

УДК 536.22

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ХЛАДОНА 404А В ГАЗООБРАЗНОМ СОСТОЯНИИ*

О.И. ВЕРБА

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

Методом коаксиальных цилиндров исследована теплопроводность хладона 404А в газовом состоянии в области параметров 309–422 К и 0,13–0,184 МПа. Оцениваемые величины погрешностей измерения температуры, давления и теплопроводности составляют соответственно $\pm 0,05$ К, $\pm 3,75$ кПа и $\pm 1,5$ – $2,5$ %. Получена аппроксимационная зависимость для теплопроводности во всем исследованном интервале температур и давлений. Проведено сопоставление результатов с имеющимися в литературе данными.

В настоящей работе исследована теплопроводность газовой фазы хладона 404А, который применяется как альтернативный озонобезопасный заменитель фреонов, используемых до настоящего времени в промышленности. Поскольку внедрение фреоновых смесей в качестве заменителей традиционных фреонов началось сравнительно недавно, свойства их, в частности, теплофизические, изучены слабо. Для смеси, исследуемой в данной работе, автором была найдена только одна статья, где приводятся результаты исследования теплопроводности в узком диапазоне температур. В качестве объекта исследования использовалась смесь фторзамещенных фреонов этанового ряда: пентафторэтана C_2F_5H (R 125), 1, 1, 1, 2-тетрафторэтана $C_2F_4H_2$ (R 134a) и 1, 1, 1-трифторэтана $C_2F_3H_3$ (R 143a), изготовленная фирмой Du Pont de Nemours (Nederland), следующего состава: R 125 (44 % масс.) + R 134a (4 % масс.) + R 143a (52 % масс.).

Измерения были выполнены стационарным методом коаксиальных цилиндров с погрешностью, не превышающей 2,5 %. Подробное описание экспериментальной установки и методики измерений, а также алгоритм расчета теплопроводности по результатам измерений и анализ погрешностей приведены в [1, 2].

В связи с тем, что описанная в [1, 2] установка была создана для исследования теплопроводности чистых веществ, при переходе на работу со смесями фреонов в нее был внесен ряд изменений. Измерительная ячейка через нуль-индикатор перепада давления мембранного типа была соединена с системой измерения давления газа, уравнивающего давление исследуемой смеси, что позволило непосредственно измерять давление в измерительной ячейке. Измерения проводились пружинным манометром класса 0,15. Система заполнения измерительного объема была переделана таким образом, чтобы, во-первых, избежать разгонки смеси по фракциям при заполнении, во-вторых, заполнять измерительную ячейку количеством исследуемого вещества до давления, запланированного в данном эксперименте.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 04-02-16355).

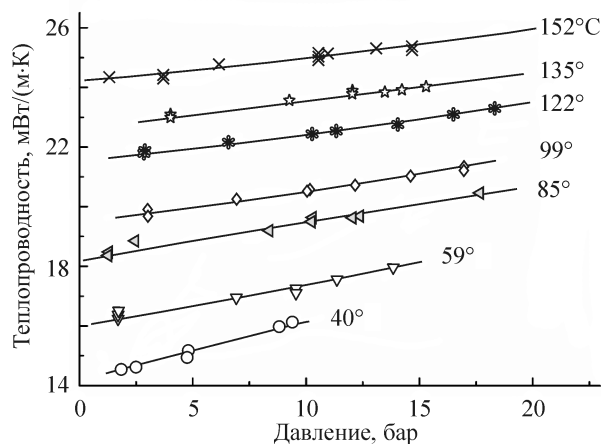


Рис. 1. Экспериментальные (символы) и рассчитанные по уравнению (1) (линии) значения теплопроводности паровой фазы хладона 404 А.

Измерения проводились с поддержанием параметров образца, близким к изотермам. Количество точек на изотерме колебалось от 5 до 15. Нестабильность теплового режима измерительной ячейки в момент измерения не превышала $3 \div 5 \cdot 10^{-5}$ К/с; при первичной обработке результатов измерений на нее вводилась поправка.

Экспериментальные значения теплопроводности хладона аппроксимированы уравнением

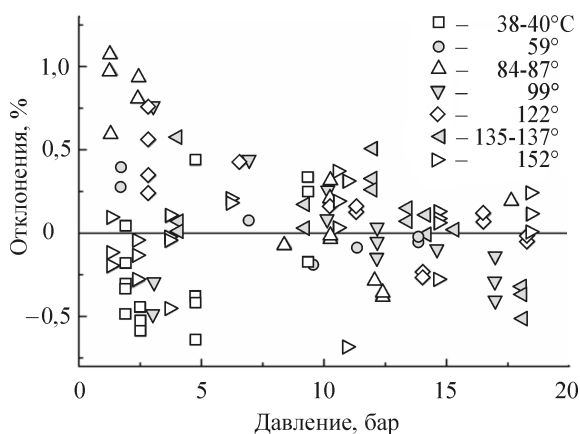
$$\lambda_{\text{cal}}(T, p) = a_0 + a_{10} \frac{T}{100} + a_{20} \frac{100}{T} + p \left(a_{11} \frac{T}{100} + a_{21} \frac{100}{T} \right) + p^2 \left(a_{12} \frac{T}{100} + a_{22} \frac{100}{T} \right), \quad (1)$$

где T — в Кельвинах, p — в барах, λ — в Вт/(м·К).

Коэффициенты расчетного уравнения (1):

$$a_0 = -2,5896 \cdot 10^{-2}, \quad a_{10} = 1,0506 \cdot 10^{-2}, \quad a_{11} = -3,66066 \cdot 10^{-5}, \quad a_{12} = 8,25 \cdot 10^{-7}, \quad a_{20} = 2,3159 \cdot 10^{-2}, \quad a_{21} = 8,45 \cdot 10^{-4}, \quad a_{22} = -6,54549 \cdot 10^{-6}.$$

На рис. 1 показаны экспериментальные и рассчитанные по уравнению (1) изотермы теплопроводности пара хладона 404А. Значения теплопроводности, полученные в эксперименте, и расхождение этих результатов с результатами расчета по уравнению (1), приведены на рис. 2 и в таблице.



Для сопоставления полученных в настоящей работе значений теплопроводности и данных о теплопроводности пара, приведенных в [3], по уравнению (1) были рассчитаны величины величины λ_c для параметров, при которых выпол-

Рис. 2. Отклонение экспериментальных результатов по теплопроводности хладона 404А в газовой фазе от рассчитанных по уравнению (1).

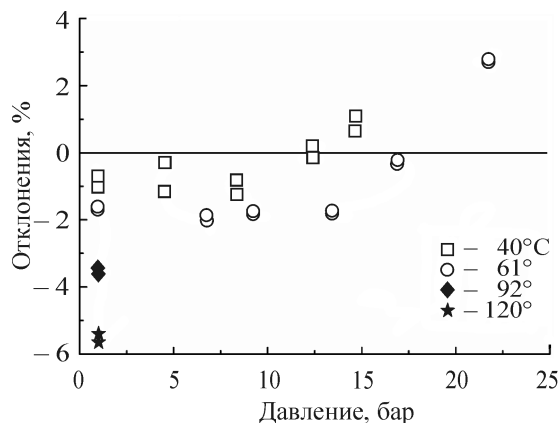
Результаты измерений теплопроводности хладона 404А в паровой фазе

p , бар	T , К	t , °С	λ_{ex} , МВт/(м·К)	$(\lambda_{\text{ex}} - \lambda_c)/\lambda_c \cdot 100$, %
1	2	3	4	5
1,92	311,32	38,17	14,511	-0,282
1,92	311,48	38,33	14,541	-0,165
1,92	311,54	38,39	14,578	0,062
2,52	311,88	38,73	14,629	-0,422
2,52	311,93	38,78	14,622	-0,499
4,77	313,19	40,04	15,219	0,455
4,77	313,19	40,04	15,056	-0,620
4,76	313,33	40,18	15,105	-0,356
9,38	316,54	43,39	16,180	0,266
9,38	316,56	43,41	16,114	-0,149
1,72	332,45	59,30	16,272	0,296
1,72	332,45	59,30	16,292	0,413
6,94	332,35	59,20	16,958	0,086
6,94	332,36	59,21	16,959	0,089
9,57	332,18	59,03	17,284	-0,168
11,38	332,18	59,03	17,570	-0,068
13,86	332,39	59,24	17,968	-0,033
13,86	332,41	59,26	17,977	-0,011
1,30	357,49	84,34	18,388	0,618
2,45	360,82	87,67	18,838	0,817
8,39	358,65	85,50	19,184	-0,047
8,39	358,70	85,55	19,185	-0,063
10,27	360,51	87,36	19,615	0,215
10,27	360,37	87,22	19,627	0,331
10,27	360,18	87,03	19,545	-0,010
10,27	360,11	86,96	19,543	-0,005
12,39	359,43	86,28	19,693	-0,359
12,39	359,34	86,19	19,691	-0,334
12,07	358,92	85,77	19,629	-0,269
17,66	358,53	85,38	20,467	0,206
17,66	358,51	85,36	20,466	0,211
3,03	372,65	99,50	19,698	-0,268
3,03	372,73	99,58	19,666	-0,466
6,95	372,77	99,62	20,262	0,417
6,95	372,79	99,64	20,263	0,466
10,14	372,70	99,55	20,539	0,088
10,14	372,67	99,52	20,574	0,273
10,14	372,65	99,50	20,576	0,288
10,11	372,38	99,23	20,511	0,093
12,17	372,43	99,28	20,714	-0,135
12,17	372,44	99,29	20,737	-0,034
12,17	372,46	99,31	20,754	0,043
14,61	372,49	99,34	21,038	-0,081
16,97	372,43	99,28	21,301	-0,281
16,97	372,43	99,28	21,334	-0,126
2,84	396,04	122,89	21,842	0,363
2,84	396,10	122,95	21,824	0,257
6,57	396,04	122,89	22,174	0,448
10,26	396,09	122,94	22,471	0,178
10,26	396,08	122,93	22,471	0,178
11,32	395,97	122,82	22,563	0,142
14,04	395,82	122,67	22,767	-0,215
14,04	395,84	122,69	22,760	-0,259

1	2	3	4	5
16,50	395,65	122,50	23,112	0,082
18,30	395,42	122,27	23,292	-0,034
18,30	395,39	122,24	23,299	-0,009
4,04	408,65	135,50	22,966	0,030
4,04	408,65	135,50	22,981	0,096
4,04	408,66	135,51	23,098	0,601
9,26	410,56	137,41	23,551	0,042
9,26	410,49	137,34	23,580	0,191
12,03	410,28	137,13	23,845	0,282
12,03	410,25	137,10	23,855	0,332
13,46	408,96	135,81	23,853	0,159
13,46	408,99	135,84	23,838	0,084
14,22	409,03	135,88	23,908	0,025
14,22	409,03	135,88	23,900	-0,008
15,31	409,02	135,87	24,027	0,029
18,15	408,96	135,81	24,261	-0,345
18,15	408,95	135,80	24,268	-0,312
1,32	426,03	152,88	24,381	0,111
1,32	426,06	152,91	24,332	-0,099
1,32	426,09	152,94	24,315	-0,181
2,36	425,30	152,15	24,312	-0,115
2,36	425,46	152,31	24,348	-0,025
3,70	424,85	151,70	24,371	-0,008
3,70	424,88	151,73	24,405	0,119
3,70	424,95	151,80	24,374	-0,033
6,19	427,00	153,85	24,773	0,223
6,19	427,08	153,93	24,774	0,202
6,19	427,15	154,00	24,779	0,194
10,55	426,61	153,46	25,023	0,048
10,55	426,66	153,51	25,067	0,204
10,94	426,84	153,69	25,146	0,327
13,08	428,94	155,79	25,307	-0,488
13,08	428,90	155,75	25,306	-0,476
14,67	425,81	152,66	25,360	0,146
14,67	426,14	152,99	25,377	0,103
14,67	426,24	153,09	25,379	0,079
18,41	426,80	153,65	25,841	0,128
18,41	426,65	153,50	25,801	0,019

нены измерения теплопроводности в работе [3]. Результаты этого сопоставления $\delta\lambda = \{(\lambda_c - \lambda[3]_{\text{ex}})/\lambda_c\} \cdot 100$, % приведены на рис. 3. На рисунке видно, что при низких давлениях нами получены более высокие, чем в [3], значения теплопроводности пара, причем расхождение увеличивается с ростом температуры. При повышенных давлениях это расхождение меняет знак, оставаясь примерно таким же по величине. Сказать что-либо о причине расхождения значений теплопроводности при давлениях 1 бар и повышенных температурах на основании имеющейся информации трудно.

Рис. 3. Сопоставление полученных результатов по теплопроводности пара хладона 404 А с данными из работы [3]. Отклонения $\delta\lambda = \{(\lambda_c - \lambda[3]_{\text{ex}})/\lambda_c\} \cdot 100$, %.



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., Груздев В.А.** Теплопроводность гексафторпропана HFC 236ea // Теплофизика и аэромеханика. — 2003. — Т. 10, № 2. — С. 237–244.
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. Thermophysics. — 2001. — Vol. 22, No. 4. — P. 1035–1043.

Статья поступила в редакцию 8 февраля 2007 г.