0 — давление, принимаемое за начало отсчета;

$\delta(p_0)$ — расстояния между молекулами в ячейке при давлении p_0 .

Значение $\delta(p_0)$ можно определить по температурной зависимости при давлении p_0 $\delta(p_0) = 1,12\sigma(1 + \alpha T)^{1/3}$ и

$$\delta = 1,12\sigma((1 - \beta(p - p_0))(1 + \alpha T))^{1/3}. \quad (2)$$

Следует заметить, что формула (2) выполняется только при линейной зависимости объема элементарной ячейки от давления и температуры, что вполне допустимо, поскольку существенное нарушение линейности наблюдается только при высоких давлениях $p > 500$ —1000 атм.

Коэффициент упругости f слабо зависит от температуры и уменьшается при увеличении температуры, что не меняет общий характер изменения коэффициента вязкости, и f можно считать не зависящим от температуры. В случае изменения давления f также меняется слабо, но в этом случае при увеличении давления коэффициент упругости увеличивается, что изменяет общий характер поведения коэффициента вязкости, и принять f не зависящим от давления уже нельзя. Положим, что коэффициент упругости зависит от давления линейно, тогда

$$f = f(p_0) + b(p - p_0), \quad (3)$$

где $f(p_0)$ — коэффициент упругости при давлении p_0 ;

b — коэффициент пропорциональности.

Подставим (2) и (3) в (1) и с учетом того, что $\delta_{eff} \approx 1,5\sigma$, получим

$$\eta_s = \frac{(f(p_0) + b(p - p_0))(1 - \beta(p - p_0))(1 + \alpha T)^{2/3}\sqrt{M}}{187\sqrt{\pi RT}} \times \exp\left(\frac{6,3(f(p_0) + b(p - p_0))\sigma^2((1 - \beta(p - p_0))(1 + \alpha T))^{2/3}}{9kT}\right). \quad (4)$$

Значения α и β можно получить при линеаризации зависимости удельного объема от температуры и давления, соответственно.

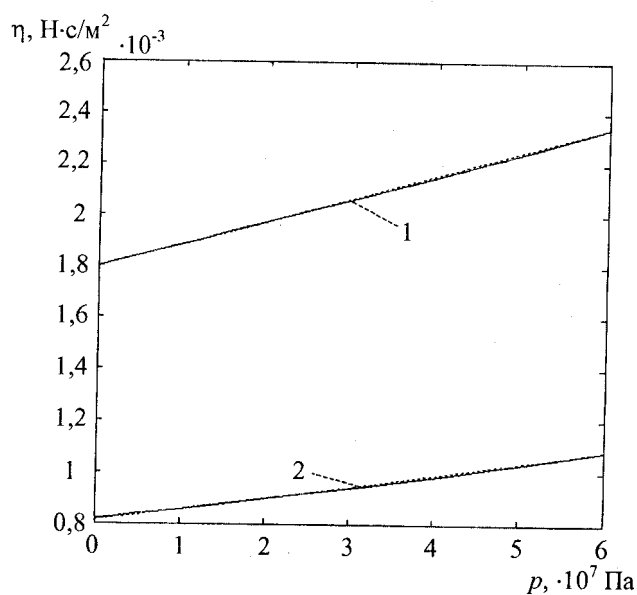
Проверка выведенной зависимости осуществлялась следующим образом: по известным экспериментальным данным [7] зависимости динамического коэффициента сдвиговой вязкости от температуры по двум значениям (как правило крайним) при давлении p_0 были получены неизвестные величины $f(p_0)$ и σ . Для этой же жидкости рассчитывалось значение η_s по формуле (4) для остальных значений температур при давлении p_0 . Было получено хорошее совпадение рассчитанных и экспериментальных данных. Результаты проверки были представлены в работе [6].

Кроме того, была проведена проверка зависимости динамического коэффициента сдвиго-

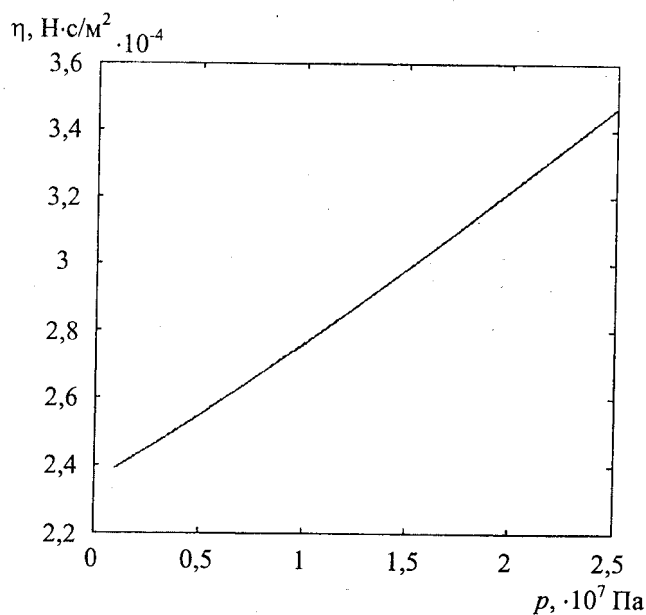
вой вязкости от давления при фиксированной температуре T_0 . Для этого по одному значению экспериментальных данных [7] (как правило, соответствующему максимальному давлению) было получено значение коэффициента пропорциональности b при некоторой температуре T_0 . В этом случае мы получаем уравнение вида $y = (a_1 + a_2x)\exp(a_3 + a_4x)$, решение которого было получено численными методами. Для остальных давлений вычислялось значение η_s по формуле (4). Было получено хорошее совпадение рассчитанных и экспериментальных данных. Проверка соответствия проводилась для трех

неполярных жидкостей — этанола, бензола и жидкого аргона. Результаты проверки представлены на рисунке, *а, б, в*. Как видим из графиков теоретические и экспериментальные данные практически совпадают.

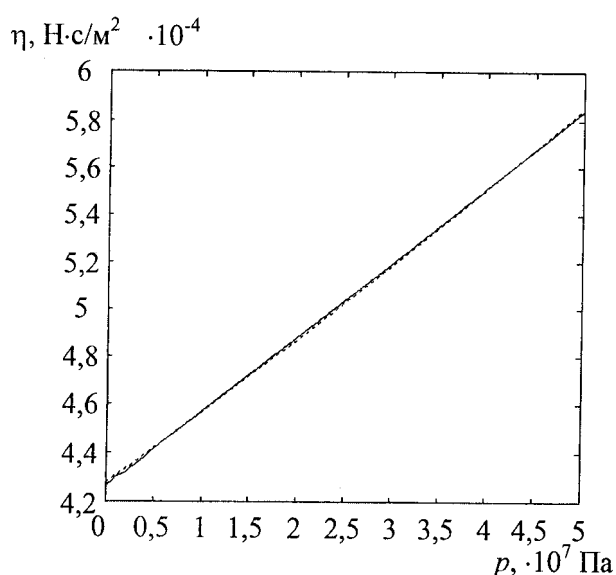
Полученное совпадение выведенной для динамического коэффициента сдвиговой вязкости обобщенной функции от температуры и давления с экспериментальными данными является еще одним подтверждением применимости модели, предложенной авторами в статье [4] для описания реологии простых жидкостей.



а



б



в

Зависимость динамического коэффициента сдвиговой вязкости от давления для:

а — этанола при двух температурах: 1 — $T = 273$ К, 2 — $T = 313$ К; *б* — жидкого аргона; *в* — бензола;

— — — экспериментальные данные;
- - - - - теоретические данные

Литература

1. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей. — М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1945. — 423 с.
2. Глестон С., Лейдлер К., Эйринг Г. Теория абсолютных скоростей. — М.: Гос. изд-во иностранной лит-ры, 1948. — 571 с.
3. Кростон К. Физика жидкого состояния. — М.: Мир, 1978. — 400 с.
4. Мартынов О. В., Тетерин Е. П. Молекулярно-кинетическая модель возникновения касательных напряжений в простых жидкостях в широком интервале градиентов

скоростей сдвига// Прикладная физика. — М.: ВИМИ. 1999. № 4. С. 12.

5. Бэир С., Винер В. О. Реологическая модель для УГД контактов, основанная на первичных лабораторных данных// Проблемы трения, 1979. Т. 101. № 3. С. 15—24.

6. Мартынов О. В., Тетерин Е. П. Температурная зависимость динамического коэффициента вязкости на основе структурной модели простых жидкостей// Прикладная физика, 2004. № 6. С. 17.

7. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. — М.: Наука, 1972. — 720 с.

Статья поступила в редакцию 16 февраля 2005 г.

The general approach to dynamic viscosity temperature and pressure dependencies evaluation

O. V. Martynov, E. P. Teterin

Kovrov State Technological Academy, Kovrov, Russia

The derivation of functional temperature and pressure dependence of dynamic shear viscosity based on a molecular-cellular structural mode is presented for a non-polar liquid. Good coincidence of theoretical and experimental pressure dependences of dynamic shear viscosity is demonstrated under different temperatures for ethanol, benzol and liquid argon.

* * *