

УДК 536.22

## **Теплопроводность хладона 507А в газообразном состоянии\***

**О.И. Верб**

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

E-mail: gamma@itp.nsc.ru

Стационарным методом коаксиальных цилиндров исследована теплопроводность хладона 507А в газовом состоянии в области температур 315 ÷ 425 К и давлений 0,105 ÷ 1,855 МПа. Оцениваемые величины погрешностей измерения температуры, давления и теплопроводности составляют, соответственно, ± 0,05 К, ± 3,75 кПа и ± 1,5 – 2,5 %. Получена аппроксимационная зависимость для теплопроводности во всем исследованном интервале температур и давлений. Проведено сопоставление результатов с имеющимися в литературе данными.

**Ключевые слова:** теплопроводность, хладон, R 507А, метод коаксиальных цилиндров.

В настоящее время идет активный процесс замещения в промышленности фторхлоруглеводородов, используемых в качестве хладагентов, на фторуглеводороды, не содержащие атомов хлора, который, по современным представлениям, при попадании в атмосферу является причиной разрушения ее озонового слоя. Так, один из наиболее важных в производстве фреонов, содержащий хлор, R 12, во многих случаях уже заменен фреоном 134а. Фторуглеводороды R 143а, R 134а, R 125, а также их двойные и тройные смеси, рассматриваются как заменители хладон R 22 и R 502. В то же время имеющиеся в литературе данные по теплофизическим свойствам этих смесей, в том числе и по теплопроводности, необходимые для технологических и конструкторских расчетов, часто очень ограничены, либо отсутствуют вообще.

В настоящей работе исследована теплопроводность газовой фазы хладона 507А, представляющего собой азеотропную смесь фторзамещенных углеводородов этанового ряда: пентафторэтана C<sub>2</sub>F<sub>5</sub>H (R 125 — 50 % масс) и 1, 1, 1 — трифторэтана C<sub>2</sub>F<sub>3</sub>H<sub>3</sub> (R 143а — 50 % масс). Хладон изготовлен фирмой Du Pont de Nemours (Нидерланды). Хладон пожаробезопасен, обладает нулевым потенциалом истощения озонового слоя атмосферы и очень низким потенциалом глобального потепления. Измерения теплопроводности проведены стационарным методом коаксиальных цилиндров с погрешностью, не превышающей 2,5 %.

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 07-08-100295-а).

Подробное описание экспериментальной установки и методики измерений, а также анализ погрешностей приведены в [1, 2].

Экспериментальные значения теплопроводности пара хладона аппроксимированы предложенным ранее для практических расчетов простым уравнением

$$\lambda(T, p) = a_{00} + a_{10} \frac{T}{100} + a_{20} \frac{100}{T} + p \left( a_{11} \frac{T}{100} + a_{21} \frac{100}{T} \right) + p^2 \left( a_{12} \frac{T}{100} + a_{22} \frac{100}{T} \right), \quad (1)$$

где  $T$  — температура в К,  $p$  — давление в барах,  $\lambda$  — теплопроводность в Вт/(м·К). Коэффициенты аппроксимационного уравнения (1) и их дисперсии приведены в табл. 1.

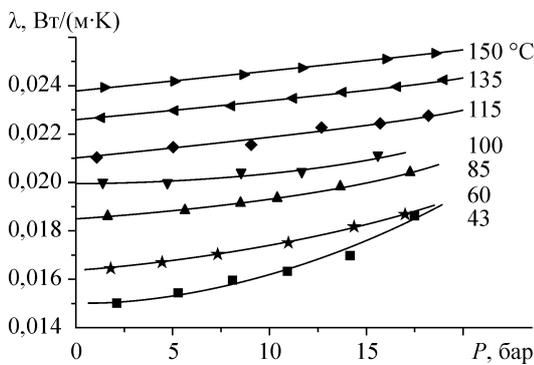
Таблица 1

Коэффициенты уравнения (1) и их дисперсии

$ij$	$a_{ij}$	$\sigma_{ij}$
00	$-2,5653 \cdot 10^{-2}$	$3,37 \cdot 10^{-3}$
01	$1,0252 \cdot 10^{-2}$	$4,58 \cdot 10^{-4}$
02	$2,6449 \cdot 10^{-2}$	$6,28 \cdot 10^{-3}$
11	$2,3366 \cdot 10^{-5}$	$1,46 \cdot 10^{-5}$
12	$-3,0256 \cdot 10^{-6}$	$7,16 \cdot 10^{-7}$
21	$-1,7966 \cdot 10^{-4}$	$2,11 \cdot 10^{-4}$
22	$5,7061 \cdot 10^{-5}$	$1,04 \cdot 10^{-5}$

На рис. 1 показаны экспериментальные и рассчитанные по уравнению (1) изотермы теплопроводности пара хладона 507А. Значения теплопроводности, полученные в эксперименте, приведены в табл. 2, а расхождение этих результатов с результатами расчета показано на рис. 2. Из рис. 2 видно, что предложенное аппроксимационное уравнение (1) описывает опытные данные с погрешностью, не превышающей погрешность эксперимента.

Полученные в настоящей работе величины теплопроводности пара сопоставлены с данными работы [3]. Для этого в уравнение (1) были подставлены значения параметров, измеренные при эксперименте авторами работы [3]. Рассчитанные таким образом значения сравнивались с экспериментальными значениями, полученными в [3]. Результаты сопоставления приведены на рис. 3, где  $\lambda_r$  — экспериментальные значения теплопроводности из работы [3],  $\lambda_B$  — значения теплопроводности, полученные указанным выше образом.



По результатам измерений, полученным в настоящей работе, рассчитана теплопроводность R 507A в газовой фазе при бесконечно малой плотности газа  $\lambda_0$ . Для этого изотермы теплопроводности экстраполированы

Рис. 1. Экспериментальные (точки) и рассчитанные по уравнению (1) (линии) значения теплопроводности R 507A в паровой фазе.

Таблица 2

Результаты измерений теплопроводности хладона 507А в паровой фазе

$t$ , °C	$P$ , бар	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$t$ , °C	$P$ , бар	$\lambda$ , Вт/(м·К)
39,44	2,12	0,01468	115,34	9,00	0,02159
43,94	5,34	0,01549	115,52	9,00	0,02159
43,93	5,34	0,01550	115,91	4,92	0,02155
43,83	8,11	0,01597	115,81	4,92	0,02157
43,87	8,11	0,01597	115,69	1,05	0,02112
43,72	10,85	0,01633	115,69	1,05	0,02113
43,78	10,85	0,01641	117,41	12,69	0,02240
42,29	14,11	0,01699	117,45	12,69	0,02240
60,56	4,45	0,01672	117,47	15,68	0,02264
60,87	7,30	0,01707	117,49	18,24	0,02292
60,94	7,30	0,01710	117,49	18,24	0,02293
61,04	10,91	0,01757	136,52	11,22	0,02361
61,12	10,91	0,01758	136,62	11,22	0,02362
62,95	14,39	0,01837	133,67	7,98	0,02303
62,83	17,03	0,01889	133,66	7,98	0,02304
62,86	17,03	0,01889	133,87	5,05	0,02282
64,70	1,79	0,01680	135,46	1,28	0,02273
64,67	1,79	0,01683	135,44	1,28	0,02274
83,75	1,63	0,01849	134,96	13,71	0,02371
83,75	1,63	0,01848	134,74	16,59	0,02396
79,58	5,57	0,01841	134,76	16,59	0,02390
79,69	5,57	0,01842	134,82	16,59	0,02399
79,81	5,57	0,01836	134,81	19,02	0,02423
78,20	8,43	0,01857	134,82	19,02	0,02422
78,14	8,43	0,01860	150,52	8,64	0,02455
77,94	10,31	0,01878	150,59	8,64	0,02455
78,14	10,31	0,01878	150,66	8,64	0,02454
85,73	13,63	0,01986	150,74	8,64	0,02453
85,82	13,63	0,01982	151,09	5,03	0,02427
85,96	17,28	0,02046	149,89	1,41	0,02391
85,99	17,28	0,02045	149,89	1,41	0,02392
98,71	8,53	0,02024	149,79	11,71	0,02471
98,87	8,53	0,02025	149,82	11,71	0,02471
98,93	8,53	0,02030	149,19	16,08	0,02500
99,29	4,72	0,01992	149,17	16,08	0,02502
99,62	4,72	0,01994	149,17	16,08	0,02505
104,10	1,35	0,02029	149,21	16,08	0,02504
99,00	11,65	0,02036	149,25	18,56	0,02525
99,32	11,65	0,02039	149,30	18,56	0,02528
99,65	15,61	0,02107			

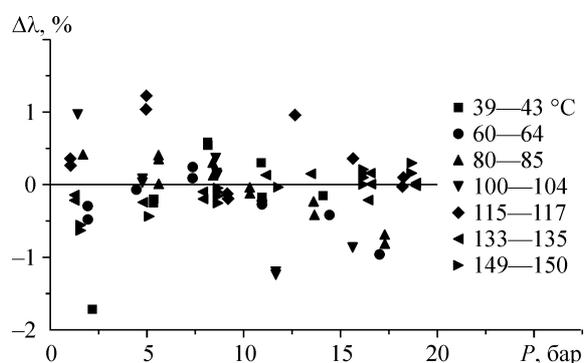


Рис. 2. Отклонения экспериментальных результатов по теплопроводности пара R 507А от рассчитанных по уравнению (1).

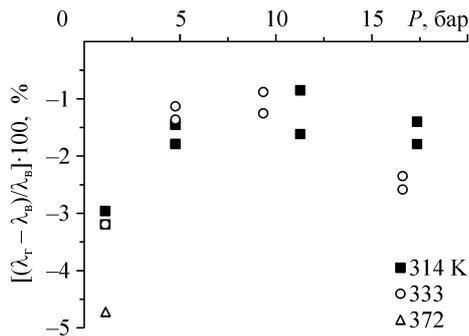


Рис. 3. Сопоставление результатов эксперимента по теплопроводности R 507A, полученных в настоящей работе и в работе [3].

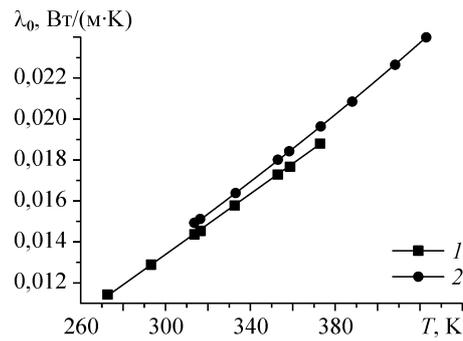


Рис. 4. Теплопроводность R 507A в газовой фазе при бесконечно малой плотности. 1 — данные работы [3], 2 — данные автора.

уравнением (1) на нулевое давление, а затем полученные значения  $\lambda_0$  аппроксимированы в исследованном интервале температур следующим уравнением:

$$\lambda_0 = -3,97 \cdot 10^{-3} + 4,3608 \cdot 10^{-5} T + 5,3058 \cdot 10^{-8} T^2. \quad (2)$$

Полученные значения  $\lambda_0$  и значения, рассчитанные по уравнению, предложенному в [3], приведены на рис. 4.

В работе [4] методом нагретой нити измерена теплопроводность жидкости и пара ряда хладонов, в том числе R 507A. Приведены уравнения для расчета теплопроводности жидкости и пара в состоянии насыщения. Там, где измерения в работе [4] и в настоящей работе выполнены в одной и той же области параметров, проведено сопоставление полученных результатов. Для этого с помощью уравнения, предложенного в [4], с использованием данных для линии сосуществования жидкость–пар, приведенных в [5], рассчитана теплопроводность насыщенного пара  $\lambda_s$ . Подстановкой тех же параметров для линии равновесия в уравнение (1) настоящей работы рассчитана теплопроводность  $\lambda_B$ . В табл. 3 приведена величина расхождения  $\delta\lambda = [(\lambda_s - \lambda_B) / \lambda_B] \cdot 100, \%$ .

Таблица 3  
Расхождение результатов по теплопроводности насыщенного пара, полученных в настоящей работе и работе [4]

$t, ^\circ\text{C}$	30	40	50	60
$\delta\lambda, \%$	2,3	2,7	3,4	4,5

Таким образом, в настоящей работе получены данные по теплопроводности R 507A в газовой фазе, существенно расширяющие температурный интервал области параметров для этой величины. Определена температурная зависимость идеальногазовой теплопроводности в исследованном температурном интервале. Полученные значения совпадают в пределах погрешностей эксперимента и обработки с имеющимися литературными данными.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верба О.И., Груздев В.А. Теплопроводность гептафторпропана HFC 227ea // Теплофизика и аэромеханика. 2002. Т. 9, № 3. С. 467–476.
2. Верба О.И. Теплопроводность хладона 404 А в газообразном состоянии // Теплофизика и аэромеханика. 2007. Т. 14, № 2. С. 169–173.
3. Geller V.Z., Nemzer B.V., Cheremnykh U.V. Thermal Conductivity of the Refrigerant Mixtures R 404A, R 407C, R 410A, and R 507A // Inter. J. of Thermophysics. 2001. Vol. 22, No. 4. P. 1035–1043.
4. Sprindler K., Hoffmann N., Sohns J., Hahne E. Thermal Conductivity of binary and ternary refrigerant mixtures: experimental results and correlations // High Temp. High Pressures. 1997. Vol. 29, P. 659–664.
5. Lemmon E.W. Pseudo-Pure Fluid Equations of State for the Refrigerant R-410A, R-404A, R-507A, and R-407C // Inter. J. of Thermophysics. 2003. Vol. 24, No. 4. P. 991–1006.

Статья поступила в редакцию 21 июня 2010 г.