

тии/расширению жидкости влияния не оказывают [10], объемная вязкость, связанная с деформацией сжимаемых объемов, стремительно растёт.

Полученные значения можно сопоставить с имеющимися экспериментальными данными. Соотношение коэффициентов объемной и сдвиговой вязкости, согласно экспериментальным данным, полученных на воде и органических жидкостях, может находиться в интервале от 1 до 120 [5]. По-видимому, такой разброс значений связан с различной степенью приближения к критической точке.

**Условные обозначения.**  $\rho$ ,  $\nu$  — плотность и удельный объем флюида,  $P$  — давление,  $w$  — скорость потока,  $\bar{w}$  — средняя скорость,  $G$  — массовый расход,  $R$ ,  $D$ ,  $A$  — радиус, диаметр и площадь поперечного сечения капилляра, соответственно;  $\eta$  — коэффициент динамической сдвиговой вязкости,  $\eta'$  — коэффициент объемной вязкости,  $\nu$  — коэффициент кинематической сдвиговой вязкости,  $r$  — текущий радиус,  $z$  — текущая координата.

### Выводы

Аналитически подтвержден аномальный рост коэффициентов объемной вязкости в окрестности критической точки, что свидетельствует об усилении объемной диссипации энергии и представляется одним из механизмов, компенсирующим рост сжимаемости.

### Литература

1. Berg R.F., Moldover M.R. Critical exponent for the viscosity of carbon dioxide and xenon // J. Chem. Phys. – 1990. – Vol.93. – No.3. – Pp. 1926-1938.
2. Onuki A. Dynamic equations and bulk viscosity near the gas-liquid critical point // Physical Review E. – 1997. – Vol.55. – No. 1. – Pp. 403-420.
3. Ocumura H., Yonezawa F. Approximate formula for bulk viscosity // J. Of Physical Society of Japan. – 2002. – Vol.14. – No.3. – P. 685-688.
4. Dellar P.J. Bulk and shear viscosities in lattice Boltzman equations // Published as DOI: 10.1103./PhysRevE.64.031203. – 2001. – P. 11.
5. Van den Berg H.R., ten Seldam C.A., Van der Gulic P.S. Compressible laminar flow in capillary //J. Fluid Mechanic. – 1993. – Vol. 246. – Pp. 1-20.
6. Повх И.Л. Техническая гидромеханика. – Ленинград: Машиностроение. – 1976. – 502 с.
7. Span R., Wagner W. A new equation of state for carbon dioxide covering the fluid region from the triple-point temperature to 1100 K at pressures up to 800 MPa // J. Phys. Chem. Ref. Data. – 1996. – Vol.25. – No.6. – Pp. 1510-1594.
8. Deiters U.K. A modular program system for the calculation of thermodynamic properties of fluids // Chem. Eng. Technol. – 2000. – Vol. 23. – No.7. – Pp. 581-584.
9. Levent Sengers J.M.H., Deiters U.K., Klask U., Swidersky P, Schneider G.M Application of the Taylor dispersion method in supercritical fluids // I.J. of Thermophysics. – 1993. – Vol.14. – No.3. – Pp. 893-921.
10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. – М.: Наука. 1–986. – 736 с.

УДК 532.133

## РАСЧЕТ ВЯЗКОСТИ СМЕСЕЙ КОМПРЕССОРНОГО МАСЛА С ИЗОПРОПИЛОВЫМ СПИРТОМ МОДИФИЦИРОВАННЫМ МЕТОДОМ ЖЁСТКИХ СФЕР

Шимчук Н.А., аспирант, Лапардин Н.И., канд. техн. наук, доцент,  
Геллер В.З., д-р техн. наук, профессор  
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

*Вязкость смеси смазочного масла и изопропилового спирта были измерены в диапазоне температур от 303 до 343 К при массовой концентрации масла от 80 до 95 %. Модифицированным методом жёстких сфер проведен расчет вязкости в указанном диапазоне температур и состава смеси.*

*The viscosity of the mixture of the lubrication oil with the isopropyl alcohol have been measured over a temperature range from 303 to 343 K and a range of oil mass fraction from 80 to 95 %. A modified rough hard-sphere method was used to calculate viscosity in the indicated ranges of temperatures and compositions.*

**Ключевые слова:** смеси, температура, вязкость, смазочное масло.

## Введение

Как известно, для обеспечения стабильности нанофлюидов в базовые жидкости добавляют сурфактанты, одним из которых является изопропиловый спирт (ИС), при этом концентрация сурфактанта может быть значительной. Таким образом, при создании наномасел для компрессорных холодильных машин и использовании ИС в качестве сурфактанта, базовой жидкостью является смесь компрессорного масла с изопропиловым спиртом. При этом возникает проблема определения вязкости таких смесей, особенностью которых является большое отличие вязкости компонентов (в десятки раз) и их основных физико-химических параметров (молекулярной массы, нормальной температуры кипения, критической температуры и т.д.).

Анализ моделей вязкости для аналогичных систем (масло-хладоновые растворы), приведенный в монографии [1] и включающий различные правила смешения, метод самоотнесения, теорию трения ( $f$ -теорию), модель свободного объема, модель жестких сфер и др., показал, что большинство из рассмотренных моделей не приводит к положительным результатам.

Задача настоящей работы — использовать модифицированную модель жестких сфер (RHS) для расчета вязкости смесей компрессорного масла с изопропиловым спиртом.

## Модель жестких сфер для расчета вязкости жидких смесей

Модель жестких сфер [2] была разработана для корреляции коэффициентов самодиффузии, вязкости и теплопроводности жидкостей и их смесей в широком диапазоне давлений и температур. В рамках данной модели транспортные свойства плотных жидкостей выражаются в виде зависимостей от приведенного мольного объема, который связан с мольным объемом, соответствующим наибольшей плотности упаковки молекул. Эта идея была дополнена допущением о том, что в соответствующих состояниях существует взаимосвязь между экспериментальными значениями транспортных свойств веществ с несферическими шероховатыми молекулами с транспортными свойствами веществ с гладкими жесткими сферическими молекулами.

За последние годы ряд успешных корреляций вязкости жидкости основывались на этом методе. Модифицированную модель RHS применил Ассаэль и др. [2, 3] для нахождения вязкости многих жидкостей, включая чистые хладагенты, производные этана и метана. Гао и др. [4] использовали эту модель для прогнозирования вязкости бинарных и тройных смесей хладагентов, составленных из гидрофторуглеродов. Блезард и Тея [5], а также Тея и др. [6] представили таблицы параметров модели RHS для 58 полярных жидкостей, включая холодильные агенты R124, R125 и R134a. Лаесеке и Хафер [7] использовали модель RHS для нахождения вязкости фторированных пропановых изомеров R245fa, R245ca и R227ea. Геллер, Лапардин и Пивоварчук [8] использовали этот метод для прогнозирования вязкости двух и многокомпонентных смесей хладонов при этом отклонения результатов расчета от эксперимента не превышали 8 %.

По модифицированной модели RHS экспериментальные данные о вязкости  $\eta$  могут быть преобразованы к безразмерному виду  $\eta^*$  в соответствии с формулой

$$\eta^* = 6,0349 \cdot 10^8 \frac{\eta}{\rho^{2/3} M^{-1/6} (RT)^{1/2}}, \quad (1)$$

а зависимость приведенной вязкости  $\eta^*$  от плотности представлена эмпирической и универсальной для всех жидкостей корреляцией

$$\log(\eta^*/R_\eta) = \sum_{i=0}^7 a_i V_R^{-i}, \quad (2)$$

где  $a_0 = 1,0945$ ;  $a_1 = -9,2632$ ;  $a_2 = 71,039$ ;  $a_3 = -301,90$ ;  $a_4 = 797,69$ ;  $a_5 = -1222,0$ ;  $a_6 = 987,56$ ;  $a_7 = -319,46$ .

Подгоночными параметрами являются фактор «жесткости»  $R_\eta$  и плотноупакованный молярный объем  $V_0$  ( $V_R = V/V_0$ ). Эти параметры выделяются из экспериментальных данных для чистых жидкостей.  $R_\eta$  обычно принимается как константа, а  $V_0$  может быть представлен линейной зависимостью для ограниченного температурного диапазона или в виде полиномиальной функции приведенной температуры  $Tr = T/T_c$  ( $T_c$  — критическая температура).

Прогнозирование вязкости жидких смесей основывается на предположении, что смесь ведет себя как гипотетическая чистая жидкость с усредненными молекулярными параметрами, задаваемыми мольными долями чистых компонентов

$$V_{0,mix} = \sum_{i=1}^i x_i V_{0,i}, \quad (3)$$

$$R_{\eta,mix} = \sum_{i=1}^i x_i R_{\eta,i} . \quad (4)$$

Проблема выбора псевдокритической температуры и молекулярной массы для компрессорного масла решалось оптимизацией этих параметров из условия минимума отклонения результатов расчета от экспериментальных данных. Для ИС эти параметры были взяты из справочника [9].

Подгоночные параметры  $R_{\eta}$  и  $V_0$  были представлены, соответственно, как константа и температурная функция в полиномиальной форме

$$V_0 \cdot 10^6 = \sum_{i=0}^3 a_i T_r^i . \quad (5)$$

Значения фактора «жесткости»  $R_{\eta}$  и коэффициентов  $a_i$  уравнения (5) приведены в табл. 1.

**Таблица 1 – Значения  $R_{\eta}$  и коэффициентов  $a_i$  в уравнении (5)**

	$R_{\eta}$	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$
Изопропиловый спирт	1,061	74,93	-32,09	-	-
Компрессорное масло	1,383	229,9	-761,6	1317	-782,6

**Сравнение результатов расчета с экспериментом**

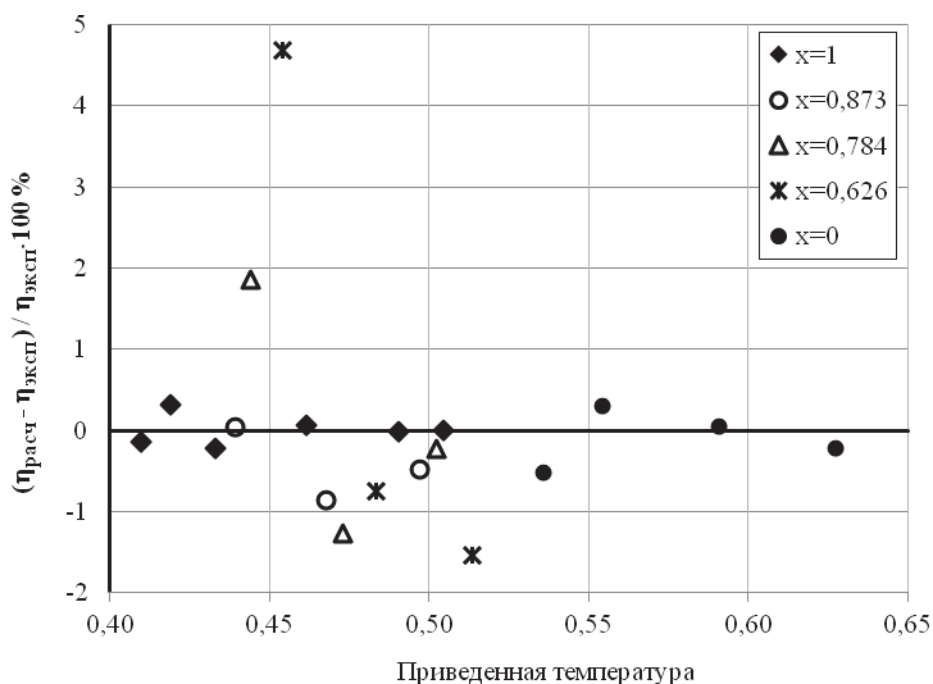
Полученные нами экспериментальные данные о вязкости чистых компонентов (изопропилового спирта и смазочного масла) приведены в табл. 2, а данные для их смесей трех составов с массовой концентрацией масла от 80 до 95 % в табл. 3. Там же проведено сравнение результатов расчета вязкости по модифицированной модели RHS с экспериментом. Графическое представление отклонений всех экспериментальных данных для изопропилового спирта, компрессорного масла и их смесей от расчетных значений вязкости показано на рис. 1.

**Таблица 2 – Экспериментальные данные и расчетные значения вязкости для изопропилового спирта и компрессорного масла**

Температура, К	Вязкость, мкПа·с		
	эксперимент	расчет	отклонение, %
Изопропиловый спирт			
293,15	2450	2437	-0,53
303,15	1826	1832	0,30
323,15	1058	1059	0,05
343,15	664	663	-0,22
Смазочное масло			
286,75	21887	21856	-0,14
293,15	16312	16365	0,33
303,15	10716	10693	-0,21
323,15	5512	5515	0,06
343,15	3330	3330	-0,01
353,15	2707	2707	0,00

**Таблица 3 – Экспериментальные данные и результаты расчета вязкости смеси смазочного масла и изопропилового спирта**

$T, K$	$c = 0,944$		$c = 0,899$		$c = 0,805$	
	$\eta, \text{мкПа}\cdot\text{с}$	$\delta, \%$	$\eta, \text{мкПа}\cdot\text{с}$	$\delta, \%$	$\eta, \text{мкПа}\cdot\text{с}$	$\delta, \%$
303,45	8074	0,05	6919	1,86	5371	4,68
323,15	4376	-0,85	3774	-1,26	2966	-0,74
343,35	2716	-0,46	2387	-0,21	1861	-1,53



**Рис. 1 – Отклонение экспериментальных данных для изопропилового спирта, компрессорного масла и их смесей от результатов расчета вязкости по модифицированной модели RHS при различных мольных долях масла  $x$**

#### Выводы

Проведено экспериментальное исследование вязкости смазочного масла и изопропилового спирта в области температур от 287 до 353 К, а также их смесей в диапазоне температур от 303 до 343 К при массовой доли масла от 80 до 95 %. Как видно из рис. 1, отклонение экспериментальных данных для изопропилового спирта, компрессорного масла и их смесей от результатов расчета вязкости по модифицированной модели RHS при различных мольных долях масла не превышают 2 % (за исключением одной опытной точки). Это позволяет сделать вывод об успешности использования модифицированной модели жестких сфер для расчета вязкости смесей смазочного масла с изопропиловым спиртом. Таким образом, применение модели RHS может быть рекомендовано для расчёта вязкости базовых жидкостей при создании наномасел для компрессорных холодильных машин.

#### Литература

1. Железный В. П., Семенюк Ю. В. Теплофизические свойства растворов хладагентов в компрессорных маслах. – Одесса:Фенікс, 2013. – 419 с. ISBN 978-966-438-692-7
2. Assael M. J. Correlation and prediction of dense fluid transport coefficients II. Simple molecular fluids / M. J. Assael, J. H. Dymond, M. Papadaki, P. M. Patterson // Fluid Phase Equil. – 1992. – № 75. – P. 245–255.
3. Assael M. J., Dymond J. H., Polimatidou S., K., Correlation and prediction of dense fluid transport coefficients. VII. Refrigerants// Int. J. Thermophysics. – 1995. – Vol. 16, No. 3, P. 761-772.
4. Gao X., Assael M. J., Nagasaka Y., Nagashima A. Prediction of the thermal conductivity and viscosity of binary and ternary HFC refrigerant mixtures// Int. J. Thermophysics. – 2000. – Vol. 21, No. 1, P. 23-34.
5. Bleazard J. G., Teja A. S. Extension of the rough hard-sphere theory for transport properties to polar liquids// Ind. Eng. Chem. Res. – 1996. – Vol. 35, P. 2453-2459.
6. Teja A. S., Smith R. L., King R., Sun T. Correlation and prediction of the transport properties of refrigerants using two modified rough hard-sphere models// In Proc. of 13th Symposium on Therm. Prop., Boulder, CO.-1997. – P. 347-362.
7. Laesecke A., Hafer R. F. Viscosity of fluorinated propane isomers. II. Measurements of three compounds and model comparisons// J. Chem. Eng. Data, in press, 2001.
8. Геллер В.З., Лапардин Н.И., Пивоварчук Т.И. Вязкость смесей хладагентов//Холодильна техніка і технологія. – 2005. – № 5 (97). – С. 5-14.
9. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник: Справ. изд. / Под ред. А.А. Потехина и А.И. Ефимовой. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1991. – 432 с. ISBN 5-7245-0703-X.