



Общероссийский математический портал

О. И. Верба, Е. П. Расчектаева, С. В. Станкус, Экспериментальное исследование теплопроводности хладагента R-407C в паровой фазе, *TBT*, 2012, том 50, выпуск 2, 218–221

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением  
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 34.239.153.44

3 ноября 2024 г., 01:16:05



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ  
ХЛАДАГЕНТА R-407C В ПАРОВОЙ ФАЗЕ

© 2012 г. О. И. Верба, Е. П. Расчектаева, С. В. Станкус

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

Поступила в редакцию 14.01.2011 г.

Теплопроводность газообразного хладагента R-407C исследовалась методом коаксиальных цилиндров в интервале температур 303–425 К и давлений 0.1–2.1 МПа. Погрешность экспериментальных данных по теплопроводности составляла 1.5–2.5%, по температуре – 0.05 К, давлению – не более 4 кПа. Получена аппроксимирующая зависимость теплопроводности от давления и температуры. Рассчитана теплопроводность на линии конденсации и в идеально-газовом состоянии. Проведено сравнение полученных и литературных данных.

## ВВЕДЕНИЕ

Хладагент R-407C является перспективным озонобезопасным заменителем широко используемому рабочему веществу R-22 и представляет собой зеотропную смесь 23 мас. % дифторметана  $\text{CH}_2\text{F}_2$  (R-32), 25 мас. % пентафторэтана  $\text{C}_2\text{HF}_5$  (R-125) и 52 мас. % 1,1,1,2-тетрафторэтана  $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$  (R-134a). Она предназначена для ретрофита в холодильных системах и системах кондиционирования воздуха малых и средних размеров. Несмотря на широкое применение, теплофизические свойства этого хладагента изучены недостаточно подробно, а проведение точных научных и инженерных расчетов требует достоверных данных. Целью данной работы являлось экспериментальное исследование теплопроводности  $\lambda$  хладагента R-407C в паровой фазе и определение температурной зависимости  $\lambda$  в идеально-газовом состоянии.

МЕТОДИКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ  
ТЕХНИКА

Измерения теплопроводности были выполнены стационарным методом коаксиальных цилиндров. Подробно методика измерений и экспериментальная техника описаны в [1]. Измерительная ячейка состояла из двух вертикально расположенных соосных никелевых цилиндров: внешний – длиной 140 мм, внутренний – 101.3 мм. Ширина кольцевого зазора между цилиндрами составляла  $0.366 \pm 0.005$  мм. Абсолютные температуры цилиндров и температурный перепад между ними измерялись медь-константановыми термопарами. Данная установка отличается от аналогов тем, что внутри измерительной ячейки не предусмотрены охранные нагреватели и другие устройства, предназначенные для компенсации утечек тепла с торцов внутреннего цилиндра и выравнивания температурного поля по его длине. Влияние свобод-

ных торцов в работе учитывалось введением поправок [1]. Тарировка установки проводилась на аргоне чистотой 99.998 об. %. Расхождение со справочными данными не превышало 1%. Перед началом эксперимента установка вакуумировалась до давления  $(2-3) \times 10^{-2}$  Тор. Для того чтобы избежать изменения в составе смеси, заполнение измерительной ячейки происходило из жидкой фазы. Погрешность экспериментальных данных по теплопроводности составляла 1.5–2.5%, по температуре – 0.05 К, давлению – не более 4 кПа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследовался хладагент R-407C производства Solvay Fluor (Milano, Italy). Предварительно смесь подвергалась очистке от воздуха и летучих примесей замораживанием образца жидким азотом с последующей откачкой до давления  $3 \times 10^{-2}$  Тор. Теплопроводность газообразного R-407C была измерена в интервале температур 303–425 К и давлений 0.1–2.1 МПа вдоль 9 квазиизотерм. Результаты экспериментов приведены в табл. 1. Первичные данные обрабатывались эмпирической зависимостью от температуры и давления [1]

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

где  $T$  – температура в К,  $p$  – давление в МПа,  $\lambda$  – в мВт/(м К). Параметры уравнения  $a_{ij}$  приведены в табл. 2. На рис. 1 представлены экспериментальные данные, приведенные к постоянным температурам (изотермам), и результаты аппроксимации по уравнению (1). Среднеквадратичное отклонение полученных экспериментальных значений от сглаженных по (1) не превышает 0.3%. Из рис. 1 видно, что теплопроводность газообразного

Таблица 1. Результаты измерений теплопроводности хладагента R-407C в паровой фазе

$T$ , К	$p$ , МПа	$\lambda$ , мВт/(м К)	$T$ , К	$p$ , МПа	$\lambda$ , мВт/(м К)
303.90	0.1055	13.31	364.23	1.5461	19.45
304.05	0.1055	13.30	364.17	1.5461	19.51
306.89	0.3543	14.07	363.65	1.7142	19.61
306.96	0.3543	14.06	363.30	2.0380	20.17
306.48	0.5563	14.12	377.37	0.1211	18.97
306.32	0.7548	14.44	377.44	0.1211	18.98
306.55	0.8838	14.75	377.04	0.3417	19.11
306.60	0.8838	14.74	377.10	0.3417	19.27
320.35	0.1189	14.51	377.97	0.6298	19.47
320.11	0.3304	14.71	376.92	0.7322	19.53
320.16	0.3304	14.69	377.73	0.9099	19.67
318.15	0.5545	14.99	377.77	0.9099	19.74
318.19	0.5545	15.00	377.19	1.1150	19.88
317.98	0.7516	15.22	379.31	1.4299	20.35
317.99	0.7516	15.30	379.42	1.7211	20.75
318.02	0.8909	15.54	377.37	1.9838	20.99
317.97	0.8909	15.52	395.03	0.1231	20.53
316.33	1.2372	15.90	394.35	0.3515	20.53
317.84	1.4594	16.62	394.27	0.6488	20.87
317.87	1.6496	17.14	394.35	0.9190	21.07
317.91	1.6496	17.04	394.95	1.1815	21.37
341.66	0.1252	16.18	394.77	1.5395	21.69
331.84	0.1271	15.47	394.07	1.7358	21.82
335.08	0.3967	15.87	393.74	2.0251	22.13
335.09	0.5912	16.16	393.79	2.0251	22.15
335.15	0.5912	16.12	409.52	0.3507	21.81
336.32	0.8696	16.55	409.59	0.3507	21.82
336.97	0.8715	16.67	410.12	0.6287	22.12
337.31	0.8715	16.62	409.73	0.9049	22.32
333.61	1.2068	16.86	409.78	1.2938	22.62
332.34	1.4999	17.30	409.80	1.2938	22.60
332.02	1.7683	17.91	409.80	1.2938	22.71
349.91	0.1186	16.81	409.09	1.6038	22.84
349.44	0.3499	16.95	409.10	1.6038	22.89
349.52	0.3499	17.02	409.12	1.6038	22.92
349.99	0.6188	17.34	408.53	1.8571	23.02
349.35	0.8646	17.53	408.67	1.8571	23.03
349.46	0.8646	17.53	408.13	1.9751	23.17
347.95	1.1922	17.88	421.43	0.1224	22.79
348.23	1.4979	18.33	420.70	0.3382	22.88
346.76	1.6849	18.54	420.83	0.6337	23.17
347.05	1.9694	19.12	421.46	0.8708	23.36
363.04	0.1201	17.86	421.41	0.8708	23.39
363.35	0.2956	18.08	424.25	1.1684	23.80
363.20	0.4826	18.18	423.92	1.4763	24.05
363.19	0.9036	18.68	423.83	1.4763	24.07
363.21	0.9036	18.63	424.22	1.7392	24.35
364.76	1.1006	18.97	424.01	2.0346	24.54
364.62	1.3104	19.17			

Таблица 2. Коэффициенты уравнения (1)

Индексы коэффициента, $ij$	0	10	20	11	21	12	22
Значение коэффициента, $a_{ij}$	-41.5642	12.2627	53.4498	-0.1558	5.1027	-0.0821	1.7597

R-407C на изотермах практически линейно увеличивается с ростом давления.

Ранее теплопроводность паров хладагента R-407C измерялась в [2] стационарным методом нагретой нити с погрешностью 1.5% в интервале температур 253–389 К и давлений 0.101–2.4 МПа на 7 изотермах, причем при низких (<293 К) и высоких (>333 К) температурах не исследовалась барическая зависимость. Сопоставление результатов настоящих исследований и [2] приведено на рис. 2. Видно, что в пересекающихся интервалах параметров состояния данные согласуются в пределах суммарной погрешности измерений.

Теплопроводность на линии конденсации  $\lambda_d$  и идеально-газовая теплопроводность  $\lambda_0$  (при  $p_0 = 0.101325$  МПа) были рассчитаны двумя способами: экстраполяцией изотерм теплопроводности пара R-407C на линию конденсации или к давлению  $p_0$ , а также расчетом по обобщающему уравнению (1). Давление пара на линии конденсации определялось по приведенному в [3] уравнению. Сопоставление показало, что значения теплопроводностей, получаемые двумя способами, совпадают в пределах случайной погрешности 0.6–2.5% для  $\lambda_d$  и 0.03–0.75% для  $\lambda_0$ . В дальнейшем для сохранения единства описания свойств во всей области параметров был выбран второй способ расчета. Рассчитанные значения  $\lambda_d$  аппроксимировались зависимостью

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

где  $b_1 = 93.995$ ,  $b_2 = -0.6297$ ,  $b_3 = 1.2201 \times 10^{-3}$ . Значения давления пара и теплопроводности на линии конденсации приведены в табл. 3.

На рис. 3 показано сопоставление значений теплопроводности R-407C на линии конденсации с данными других

авторов [2], [4]. Отличие настоящих результатов от [2] и [4] в основном не превышает 2% и 7% и лишь при приближении к критической температуре увеличивается до 6% и 9%, соответственно. Погрешность данных [2] и [4] составляет 3.5% и 5%. Таким образом, в широком интервале температур все значения  $\lambda_d$  согласуются в пределах суммарной погрешности измерений. Увеличение расхождений при приближении к критической точке, по-видимому, связано с ростом погрешностей измерений из-за увеличения сжимаемости и времени установления термодинамического равновесия.

Для  $\lambda_0$  из уравнения (1) получено

$$\lambda_0 = c_1 + c_2 T + c_3 / T, \quad (3)$$

где  $c_1 = -41.564$ ,  $c_2 = 0.12246$ ,  $c_3 = 5398.5$ . Отклонение полученных результатов по  $\lambda_0$  от [2] (2 на рис. 4) не превышает 2.5%, что также находится в пределах оцениваемых погрешностей.

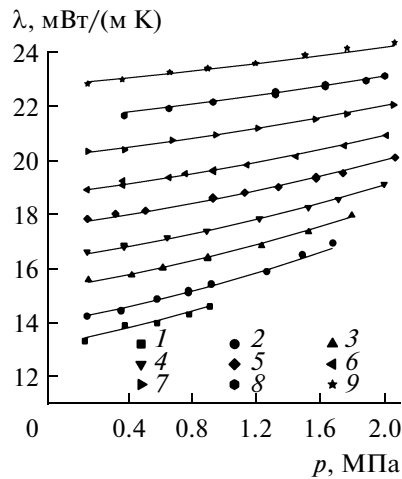
С использованием экспериментальных данных по идеально-газовой теплопроводности чистых компонентов R-32, R-125 [5] и R-134a (расчет на основе результатов представленных экспериментов) была рассчитана величина  $\lambda_0$  в аддитивном приближении. Расхождения между значениями, рассчитанными указанным образом, и экспериментальными лежат в пределах 2% (3 на рис. 4). Это дает основание предполагать, что расчет теплопроводности в идеально-газовом состоянии по правилу аддитивности можно применить к расчетам этого свойства других смесевых хладагентов, содержащих те же компоненты.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

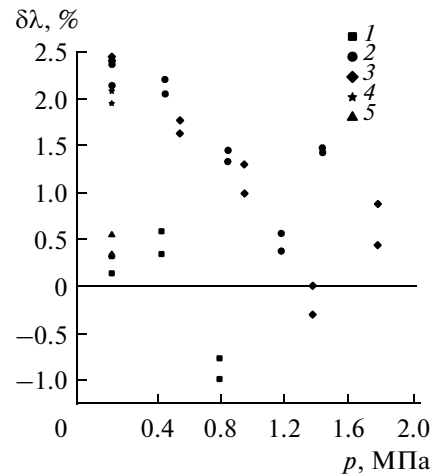
Получены новые экспериментальные данные по теплопроводности хладагента R-407C в паровой фазе в интервале температур 303–425 К и давлений 0.1–2.1 МПа и оценены их погрешности. Установлено, что аппроксимирующее уравнение (1) описывает теплопроводность R-407C в широкой области параметров состояния: от идеально-газового до линии конденсации. Показано, что в идеально-газовом состоянии теплопроводность трехкомпонентной смеси можно рассчитать по правилу аддитивности.

Таблица 3. Теплопроводность R-407C на линии конденсации

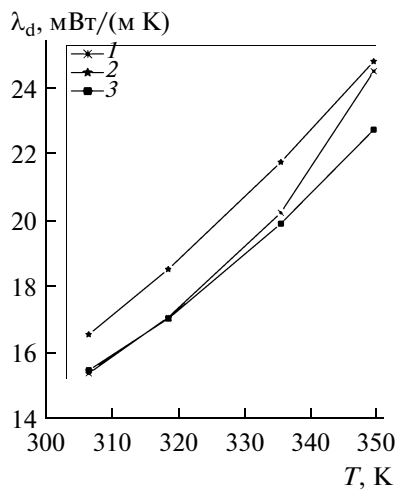
$T$ , К	$p_d$ , МПа	$\lambda_d$ , мВт/(м К)
300	1.0757	14.90
310	1.4179	16.04
320	1.8375	17.43
330	2.3470	19.07
340	2.9627	20.94
350	3.7100	23.06



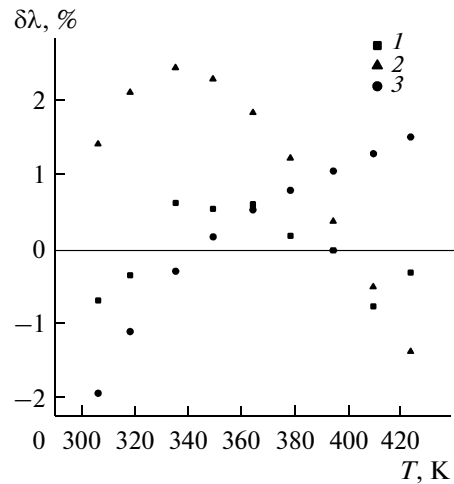
**Рис. 1.** Изотермы теплопроводности пара R-407C: точки – экспериментальные данные, изотермы 1 –  $T=306$  К, 2 – 318, 3 – 335, 4 – 349, 5 – 364, 6 – 378, 7 – 394, 8 – 409, 9 – 423; линии – уравнение (1).



**Рис. 2.** Относительные отклонения теплопроводности  $\delta\lambda = 100(\lambda[2] - \lambda)/\lambda$ , % хладагента R-407C [2] от результатов данного исследования: 1 – 293.15 К, 2 – 314.15, 3 – 333.15, 4 – 363.15, 5 – 389.15.



**Рис. 3.** Теплопроводность хладагента R-407C на линии конденсации: 1 – [2], 2 – [3], 3 – расчет по уравнению (2).



**Рис. 4.** Относительные отклонения идеально-газовой теплопроводности R-407C от уравнения (3): 1 – расчет  $\lambda_0$  экстраполяцией изотерм, 2 – данные в [2], 3 – расчет  $\lambda_0$  в аддитивном приближении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Верба О.И., Груздев В.А.* Теплопроводность гептафторпропана HFC 227ea // Теплофизика и аэромеханика. 2002. Т. 9. № 3. С. 467.
2. *Geller V.Z., Nemzer B.V., Cheremnykh U.V.* Thermal Conductivity of the Refrigerant Mixtures R 404A, R 407C, R 410A, and R 507C // Int. J. Thermophys. 2001. V. 22. № 4. P. 1035.
3. *Lemmon E.W.* Pseudo-Pure Fluid Equations of State for the Refrigerant Blends R-410A, R-404A, R-507A,

and R-407C // Int. J. Thermophys. 2003. V. 24. № 4. P. 991.

4. *Spindler K., Hoffmann N., Hahne E.* Wärmeleitfähigkeit der Gemische R410A, R507, R404A und R407C // DKV-Tagungsber. 1996. № 23. S. 243.
5. *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.