

УДК 62 – 714:532.13.001.24

А.С. Бойчук

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

УРАВНЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ВЯЗКОСТИ ХЛАДАГЕНТОВ R32 И R125

Составлены уравнения для расчета вязкости альтернативных хладагентов R32 и R125 через переменные температуру и плотность. Коэффициенты уравнений определены методом наименьших квадратов по экспериментальным данным. Уравнения описывают вязкость в интервале температур от 232 до 423 К при давлении до 9,8 МПа для R32 и от 230 до 423 К при давлении до 10,1 МПа для R125. Точность составленных уравнений вполне приемлема для инженерных расчетов.

Ключевые слова: Хладагенты – R32 – R125 – Вязкость – Уравнения.

А.С. Бойчук

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

РІВНЯННЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ В'ЯЗКОСТІ ХОЛОДОАГЕНТІВ R32 ТА R125

Складені рівняння для розрахунку в'язкості альтернативних холодоагентів R32 та R125 через змінні температуру та густину. Коефіцієнти рівнянь визначені методом найменших квадратів по експериментальним даним. Рівняння описують в'язкість в інтервалі температур від 232 до 423 К при тиску до 9,8 МПа для R32 та від 230 до 423 К при тиску до 10,1 МПа для R125. Точність складених рівнянь цілком прийнятна для інженерних розрахунків.

Ключові слова: Холодоагенти – R32 – R125 – В'язкість – Рівняння.

I. ВВЕДЕНИЕ

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

Существующие уравнения для расчета вязкости в широкой области параметров представлены через независимые переменные температуру T и плотность ρ [1, 2]. В комплексе с такими уравнениями необходимо использовать надежные уравнения состояния для расчета плотности при известных значениях давления и температуры, соответствующих опытным данным.

II. УРАВНЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ВЯЗКОСТИ

Вязкость альтернативных хладагентов исследована экспериментально в области параметров, важных для холодильных установок. 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 вязкость в зависимости от температуры и плотности в интервале температур от 232 до 423 К при давлении до 9,8 МПа для R32 и от 230 до 423 К при давлении до 10,1 МПа для R125.

Таблица 1 – Перечень экспериментальных данных о вязкости R32.

Автор и источник	Число точек	Интервал параметров	
		T (К)	p (МПа)
R32			
Оливейра и соавт. [5]	33	223 – 343	0,2 – 5,1
Риппл и соавт. [6]	10	251 – 293	0,3 – 1,5
Ассаэль и соавт. [7]	26	273 – 313	1,6 – 15,5
Данлоп [8]	1	298	0,1
Такахашаи и соавт. [9]	114	298 – 423	0,1 – 10,0
Геллер и соавт. [10]	51	253 – 363	0,1 – 5,4
Сун и соавт. [11]	21	233 – 333	0,2 – 3,9
Лассек и соавт. [12]	60	250 – 315	0,4 – 2,6
Оливейра и соавт. [13]	13	223 – 343	0,1 – 4,9
Фрьоба и соавт. [14]	12	233 – 343	0,2 – 4,9

Таблиця 2 – Перечень экспериментальных данных о вязкости R125.

Автор и источник	Число точек	Интервал параметров	
		T (К)	p (МПа)
R125			
Оливейра и соавт. [5]	26	224 – 333	0,1 – 4,0
Диллер и соавт. [15]	137	176 – 420	3,3 – 53,0
Риппл и соавт. [6]	15	250 – 302	0,3 – 1,5
Ассаэль и соавт. [16]	22	273 – 313	2,5 – 14,5
Данлоп [8]	1	298	0,1
Сун и соавт. [11]	20	233 – 328	0,1 – 2,8
Ассаэль и соавт. [17]	24	273 – 313	0,1 – 1,3
Риппл и соавт. [18]	8	256 – 303	0,4 – 1,6
Такахашаи и соавт. [19]	131	298 – 423	0,1 – 8,4
Оливейра и соавт. [13]	13	224 – 332	0,1 – 2,9
Фрьоба и соавт. [14]	11	233 – 333	0,2 – 3,2
Авелино и соавт. [20]	116	254 – 293	1,4 – 10,1

Уравнение для расчета вязкости перечисленных хладагентов составлены в форме, которая имеет вид:

$$\eta_{\text{exp}} - \eta_0 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{a_{i1}}{T} + a_{i2} + a_{i3} \cdot T \right) (\rho - \rho_0)^i, \quad (1)$$

где индексом 0 обозначены свойства при атмосферном давлении. Размерность вязкости – мкПа·с, плотности – кг/м³, температуры – К.

Уравнение (1) удовлетворяет предельному условию, так как при атмосферном давлении обе его части становятся равными нулю. Для расчета плотности R32 и R125 были использованы надежные уравнения состояния, представленные в [3].

По экспериментальным данным [5 – 20] методом наименьших квадратов определены коэффициенты уравнений для вязкости. Оптимизация числа коэффициентов проводилась по методике, представленной в [4].

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

$$\eta_0 = \sum_{i=0}^n b_i T^i. \quad (2)$$

Уравнения описывают данные о вязкости R32 и R125 при нормальном атмосферном давлении со средними квадратическими погрешностями 0,87 и

0,75% и максимальными 1,06 и –1,91% соответственно.

Для расчета 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 расчета вязкости и плотности двух фреонов при атмосферном давлении и интервалы их действия по температуре.

Таблиця 3 – Коэффициенты уравнений для расчета вязкости и плотности R32 и R125 при атмосферном давлении.

Коэффициент	Вещество	
	R32	R125
b_0	$5,7221 \cdot 10^{-3}$	$-1,6662 \cdot 10^{-4}$
b_1	$4,2000 \cdot 10^{-2}$	$4,5963 \cdot 10^{-2}$
b_2	0	$-8,7431 \cdot 10^{-6}$
c_1	$6,1274 \cdot 10^2$	$1,4265 \cdot 10^3$
c_2	$8,9754 \cdot 10^3$	$1,7471 \cdot 10^4$
$\Delta T, \text{ К}$	223 – 423	226 – 423

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

Таблиця 4 - Коэффициенты уравнения (1) для расчета вязкости R32 и R125 и отклонения опытных данных от рассчитанных по уравнению.

Коэффициент	Вещество	
	R32	R125
a_{11}	$5,6115 \cdot 10^1$	$4,9040 \cdot 10^1$
a_{12}	$-3,5116 \cdot 10^{-1}$	$-2,9565 \cdot 10^{-1}$
a_{13}	$5,2029 \cdot 10^{-4}$	$4,5905 \cdot 10^{-4}$
a_{21}	$1,2237 \cdot 10^{-1}$	$-9,3058 \cdot 10^{-1}$
a_{22}	$1,7012 \cdot 10^{-4}$	$5,1515 \cdot 10^{-3}$
a_{23}	$-7,9384 \cdot 10^{-7}$	$-6,9493 \cdot 10^{-6}$
a_{31}	$-7,0359 \cdot 10^{-5}$	$5,5345 \cdot 10^{-4}$
a_{32}	0	$-2,8979 \cdot 10^{-6}$
a_{33}	0	$3,7073 \cdot 10^{-9}$
a_{41}	0	$1,1131 \cdot 10^{-8}$
$\Delta T, \text{ К}$	232 – 423	230 – 423
$\Delta p, \text{ МПа}$	0,1 – 9,8	0,1 – 10,1
$\delta\eta_{\text{max}}, \%$	3,09	4,14
$\delta\eta_{\text{cp}}, \%$	1,25	1,22

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

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уравнения для расчета вязкости 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. **И.Ф. Голубев.** Вязкость газов и газовых смесей. - М.: Физматгиз, 1959. - 377 с.
2. **В.Е. Люстерник.** Уравнение вязкости сжатого газообразного и жидкого водорода. // Теплофизика высоких температур. - 1969. - Т. 7. - № 2. - С. 367 - 369.
3. **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.
4. **А.А. Вассерман, А.Я. Крейзерова.** Оптимизация числа коэффициентов уравнения состояния. // Теплофизика высоких температур. - 1978. - Т. 6. - № 6. - С. 1185 - 1188.
5. **С.М.В.Р. Oliveira, W.A. Wakeham.** The Viscosity of R32 and R125 at Saturation. // International Journal of Thermophysics. - 1993. - Vol. 14. - No. 6. - P. 1131 - 1143
6. **D. Ripple, O. Matar.** Viscosity of the Saturated Liquid Phase of Six Halogenated Compounds and Three Mixtures. // J. Chem. Eng. Data. - 1993. - Vol. 38. - P. 560 - 564.
7. **M.J. Assael, J.H. Dymond, S.K. Polimatidou.** Measurements of the Viscosity of R134a and R32 in the Temperature Range 270-340 K at Pressures up to 20 MPa. // International Journal of Thermophysics. - 1994. - Vol. 15. - No. 4. - P. 591 - 601.
8. **P.J. Dunlop.** Viscosities of a series of gaseous fluorocarbons at 25°C. // The Journal of Chemical Physics. - 1994. - Vol. 100. - No. 4. - P. 3419 - 3151.
9. **M. Takahashi, N. Shibasaki-Kitakava, C. Yokoyama, S. Takahashi.** Gas Viscosity of Difluoromethane from 298.15 to 423.15 K and up to 10 MPa. // J. Chem. Eng. Data. - 1995. - Vol. 40. - P. 900 - 902.
10. **V.Z. Geller, M.E. Paulaitis, D.B. Bivens, A. Yokozeki.** Viscosities of HFC-32 and HFC-32/Lubricant Mixtures. // International Journal of Thermophysics. - 1996. - Vol. 17. - No. 1. - P. 75 - 83.
11. **L. Sun, M. Zhu, L. Han, Z. Lin.** Viscosity of Difluoromethane and Pentafluoroethane along the Saturation Line. // J. Chem. Eng. Data. - 1996. - Vol. 41. - No. 2. - P. 292 - 296.
12. **A. Laesecke, T.O.D. Luddecke, R.F. Hafer, D.J. Morris.** Viscosity Measurements of Ammonia, R32, and R134a. Vapor Buoyancy and Radial Acceleration in Capillary Viscometers. // International Journal of Thermophysics. - 1999. - Vol. 20. - No. 2. - P. 401 - 434.
13. **C.M.B.P. Oliveira, W.A. Wakeham.** Viscosity of R134a, R32 and R125 at Saturation. // International Journal of Thermophysics. - 1999. - Vol. 20. - No. 2. - P. 365 - 373.
14. **A.P. Froba, S. Will, A. Leipertz.** Saturated Liquid Viscosity and Surface Tension of Alternative Refrigerants. // International Journal of Thermophysics. - 2000. - Vol. 21. - No. 6. - P. 1225 - 1253.
15. **D.E. Diller, S.M. Peterson.** Measurements of the Viscosities of Saturated and Compressed Fluid 1-Chloro-1,2,2,2-Tetrafluoroethane (R124) and Pentafluoroethane (R125) at Temperatures Between 120 and 420 K. // International Journal of Thermophysics. - 1993. - Vol. 14. - No. 1. - P. 55 - 66.
16. **M.J. Assael, S.K. Polimatidou.** Measurements of the Viscosity of Liquid R22, R124, and R125 in the Temperature Range 273-333 K at Pressures up to 17 MPa. // International Journal of Thermophysics. - 1994. - Vol. 15. - No. 5. - P. 779 - 790.
17. **M.J. Assael, S.K. Polimatidou.** Measurements of the Viscosity of Refrigerants in the Vapor Phase. // International Journal of Thermophysics. - 1997. - Vol. 18. - No. 2. - P. 353 - 366.
18. **D. Ripple, D. Defibaugh.** Viscosity of the Saturated Liquid Phase of Three Fluorinated Ethanes: R152a, R143a, and R125. // J. Chem. Eng. Data. - 1997. - Vol. 42. - No. 2. - P. 360 - 364.
19. **M. Takahashi, N. Shibasaki-Kitakava, C. Yokoyama.** Viscosity of Gaseous HFC-125 (Pentafluoroethane) Under High Pressure. // International Journal of Thermophysics. - 1999. - Vol. 20. - No. 2. - P. 445 - 453.
20. **H.M.N.T. Avelino, J.M.N.A. Fareleira, C.M.B.P. Oliveira.** Viscosity of Compressed Liquid 1,1,1-Trifluoroethane (HFC-143a) and Pentafluoroethane (HFC-125). // J. Chem. Eng. Data. - 2006. - Vol. 51. - No. 5. - P. 1672 - 1677.

A.S. Boychuk

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

EQUATIONS FOR REFRIGERANTS R32 AND R125 VISCOSITY CALCULATION

Equations for alternative refrigerants R32 and R125 viscosity calculation expressed in terms of independent variables, such as temperature and density are worked out. Equation coefficients are determined by the least square technique according to the experimental data. The equations describe the viscosity at temperatures ranging from 232 to 423 K at a pressure up to 9.8 MPa for R32 and from 230 to 423 K at a pressure up to 10.1 MPa for R125. The composed equations accuracy is quite acceptable for engineering calculations.

Keywords: Refrigerants – R32 – R125 – Viscosity – Equations

REFERENCES

1. **I.F. Golubev.** Vjazkost' gazovigazovyhsmesej. - M.: Fizmatgiz, 1959. – 377 c.
2. **V.E. Ljuster-nik.** Uravnenievjazkostiszhatogogazoobraznogoizhidk ogovodoroda. // Teplofizikavysokih temperatur. – 1969. – T. 7. – № 2. – С. 367-369.
3. **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.
4. **A.A. Vasserman, A.Y. Kreizerova.** Optimizaciya chislacoefficientov uravneniyasostoyaniya. // Teplofizikavysokih temperatur. – 1978. – T. 6. – № 6. – С. 1185 – 1188.
5. **C.M.B.P. Oliveira, W.A. Wakeham.** The Viscosity of R32 and R125 at Saturation. // International Journal of Thermophysics. – 1993. – Vol. 14. – No. 6. – P. 1131 – 1143
6. **D. Ripple, O. Matar.** Viscosity of the Saturated Liquid Phase of Six Halogenated Compounds and Three Mixtures. // J. Chem. Eng. Data. – 1993. – Vol. 38. – P. 560 – 564.
7. **M.J. Assael, J.H. Dymond, S.K. Polimatidou.** Measurements of the Viscosity of R134a and R32 in the Temperature Range 270-340 K at Pressures up to 20 MPa. // International Journal of Thermophysics. – 1994. – Vol. 15. – No. 4. – P. 591 – 601.
8. **P.J. Dunlop.** Viscosities of a series of gaseous fluorocarbons at 25°C. // The Journal of Chemical Physics. – 1994. – Vol. 100. – No. 4. – P. 3419 – 3151.
9. **M. Takahashi, N. Shibasaki-Kitakava, C. Yokoyama, S. Takahashi.** Gas Viscosity of Difluoromethane from 298.15 to 423.15 K and up to 10 MPa. // J. Chem. Eng. Data. – 1995. – Vol. 40. – P. 900-902.
10. **V.Z. Geller, M.E. Paulaitis, D.B. Bivens, A. Yokozecki.** Viscosities of HFC-32 and HFC-32/Lubricant Mixtures. // International Journal of Thermophysics. – 1996. – Vol. 17. – No. 1. – P. 75–83.
11. **L. Sun, M. Zhu, L. Han, Z. Lin.** Viscosity of Difluoromethane and Pentafluoroethane along the Saturation Line. // J. Chem. Eng. Data. – 1996. – Vol. 41. – No. 2. – P. 292 – 296.
12. **A. Laesecke, T.O.D. Luddecke, R.F. Hafer, D.J. Morris.** Viscosity Measurements of Ammonia, R32, and R134a. Vapor Buoyancy and Radial Acceleration in Capillary Viscometers. // International Journal of Thermophysics. – 1999. – Vol. 20. – No. 2. – P. 401 – 434.
13. **C.M.B.P. Oliveira, W.A. Wakeham.** Viscosity of R134a, R32 and R125 at Saturation. // International Journal of Thermophysics. – 1999. – Vol. 20. – No. 2. – P. 365 – 373.
14. **A.P. Froba, S. Will, A. Leipertz.** Saturated Liquid Viscosity and Surface Tension of Alternative Refrigerants. // International Journal of Thermophysics. – 2000. – Vol. 21. – No. 6. – P. 1225 – 1253.
15. **D.E. Diller, S.M. Peterson.** Measurements of the Viscosities of Saturated and Compressed Fluid 1-Chloro-1,2,2,2-Tetrafluoroethane (R124) and Pentafluoroethane (R125) at Temperatures Between 120 and 420 K. // International Journal of Thermophysics. – 1993. – Vol. 14. – No. 1. – P. 55 – 66.
16. **M.J. Assael, S.K. Polimatidou.** Measurements of the Viscosity of Liquid R22, R124, and R125 in the Temperature Range 273-333 K at Pressures up to 17 MPa. // International Journal of Thermophysics. – 1994. – Vol. 15. – No. 5. – P. 779 – 790.
17. **M.J. Assael, S.K. Polimatidou.** Measurements of the Viscosity of Refrigerants in the Vapor Phase. // International Journal of Thermophysics. – 1997. – Vol. 18. – No. 2. – P. 353 – 366.
18. **D. Ripple, D. Defibaugh.** Viscosity of the Saturated Liquid Phase of Three Fluorinated Ethanes: R152a, R143a, and R125. // J. Chem. Eng. Data. – 1997. – Vol. 42. – No. 2. – P. 360 – 364.
19. **M. Takahashi, N. Shibasaki-Kitakava, C. Yokoyama.** Viscosity of Gaseous HFC-125 (Pentafluoroethane) Under High Pressure. // International Journal of Thermophysics. – 1999. – Vol. 20. – No. 2. – P. 445 – 453.
20. **H.M.N.T. Avelino, J.M.N.A. Fareleira, C.M.B.P. Oliveira.** Viscosity of Compressed Liquid 1,1,1-Trifluoroethane (HFC-143a) and Pentafluoroethane (HFC-125). // J. Chem. Eng. Data. – 2006. – Vol. 51. – No. 5. – P. 1672 – 1677.

Отримана в редакції 17.06.2014, прийнята до друку 19.06.2014