

УДК 62 – 714:536.23.001.24

**А.С. Бойчук**

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

**УРАВНЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ХЛАДАГЕНТОВ R32 И R125**

*Составлены уравнения для расчета теплопроводности альтернативных хладагентов R32 и R125 через переменные температуру и плотность. Коэффициенты уравнений определены методом наименьших квадратов по экспериментальным данным. Уравнения описывают теплопроводность в интервале температур от 223 до 466 К при давлении до 50 МПа для R32 и от 228 до 513 К при давлении до 53 МПа для R125. Точность составленных уравнений вполне приемлема для инженерных расчетов.*

**Ключевые слова:** Хладагенты – R32 – R125 – Теплопроводность – Уравнения.

**А.С. Бойчук**

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

**РІВНЯННЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ХОЛОДОАГЕНТІВ R32 ТА R125**

*Складені рівняння для розрахунку теплопровідності альтернативних холодоагентів R32 та R125 через змінні температуру та густину. Коефіцієнти рівнянь визначені методом найменших квадратів по експериментальним даним. Рівняння описують теплопровідність в інтервалі температур від 223 до 466 К при тиску до 50 МПа для R32 та від 228 до 513 К при тиску до 53 МПа для R125. Точність складених рівнянь цілком прийнятна для інженерних розрахунків.*

**Ключові слова:** Холодоагенти – R32 – R125 – Теплопровідність – Рівняння.

DOI: 10.15673/0453-8307.6/2014.30694



This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

**I. ВВЕДЕНИЕ**

Хладагенты R32 и R125 отвечают базовым требованиям для рабочих веществ современных холодильных установок и рассматриваются как заменители хладагентов R12 и R22. Данные вещества применяются в холодильной промышленности, как в чистом виде, так и в составе смесей. Их озоноразрушающий потенциал равен нулю. Для проектирования и эффективной эксплуатации таких установок необходимы данные о теплопроводности. Это свойство удобно рассчитывать с помощью уравнений, составленных на основании экспериментальных данных.

Существующие уравнения для расчета теплопроводности в широкой области параметров представлены через независимые переменные температуру  $T$  и плотность  $\rho$  [1 – 3]. В комплексе с такими уравнениями необходимо использовать надежные уравнения состояния для расчёта плотности при известных значениях давления и температуры, соответствующих опытному данным.

**II. УРАВНЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ**

Теплопроводность альтернативных хладагентов исследована экспериментально в более широком интервале давлений, чем вязкость. В таблицах 1 и 2 представлены ссылки на литературные источники, количество опытных данных и их интервал по температуре и давлению.

На основе имеющихся экспериментальных данных для хладагентов составлены уравнения, позволяющие рассчитать теплопроводность в зависимости от температуры и плотности в интервале температур от 223 до 466 К при давлении до 50 МПа для R32 и от 228 до 513 К при давлении до 53 МПа для R125.

Уравнение для расчета теплопроводности перечисленных хладагентов составлено в форме, которая имеет вид:

$$\lambda_{\text{exp}} - \lambda_0 = \sum_{i=1}^n \left( \frac{a_{i1}}{T} + a_{i2} + a_{i3} \cdot T \right) (\rho - \rho_0)^i, \quad (1)$$

где индексом 0 обозначены свойства при атмосферном давлении. Размерность теплопроводности – мВт/(м·К), плотности – кг/м<sup>3</sup>, температуры – К.

**Таблиця 1** – Перечень експериментальних даних о теплопроводности R32.

Автор и источник	Число точек	Интервал параметров	
		$T$ (К)	$p$ (МПа)
R32			
Пападаки и соавт. [6]	10	205 – 303	0,2 – 3,5
Танака и соавт. [7]	53	283 – 333	0,1 – 3,9
Ассаэль и соавт. [8]	27	253 – 313	0,6 – 17,6
Ро и соавт. [9]	24	223 – 323	2 – 20
Ята и соавт. [10]	27	253 – 324	2 – 30
Гросс и соавт. [11]	80	233 – 345	0,1 – 6,2
Ро и соавт. [12]	24	234 – 323	2 – 20
Сун и соавт. [13]	20	255 – 342	0,2 – 3,9
Ле Неидре и соавт. [14]	613	299 – 466	0,1 – 50

**Таблиця 2** – Перечень експериментальних даних о теплопроводности R125.

Автор и источник	Число точек	Интервал параметров	
		$T$ (К)	$p$ (МПа)
R125			
Вилсон и соавт. [15]	7	216 – 333	0,1 – 3,2
Пападаки и соавт. [6]	7	225 – 306	0,1 – 7,4
Цветков и соавт. [16]	16	173 – 290	0,1 – 1,1
Танака и соавт. [7]	51	283 – 333	0,1 – 2,0
Цветков и соавт. [17]	30	187 – 419	0,1 – 6,0
Ассаэль и соавт. [8]	20	253 – 313	1,2 – 16,0
Ята и соавт. [10]	24	257 – 305	1,1 – 31
Гао и соавт. [18]	32	194 – 334	2 – 30
Гросс и соавт. [11]	102	254 – 354	0,1 – 7,0
Ассаэль и соавт. [19]	17	273 – 313	0,2 – 1,1
Ро и соавт. [12]	24	231 – 324	2 – 20
Сун и соавт. [13]	17	251 – 334	0,2 – 2,8
Ле Неидре и соавт. [20]	640	297 – 513	0,1 – 53

Уравнение (1) удовлетворяет предельному условию, так как при атмосферном давлении обе его части становятся равными нулю. Для расчёта плотности R32 и R125 были использованы уравнения состояния, представленные в [4].

По экспериментальным данным [6 – 20] методом наименьших квадратов определены коэффициенты уравнений для теплопроводности. Оптимизация числа коэффициентов проводилась по методике, представленной в [5].

Также на основании опытных данных были составлены уравнения для теплопроводности хладагентов при атмосферном давлении в следующей форме:

$$\lambda_0 = \sum_{i=0}^n b_i T^i. \quad (2)$$

Уравнения описывают данные о теплопроводности R32 и R125 при нормальном атмосферном давлении со средними квадратическими погрешностями 0,62 и 0,13% и максимальными 2,37 и –0,61% соответственно.

Для расчёта плотности исследуемых хладагентов при атмосферном давлении составлено следующее уравнение:

$$\rho_0 = \frac{c_1}{T} + \frac{c_2}{T^2}. \quad (3)$$

В таблице 3 приведены коэффициенты уравнений (2) и (3) для расчёта теплопроводности и плотности двух фреонов при атмосферном давлении и интервалы их действия по температуре.

**Таблиця 3** – Коэффициенты уравнений для расчёта теплопроводности и плотности R32 и R125 при атмосферном давлении.

Коэффициент	Вещество	
	R32	R125
$b_1$	$4,3939 \cdot 10^{-2}$	0
$b_2$	$-9,1784 \cdot 10^{-5}$	$2,3743 \cdot 10^{-4}$
$b_3$	$2,8945 \cdot 10^{-7}$	$-3,2840 \cdot 10^{-7}$
$b_4$	0	$2,0156 \cdot 10^{-10}$
$c_1$	$6,1274 \cdot 10^2$	$1,4265 \cdot 10^3$
$c_2$	$8,9754 \cdot 10^3$	$1,7471 \cdot 10^4$
$\Delta T, K$	223 – 466	225 – 513

В таблице 4 приведены коэффициенты уравнения (1) для расчёта теплопроводности через переменные температуру и плотность, указаны интервалы параметров, на которые эти уравнения распространяются, максимальное  $\delta\lambda_{\max}$  и среднее квадратическое  $\delta\lambda_{\text{ср}}$  отклонения экспериментальных данных от рассчитанных по уравнению.

**Таблица 4** – Коэффициенты уравнения (1) для расчета теплопроводности R32 и R125 и отклонения опытных данных от рассчитанных по уравнению.

Коэффициент	Вещество	
	R32	R125
$a_{11}$	$-1,2643 \cdot 10^1$	$-9,3369 \cdot 10^0$
$a_{12}$	$1,2832 \cdot 10^{-1}$	$5,7785 \cdot 10^{-2}$
$a_{13}$	$-1,0986 \cdot 10^{-4}$	$-4,8028 \cdot 10^{-5}$
$a_{21}$	$1,1076 \cdot 10^{-2}$	$7,6813 \cdot 10^{-3}$
$a_{22}$	$3,6320 \cdot 10^{-5}$	0
$\Delta T, K$	223 – 466	228 – 513
$\Delta p, MPa$	0,1 – 50	0,1 – 53
$\delta\lambda_{\text{макс}}, \%$	-3,04	-3,41
$\delta\lambda_{\text{ср}}, \%$	1,38	1,46

Из таблицы 4 видно, что уравнение (1) с вполне приемлемой точностью описывает данные о теплопроводности в области температур и давлений, превышающих характерные для современных холодильных установок.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уравнения для расчета теплопроводности хладагентов R32 и R125 через независимые переменные температуру и плотность в комплексе с надежными уравнениями состояния описывают накопленные опытные данные с точностью, соответствующей точности эксперимента, что позволяет рекомендовать их для инженерных расчетов холодильных установок и для составления уравнений транспортных свойств смесей.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Н.Б. Варгафтик.** Теплопроводность сжатых газов и жидкостей. // Известия ВТИ. – 1951. – № 7. – С. 13 – 19.
2. **В.В. Алтунин.** Теплофизические свойства двуокиси углерода. – М.: Изд. стандартов, 1975. – 551с.
3. **Н.Б. Варгафтик, Л.П. Филиппов, А.А. Тарзианов, Е.Е. Тоцкий.** Справочник по теплопроводности жидкостей и газов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
4. **А.А. Vasserman, D.V. Fominsky.** Equations of State for the Ozone-Safe Refrigerants R32 and R125. // International Journal of Thermophysics. – 2001. – Vol. 22. – No. 4. – P. 1089 – 1098. doi: 10.1023/A:1010699806169
5. **А.А. Вассерман, А.Я. Крейзерова.** Оптимизация числа коэффициентов уравнения состояния. // Теплофизика высоких температур. – 1978. – Т. 6. – № 6. – С. 1185 – 1188.
6. **М. Papadaki, W.A. Wakeham.** Thermal Conductivity of R32 and R125 in the Liquid Phase at the Saturation Vapor Pressure. // International Journal of Thermophysics. – 1993. – Vol. 14. – No. 6. – P. 1215 – 1220. doi: 10.1007/BF02431285
7. **Y. Tanaka, S. Matsuo, S. Taya.** Gaseous Thermal Conductivity of Difluoromethane (HFC-32), Pentafluoroethane (HFC-125), and Their Mixtures. // International Journal of Thermophysics. – 1995. – Vol. 16. – No. 1. – P. 121 – 131. doi: 10.1007/BF01438963
8. **M.J. Assael, L. Karagianidis.** Measurements of the Thermal Conductivity of Liquid R32, R124, R125, and R141b. // International Journal of Thermophysics. – 1995. – Vol. 16. – No. 4. – P. 851 – 865. doi: 10.1007/BF02093468
9. **S.T. Ro, J.Y. Kim, D.S. Kim.** Thermal Conductivity of R32 and Its Mixture with R134a. // International Journal of Thermophysics. – 1995. – Vol. 16. – No. 5. – P. 1193 – 1201. doi: 10.1007/bf02081287
10. **J. Yata, M. Hori, K. Kobayashi, T. Minamiyama.** Thermal Conductivity of Alternative Refrigerants in the Liquid Phase. // International Journal of Thermophysics. – 1996. – Vol. 17. – No. 3. – P. 561-571. doi: 10.1007/BF01441503
11. **U. Gross, Y.W. Song.** Thermal Conductivities of New Refrigerants R125 and R32 Measured by the Transient Hot-Wire Method. // International Journal of Thermophysics. – 1996. – Vol. 17. – No. 3. – P. 607-619. doi: 10.1007/BF01441507
12. **S.T. Ro, M.S. Kim, S.U. Jeong.** Liquid Thermal Conductivity of Binary Mixtures of Difluoromethane (R32) and Pentafluoroethane (R125). // International Journal of Thermophysics. – 1997. – Vol. 18. – No. 4. – P. 991-999. doi: 10.1007/BF02575243
13. **L. Sun, M. Zhu, L. Han, Z. Lin.** Thermal Conductivity of Gaseous Difluoromethane and Pentafluoroethane near the Saturation Line. // J.Chem. Eng. Data. – 1997. – Vol. 42. – No. 1. – P. 179-182. doi: 10.1021/je960245k
14. **B. Le Neidre, Y. Garrabos.** Measurements of the Thermal Conductivity of HFC-32 (Difluoromethane) in the Temperature Range from 300 to 465 K at Pressures up to 50 MPa. // International Journal of Thermophysics. – 2001. – Vol. 22. – No. 3. – P. 701-722. doi: 10.1021/je0002078
15. **L.C. Wilson, W.V. Wilding, G.M. Wilson, R.L. Rowley, V.M. Felix, T. Chisolm-Carter.** Thermophysical Properties of HFC-125. // Fluid Phase Equilibria. – 1992. – No. 80. – P. 167 – 177. doi: 10.1016/0378-3812(92)87065-U
16. **O.B. Tsvetkov, Yu.A. Laptev, A.G. Asambaev.** Thermal Conductivity of Refrigerants R123, R134a, and R125 at Low Temperatures. // International Journal of Thermophysics. – 1994. – Vol. 15. – No. 2. – P. 203 – 214. doi: 10.1007/BF01441582
17. **O.B. Tsvetkov, A.V. Kletski, Yu.A. Laptev, A.G. Asambaev, I.A. Zausaev.** Thermal Conductivity and PVT Measurements of Pentafluoroethane (Refrigerant HFC-125). // International Journal of Thermophysics. – 1995. – Vol. 16. – No. 5. – P. 1185-1192. doi: 10.1007/BF02081286
18. **X. Gao, T. Yamada, Y. Nagasaka, A. Nagashima.** The Thermal Conductivity of CFC Alternatives HFC-125 and HCFC-141b in the Liquid Phase. International Journal of Thermophysics. – 1996. – Vol. 17. – No. 2. – P. 279 – 292. doi: 10.1007/BF01443393
19. **M.J. Assael, N. Malamataris, L. Karagiannadis.** Measurements of the Thermal Conductivity of Refrigerants in the Vapor Phase. // International Journal of Thermophysics. – 1997. – Vol. 18. – No. 2. – P. 341-352. doi: 10.1007/BF02575165
20. **B. Le Neidre, Y. Garrabos.** Measurements of the Thermal Conductivity of HFC-125 in the Temperature Range from 300 to 515 K at Pressures up to 53 MPa. // International Journal of Thermophysics. – 1999. – Vol. 20. – No. 2. – P. 375-399. doi: 10.1021/je0002078

A.S. Boychuk

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

## EQUATIONS FOR REFRIGERANTS R32 AND R125 THERMAL CONDUCTIVITY CALCULATION

*Equations for thermal conductivity of alternative refrigerants R32 and R125 for variable temperature and density were worked out. The reliable equation of state was used for each refrigerant. Coefficients of the equations were determined by least-square method on the experimental data. The equations describe the thermal conductivity in the temperature range from 223 to 466 K at pressure up to 50 MPa for R32 and from 228 to 513 K at pressure up to 53 MPa for R125. The accuracy of the equations is acceptable for engineering calculations.*

**Keywords:** Refrigerants – R32 – R125 – Thermal conductivity – Equations.

### REFERENCES

1. N.B. Vargaftik. Teploprovodnost' szhatyh gazov i zhidkostej. // Izvestija VTI. – 1951. – № 7. – P.13–19.
2. V.V. Altunin. Teplofizicheskie svoystva dvoukisi ugleroda. – M.: Izd. Standartov, 1975. – 551 p.
3. N.B. Vargaftik, L.P. Filippov, A.A. Tarzimanov, E.E. Tockij. Spravochnik po teploprovodnosti zhidkostej i gazov. – M.: Energoatomizdat, 1990. – 352 p.
4. A.A. Vasserman, D.V. Fominsky. Equations of State for the Ozone-Safe Refrigerants R32 and R125. // International Journal of Thermophysics. – 2001. – Vol. 22. – No. 4. – P. 1089-1098. doi: 10.1023/A:1010699806169
5. A.A. Vasserman, A.Y. Kreizerova. Optimizaciya chisla koefitsientov uravneniya sostoyaniya. // Teplofizika vysokih temperatur. – 1978. – T. 6. – № 6. – P. 1185-1188.
6. M. Papadaki, W.A. Wakeham. Thermal Conductivity of R32 and R125 in the Liquid Phase at the Saturation Vapor Pressure. // International Journal of Thermophysics. – 1993. – Vol. 14. – No. 6. – P. 1215-1220. doi: 10.1007/BF02431285
7. Y. Tanaka, S. Matsuo, S. Taya. Gaseous Thermal Conductivity of Difluoromethane (HFC-32), Pentafluoroethane (HFC-125), and Their Mixtures. // International Journal of Thermophysics. – 1995. – Vol. 16. – No. 1. – P. 121-131. doi: 10.1007/BF01438963
8. M.J. Assael, L. Karagiannidis. Measurements of the Thermal Conductivity of Liquid R32, R124, R125, and R141b. // International Journal of Thermophysics. – 1995. – Vol. 16. – No. 4. – P. 851-865. doi: 10.1007/BF02093468
9. S.T. Ro, J.Y. Kim, D.S. Kim. Thermal Conductivity of R32 and Its Mixture with R134a. // International Journal of Thermophysics. – 1995. – Vol. 16. – No. 5. – P. 1193-1201. doi: 10.1007/bf02081287
10. J. Yata, M. Hori, K. Kobayashi, T. Minamiyama. Thermal Conductivity of Alternative Refrigerants in the Liquid Phase. // International Journal of Thermophysics. – 1996. – Vol. 17. – No. 3. – P. 561-571. doi: 10.1007/BF01441503
11. U. Gross, Y.W. Song. Thermal Conductivities of New Refrigerants R125 and R32 Measured by the Transient Hot-Wire Method. // International Journal of Thermophysics. – 1996. – Vol. 17. – No. 3. – P. 607-619. doi: 10.1007/BF01441507
12. S.T. Ro, M.S. Kim, S.U. Jeong. Liquid Thermal Conductivity of Binary Mixtures of Difluoromethane (R32) and Pentafluoroethane (R125). // International Journal of Thermophysics. – 1997. – Vol. 18. – No. 4. – P. 991-999. doi: 10.1007/BF02575243
13. L. Sun, M. Zhu, L. Han, Z. Lin. Thermal Conductivity of Gaseous Difluoromethane and Pentafluoroethane near the Saturation Line. // J.Chem. Eng. Data. – 1997. – Vol. 42. – No. 1. – P. 179-182. doi: 10.1021/je960245k
14. B. Le Neindre, Y. Garrabos. Measurements of the Thermal Conductivity of HFC-32 (Difluoromethane) in the Temperature Range from 300 to 465 K at Pressures up to 50 MPa. // International Journal of Thermophysics. – 2001. – Vol. 22. – No. 3. – P. 701-722. doi: 10.1021/je0002078
15. L.C. Wilson, W.V. Wilding, G.M. Wilson, R.L. Rowley, V.M. Felix, T. Chisolm-Carter. Thermophysical Properties of HFC-125. // Fluid Phase Equilibria. – 1992. – No. 80. – P. 167-177. doi: 10.1016/0378-3812(92)87065-U
16. O.B. Tsvetkov, Yu.A. Laptev, A.G. Asambaev. Thermal Conductivity of Refrigerants R123, R134a, and R125 at Low Temperatures. // International Journal of Thermophysics. – 1994. – Vol. 15. – No. 2. – P. 203-214. doi: 10.1007/BF01441582
17. O.B. Tsvetkov, A.V. Kletski, Yu.A. Laptev, A.G. Asambaev, I.A. Zausaev. Thermal Conductivity and PVT Measurements of Pentafluoroethane (Refrigerant HFC-125). // International Journal of Thermophysics. – 1995. – Vol. 16. – No. 5. – P. 1185-1192. doi: 10.1007/BF02081286
18. X. Gao, T. Yamada, Y. Nagasaka, A. Nagashima. The Thermal Conductivity of CFC Alternatives HFC-125 and HCFC-141b in the Liquid Phase. // International Journal of Thermophysics. – 1996. – Vol. 17. – No. 2. – P. 279-292. doi: 10.1007/BF01443393
19. M.J. Assael, N. Malamataris, L. Karagiannidis. Measurements of the Thermal Conductivity of Refrigerants in the Vapor Phase. // International Journal of Thermophysics. – 1997. – Vol. 18. – No. 2. – P. 341-352. doi: 10.1007/BF02575165
20. B. Le Neindre, Y. Garrabos. Measurements of the Thermal Conductivity of HFC-125 in the Temperature Range from 300 to 515 K at Pressures up to 53 MPa. // International Journal of Thermophysics. – 1999. – Vol. 20. – No. 2. – P. 375-399. doi: 10.1021/je0002078

Отримана в редакції 20.08.2014, прийнята до друку 17.11.2014