

Уравнение для расчета коэффициента вязкости неона от тройной точки до температуры 700 К и давления 50 МПа*

О.С. Дутова, А.Б. Мешалкин

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: dutova@itp.nsc.ru

Получено малопараметрическое уравнение для описания коэффициента вязкости жидкого и газообразного неона при температурах от 24,6 до 700 К и давлениях от 0,044 до 50 МПа, позволяющее получить данные, лежащие в основном в пределах экспериментальной погрешности. Показано, что предложенное уравнение для расчета коэффициента вязкости жидкости и газа позволяет осуществлять надежную экстраполяцию за пределы изученного участка.

Ключевые слова: вязкость, плотность, температура, давление, газ, жидкость, неон.

Введение

Вязкость является важным свойством (характеристикой), которое имеет большое значение для таких направлений и отраслей, как механика жидкости, химические технологии, оптимизация промышленных процессов, нефтяная промышленность. Она представляет большой интерес для фундаментальных и прикладных областей исследований. Поэтому теоретическое понимание поведения вязкости имеет большое значение. В настоящее время используются и получают дальнейшее развитие различные подходы к прогнозированию вязкости, например, принципы соответствующих состояний, методы термодинамического подобия, теория трения, теория свободного объема.

Для описания экспериментальных данных по вязкости в достаточно широком интервале параметров состояния в настоящее время широко применяются эмпирические зависимости вязкости как функции температуры и плотности. Различные варианты уравнений для расчета вязкости позволяют описывать экспериментальные данные в широкой области параметров состояния.

Широко используемая в настоящее время корреляция для вязкости неона [1] основана на принципе соответствующих состояний и охватывает диапазон температур от 25 до 725 К и давлений до 1000 МПа. Погрешность вязкости на линии насыщения в жидкой

* Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН 121031800219-2.

и паровой фазах составляет 10 %. Неопределенность в сверхкритической области при атмосферном давлении составляет 3 % и возрастает до 4 % при 80 МПа.

Другая модель соответствующих состояний была предложена в работе [2]. Здесь были получены полуэмпирические корреляции свойств инертных газов и их бинарных смесей при давлениях от 0,1 до 20 МПа и температурах до 1400 К. Разработанные соотношения основаны на кинетической теории Чепмена – Энскогского для разбавленных газов с применением закона соответствующих состояний для учета зависимости свойств от давления. Погрешность вязкости для газовой фазы при атмосферном давлении в этом случае составляет 3 %.

Преимущественно в моделях уравнение для расчета вязкости записывается как функция плотности и температуры. Данные модели требуют точного уравнения состояния для определения плотности при задании точки состояния P , T . Предыдущее эталонное уравнение состояния неона было опубликовано в 1986 году [3]. Для расчета термических и калорических свойств неона используется новое уравнение состояния, представленное в работе [4].

В работах [5 – 8] на основе уточненных и наиболее надежных современных экспериментальных и расчетных данных были разработаны соотношения для вязкости разреженного газа неона, охватывающие диапазон температур 25 – 10000 К.

Уравнения для расчета вязкости в широком интервале параметров

В работах [9 – 12] с помощью установленной ранее зависимости избыточной вязкости $\Delta\eta = (\eta(T, P) - \eta_e(T, P))$ от плотности внутренней энергии $\Delta U/V$ [9] было получено простое малопараметрическое уравнение для описания коэффициента вязкости в широкой области параметров состояния:

$$\eta(T, P) = A x \exp\left(\alpha \frac{x_0}{x_0 - x}\right) + B \left(\frac{T}{T_C}\right)^{0.25} \left(\frac{x}{x_0}\right)^{0.5} \exp(-\beta x/x_0) + \eta_e, \quad (1)$$

здесь первый член обусловлен переносом импульса за счет межмолекулярного взаимодействия, второй определяется смешанным механизмом (объединяющим механизмы передачи импульсов, характерные для первого и третьего слагаемых), а третий представляет вклад в перенос импульса при столкновениях частиц; $\eta_e(T, \rho) = \eta_0(T) \Psi(b\rho)$ — вязкость системы твердых сфер по Энскогу, $\eta_0(T)$ — вязкость разреженного газа, $\Psi(b\rho)$ — функция плотности, $x = \Delta U/V$, $\Delta U = U_{ig}(T) - U(P, T)$ — энергия взаимодействия, $U_{ig}(T)$ — внутренняя энергия идеального газа, $U(P, T)$ — внутренняя энергия системы в заданном состоянии, $x_0 = H_0^0/V_0$, $H_0^0 = U_{ig}(0) - U(0, 0)$ — энтальпия испарения при абсолютном нуле температуры и давления, равном нулю, $V_0 = \lim_{T \rightarrow 0, P \rightarrow 0} (V(T, P))$ — гипотетический

объем переохлажденной до абсолютного нуля жидкости, T_C — температура в критической точке, A , α , B , β — индивидуальные константы вещества.

Описание экспериментальных данных, близкое к оптимальному, достигается при $b = V_0$. Для хорошо изученных веществ физические параметры V_0 и H_0^0 обычно приводятся в таблицах термодинамических свойств веществ. В этом случае уравнение для вязкости (1) содержит всего лишь четыре эмпирические константы — A , α , B , β . Если данные о V_0 и H_0^0 отсутствуют, количество эмпирических коэффициентов для уравнения (1), которые необходимо найти из данных по вязкости, возрастает до шести: A , α ,

B, β, V_0 и x_0 . Уравнение (1) описывает зависимость вязкости жидкости и газа широкого круга веществ в основном в пределах погрешности эксперимента (таблиц) во всем изученном диапазоне параметров состояния.

Расчет коэффициента вязкости неона

Ниже приводятся результаты расчета коэффициентов вязкости жидкости, газа по уравнению (1) для неона. Отметим, что для того, чтобы воспользоваться уравнением (1) для расчета коэффициента вязкости, необходимо располагать достаточно точными термическими и калорическими уравнениями состояния для расчета термических и калорических свойств вещества, с помощью которых могут быть рассчитаны плотность и внутренняя энергия. Вся исходная информация по этим свойствам взята из работы [13].

Для расчета коэффициентов, входящих в уравнение вязкости неона, использовались данные в следующем диапазоне параметров: по температурам — до 600 К, по давлениям — до 50 МПа, по плотности — от 0 до плотности в тройной точке. Экспериментальные работы по вязкости неона [14–25] выполнялись в узких интервалах температур и давлений разными методами и в основном на линии насыщения или же в области комнатных и более высоких температур. Однако результаты различных авторов демонстрируют значительные расхождения. Наиболее обстоятельное исследование вязкости неона в диапазоне температур от тройной точки до 300 К и в весьма широком интервале значений плотности выполнено в работе [21]. В качестве исходных данных для расчета коэффициентов A, α, B, β были взяты экспериментальные данные работ [14–25]. В расчетах использовалось значение H_0^0 , полученное в [26]. Коэффициент V_0 находился по правилу Филиппова – Тиммерманса: $V_0/V_C = Z_C$. Для расчета коэффициента вязкости системы твердых сфер по Энскогу η_e применялось уравнение для вязкости разреженного газа из работы [8]. Для проверки экстраполяционных возможностей полученного уравнения были выбраны экспериментальные данные по измерению вязкости неона из работ [18, 21].

Результаты расчета вязкости неона представлены в таблице и на рис. 1–3. В таблице указаны значения параметров характерных точек неона и коэффициентов $A, \alpha, B, \beta, x_0, H_0^0$ и V_0 , которые необходимы для расчета вязкости по (1), а также диапазоны параметров описания. На рис. 1 приведены для сравнения рассчитанные по (1) значения

Таблица
Физические параметры неона, коэффициенты $A, \alpha, B, \beta, x_0, H_0^0$ и V_0
уравнения (1) для расчета вязкости Ne
и диапазоны параметров описания: по температуре (ΔT),
давлению (ΔP), плотности ($\Delta \rho$)

T_C , К	44,4
P_C , МПа	2,6616
ρ_C , кг/м ³	481,91
Z_C	0,30321
$A, 10^{-12}$ с	0,29012
α	0,50802
B , мкПа·с	8,1
β	19,5
$x_0 = H_0^0 / V_0$, МПа	140,3948
H_0^0 , Дж/г	93,166
$b = V_0$, см ³ /г	0,6636
ΔT , К	24,6÷700
ΔP , МПа	0,044÷50
$\Delta \rho$, г/см ³	0,0045÷1,252

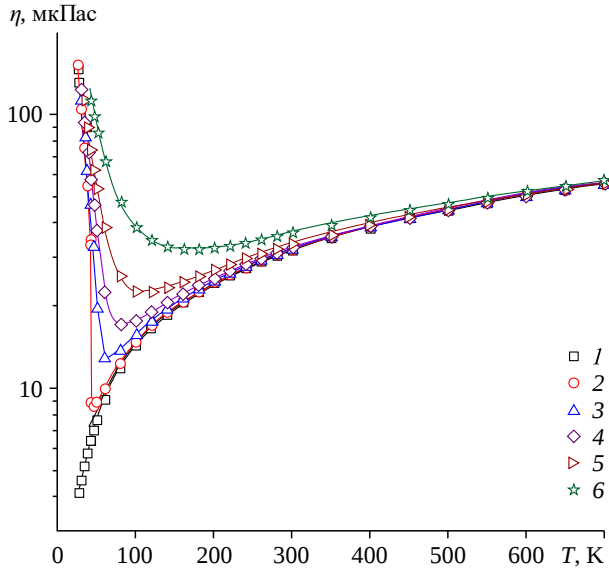


Рис. 1. Сопоставление рассчитанных значений вязкости неона (линии) с табличными [13] (символы) на изобарах, равных 0,1 (1), 2 (2), 5 (3), 10 (4), 20 (5) и 50 (6) МПа.

коэффициента вязкости в зависимости от температуры на изобарах с табличными данными [13]. На рис. 2 показано отклонение рассчитанных по уравнению (1) значений вязкости неона от экспериментальных данных [15, 16, 18–21, 23, 25]. В диапазоне значений давления до 50 МПа отклонения между рассчитанными по (1) и экспериментальными данными [14–25] как для газа, так и для жидкости находятся в пределах погрешностей экспериментов (обычно это составляет 3–5 %), кроме критической области. Экспериментальные погрешности измерения вязкости существенно возрастают как при низких (криогенных) температурах, так и при высоких температурах и давлениях.

На рис. 3 приведены для сопоставления рассчитанные по (1) значения вязкости неона с экспериментальными данными при давлениях до 300 МПа [18, 21]. При этом коэффициенты уравнения (1) находились из экспериментальных данных по вязкости до 50 МПа, затем выполнялась экстраполяция коэффициента вязкости по (1) до давлений 300 МПа без привлечения экспериментальных данных при давлениях выше 50 МПа. Как видно

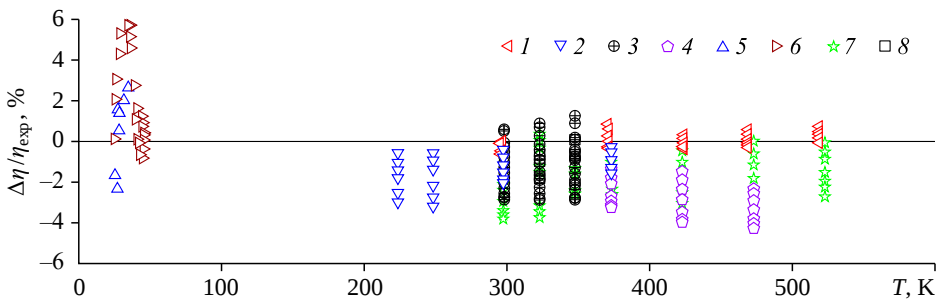


Рис. 2. Относительные отклонения $\Delta\eta/\eta_{\text{exp}}$ рассчитанных значений вязкости от экспериментальных данных [15, 16, 18–21, 23, 25] для неона в области давлений до 50 МПа и температур до 530 К.

Данные работ [15] (1), [16] (2), [18] (3), [19] (4), [20] (5), [21] (6), [23] (7), [25] (8).

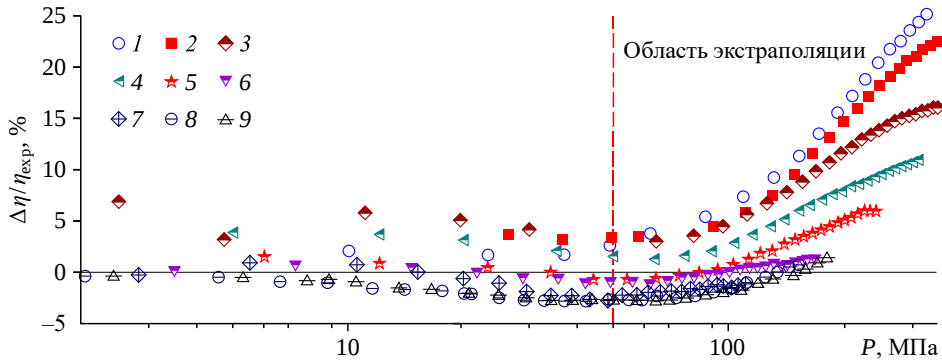


Рис. 3. Относительные отклонения $\Delta\eta/\eta_{\text{exp}}$ рассчитанных значений от экспериментальных данных работ [21, 18] для неона на изохорах при температурах от 30 до 300 К и изотермах, равных 298 и 348 К.

При $P < 50$ МПа — расчет вязкости по уравнению (1); при $P > 50$ МПа — экстраполяция рассчитанных значений вязкости до 300 МПа, штриховая линия соответствует изобаре 50 МПа; символы — данные работы [21] на изохорах 1,21 (1), 1,16 (2), 1,06 (3), 0,99 (4), 0,88 (5), 0,725 (6), 0,595 (7) г/см³ и данные работы [18] на изотермах: 298,15 (8), 348,15 (9) К.

из рис. 3, согласование расчетных и экспериментальных данных следует принять удовлетворительным, за исключением расхождений между расчетными экстраполированными и экспериментальными данными [21] на некоторых изохорах при высоких давлениях, где данные [21] менее надежны. Эта ненадежность была обусловлена тем, что необходимые для определения коэффициента вязкости значения плотности находились в более узком диапазоне параметров, чем область, охваченная экспериментом. Поэтому в работе [21] частично использовались значения плотности, полученные экстраполяцией опытных изобар и изотерм. Оценивая погрешность своих экспериментальных данных (4 %), авторы не учитывали влияния погрешности значений плотности в области, не исследованной экспериментально.

Заключение

Уравнение (1) описывает вязкость жидкого и газообразного Ne в широком диапазоне параметров состояния (при температурах от 24,6 до 700 К и давлениях до 50 МПа) в основном в пределах экспериментальной погрешности. Это уравнение содержит четыре индивидуальных эмпирических коэффициента, которые необходимо найти из экспериментальных или табличных данных по вязкости. Установлено, что предложенное уравнение позволяет с удовлетворительной точностью осуществлять экстраполяцию коэффициента вязкости далеко за пределы опорного участка, по которому найдены коэффициенты уравнения (1).

Список литературы

1. Huber M.L. Models for viscosity, thermal conductivity, and surface tension of selected pure fluids as implemented in REFPROP v10.0. (NIST. IR. 8209). 2018. 271 p.
2. Tournier J.-M.P., El-Genk M.S. Properties of noble gases and binary mixtures for closed Brayton cycle applications // Energy Conversion and Management. 2008. Vol. 49. P. 469–492.
3. Katti R.S., Jacobsen R.T., Stewart R.B., Jahangiri M. Thermodynamic properties for neon for temperatures from the triple point to 700 K at Pressures to 700 MPa // Adv. Cryo. Eng. 1986. Vol. 31. P. 1189–1197.
4. Tkaczuk J., Lemmon E.W., Bell I.H., Luchier N., Millet F. Equation of state for the thermodynamic properties of binary mixtures for helium-4, neon, and argon // J. Phys. Chem. Ref. Data. 2020. Vol. 49, No. 2. P. 02310-1–02310-12.

5. Bich E., Hellmann R., Vogel E. Ab initio potential energy curve for the neon atom pair and thermophysical properties for the dilute neon gas. II. Thermophysical properties for low-density neon // Mol. Phys. 2008. Vol. 106. P. 813–825.
6. Berg R.F., Moldover M.R. Recommended viscosities of 11 dilute gases at 25 °C // J. Phys. Chem. Ref. Data. 2012. Vol. 41, No 4. P. 043104-1–043104-10.
7. Assael M.J., Kalyva A.E., Monogenidou S.A., Huber M.L., Perkins R.A., Friend D.G., May E.F. Reference values and reference correlations for the thermal conductivity and viscosity of fluids // J. Phys. Chem. Ref. Data. 2018. Vol. 47, No. 2. P. 021501-1–021501-10.
8. Xiao X., Rowland D., Al Ghafri S., May E. Wide-ranging reference correlations for dilute gas transport properties based on ab initio calculations and viscosity ratio measurements // J. Phys. Chem. Ref. Data. 2020. Vol. 49, No. 1. P. 013101-1–013101-18.
9. Каплун А.Б. Единое уравнение для коэффициента вязкости жидкости и газа // Теплофизика высоких температур. 1989. Т. 27, № 5. С. 884–888.
10. Каплун А.Б., Мешалкин А.Б., Дутова О.С. Единое малопараметрическое уравнение для расчета коэффициента вязкости аргона // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24, № 2. С. 209–219.
11. Kaplun A.B., Meshalkin A.B., Dutova O.S. Unified low-parametrical equation used to calculate the viscosity coefficient of liquid, gas, and fluid. Argon. Xenon // J. Physics: Conf. Series. 2018. Vol. 1105. P. 012157-1–012157-6.
12. Дутова О.С., Безверхий П.П. Уравнение для коэффициента вязкости жидкости, газа и флюида инертных газов. Криптон // Теплофизика и аэромеханика. 2022. Т. 29, № 6. С. 917–922.
13. NIST Chemistry WebBook. NIST Standard Reference Database Number 69 / Eds. P.J. Linstrom, W.G. Mallard. Gaithersburg, MD, 2018. URL: <http://webbook.nist.gov/chemistry/>.
14. Kestin J., Leidenfrost W. An absolute determination of the viscosity of eleven gases over a range of pressures // Physica. 1959. Vol. 25. P. 1033–1062.
15. Kestin J., Whitelaw J. A relative determination of the viscosity of several gases by the oscillating disk method // Physica. 1963. Vol. 29. P. 335–356.
16. Flynn G., Hanks R., Lemaire N., Ross J. Viscosity of nitrogen, helium, neon and argon from 78.5 C to 100 °C below 200 atmospheres // J. Chem. Phys. 1963. Vol. 38. P. 154–162.
17. Kestin J., Nagashima A. Viscosity of neon–helium and neon–argon mixtures at 20° C and 30° C // J. Chem. Phys. 1964. Vol. 40, No. 12. P. 3648–3654.
18. Trappeniens N., Botzen H., Van Der Berg H., Van Oosten J. The viscosity of neon between 25 C and 75 C at pressures up to 1800 atmospheres – corresponding states for the viscosity of the noble gases up to high density // Physica. 1964. Vol. 30. P. 985–996.
19. Reynes E.G., Thodos G. Viscosity of helium, neon, and nitrogen in the dense gaseous region // J. Chem. Eng. Data. 1966. Vol. 11. P. 137–140.
20. Forster S. Viscosity measurements in liquid neon, argon, and nitrogen // Cryogenics. 1963. Vol. 3. P. 176–177.
21. Слюсарь В.П., Руденко Н.С., Третьяков И.С. Вязкость элементов нулевой группы на линии насыщения и под давлением до 5000 атм // Теплофизические свойства веществ и материалов. М.: Изд. Стандартов, 1973. Вып. 7. С. 50–70.
22. Herreman W., Grevendonk W. An experimental study on the shear viscosity of liquid neon // Cryogenics. 1974. Vol. 14. P. 395–398.
23. Рабинович В.А., Вассерман А.А., Недоступ В.И., Векслер Л.С. Теплофизические свойства неона, аргона, криптона и ксенона. М.: Изд. стандартов, 1976. 636 с.
24. Vogel E. Precise measurements of the viscosity coefficient of nitrogen and the rare-gases between room temperature and 650 K // Ber. Bunsenges. Phys. Chem. 1984. Vol. 88. P. 997–1002.
25. Evers C., Loesch H.W., Wagner W. An absolute viscometer-densimeter and measurements of the viscosity of nitrogen, methane, helium, neon, argon, and krypton over a wide range of density and temperature // Intern. J. Thermophys. 2002. Vol. 23, No. 6. P. 1411–1439.
26. Shakeel H., Wei H., Pomeroy J.M. Measurements of enthalpy of sublimation of Ne, N₂, O₂, Ar, CO₂, Kr, Xe and H₂O using a double paddle oscillator // J. Chem. Thermodynamics. 2018. Vol. 118. P. 127–138.

*Статья поступила в редакцию 14 октября 2024 г.,
принята к публикации 8 ноября 2024 г.*