

УДК 536.23

## Теплопроводность смеси R-410A в паровой фазе

О.И. Верба, Е.П. Расчектаева, С.В. Станкус

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

E-mail: stankus@itp.nsc.ru

Исследована теплопроводность смеси R-410A в интервале температур 314–428 К и давлений 0,1–2,0 МПа. Измерения выполнялись стационарным методом коаксиальных цилиндров. Погрешность экспериментальных данных по теплопроводности составляла 1,5–2,5 %, погрешности измерения температуры и давления не превышали 0,05 К и 4 кПа соответственно. Получено аппроксимирующее уравнение для теплопроводности в зависимости от давления и температуры. Рассчитана теплопроводность на линии конденсации и в идеальном газе.

**Ключевые слова:** теплопроводность, хладагент, R-410A, паровая фаза.

Хладагент R-410A представляет собой квазиазеотропную двухкомпонентную смесь 50 масс. % R-32 и 50 масс. % R-125, которая относится к классу озонобезопасных соединений, так как оба компонента не содержат хлор. R-410A является долгосрочной, энергоэффективной заменой для фреона R-22, производство и применение которого ограничены действием Монреальского протокола. Смесь используется повсеместно в новых системах бытового и коммерческого кондиционирования и охлаждения, а также применяется для заправки в тепловых насосах. Хладагент R-410A нашел широкое применение, однако его теплофизические свойства исследованы недостаточно подробно. В настоящей работе экспериментально исследуется теплопроводность  $\lambda$  смеси R-410A в паровой фазе, анализируется поведение теплопроводности в идеальном газе и на линии конденсации в зависимости от температуры.

Измерения теплопроводности смеси выполнялись стационарным методом коаксиальных цилиндров в относительном варианте. Работы [1–3] содержат подробное описание методики измерений и проведения эксперимента. Два вертикально расположенных соосных никелевых цилиндра образуют кольцевой зазор. Длина внешнего цилиндра — 140 мм, внутреннего — 101,3 мм. Ширина зазора между цилиндрами равнялась  $0,366 \pm 0,005$  мм. Абсолютные температуры цилиндров и перепад температуры между ними измерялись медь-константановыми термопарами, которые изготавливались индивидуально и градуировались путем сравнения с показаниями образцового платинового термометра сопротивления. Погрешность измерения температуры составляла 0,05 К. Давление в экспериментах определялось манометрами с погрешностью не более 4 кПа.

Теплопроводность рассчитывалась по известной формуле для кольцевого зазора с введением ряда поправок [1]:

$$\lambda = A \left[ \frac{Q}{\Delta T_{\text{изм}}} (1 + \psi_{\text{в}} + \psi_{\text{н}}) - (q_{\text{р}} + q_{\text{к}}) \right], \quad (1)$$

где  $A = \frac{\ln(R_1/R)}{2\pi L(1+\psi_T)}$ ,  $A$  — постоянная прибора,  $R$  и  $L$  — радиус и длина внутреннего цилиндра,  $R_1$  — радиус внутренней поверхности внешнего цилиндра,  $Q$  — радиальный тепловой поток,  $\Delta T_{\text{изм}} = T_1 - T_2$  — температурный перепад в слое исследуемого вещества,  $T_1$  и  $T_2$  — температуры внутренней и внешней поверхности цилиндрического слоя исследуемого вещества,  $\psi_T$ ,  $\psi_B$ ,  $\psi_H$ ,  $q_p$  и  $q_k$  — поправки в расчетную формулу. Поправки  $\psi_B$  и  $\psi_H$  учитывают влияние на  $\Delta T_{\text{изм}}$  тепловых потоков во внутреннем и внешнем цилиндрах

Таблица 1

Результаты измерений теплопроводности смеси R-410A в паровой фазе

$T$ , К	$p$ , МПа	$\lambda$ , мВт/(м·К)	$T$ , К	$p$ , МПа	$\lambda$ , мВт/(м·К)
314,99	0,181	14,24	387,10	0,791	20,52
314,97	0,181	14,25	387,08	0,791	20,57
314,82	0,508	14,64	386,97	1,289	20,93
314,81	0,508	14,59	386,96	1,289	21,01
314,63	0,824	15,13	384,19	0,705	20,21
315,39	0,996	15,34	384,22	0,705	20,24
316,65	1,457	16,33	387,37	0,348	20,19
320,14	1,666	17,00	387,38	0,348	20,21
333,93	0,154	15,57	384,26	1,639	20,99
333,92	0,154	15,59	384,12	1,639	21,03
333,76	0,517	15,95	383,86	1,919	21,32
333,74	0,517	16,00	383,82	1,919	21,28
333,63	0,871	16,42	394,61	1,927	21,90
333,74	1,207	16,90	394,57	1,927	22,01
333,81	1,207	16,90	394,58	1,634	21,78
334,20	1,526	17,40	394,56	1,634	21,79
334,00	1,755	17,88	395,02	1,411	21,50
333,97	1,755	17,86	394,98	1,411	21,53
333,87	1,999	18,38	394,90	1,029	21,17
333,89	1,999	18,41	394,81	1,029	21,26
357,73	0,199	17,58	394,21	0,742	20,97
357,63	0,199	17,58	394,28	0,742	21,01
357,63	0,599	18,00	394,51	0,421	20,76
357,74	0,599	18,02	394,53	0,421	20,76
355,03	0,884	18,05	408,78	0,138	21,76
355,01	0,884	18,07	410,66	0,521	22,12
354,76	1,398	18,67	410,65	0,521	22,14
355,72	1,556	18,97	410,64	0,768	22,29
355,75	1,556	18,93	410,63	0,768	22,35
355,95	1,788	19,27	410,43	1,109	22,48
355,97	1,788	19,27	410,46	1,109	22,56
371,31	0,245	18,90	410,62	1,317	22,65
371,03	0,574	19,09	405,35	1,635	22,44
371,03	0,574	19,08	405,28	1,635	22,51
371,04	0,868	19,24	405,49	1,930	22,74
371,05	0,868	19,32	405,69	1,930	22,72
371,09	1,115	19,52	427,48	1,926	24,50
371,12	1,115	19,54	427,55	1,926	24,52
371,72	1,365	19,84	427,70	1,620	24,30
371,66	1,365	19,83	427,73	1,620	24,30
371,56	1,739	20,22	425,73	1,333	23,92
371,56	1,739	20,23	425,68	1,333	24,00
371,58	1,885	20,43	425,74	1,038	23,75
371,68	1,855	20,37	425,76	1,038	23,78
388,23	0,140	20,17	425,89	0,755	23,57
388,32	0,140	20,09	422,18	0,443	23,06
388,36	0,507	20,43	422,21	0,443	23,09
388,41	0,507	20,43	422,35	0,128	22,84
386,08	0,602	20,26	422,35	0,128	22,85

Таблица 2

Коэффициенты уравнения (1)

Индексы коэффициента, $ij$	00	10	20	11	21	12	22
Значение коэффициента, $a_{ij}$	-25,532	10,063	24,908	-0,0578	3,577	-0,1369	2,388

и расположения спаев дифференциальной термопары,  $(q_p + q_k)$  — поправка на теплообмен излучением и отвод тепла по элементам подвески и центровки внутреннего цилиндра,  $\psi_T$  — поправка на потоки тепла с торцов внутреннего цилиндра. Все уравнения для расчета поправок приведены в работе [1]. Установка тарировалась на аргоне чистотой 99,998 об. %. Оцениваемая погрешность измерений теплопроводности 1,5–2,5 % была подтверждена в экспериментах с хорошо исследованным хладагентом R-134a [4].

Смесь R-410A исследовалась в интервале температур 314–428 К и давлений 0,1–2,0 МПа вдоль восьми квазиизотерм. В табл. 1 приведены экспериментальные значения теплопроводности. Обработка первичных данных выполнялась посредством их аппроксимации эмпирической зависимостью [1, 2]:

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

где  $T$  — температура в градусах Кельвина,  $p$  — давление в МПа,  $\lambda$  — в мВт/(м·К); коэффициенты уравнения  $a_{ij}$  приведены в табл. 2. Среднеквадратичное отклонение полученных экспериментальных значений от сглаженных по формуле (2) не превышает 0,3 %.

На рис. 1 представлены экспериментальные данные, приведенные к одинаковым температурам (изотермам), и сглаженные зависимостью (2) значения. На рисунке видно, что теплопроводность газообразного R-410A на изотермах практически линейно увеличивается с ростом давления.

Значения теплопроводности R-410A в газовой фазе, полученные в настоящей работе, сравнивались с результатами измерений [5]. Эксперименты в работе [5] выполнялись стационарным методом нагретой нити с погрешностью 1,5 %. Измерения были проведены на четырех изотермах в интервалах температур 274–333 К и давлений 0,1–3,7 МПа,

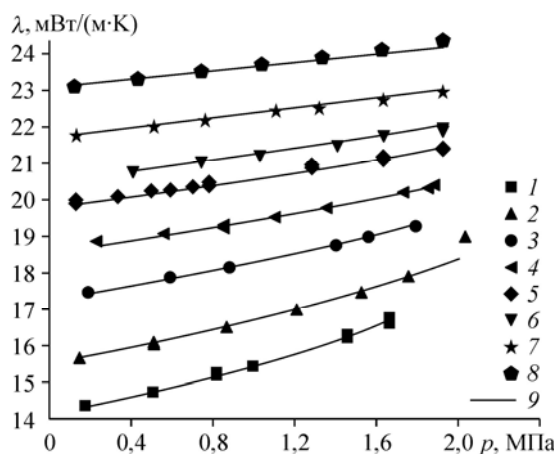


Рис. 1. Изотермы теплопроводности пара смеси R-410A.

Символы — экспериментальные данные; изотермы:  $T = 316$  (1), 334 (2), 356 (3), 371 (4), 386 (5), 395 (6), 409 (7), 425 (8); 9 — уравнение (2).

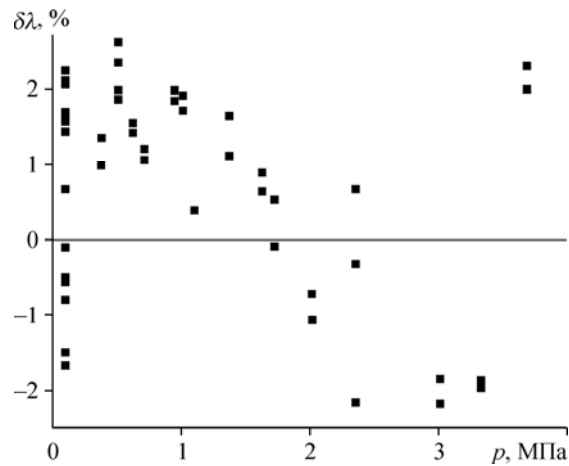


Рис. 2. Относительные отклонения теплопроводности  $\delta\lambda = 100 \cdot (\lambda_1 - \lambda) / \lambda$  (%) хладагента R-410A [5] от результатов данного исследования.

при атмосферном давлении была исследована температурная зависимость теплопроводности в интервале от 255 до 410 К. Сравнение результатов представленной работы и работы [5] приведено на рис. 2 ( $\lambda_1$  — данные работы [5]). Как видно, в пересекающихся интервалах измерений данные согласуются в пределах суммарной погрешности измерений.

Для смеси R-410A теплопроводность на линии конденсации  $\lambda_d$  и в идеально-газовом состоянии  $\lambda_0$  (при  $p_0 = 0,101325$  МПа) были определены из обобщающего уравнения (2). Данные по давлению пара на линии конденсации были взяты из работ [6, 7]. Зависимости  $\lambda_d(T)$  и  $\lambda_0(T)$  хорошо описываются уравнениями

$$\lambda_d = b_1 + b_2 \cdot T + b_3 \cdot T^2, \quad (3)$$

$$\lambda_0 = c_1 + c_2 \cdot T + c_3 / T, \quad (4)$$

где  $b_1 = 85,7099$ ,  $b_2 = -0,62837$ ,  $b_3 = 13,20 \cdot 10^{-4}$ ,  $c_1 = -25,532$ ,  $c_2 = 0,10056$ ,  $c_3 = 2529,5$ .

На рис. 3 приведено сопоставление данных по теплопроводности на линии конденсации и в идеально-газовом состоянии, полученных в настоящей работе и в работе [5].

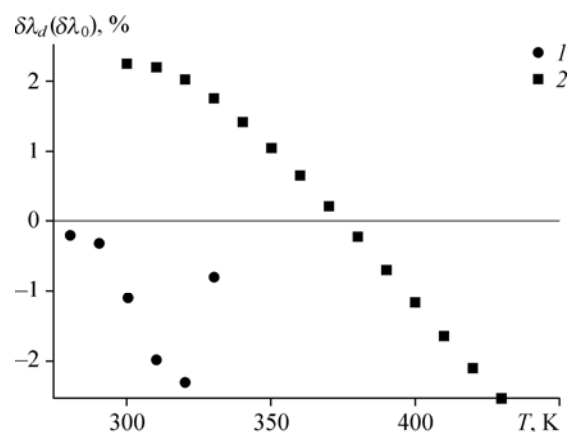


Рис. 3. Относительные отклонения значений  $\lambda_d$  и  $\lambda_0$ , полученных в работе [5] и в данном исследовании.

1 — теплопроводность на линии конденсации, 2 — идеально-газовая теплопроводность.

Отклонения рассчитанных значений  $\lambda_d$  и  $\lambda_0$  от результатов работы [5] составляют 0,2–2 % и 0,1–2,5 % соответственно, и, следовательно, находятся в пределах оцениваемых погрешностей.

### Заключение

Таким образом, получены новые экспериментальные данные по теплопроводности хладагента R-410A в паровой фазе в интервале температур 314–428 К и давлений 0,1–2,0 МПа и оценены их погрешности. Установлено, что аппроксимирующее уравнение (2) описывает теплопроводность R-410A в широкой области параметров состояния: от идеально-газового до линии конденсации.

### Список литературы

1. **Верба О.И., Груздев В.А.** Теплопроводность гептафторпропана HFC-227ea // Теплофизика и аэромеханика. 2002. Т. 9, № 3. С. 467.
2. **Верба О.И., Расчектаева Е.П., Станкус С.В.** Экспериментальное исследование теплопроводности хладагента R-407C в паровой фазе // Теплофизика высоких температур. 2012. Т. 50, № 2. С. 218–221.
3. **Верба О.И., Расчектаева Е.П., Станкус С.В.** Экспериментальное исследование теплопроводности хладагента R-406A в паровой фазе // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52, № 1. С. 145–147.
4. **Куйбина Е.П.** Теплопроводность хладагента R-134a в паровой фазе // Сб. тр. XVI Междун. научн.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии СТТ 2010». В 3 т. Т. 3. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет. 2010. 188 с.
5. **Geller V.Z., Nemzer B.V., Cheremnykh U.V.** Thermal conductivity of the refrigerant mixtures R 404A, R 407 C, R 410A, and R 507C // Inter. J. Thermophysics. 2001. Vol. 22, No. 4. P. 1035–1043.
6. **Lemmon E.W.** Pseudo-pure fluid equations of state for the refrigerant blends R-410A, R-404A, R-507A, and R-407C // Inter. J. Thermophysics. 2003. Vol. 24, No. 4. P. 991–1006.
7. **Lemmon E.W., McLinden M.O., Huber M.L.** NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP. Version 8.0. Standard Reference Data Program. Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology, 2002.

*Статья поступила в редакцию 17 марта 2016 г.,  
после доработки — 8 апреля 2016 г.*