

## ЗАВИСИМОСТЬ ВЯЗКОСТИ СЖИЖЕННЫХ ГАЗОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ

Е. Р. Лихачев

*Воронежский государственный университет*

Поступила в редакцию 14.01.2009 г.

**Аннотация.** Найдена формула, выражающая зависимость вязкости сжиженных газов от температуры и давления. Получены значения всех постоянных величин, входящих в эту формулу для инертных газов, водорода, азота, кислорода и воздуха.

**Ключевые слова:** Вязкость, зависимость вязкости от температуры и давления, сжиженные газы

**Abstract.** A formula describing the dependence of the viscosity of liquefied gases on the temperature and pressure was derived. All the constants of interest for inert gases, hydrogen, nitrogen, oxygen, and air were determined.

**Keywords:** viscosity, the dependence of the viscosity on the temperature and pressure, liquefied gases

В работе [1] показано, что температурная зависимость вязкости жидкостей хорошо выражается формулой

$$\eta = \eta_0 \exp\left[\frac{E}{R(T + T_0)}\right], \quad (1)$$

где  $T_0$  — поправка к температуре, появляющаяся из-за отклонения реальных жидкостей от идеальной. Представляет интерес поиск закономерностей, связывающих параметры  $E$  и  $T_0$  со свойствами жидкостей. В настоящей работе нами предпринята попытка выявления таких закономерностей для некоторых сжиженных газов. Рассматривались инертные газы, а также водород, азот, кислород и воздух, для которых исследовалась зависимость вязкости от температуры и давления.

Сжиженные инертные газы являются одной из групп наиболее простых жидкостей, состоящих из атомов одного элемента периодической системы. Атомы этих веществ имеют насыщенные электронные оболочки, благодаря чему они практически не вступают в химические реакции. Из-за сферической симметрии потенциальная энергия взаимодействия этих веществ зависит только от расстояния между ними и не зависит от взаимной ориентации.

Водород, азот и кислород в отличие от инертных газов состоят из двухатомных молекул, а воздух является смесью газов. Так как все это должно сказаться на взаимодействии между

частицами, то представляет интерес сравнение найденной для этих сжиженных газов зависимости вязкости от температуры и давления с аналогичной зависимостью для инертных газов.

Для расчетов в настоящей работе использованы таблицы экспериментальных значений вязкости сжиженных газов при разных температурах и давлениях, приведенные в справочниках [2] (для инертных газов) и [3] (для остальных газов). Для воздуха дополнительно использовались данные из [4], так как в [3] для него имеются ошибки.

Сначала была сделана попытка расчета параметров  $E$ ,  $\eta_0$  и  $T_0$  по формуле (1) при различных давлениях. Однако из-за сравнительно больших экспериментальных погрешностей, получались результаты, в которых не прослеживалась единая закономерность. Поэтому в дальнейшем искали общую формулу, выражающую зависимость вязкости от температуры и давления. В результате была получена следующая общая формула

$$\eta = \eta_0 \exp\left[ap - bp^2 + \frac{E}{R(T + T_0)}\right], \quad (2)$$

где  $p$  — давление,  $a$  и  $b$  — постоянные величины. Температурную зависимость вязкости в этом случае можно представить в виде подобном (1)

$$\eta = \eta'_0 \exp\left[\frac{E}{R(T + T_0)}\right],$$

где  $\eta'_0 = \eta_0 \exp(ap \cdot bp^2)$ . Значения параметров  $T_0, E, \eta_0, a, b$ , полученные с помощью формулы (2), представлены в табл. 1.

Лишь для водорода потребовалось уточнение этой формулы в виде

$$\eta = \eta_0 \exp \left[ ap - bp^2 + cp^3 - dp^4 + \frac{E}{R(T + T_0)} \right], \quad (3)$$

где  $E, h_0, T_0, a, b, c, d$  — постоянные величины, имеющие следующие значения:  $E = 0.62$  кДж/моль,  $\eta_0 = 1.07 \cdot 10^{-6}$  Па·с,  $T_0 = 10$  К,  $a = 6.54 \cdot 10^{-3}$  бар<sup>-1</sup>,  $b = 1.27 \cdot 10^{-5}$  бар<sup>-2</sup>,  $c = 1.45 \cdot 10^{-8}$  бар<sup>-3</sup>,  $d = 6.2 \cdot 10^{-12}$  бар<sup>-4</sup>.

Анализ результатов расчета показывает, что с ростом температуры, начиная с некоторой температуры, величина которой зависит от давления, табличные значения вязкости начинают отклоняться от расчетных и тем сильнее, чем выше температура. Эти отклонения связаны с тем, что при нагревании жидкости увеличиваются расстояния между атомами и вместе с этим меняется характер связи между ними. Поэтому при повышении температуры изменяется также поведение вязкости. Анализ результатов вычислений показывает, что заметные отклонения расчетных значений вязкости от табличных на-

чинаются тогда, когда удельный объем жидкости достигает примерно половины критического объема. При высоких давлениях удовлетворительное согласие расчетных значений вязкости с табличными наблюдается до температур, превосходящих критическую температуру.

В последнем столбце таблицы приведены средние относительные отклонения  $\delta$  расчетных величин вязкости от табличных (экспериментальных), где

$$\delta = \frac{1}{n} \cdot \sum_n \left| \frac{\eta_s - \eta_p}{\eta_s} \right|. \quad (4)$$

Здесь  $\eta_s$  — экспериментальная вязкость,  $\eta_p$  — расчетная вязкость,  $n$  — число использованных в (2) и (3) значений вязкости. В настоящей работе величину  $\delta$  находили для 100 значений вязкости, относящихся к разным давлениям, охватывающих весь диапазон, представленный в таблицах [2, 3], и к тем температурам, при которых еще не наблюдается значительное отклонение расчетных величин вязкости от табличных. Максимальные значения температур  $T_{\text{макс}}$ , данные при которых использовались в расчете  $\delta$ , в зависимости от давления приведены в табл. 2. Указанные в табл. 1 значения  $\delta$ , а также найден-

Таблица 1

Значения параметров исследуемых сжиженных газов

Газ	$T_0$ , К	$E$ , кДж/моль	$\eta_0$ , $10^{-5}$ Па·с	$a$ , $10^{-3}$ бар <sup>-1</sup>	$b$ , $10^{-7}$ бар <sup>-2</sup>	$\delta$ , %
Ne	12	1.11	0.41	2.54	10.8	2.2
Ar	18	3.05	0.81	1.35	3.6	1.2
Kr	60	4.8	1.5	0.86	1.7	1.6
Xe	85	6.4	2.2	0.71	1	1
Азот	3	2.27	4.9	2.34	9	2.2
Кислород	20	2.84	8.5	1.28	3.1	1.8
Воздух	-5	2.24	4.8	2.37	8.6	1.3

Таблица 2

Максимальные температуры  $T_{\text{макс}}$ , К

а)

Газ	$p$ , бар	4	10	50	200	500	800	1000
	Ne	30	—	34	50	70	80	100
Ar	—	110	110	140	200	210	210	
Kr	—	130	150	170	210	280	300	
Xe	—	190	190	210	260	290	330	

б)

Газ	$p$ , бар	10	50	100	300	500	700	1000
	Водород	25	33	50	60	100	—	80
Азот	100	110	120	150	200	220	230	
Кислород	115	125	130	165	210	280	320	
Воздух	105	115	125	160	200	260	310	

Сравнение параметров жидких кислорода и аргона

Газ	$T_{\text{крит}},$ К	$H_{\text{исп}},$ кДж/моль	$T_{\text{к}},$ К	$p_{\text{к}},$ бар	$E,$ кДж/моль	$\eta_0 \times 10^6,$ Па·с	$T_0,$ К	$a \times 10^3,$ бар <sup>-1</sup>	$b \times 10^7,$ бар <sup>-2</sup>
Кислород	90	1.63	155	51	2.84	8.5	20	1.28	3.1
Аргон	87.3	1.56	151	50	3.05	8.1	18	1.35	3.6

ное для водорода  $\delta = 1.2\%$ , дают представление о согласии формул (2) и (3) с экспериментом.

Из табл. 1 видно, что все параметры сжиженных инертных газов монотонно изменяются от неона к ксенону. Значения энергетического параметра  $E$  при переходе от неона к ксенону увеличиваются, согласуясь с ростом теплоты плавления и теплоты сублимации соответствующих элементов.

При сравнении результатов для водорода, азота, кислорода и воздуха с аналогичными результатами для инертных газов обращает на себя внимание близость расчетных параметров кислорода и аргона, у которых числа электронов у молекулы одного ( $O_2$ ) и у атома другого (Ar) близки друг к другу. В табл. 3 проведено сравнение всех параметров жидких кислорода и аргона, зависящих от взаимодействия между частицами. В табл. 3 приведены взятые из [3, 5] следующие параметры:  $T_{\text{крит}}$  — температура ки-

пения,  $H_{\text{исп}}$  — теплота испарения,  $T_{\text{к}}$  — критическая температура,  $p_{\text{к}}$  — критическое давление, а также  $E, h_0, T_0, a, b$ , входящие в формулу (2).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фогельсон Р.Л. Температурная зависимость вязкости / Р. Л. Фогельсон, Е. Р. Лихачев // ЖТФ. — 2001. — Т. 71. Вып. 8. — С. 128—131.
2. Рабинович В.А. Теплофизические свойства неона, аргона, криптона и ксенона / В. А. Рабинович, А. А. Вассерман, В. И. Недоступ, Л. С. Векслер. — М.: Изд. стандартов. — 1976. — 636 с.
3. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. — М.: Наука, 1972. — 720 с.
4. Вассерман А.А. Теплофизические свойства жидкого воздуха и его компонентов / А. А. Вассерман, В. А. Рабинович — М.: Изд. стандартов, 1968. — 239 с.
5. Свойства элементов. Ч. 1. Физические свойства. — М.: Металлургия, 1976. — 600 с.

**Лихачев Евгений Робертович** — к.ф.-м.н., ассистент кафедры физики твердого тела и наноструктур ВГУ; тел.: (4732)20-83-63, e-mail: ftt@phys.vsu.ru

**Likhachev E.R.** — Assistant of Solid State Physics and Nanostructures Department of Voronezh State University; tel.: (4732)20-83-63, e-mail: ftt@phys.vsu.ru