

УДК 536.22

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ХЛАДАГЕНТА R404A В ЖИДКОМ СОСТОЯНИИ*

А.В. БАГИНСКИЙ, А.С. ШИПИЦЫНА

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

Методом высокочастотных тепловых волн исследована теплопроводность озонобезопасного хладагента R404A в неизученной ранее области жидкого состояния в интервале температур 297,9 К + 332,6 К и давлений от линии насыщения до 3,7 МПа. Оцениваемые величины погрешностей измерений температуры, давления и теплопроводности составляют соответственно $\pm 0,1$ К, ± 3 кПа и $\pm 1,5$ %. Рассчитаны значения теплопроводности жидкой фазы R404A на линии кипения. Получены аппроксимационные зависимости для теплопроводности во всем исследованном интервале температур и давлений, а также на линии кипения.

В настоящее время теплофизические свойства экологически безопасных фреонов нового поколения, особенно смесей этих фреонов, рассматриваемых в качестве перспективных заменителей традиционных хладагентов, исследованы недостаточно подробно. Во многих случаях экспериментальные данные по их термодинамическим и переносным свойствам отсутствуют, а существующие, как правило, ограничены областью фазового равновесия жидкость–пар.

Теплопроводность жидкого смесевоего хладагента R404A (44 % R125, 52 % R143a, 4 % R134a) в однофазной области исследовалась ранее в [1]. Измерения в этой работе проводились при фиксированных температурах: 233, 247, 273, 298 и 323 К и давлениях 2, 5, 10, 15, 20 МПа (на изотерме 323 К при давлениях 5, 10, 15, 20 МПа). Экспериментальные данные по теплопроводности R404A в жидком состоянии в области более низких давлений (от равновесного до 2 МПа), по-видимому, отсутствуют. В настоящей работе представлены результаты измерений теплопроводности R404A в жидком состоянии в интервале температур 297,8–332,6 К и давлений от линии равновесия до 3,7 МПа.

Измерения проведены зондовым методом тепловых волн высокой (20 Гц) частоты. Особенностью данного метода является то, что он позволяет экспериментально исключить радиационную компоненту теплопереноса и обеспечивает, тем самым, непосредственное измерение молекулярной теплопроводности [2]. Методика измерений и конструкция экспериментальной установки подробно описаны в работе [3]. Использованный в настоящей работе зонд был изготовлен из платиновой проволоки диаметром 20 мкм. Зонд был предварительно отградуирован как термометр сопротивления и использовался одновременно и в качестве датчика температуры (погрешность измерений — 0,1 К). Давление в измерительной ячейке создавалось и поддерживалось при помощи термокомпрессора и измерялось кварцевым преобразователем “ПДТК-6,0-МР” класса 0,05.

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

Суммарная погрешность измерения теплопроводности на нашей установке оценивается в 1,5 %, что неоднократно подтверждено результатами экспериментов с хорошо исследованными жидкостями. При выполнении данного исследования до и после экспериментов с R404A были проведены контрольные измерения теплопроводности эталонной жидкости (толуол) при атмосферном давлении в интервале температур 303÷347 К. Отличие полученных данных по теплопроводности толуола от справочных [4] не превышало указанной погрешности.

В работе исследовался хладагент R404A производства Du Pont. Перед началом измерений он был подвергнут дополнительной очистке от воды и летучих примесей. При заполнении объемов термокомпрессора и измерительной ячейки предпринимались меры, препятствующие разгонке смеси по фракциям. Измерения проводились по изотермам (297,9, 306,7, 314,7, 324,6 и 332,6 К). Диапазон исследованных давлений был ограничен сверху критическим давлением $P_c = 3,726$ МПа [5], а снизу — давлением несколько выше давления насыщенных паров. Последнее связано с тем, что зонд всегда перегрет (на ~ 1 К) относительно исследуемой жидкости.

Результаты измерений теплопроводности R404A приведены в таблице и на рис. 1. Из представленных графиков видно, что в исследованных интервалах параметров состояния зависимость теплопроводности от давления практически линейна. Поэтому аппроксимация экспериментальных данных производилась уравнением

$$\lambda(P, T) = \lambda_0(T) + \lambda_1(T)P, \quad (1)$$

где $\lambda_i(T) = a_{i0} + a_{i1} \cdot (T - 273,15) + a_{i2} \cdot (T - 273,15)^2$ при $a_{00} = 70,7055$, $a_{01} = -0,3419$, $a_{02} = -1,47 \cdot 10^{-3}$, $a_{10} = 3,63 \cdot 10^{-2}$, $a_{11} = 2,65 \cdot 10^{-3}$, $a_{12} = 0$. Температура в соотношениях (1) выражена в К, давление — в МПа, теплопроводность — в мВт/(м·К). Значения коэффициентов a_{ij} рассчитаны методом наименьших квадратов. Отклонение экспериментальных точек от зависимости (1) (рис. 2) во всем исследованном интервале температур и давлений существенно меньше погрешности измерений.

Зависимости $\lambda(P, T)$, рассчитанные по эмпирическим формулам работы [1], также приведены на рис. 1 и, как видно из графиков, расхождение наших и данных из работы [1] данных по теплопроводности R404A в жидком состоянии нигде не превышает суммарной погрешности измерений.

Значения теплопроводности насыщенной жидкости $\lambda_{нас}$ (рис. 3) определялись экстраполяцией экспериментальных кривых $\lambda(P)$ на линию кипения (использовались данные работы [5] по давлению насыщенных паров R404A). Видно, что полученные нами значения $\lambda_{нас}$ хорошо согласуются с данными [1], но заметно ниже

(до 10 %) результатов работы [6]. Возможно, результаты в [6] оказались завышенными из-за возникновения заметных конвективных потоков при измерениях непосредственно на линии равновесия. Однако для окончательного ответа

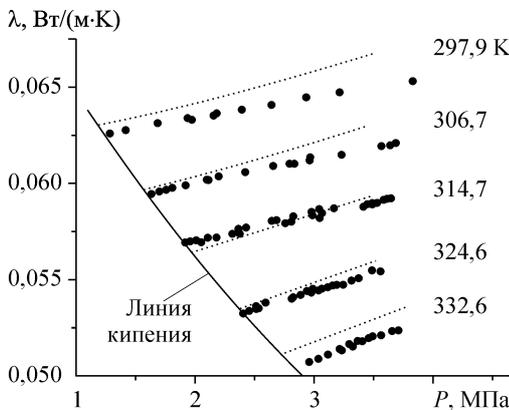


Рис. 1. Теплопроводность хладагента R404A в жидком состоянии.

Точки — данные настоящей работы, пунктир — данные [1].

Теплопроводность хладагента R404a. Экспериментальные данные

T, K	P, МПа	λ , Вт/м·К	T, K	P, МПа	λ , Вт/м·К
297,95	1,966	0,06331	314,75	3,439	0,05892
297,95	2,145	0,06353	314,75	3,475	0,05898
297,95	2,384	0,06381	314,75	3,478	0,05892
297,95	2,633	0,06409	314,75	3,520	0,05901
297,95	2,926	0,06445	314,75	3,575	0,05915
297,95	3,202	0,06472	314,75	3,610	0,05920
297,95	3,818	0,06532	314,75	3,638	0,05921
297,95	1,277	0,06258	314,75	2,002	0,05703
297,95	1,411	0,06276	314,75	1,946	0,05697
297,95	1,676	0,06313	314,75	1,905	0,05693
297,85	1,924	0,06340			
297,85	2,172	0,06360	324,75	2,501	0,05348
			324,75	2,508	0,05349
306,65	1,626	0,05945	324,45	2,502	0,05360
306,65	1,689	0,05958	324,55	2,810	0,05409
306,65	1,741	0,05964	324,55	2,928	0,05440
306,65	1,756	0,05967	324,55	2,974	0,05453
306,65	1,802	0,05977	324,55	2,968	0,05436
306,65	1,912	0,05991	324,55	3,039	0,05444
306,65	2,089	0,06019	324,65	3,057	0,05455
306,65	2,102	0,06019	324,65	3,141	0,05467
306,75	2,414	0,06057	324,65	3,155	0,05472
306,75	2,827	0,06103	324,65	3,235	0,05472
306,65	2,810	0,06104	324,65	3,309	0,05497
306,65	2,783	0,06104	324,55	2,397	0,05324
307,05	3,220	0,06148	324,55	2,446	0,05336
306,75	2,649	0,06089	324,55	2,524	0,05353
306,75	2,962	0,06133	324,55	2,581	0,05378
306,75	2,953	0,06119	324,75	2,802	0,05403
306,75	3,560	0,06193	324,75	2,874	0,05420
306,75	3,631	0,06196	324,75	2,960	0,05433
306,75	3,676	0,06209	324,75	3,013	0,05444
306,75	2,190	0,06035	324,75	3,102	0,05458
			324,75	3,182	0,05472
314,75	3,061	0,05845	324,75	3,298	0,05493
314,75	3,049	0,05845	324,75	3,366	0,05507
314,65	3,035	0,05823	324,75	3,478	0,05546
314,65	3,038	0,05820	324,75	3,546	0,05541
314,65	2,798	0,05799			
314,65	2,748	0,05794	332,55	2,952	0,05073
314,75	2,369	0,05739	332,55	3,028	0,05088
314,75	2,333	0,05734	332,55	3,106	0,05110
314,75	2,302	0,05737	332,55	3,205	0,05138
314,75	2,169	0,05719	332,65	3,221	0,05132
314,75	2,095	0,05716	332,65	3,314	0,05154
314,75	2,043	0,05694	332,65	3,359	0,05179
314,75	2,355	0,05761	332,65	3,395	0,05180
314,65	2,421	0,05769	332,65	3,451	0,05195
314,65	2,636	0,05804	332,65	3,468	0,05201
314,65	2,672	0,05807	332,65	3,483	0,05204
314,65	2,814	0,05828	332,55	3,559	0,05207
314,65	2,969	0,05850	332,55	3,552	0,05211
314,65	3,036	0,05865	332,55	3,645	0,05231
314,65	2,974	0,05834	332,55	3,700	0,05239
314,65	3,158	0,05870	332,55	3,286	0,05165
314,75	3,407	0,05879	332,55	3,284	0,05163

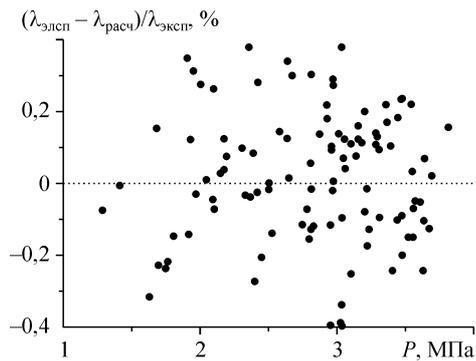


Рис. 2. Отклонения измеренных значений теплопроводности R404A от зависимости (1).

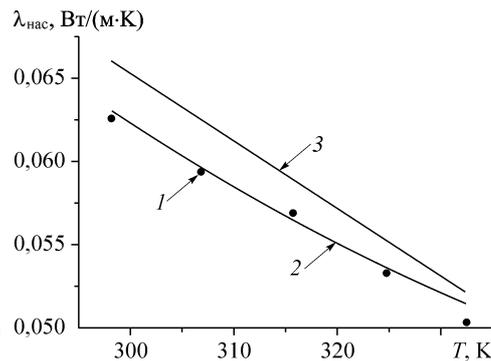


Рис. 3. Теплопроводность насыщенной жидкости хладагента R404A.

1 — наши данные, 2 — данные [1], 3 — данные [6].

на этот вопрос необходимо проведение дополнительных тщательных исследований теплопроводности вблизи линии кипения. Зависимость $\lambda_{\text{нас}}(T)$ по нашим данным близка к линейной и в пределах погрешности описывается уравнением

$$\lambda_{\text{нас}} = 166,8 - 3,496 \cdot 10^{-1} \cdot T, \text{ мВт/(м}\cdot\text{К)}.$$

ВЫВОДЫ

Исследована теплопроводность жидкого хладагента R404A и получены новые экспериментальные данные в неисследованной ранее области параметров состояния. Получено эмпирическое уравнение, описывающее теплопроводность R404A в этой области с погрешностью, не превышающей погрешность экспериментальных данных. Рассчитаны значения $\lambda_{\text{нас}}$ теплопроводности насыщенной жидкости R404A и получено аппроксимирующее уравнение $\lambda_{\text{нас}}(T)$. Отмечены хорошее согласование наших данных с данными [1] как в однофазной области, так и на линии насыщения, и заметные расхождения с [6] по теплопроводности насыщенной жидкости. Выяснение причин этих расхождений требует дополнительных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sang Hoon Lee, Min Soo Kim, Sung Tack Ro. Thermal Conductivity of 1,1,1-Trifluoroethane (R143a) and R404A in the Liquid Phase // J. Chem. Eng. Data. — 2001. — Vol. 46. — P. 1013–1015.
2. Багинский А.В. Об исследовании теплопроводности полупрозрачных веществ в тонких слоях. II. Высокочастотная плоская тепловая волна // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. — 1981. — Вып. 3, № 13. — С. 17–19.
3. Станкус С.В., Хайрулин Р.А., Багинский А.В. Термодинамические и переносные свойства гексафторбензола и перфтортриэтиламина в жидком состоянии // Теплофизика и аэромеханика. — 2001. — Т. 8, № 2. — С. 17–19.
4. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов / Н.Б. Варгафтик, Л.П. Филиппов, А.А. Тарзианов, Е.Е. Тоцкий. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 352 с.
5. Fujiwara K., Nakamura S., Noguchi M. Thermodynamic Properties for R-404A // Inter. J. Thermophys. — 1999. — Vol. 20, No. 1. — P. 129–140.
6. Spindler K., Hoffmann N., Sohns J., Hahne E. Thermal conductivity of binary and ternary refrigerant mixtures: experimental results and correlations // High Temp.–High Press. — 1997. — Vol. 29. — P. 659–664.

Статья поступила в редакцию 16 октября 2006 г.