

УДК 536.22

Теплопроводность хладагента R507A 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 R507 в области жидкого состояния в интервале температур 297,95 К + 332,55 К и давлений от линии насыщения до 3,7 МПа. Оцениваемые величины погрешностей измерений температуры, давления и теплопроводности составляют соответственно 0,1 К, 3 кПа, и 1,5 %. Рассчитаны значения теплопроводности жидкой фазы R507 на линии кипения. Получены аппроксимационные зависимости для теплопроводности во всем исследованном интервале температур и давлений, а также на линии кипения.

В соответствии с международными соглашениями (Монреальский протокол и др.) предусматривается прекращение производства и использования традиционных хлорсодержащих фреонов и замена их экологически безопасными фреонами нового поколения. В качестве наиболее перспективных заменителей рассматриваются смесевые хладагенты на основе бесхлорных фреонов (R34, R125, R134a, R143a) с низкими озоноразрушающим и парниковым потенциалами. В то же время теплофизические свойства этих хладагентов исследованы недостаточно подробно, что затрудняет их эффективное использование. В частности, нам не удалось обнаружить в литературе данных по теплопроводности жидкого хладагента R507 (50 % R125 (C₂HF₅) / 50 % R143a (C₂H₃F₃)) в однофазной области, а имеющиеся данные по теплопроводности насыщенной жидкости R507 [1] требуют уточнения.

В настоящей работе представлены результаты измерений теплопроводности хладагента R507 производства Du Pont в жидком состоянии в интервале температур 297,9...332,5 К и давлений 1,46...3,7 МПа, получены аналитические зависимости $\lambda(P, T)$ и рассчитаны значения теплопроводности насыщенной жидкости. Измерения проведены зондовым методом тепловых волн высокой (20...200 Гц) частоты. Особенностью данного метода является то, что он позволяет экспериментально исключить радиационную компоненту теплопереноса [2] и измерять, тем самым, непосредственно молекулярную составляющую теплопроводности жидкостей частично прозрачных в видимой и ИК-областях спектра. Это особенно важно при исследовании веществ, оптические свойства которых не изучены (как в данном случае) и поэтому отсутствует возможность сделать оценку вклада радиационного теплопереноса. Зонд изготовлен из платиновой проволоки диаметром 20 мкм. Предварительно он был отградуирован как термометр сопротивления и кроме основного назначения использовался для измерения температуры исследуемой жидкости. Давление в измерительной ячейке создавалось термокомпрессором и измерялось кварцевым преобразователем ПДТК-6.0 МПа класса 0,05. Преобразо-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 07-08-00295-а).

ватель размещался в одном уровне с ячейкой, чтобы исключить необходимость введения поправки на гидростатическое давление. Суммарная (с учетом погрешности калибровок) погрешность измерения теплопроводности составляла 1,5 % (погрешность измерения температуры — 0,1 К, давления — 3 кПа). Для экспериментальной оценки погрешности были проведены контрольные измерения молекулярной теплопроводности толуола. Отклонение полученных данных от справочных [3] не превышало величины расчетной погрешности. Подробно методика измерений описана ранее в работах [4, 5].

Таблица

Теплопроводность хладагента R507. Экспериментальные данные

<i>T</i> , К	<i>P</i> , МПа	λ , Вт/м·К	<i>T</i> , К	<i>P</i> , МПа	λ , Вт/м·К	<i>T</i> , К	<i>P</i> , МПа	λ , Вт/м·К
297,95	1,465	0,0612	297,95	3,33	0,0633	314,85	2,416	0,0561
297,95	1,539	0,0613	297,95	3,245	0,0633	314,85	2,479	0,0562
297,95	1,585	0,0613	297,95	3,312	0,0631	314,85	2,502	0,0563
297,95	1,63	0,0615	297,95	3,523	0,0634	314,95	2,51	0,0563
297,95	1,662	0,0615	297,95	3,568	0,0635	314,85	2,588	0,0564
297,95	1,705	0,0615	297,95	3,697	0,0637	314,85	2,7	0,0566
297,95	1,768	0,0616	–	–	–	314,85	2,776	0,0567
297,95	1,751	0,0615	304,95	3,562	0,0611	314,85	2,852	0,0569
297,95	1,819	0,0616	304,95	3,422	0,0610	314,95	2,792	0,0567
297,95	1,82	0,0617	304,95	3,24	0,0608	314,95	2,93	0,0569
297,95	1,85	0,0617	304,95	3,107	0,0607	314,95	3,009	0,0572
297,95	1,864	0,0618	304,85	3,059	0,0607	314,95	3,085	0,0573
297,95	1,906	0,0618	304,85	2,969	0,0606	314,95	3,2	0,0574
297,95	2,033	0,0621	304,85	2,891	0,0605	314,85	3,197	0,0574
298,05	2,214	0,0621	304,85	2,793	0,0605	314,85	3,267	0,0575
297,95	2,006	0,0618	304,85	2,693	0,0604	314,95	3,476	0,0579
297,95	2,047	0,0620	304,85	2,603	0,0603	314,95	3,522	0,0579
297,95	2,076	0,0620	304,85	2,603	0,0602	314,85	3,618	0,0581
297,95	2,089	0,0620	304,85	2,542	0,0602	314,85	3,69	0,0581
297,95	2,117	0,0621	304,85	2,51	0,0601			
297,95	2,182	0,0622	304,85	2,444	0,0601	324,75	2,584	0,0524
297,95	2,204	0,0622	304,85	2,376	0,0600	324,75	2,657	0,0526
297,95	2,21	0,0622	304,95	2,292	0,0599	324,75	2,763	0,0529
297,95	2,235	0,0622	304,95	2,204	0,0595	324,75	2,861	0,0531
297,95	2,248	0,0622	304,95	2,12	0,0595	324,75	2,98	0,0533
297,95	2,256	0,0622	304,85	2,031	0,0594	324,75	2,931	0,0531
297,95	2,258	0,0622	304,85	1,988	0,0594	324,75	3,035	0,0534
297,95	2,287	0,0623	304,95	1,915	0,0593	324,75	3,125	0,0535
297,95	2,309	0,0623	304,95	1,894	0,0591	324,75	3,232	0,0538
297,95	2,321	0,0623	304,95	1,896	0,0593	324,75	3,463	0,0541
297,95	2,332	0,0623	304,95	1,833	0,0591	324,85	3,58	0,0544
297,95	2,434	0,0624	304,95	1,832	0,0592	324,85	3,66	0,0545
297,95	2,447	0,0623	304,95	1,747	0,0591			
297,95	2,494	0,0623	304,95	1,677	0,0591	332,55	3,438	0,0508
297,95	2,526	0,0624	304,95	1,652	0,0590	332,55	3,444	0,0500
297,95	2,587	0,0625	304,95	1,606	0,0589	332,45	3,316	0,0506
297,95	2,592	0,0625	304,95	1,557	0,0589	332,55	3,565	0,0511
297,95	2,66	0,0625	–	–	–	332,55	3,629	0,0513
297,95	2,747	0,0626	314,75	2,093	0,0556	332,55	3,669	0,0514
297,95	2,853	0,0628	314,75	2,097	0,0557	332,55	3,678	0,0513
297,95	2,914	0,0628	314,75	2,173	0,0559	332,55	3,741	0,0515
297,95	2,928	0,0627	314,75	2,239	0,0559	332,55	3,752	0,0515
297,95	3,16	0,0631	314,75	2,317	0,0561	332,55	3,772	0,0516
297,95	3,23	0,0632	314,75	2,423	0,0563	332,55	3,775	0,0516

Рис. 1. Экспериментальные данные по теплопроводности хладагента R507 в жидком состоянии.

Температура $T = 297,95$ (1), 304,9 (2), 314,85 (3), 324,75 (4), 332,55 (5).

Результаты наших измерений представлены в таблице и на рис. 1. Как видно из приведенных графиков, в исследованной области параметров состояния теплопроводность убывает с температурой и практически линейно возрастает с увеличением давления. Поэтому экспериментальные данные были аппроксимированы линейной по давлению зависимостью

$$\lambda(P, T) = 0,069428 - 3,5538 \cdot 10^{-4} \cdot (T - 273,15) - 1,27 \cdot 10^{-6} \cdot (T - 273,15)^2 + (8,181 \cdot 10^{-5} + 4,163 \cdot 10^{-5} \cdot (T - 273,15) - 1,4 \cdot 10^{-7} \cdot (T - 273,15)^2) \cdot P, \quad (1)$$

где $\lambda(P, T)$ выражается в $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}$, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, T — в К, P — в МПа.

Численные значения коэффициентов рассчитывались методом наименьших квадратов. Максимальное отклонение экспериментальных точек от зависимости (1) менее 0,4 %, рис. 2.

Используя полученное уравнение, были рассчитаны значения теплопроводности на линии кипения (данные по давлению паров R507 взяты из [6]). В пределах погрешности экспериментальных данных теплопроводность $\lambda_s(T_s)$ насыщенной жидкости R507 в исследованном интервале температур описывается линейной зависимостью

$$\lambda_s(T_s) = 0,161 - 3,35 \cdot 10^{-4} \cdot T_s.$$

Наши данные по теплопроводности насыщенной жидкости R507 показаны на рис. 3 и, как видно из графика, они лежат систематически ниже известных литературных [1] (от 6,6 % при низкой температуре до 3,8 % при высокой). Тем, что в наших данных исключена радиационная компонента теплопереноса, наблюдаемое расхождение результатов может быть объяснено лишь частично, и для выяснения его причин требуются дополнительные независимые исследования. Следует,

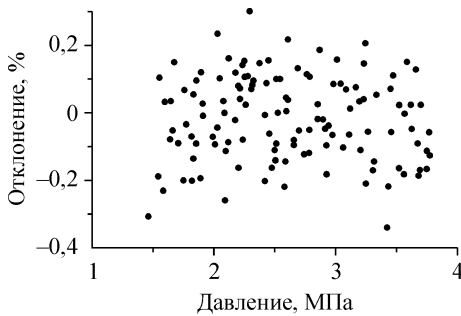
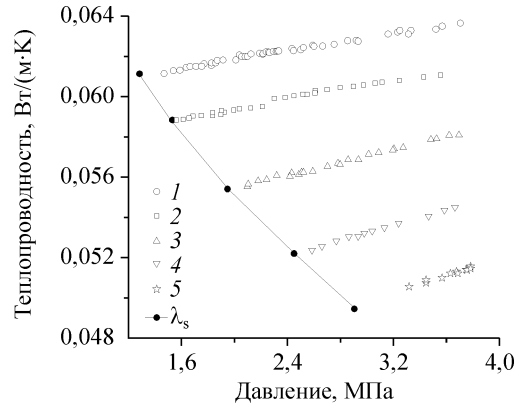


Рис. 2. Отклонение экспериментальных данных по теплопроводности хладагента R507 от зависимости (1).

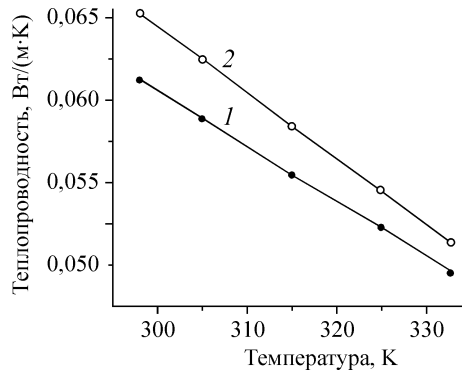


Рис. 3. Теплопроводность насыщенной жидкости хладагента R507. 1 — наши данные, 2 — данные [1].

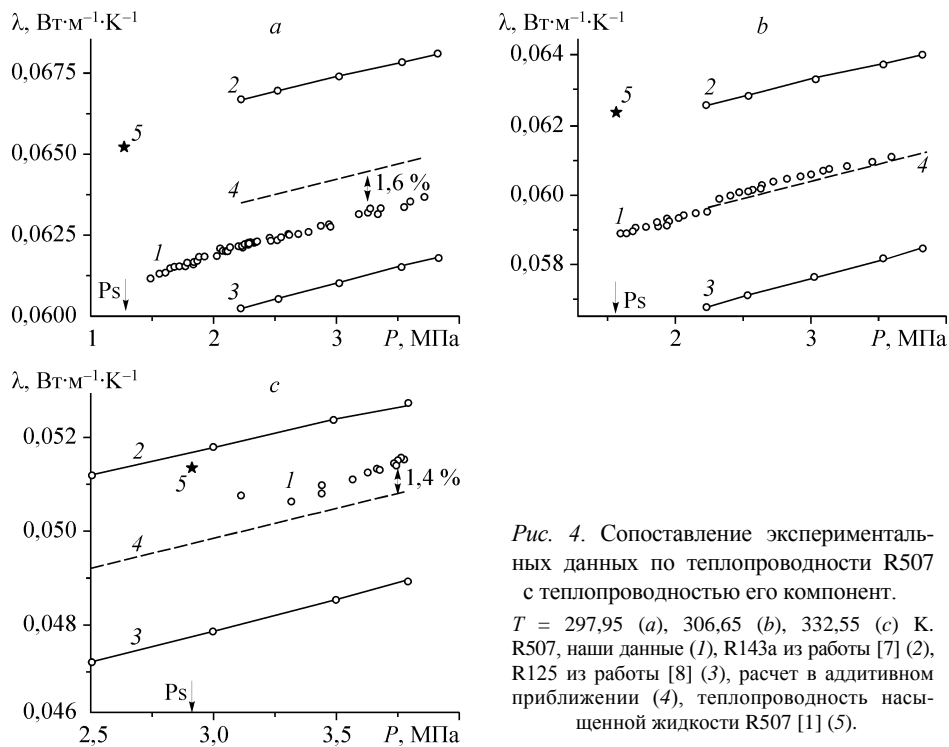


Рис. 4. Сопоставление экспериментальных данных по теплопроводности R507 с теплопроводностью его компонент.
 $T = 297,95$ (a), $306,65$ (b), $332,55$ (c) К.
 R507, наши данные (1), R143a из работы [7] (2), R125 из работы [8] (3), расчет в аддитивном приближении (4), теплопроводность насыщенной жидкости R507 [1] (5).

тем не менее, заметить, что значения λ_s насыщенной жидкости R507, полученные в работе [1], близки к значениям теплопроводности фреона R143a [7] (высокотеплопроводная компонента хладагента R507), рис. 4, что не характерно для растворов химически невзаимодействующих жидкостей [9] и свидетельствует о возможной систематической погрешности в данных работы [1]. Косвенным подтверждением этого предположения является то, что данные работы [1] по теплопроводности насыщенной жидкости R404a также завышены (до 10 %) относительно наших [10] и работы [7] данных.

Пунктиром на графиках рис. 4 показаны рассчитанные в аддитивном приближении значения теплопроводности смеси R143a/R125 (50 % / 50 %). Видно, что экспериментальные значения $\lambda(P, T)$ хладагента R507 в пределах погрешности согласуются с результатами этого расчета. Вблизи комнатных температур (см. рис. 4, a) экспериментальные данные по теплопроводности R507 практически точно описываются эмпирической формулой, предложенной в работе [9], для расчета теплопроводности растворов органических жидкостей

$$\lambda = c_1\lambda_1 + c_2\lambda_2 - 0,72|\lambda_1 - \lambda_2|c_1c_2 \quad (2)$$

где λ — теплопроводность раствора, λ_1 и λ_2 — теплопроводности компонент раствора, c_1 и c_2 — их концентрации ($c_1 + c_2 = 1$).

При повышенных температурах полученные нами экспериментальные значения теплопроводности R507 систематически отклоняются от (2), а отклонение от аддитивности становится положительным (см. рис. 4, c), что противоречит выводам работы [9]. Однако из-за плохого согласования данных разных авторов по теплопроводности бесхлорных фреонов при температурах выше комнатной (расхождения достигают 10 % и более) делать какие-либо определенные выводы относительно различий в поведении теплопроводности органических и фторорганических растворов представляется преждевременным.

ВЫВОДЫ

Впервые получены экспериментальные данные по молекулярной теплопроводности хладагента R507 в интервале температур 297,95...332,55 К и давлений от линии равновесия до 3,78 МПа.

Проведен анализ экспериментальных зависимостей и получены уравнения, описывающие поведение теплопроводности хладагента R507, в исследованном интервале температур и давлений.

Проведена экстраполяция экспериментальных данных на линию кипения. Рассчитаны значения теплопроводности насыщенной жидкости $\lambda_s(T)$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Багинский А.В. Об исследовании теплопроводности полупрозрачных веществ в тонких слоях. II. Высокочастотная плоская тепловая волна // Изв. СО АН СССР. — 1981. — № 13. Сер. техн. наук. — Вып. 3. — С. 17–19.
3. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов / Н.Б. Варгафтик, Л.П. Филиппов, А.А. Тарзиманов, Е.Е. Тоцкий. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 352 с.
4. 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. 317–327.
5. Багинский А.В., Басин А.С. Анализ методики эквивалентного импеданса и некоторые результаты измерений теплопроводности органических жидкостей // Теплофизические свойства растворов. — Новосибирск, Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1983. — С. 70–86.
6. Lemmon E.W. Pseudo-pure fluid equation of state for the refrigerants blends R-410A, R-404A, R-507A, and R-407C // Inter. J. of Thermophysics. — 2003. — Vol. 24, No. 4. — P. 991–1006.
7. 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. Engng. Data. — 2001. — Vol. 46. — P. 1013–1015.
8. Gao X., Yamada T., Nagasaka Y., Nagashima A. The Thermal Conductivity of CFC Alternatives HFC-125 and HCFC-141b in the Liquid Phase // Inter. J. of Thermophysics. — 1996. — Vol. 17, No. 2. — P. 279–292.
9. Филиппов Л.П. Исследование теплопроводности жидкостей. — М.: Изд-во МГУ, 1970. — 239 с.
10. Багинский А.В., Шипицина А.С. Теплопроводность хладагента R404A в жидком состоянии // Теплофизика и аэромеханика. — 2007. — Т. 14, № 1. — С. 67–70.

Статья поступила в редакцию 23 октября 2007 г.