

УДК 62 – 714:532.13:536.23.001

**А. А. Вассерман, А. С. Бойчук**

Одесский национальный морской университет, ул. Мечникова, 34, г. Одесса, 65029, Украина

✉ e-mail: boychart@i.ua

## **ВЯЗКОСТЬ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ СМЕСИ ХЛАДАГЕНТОВ R125/R134a**

*Составлены уравнения, описывающие экспериментальные данные о вязкости и теплопроводности смеси хладагентов R125/R134a. Коэффициенты этих уравнений определены методом наименьших квадратов. Уравнения отображают зависимость вязкости и теплопроводности смеси от температуры, плотности и состава. Они позволяют рассчитывать вязкость в интервалах температур 298...423 К до давления 6,0 МПа при докритических и 248...345 К до 2,8 МПа при сверхкритических плотностях. Теплопроводность описана в интервалах 298...423 К до давления 6,0 МПа при докритических и 232...323 К до 20 МПа при сверхкритических плотностях. Средние квадратические и максимальные отклонения опытных данных от рассчитанных не превышают 3,1 % и 5,3 % для вязкости и 2,2 % и 5,0 % для теплопроводности.*

**Ключевые слова:** Хладагент; Смесь R125/R134a; Вязкость; Теплопроводность; Уравнения.

**О. А. Вассерман, А. С. Бойчук**

Одеський національний морський університет, вул. Мечникова, 34, м. Одеса, 65029, Україна

## **В'ЯЗКІСТЬ І ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ СУМІШІ ХОЛОДОАГЕНТІВ R125/R134a**

*Складені рівняння, що описують дослідні дані про в'язкість і теплопровідність суміші холодоагентів R125/R134a. Коефіцієнти цих рівнянь визначені методом найменших квадратів. Рівняння відображують залежність в'язкості і теплопровідності цієї суміші від температури, густини та складу. Вони дозволяють розраховувати в'язкість в інтервалах температур 298...423 К до тиску 6,0 МПа при докритичних та 248...345 К до 2,8 МПа при надкритичних густинах. Теплопровідність описана в інтервалах 298...423 К до тиску 6,0 МПа при докритичних та 232...323 К до 20 МПа при надкритичних густинах. Середні квадратичні та максимальні відхилення дослідних даних від розрахованих не перевищують 3,1 % і 5,3 % для в'язкості та 2,2 % і 5,0 % для теплопровідності.*

**Ключові слова:** Холодоагент; Суміш R125/R134a; В'язкість; Теплопровідність; Рівняння.



This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

### **I. ВВЕДЕНИЕ**

В связи с расширением диапазона температур, которыми оперирует современная холодильная техника, в настоящее время применяются не только чистые фреоны, но и их смеси, что позволяет достигать необходимый уровень охлаждения. Наиболее перспективными в этом отношении являются смеси, составленные на базе широко распространенных фреонов, в частности смесь R125/R134a. Данная смесь малотоксичная, невзрывоопасна, неагрессивна к конструкционным материалам, не содержит хлора, имеет нулевой потенциал разрушения озона и обладает благоприятными теплофизическими свойствами.

Используя смеси хладагентов в самых разнообразных установках с различными температурными режимами возникла необходимость обладания надежными сведениями об их теплофизических свойствах в широкой области параметров. Для гидравлических и

тепловых расчетов теплообменной и технологической аппаратуры холодильных установок весьма важными являются данные о вязкости и теплопроводности рабочих веществ. В настоящей работе составлены уравнения, описывающие экспериментальные данные об указанных свойствах смеси R125/R134a.

### **II. ВЯЗКОСТЬ СМЕСИ R125/R134a**

Вязкость смеси хладагентов R125/R134a экспериментально исследована в области параметров, представляющей интерес для холодильной техники. В таблице 1 представлены ссылки на литературные источники, количество опытных данных, их интервалы по температуре и давлению, а также мольная доля R125 в смеси. Для сокращения размеров таблицы во втором столбце указан только первый из авторов публикации.

**Таблица 1** – Сведения об экспериментальных данных о вязкости смеси R125/R134a

Год	Автор и источник	Число точек	Интервалы параметров		Мольная доля R125 в смеси
			$T$ (К)	$p$ (МПа)	
1993	Риппл [1]	15	251,83...311,04	1,216...2,168	0,478...0,493
2001	Лассек [2]	156	248,85...345,11	0,515...2,809	0,3; 0,7
2000	Йокояма [3]	340	298,15...423,15	0,101...6,624	0,2508; 0,5001; 0,7510

Экспериментальные данные представлены в двух областях плотностей, поэтому для вязкости были составлены два уравнения, действующие соответственно при докритических и сверхкритических плотностях.

На основании экспериментальных данных [3] для смеси при плотностях до  $385 \text{ кг/м}^3$  составлено уравнение, позволяющее рассчитать вязкость смеси R125/R134a в зависимости от температуры, плотности и состава в интервале температур  $298...423 \text{ К}$  при давлении до  $6,0 \text{ МПа}$ . Это уравнение имеет вид:

$$\eta_{mix} = x_1\eta_1(1 + a_{11}\rho_1 + a_{12}\rho_1^2 x_1\eta_1) + x_2\eta_2(1 + a_{21}\rho_2 + a_{22}\rho_2^2 x_2\eta_2), \quad (1)$$

где  $\eta_{mix}$ ,  $\eta_1$  и  $\eta_2$  – вязкости смеси и компонентов, мкПа·с,  $x_1$  и  $x_2$  – мольные доли компонентов,  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – плотности R125 и R134a,  $\text{кг/м}^3$ .

Коэффициенты  $a_{ij}$  уравнения (1) приведены в таблице 2.

**Таблица 2** – Коэффициенты уравнения (1) для расчёта вязкости смеси R125/R134a при  $\rho < 385 \text{ кг/м}^3$ 

Коэффициент	Значение
$a_{11}$	$1,1334 \cdot 10^{-3}$
$a_{12}$	$-1,0532 \cdot 10^{-7}$
$a_{21}$	$-9,4676 \cdot 10^{-4}$
$a_{22}$	$1,4032 \cdot 10^{-9}$

Уравнения для расчёта вязкости R125 и R134a приведены в работах [4,5].

Для расчёта плотности R125 было использовано уравнение состояния, представленное в [6], а плотности R134a – информационная система REFPROP [7].

По экспериментальным данным [1,2] при сверхкритических плотностях составлено уравнение, позволяющее рассчитать вязкость смеси R125/R134a в зависимости от температуры, плотности и состава в интервале температур  $248...345 \text{ К}$  при давлении до  $2,8 \text{ МПа}$ . Поскольку данные представлены в области

**Таблица 4** – Точность аппроксимации опытных данных о вязкости смеси R125/R134a при  $\rho < 385 \text{ кг/м}^3$  уравнением (1)

Автор и источник	Число точек	Интервалы параметров		$\delta\eta_{\max}$ , %	$\delta\eta_{\text{ср}}$ , %
		$T$ , К	$p$ , МПа		
Йокояма [3]	226	298,15...423,15	0,101...5,949	4,9	2,2

высоких плотностей, то для их описания с необходимой точностью использовано уравнение с избыточными значениями вязкости и плотности смеси, имеющее вид:

$$\eta_{mix} - \eta_{0mix} = \sum_{i=1}^n a_i (\rho_{mix} - \rho_{0mix})^i. \quad (2)$$

В уравнении (2) индексом 0 обозначены свойства смеси при атмосферном давлении. Они рассчитаны с использованием соответствующих уравнений для компонентов, скомбинированных по методу С. А. Улыбина [8]. Значения плотности  $\rho_{mix}$  смеси R125/134a получены с помощью системы [7].

Коэффициенты  $a_i$  уравнения (2) приведены в таблице 3

**Таблица 3** – Коэффициенты уравнения (2) для расчёта вязкости смеси R125/R134a при  $\rho > 940 \text{ г/м}^3$ 

Коэффициент	Значение
$a_1$	$3,4526 \cdot 10^0$
$a_2$	$-2,7179 \cdot 10^{-2}$
$a_3$	$6,9970 \cdot 10^{-5}$
$a_4$	$-8,1268 \cdot 10^{-8}$
$a_5$	$4,4363 \cdot 10^{-11}$
$a_6$	$-9,2522 \cdot 10^{-15}$

Для оценки точности уравнений (1) и (2) было выполнено сравнение рассчитанных значений вязкости смеси R125/R134a с экспериментальными данными. При этом были исключены некоторые опытные точки, не согласующиеся с основным массивом данных. В таблицах 4 и 5 приведены максимальные  $\delta\eta_{\max}$  и средние квадратические  $\delta\eta_{\text{ср}}$  отклонения экспериментальных данных от расчётных. Заметим, что опытные данные о вязкости смеси при атмосферном давлении (24 точки из работы [3]) описываются со средним квадратическим отклонением  $0,6 \%$ .

**Таблиця 5** – Точность аппроксимации опытных данных о вязкости смеси R125/R134a при  $\rho > 940 \text{ кг/м}^3$  уравнением (2)

Автор и источник	Число точек	Интервалы параметров		$\delta\eta_{\text{макс}}$ , %	$\delta\eta_{\text{ср}}$ , %
		$T$ , К	$p$ , МПа		
Риппл [1]	12	251,83...311,04	1,216...2,168	5,3	3,6
Лассек [2]	106	248,85...345,11	0,601...2,809	-4,9	3,0
Весь массив	118	248,85...345,11	0,601...2,809	5,3	3,1

Из таблиц 4 и 5 видно, что уравнения (1) и (2) удовлетворительно описывают данные о вязкости смеси в области температур и давлений, представляющей интерес для современных холодильных установок.

### III. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ СМЕСИ R125/R134a

Теплопроводность смеси R125/R134a экспериментально исследована в более широком интервале давлений, чем вязкость, но опытные данные получены только для жидкой фазы. В таблице 6 представлены ссылки на литературные источники, количество

опытных данных, их интервалы по температуре и давлению, а также мольная доля R125 в смеси.

Уравнение для расчёта теплопроводности смеси составлено в форме, аналогичной (1), и имеет вид:

$$\lambda_{\text{mix}} = x_1\lambda_1 + \sum_{i=1}^n b_{1i}(\rho_1 x_1 \lambda_1)^i + x_2\lambda_2 + \sum_{j=1}^m b_{2j}(\rho_2 x_2 \lambda_2)^j, \quad (3)$$

где  $\lambda_{\text{mix}}$ ,  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – теплопроводности смеси и компонентов, мВт/(м·К),  $x_1$  и  $x_2$  – мольные доли компонентов,  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – их плотности, кг/м<sup>3</sup>. Коэффициенты  $b_{ij}$  уравнения (3) приведены в таблице 7.

**Таблиця 6** – Сведения об экспериментальных данных о теплопроводности смеси R125/R134a

Год	Автор и источник	Число точек	Интервалы параметров		Мольная доля R125 в смеси
			$T$ (К)	$p$ (МПа)	
1999	Джонг [9]	98	232,75...323,55	2...20	0,1672; 0,3368; 0,5472; 0,7563

**Таблиця 7** – Коэффициенты уравнения (3) для расчёта теплопроводности смеси R125/R134a при  $\rho > 1100 \text{ кг/м}^3$ 

Коэффициент	Значение
$b_{11}$	$-3,7631 \cdot 10^{-5}$
$b_{21}$	$-5,5773 \cdot 10^{-6}$

Уравнения для расчёта теплопроводности R125 и R134a приведены в работах [5, 10].

При сравнении значений теплопроводности смеси R125/R134a, рассчитанных по уравнению (3), с опытными данными некоторые точки, не согласующиеся с основным массивом, были исключены. В таблице 8 приведены максимальные  $\delta\lambda_{\text{макс}}$  и средние квадратические  $\delta\lambda_{\text{ср}}$  отклонения экспериментальных данных от расчётных.

**Таблиця 8** – Точность аппроксимации опытных данных о теплопроводности смеси R125/R134a при  $\rho > 1100 \text{ кг/м}^3$ 

Автор и источник	Число точек	Интервал параметров		$\delta\lambda_{\text{макс}}$ , %	$\delta\lambda_{\text{ср}}$ , %
		$T$ , К	$p$ , МПа		
Джонг [9]	95	232,75...323,55	2...20	5,0	2,2

Из таблицы 8 видно, что уравнение (3) описывает данные о теплопроводности смеси с точностью, сопоставимой с точностью эксперимента.

Поскольку опытные данные о теплопроводности смеси имеются лишь для жидкой фазы в области высоких плотностей, для получения уравнения, которое позволяло бы рассчитывать это свойство при плотностях ниже критической, были использованы данные о теплопроводности, полученные с помощью системы REFPROP [7]. Эти данные рассчитывались для значений температуры, давления и состава смеси, приведенных в работе [3] для вязкости.

Аппроксимация данных о теплопроводности смеси при докритических плотностях проводилась с помощью уравнения в форме (3).

Коэффициенты уравнения приведены в таблице 9.

В таблице 10 приведены максимальные  $\delta\lambda_{\max}$  и средние квадратические  $\delta\lambda_{\text{ср}}$  отклонения полученных опорных данных от рассчитанных по уравнению.

Таким образом, уравнение для расчёта теплопроводности смеси при докритических плотностях пригодно для использования при инженерных расчётах.

**Таблица 9** – Коэффициенты уравнения для расчёта теплопроводности смеси при  $\rho < 385 \text{ кг/м}^3$

Коэффициент	Значение
$b_{11}$	$-1,0799 \cdot 10^{-3}$
$b_{12}$	$6,1358 \cdot 10^{-7}$
$b_{13}$	$-5,3121 \cdot 10^{-11}$
$b_{21}$	$-8,8131 \cdot 10^{-4}$
$b_{22}$	$3,3383 \cdot 10^{-8}$
$b_{23}$	$-6,7735 \cdot 10^{-13}$

**Таблица 10** – Точность аппроксимации опорных данных о теплопроводности смеси R125/R134a при  $\rho < 385 \text{ кг/м}^3$

Автор и источник	Число точек	Интервалы параметров		$\delta\lambda_{\max}$ , %	$\delta\lambda_{\text{ср}}$ , %
		$T$ , К	$p$ , МПа		
Йокояма [3]	261	298,15...423,15	0,101...5,949	5,0	1,5

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Составлены уравнения для расчёта вязкости и теплопроводности смеси хладагентов R125/R134a с использованием соответствующих уравнений для компонентов. Уравнения описывают накопленные опытные данные с приемлемой точностью и могут быть рекомендованы для использования при расчётах холодильных установок.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Ripple D., Matar O.** Viscosity of the Saturated Liquid Phase of Six Halogenated Compounds and Three Mixtures // *J. Chem. Eng. Data.* – 1993. – Vol. 38. – No. 4. – P. 560–564. doi: 10.1021/je00012a021
- Laesecke A., Hafer R.F., and Morris D.J.** Saturated-Liquid Viscosity of Ten Binary and Ternary Alternative Refrigerant Mixtures. Part I: Measurements // *J. Chem. Eng. Data.* – 2001. – Vol. 46. – No. 2. – P. 433–445. doi: 10.1021/je000335w
- Yokoyama C., Nishino T., and Takahashi M.** Viscosity of Gaseous Mixtures of HFC-125 (pentafluoroethane) + HFC-134a (1,1,1,2-tetrafluoroethane) under pressure // *Fluid Phase Equilibria.* – 2000. – V.174. – P. 231–240. doi: 10.1016/S0378-3812(00)00430-1
- Бойчук А. С.** Уравнения для расчета вязкости хладагентов R32 и R125 // *Холодильна техніка та технологія.* – 2014. – № 4 (150). – С. 18–21. doi: 10.15673/0453-8307.4/2014.28046

- Бойчук А. С.** Уравнения для расчета вязкости и теплопроводности хладагента R134a // *Холодильна техніка та технологія.* – 2015. – том 51, вип. 2. – С. 42–47. doi: 10.15673/0453-8307.2/2015.39352
- Vasserman A.A., Fominsky D.V.** Equations of State for Ozone-Safe Refrigerants R32 and R125 // *Int. J. Thermophys.* – 2001. – Vol.22. – No. 4. – P. 1089–1098. doi: 10.1023/A:1010699806169
- Lemmon E. W., Huber M. L., and McLinden M. O.** NIST Standard Reference Database 23, Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties (REFPROP), Version 8.0; National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg, MD, 2007.
- Улыбин С. А.** Температурная зависимость вязкости разреженных газовых смесей // *Теплоэнергетика.* – 1962. – № 8. – С. 93–94.
- Jeong S.U., Kim M.S., and Ro S.T.** Liquid Thermal Conductivity of Binary Mixtures of Pentafluoroethane (R125) and 1,1,1,2-Tetrafluoroethane (R134a) // *Int. J. Thermophys.* – 1999. – Vol. 20. – No. 1. – P. 55–62. doi: 10.1023/A:1021469928377
- Бойчук А. С.** Уравнения для расчета теплопроводности хладагентов R32 и R125 // *Холодильна техніка та технологія.* – 2014. – № 6 (152). – С. 10–13. doi: 10.15673/0453-8307.6/2014.30694

Отримана в редакції 15.06.2016, прийнята до друку 01.07.2016

A. A. Vasserman, A. S. Boychuk✉

Odessa National Maritime University, 34 Mechnikova str., Odessa, 65029, Ukraine

✉ e-mail: boychart@i.ua

## VISCOSITY AND THERMAL CONDUCTIVITY OF REFRIGERANTS R125/R134a MIXTURE

Equations describing viscosity and thermal conductivity experimental data of refrigerants R125/R134a mixture are compiled. Coefficients are determined by the least square technique. Equations represent refrigerants mixture viscosity and thermal conductivity dependence from temperature, density and composition. Providing possibility to calculate mixture viscosity at temperature ranging 298...423 K at a pressure up to 6,0 MPa at subcritical and 248...345 K up to 2,8 MPa at supercritical densities. Thermal conductivity is described at temperature ranging 298...423 K up to 6,0 MPa at subcritical and 232...323 K up to 20 MPa at supercritical densities. Standard and maximum deviations of the experimental values from calculated do not exceed 3,1% and 5,3% for viscosity and 2,2% and 5,0% for thermal conductivity.

**Keywords:** Refrigerant; Mixture R125/R134a; Viscosity; Thermal conductivity; Equations.

### REFERENCES

1. **Ripple D., Matar O.** (1993) Viscosity of the Saturated Liquid Phase of Six Halogenated Compounds and Three Mixtures. *J. Chem. Eng. Data*, 38 (4), 560-564. DOI: 10.1021/je00012a021
2. **Laesecke A., Hafer R. F., Morris D. J.** (2001) Saturated-Liquid Viscosity of Ten Binary and Ternary Alternative Refrigerant Mixtures. Part I: Measurements. *J. Chem. Eng. Data*, 46 (2), 433-445. DOI: 10.1021/je000335w
3. **Yokoyama C., Nishino T., Takahashi M.** (2000) Viscosity of Gaseous Mixtures of HFC-125 (pentafluoroethane) + HFC-134a (1,1,1,2-tetrafluoroethane) under pressure. *Fluid Phase Equilibria*, 174, 231-240. DOI: 10.1016/S0378-3812(00)00430-1
4. **Boychuk A. S.** (2014). Equations for Refrigerants R32 and R125 Viscosity Calculation. *Kholodylna Tekhnika ta Tekhnologiya [Refrigeration Engineering and Technology]*, No.4, 18-21 (in Russian). DOI: 10.15673/0453-8307.4/2014.28046
5. **Boychuk A. S.** (2015). Equations for Refrigerant R134a Viscosity and Thermal Conductivity Calculation. *Kholodylna Tekhnika ta Tekhnologiya [Refrigeration Engineering and Technology]*, 51(2), 42-47 (in Russian). DOI: 10.15673/0453-8307.2/2015.39352
6. **Vasserman A. A., Fominsky D. V.** (2001) Equations of State for Ozone-Safe Refrigerants R32 and R125. *Int. J. Thermophysics*, 22 (4), 1089-1098. DOI: 10.1023/A:1010699806169
7. **Lemmon E. W., Huber M. L., McLinden M. O.** (2007) NIST Standard Reference Database 23, Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties (REFPROP), Version 8.0; National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg, MD.
8. **Ulibin S. A.** (1962). The temperature dependence of the viscosity of rarefied gas mixtures. *Teploenergetika [Heat-Energetics]*, No. 8, P. 93-94 (in Russian).
9. **Jeong S. U., Kim M. S., Ro S. T.** (1999) Liquid Thermal Conductivity of Binary Mixtures of Pentafluoroethane (R125) and 1,1,1,2-Tetrafluoroethane (R134a). *Int. J. Thermophysics*, 20 (1), 55-62. DOI: 10.1023/A:1021469928377
10. **Boychuk A. S.** (2014). Equations for Refrigerants R32 and R125 Thermal Conductivity Calculation. *Kholodylna Tekhnika ta Tekhnologiya [Refrigeration engineering and technology]*, No. 6 (152), 10-13 (in Russian). DOI: 10.15673/0453-8307.6/2014.30694

Received 15 June 2016

Approved 01 July 2016

Available in Internet 31 August 2016