

УДК 536.22

Теплопроводность и температуропроводность хладагента R134a в жидком состоянии*

А.В. Багинский, А.С. Шипицына

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

E-mail: gamma@itp.nsc.ru

Методом высокочастотных тепловых волн исследована теплопроводность и температуропроводность озонобезопасного фреона R134a в области жидкого состояния в интервале температур 295,9–354,9 К и давлений от линии равновесия жидкость–пар до 4,08 МПа. Оцениваемые величины погрешностей измерений температуры, давления, теплопроводности и температуропроводности составляют соответственно 0,1 К, 3 кПа, 1,5 и 2,5 %. Рассчитаны значения теплопроводности и температуропроводности жидкой фазы R134a на линии кипения. Получены аппроксимационные зависимости для теплопроводности и температуропроводности во всем исследованном интервале температур и давлений, а также на линии кипения.

Ключевые слова: теплопроводность, температуропроводность, R134a, жидкое состояние, метод высокочастотных тепловых волн.

Бесхлорные фреоны этанового ряда R32, R125, R134a, R143a и их смеси обладают низкими озоноразрушающим и парниковым потенциалами и рассматриваются как наиболее перспективные заменители традиционных хлорсодержащих фреонов. Очевидно, что эффективное использование указанных хладагентов невозможно без знания полного комплекса их свойств. В то же время, ряд теплофизических характеристик этих фреонов исследован недостаточно подробно. В частности, экспериментальные данные по их теплопроводности в жидком состоянии либо единичны, либо результаты разных авторов плохо согласуются между собой (расхождения достигают 30 % и более). Это затрудняет анализ экспериментальных данных и делает невозможной разработку надежных методов расчета и прогнозирования свойств смесевых хладагентов этой группы. Требуется, таким образом, дополнительные исследования с целью получения надежных экспериментальных данных по переносным свойствам фреонов этой группы.

Теплопроводность фреона R134a в однофазной области жидкого состояния исследовалась ранее в работах [1-6]. Экспериментальные данные получены в широкой области температур (203 К–412 К) и давлений (до 70 МПа). Однако измерения проведены с большим шагом по давлению (2–5 МПа), в результате чего экспериментальное исследование охватывает, в основном, область закритических давлений ($P > P_C = 4,06$ МПа), а наиболее важная в техническом отношении область, от линии

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

равновесия жидкость–пар до критической точки, осталась практически неизученной. В настоящей работе исследования проведены именно в этой области параметров состояния. Получены подробные экспериментальные данные по теплопроводности и температуропроводности жидкого фреона R134a в интервале температур 295,9–354,9 К и давлений от линии равновесия жидкость–пар до 4,08 МПа, получены аналитические зависимости $\lambda(P, T)$ и $a(P, T)$, рассчитаны значения теплопроводности и температуропроводности насыщенной жидкости.

Измерения проведены зондовым методом тепловых волн высокой (20–200 Гц) частоты. Зонд был изготовлен из платиновой проволоки диаметром 10 мкм. Предварительно он был отградуирован как термометр сопротивления и, кроме основного назначения, использовался для измерения температуры исследуемой жидкости. Давление в системе создавалось термокомпрессором и измерялось кварцевыми преобразователями ПДТК-4,0 МПа и ПДТК-6,0 МПа, класса 0,05. Преобразователи размещались на одном уровне с измерительной ячейкой, чтобы исключить необходимость введения поправки на гидростатическое давление. Суммарная (с учетом погрешности калибровок) погрешность измерения теплопроводности составляла 1,5 %, температуропроводности — не превышала 2,5 % (погрешность измерения температуры — 0,1 К, давления — 3 кПа). До и после экспериментов с фреоном проводились контрольные измерения тепло- и температуропроводности толуола и н-гептана. Отклонение результатов этих экспериментов от справочных данных [7] не превышало величины расчетной погрешности. Важная особенность метода тепловых волн высокой частоты состоит в том, что при исследовании веществ, частично прозрачных в видимой и ИК-областях спектра, данный метод позволяет экспериментально исключить радиационную компоненту теплопереноса [8] и тем самым измерять непосредственно молекулярную составляющую теплопроводности. Это избавляет от необходимости выполнения сложных многоступенчатых расчетов и существенно упрощает эксперимент. Если же оптические свойства исследуемой жидкости не изучены (как в данном случае) или изучены недостаточно и отсутствует возможность сделать оценки радиационного вклада в теплоперенос, это достоинство метода приобретает особое значение. Подробно методика измерений ранее описана в работах [9, 10].

Результаты наших измерений теплопроводности и температуропроводности фреона R134a представлены в табл. 1, на рис. 1 и 2. Как видно из приведенных графиков, в исследованной области параметров состояния теплопроводность и температуропроводность убывают с температурой и слабонелинейно возрастают

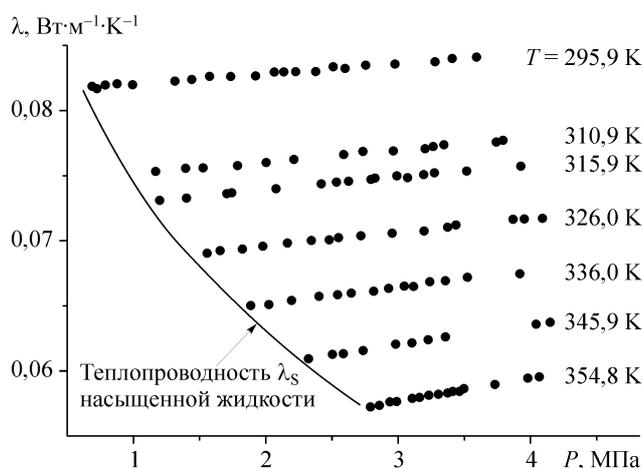


Рис. 1. Экспериментальные данные по теплопроводности фреона R134a в жидком состоянии.

Таблица 1

Экспериментальные значения теплопроводности и температуропроводности R134a

T	P	λ	$a \cdot 10^8$	T	P	λ	$a \cdot 10^8$
К	МПа	Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	м ² ·с ⁻¹	К	МПа	Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	м ² ·с ⁻¹
295,85	0,676	0,08174	4,702	325,95	2,484	0,07008	4,166
295,85	0,719	0,08168	4,718	325,95	2,542	0,07015	4,168
295,85	0,784	0,08187	4,749	325,95	2,552	0,07020	4,179
295,85	0,862	0,08194	4,763	325,95	2,714	0,07033	4,190
295,85	0,981	0,08191	4,740	325,95	2,956	0,07057	4,201
295,85	1,302	0,08219	4,770	325,95	3,196	0,07075	4,211
295,85	1,423	0,08238	4,791	325,95	3,374	0,07093	4,227
295,85	1,569	0,08255	4,814	325,95	3,433	0,07103	4,238
295,85	1,733	0,08249	4,779	325,95	3,866	0,07154	4,293
295,85	1,926	0,08267	4,802	325,95	3,948	0,07159	4,296
295,85	2,124	0,08291	4,834	325,95	4,086	0,07166	4,300
295,85	2,057	0,08282	4,809	335,95	1,875	0,06492	3,813
295,85	2,224	0,08286	4,803	335,95	2,014	0,06506	3,825
295,85	2,371	0,08298	4,811	335,95	2,188	0,06535	3,861
295,85	2,500	0,08330	4,885	335,95	2,396	0,06569	3,911
295,85	2,589	0,08319	4,830	335,95	2,537	0,06578	3,910
295,85	2,756	0,08340	4,871	335,95	2,635	0,06597	3,937
295,85	2,975	0,08355	4,869	335,95	2,810	0,06614	3,949
295,85	3,279	0,08365	4,860	335,95	2,928	0,06631	3,966
295,85	3,409	0,08392	4,901	335,95	3,054	0,06646	3,981
295,85	3,586	0,08401	4,918	335,95	3,112	0,06648	3,979
295,85	3,581	0,08401	4,906	335,95	3,232	0,06680	4,039
310,85	1,161	0,07523	4,376	335,95	3,351	0,06685	4,030
310,85	1,379	0,07547	4,408	335,95	3,523	0,06713	4,070
310,85	1,516	0,07555	4,404	335,95	3,918	0,06746	4,083
310,85	1,780	0,07576	4,417	345,85	2,318	0,06089	3,513
310,85	1,993	0,07601	4,446	345,75	2,506	0,06120	3,562
310,85	2,201	0,07620	4,464	345,85	2,579	0,06128	3,567
310,85	2,578	0,07651	4,476	345,95	2,738	0,06152	3,604
310,85	2,728	0,07668	4,493	345,85	2,977	0,06194	3,662
310,85	2,957	0,07679	4,493	345,85	3,104	0,06210	3,676
310,85	3,211	0,07702	4,513	345,85	3,220	0,06229	3,701
310,85	3,793	0,07759	4,557	345,85	3,355	0,06252	3,732
310,85	3,744	0,07748	4,547	345,85	4,147	0,06364	3,864
310,85	3,269	0,07713	4,524	345,85	4,035	0,06345	3,831
310,85	3,339	0,07721	4,537	345,85	4,035	0,06349	3,844
315,85	1,193	0,07306	4,270	354,85	2,986	0,05760	3,191
315,85	1,397	0,07328	4,290	354,85	3,167	0,05791	3,257
315,85	1,695	0,07358	4,321	354,85	3,225	0,05805	3,273
315,85	1,737	0,07358	4,309	354,85	3,356	0,05824	3,309
315,85	2,076	0,07396	4,347	354,85	3,487	0,05850	3,346
315,85	2,417	0,07428	4,375	354,85	3,717	0,05896	3,429
315,85	2,545	0,07440	4,382	354,85	3,976	0,05936	3,491
315,85	2,617	0,07441	4,370	354,85	3,289	0,05812	3,290
315,85	2,824	0,07466	4,408	354,95	3,375	0,05828	3,329
315,85	3,076	0,07483	4,408	354,95	3,457	0,05844	3,350
315,85	2,794	0,07464	4,403	354,95	4,059	0,05951	3,520
315,85	2,995	0,07484	4,425	354,85	3,410	0,05839	3,335
315,85	3,265	0,07507	4,438	354,85	2,9395	0,05753	3,183
315,85	3,924	0,07563	4,479	354,85	2,9233	0,05751	3,181
315,85	3,202	0,07501	4,427	354,85	2,8394	0,05731	3,141
315,85	3,515	0,07523	4,449	354,85	2,9375	0,05747	3,171
325,95	1,551	0,06899	4,055	354,85	2,9885	0,05758	3,193
325,95	1,645	0,06920	4,093	354,85	3,1001	0,05784	3,240
325,95	1,811	0,06932	4,094	354,85	3,1567	0,05794	3,265
325,95	1,972	0,06951	4,110	354,85	2,7833	0,05719	3,110
325,95	2,166	0,06972	4,131	354,85	2,7685	0,05715	3,101
325,95	2,342	0,06994	4,156	354,95	3,7313	0,05894	3,431

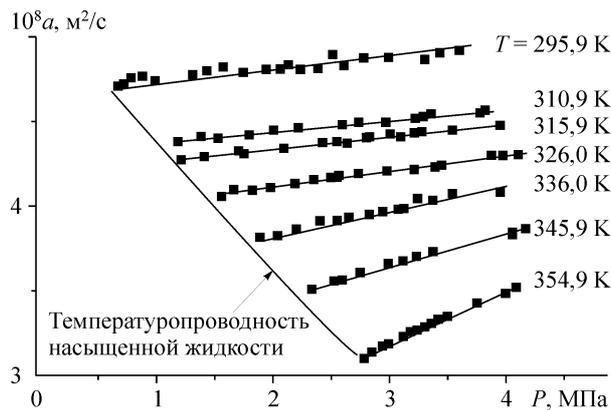


Рис. 2. Экспериментальные данные по температуропроводности фреона R134a в жидком состоянии.

с увеличением давления. Полученные экспериментальные данные $\lambda(P, T)$ и $a(P, T)$ хорошо описываются уравнениями вида

$$\lambda(P, T) = \sum_{j=0}^2 P^j \sum_{i=0}^2 \lambda_{ij} T^i, \quad (1)$$

$$a(P, T)10^8 = \sum_{j=0}^2 P^j \sum_{i=0}^3 a_{ij} T^i. \quad (2)$$

Здесь температура — T/K , давление — $P/\text{МПа}$, теплопроводность — $\lambda(P, T)/\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, температуропроводность — $a(P, T)/\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Значения коэффициентов a_{ij} и λ_{ij} рассчитаны методом наименьших квадратов и приведены в табл. 2 и 3. Максимальное отклонение экспериментальных точек от (1) и (2) менее 0,4 % и 1 % соответственно (рис. 3, 4).

На рис. 5 приведено сопоставление результатов наших измерений теплопроводности с данными работ [1–4]. Видно, что в области температур, близких к комнатной, наши данные в пределах погрешности совпадают с результатами этих работ. При более высоких температурах данные [1, 2] лежат систематически выше наших, а данные [3] — систематически ниже, причем с ростом температуры

Таблица 2

Значения коэффициентов λ_{ij} в уравнении (1)

–	$i = 0$	$i = 1$	$i = 2$
$j = 0$	$4,1187 \cdot 10^{-1}$	$-1,7068 \cdot 10^{-3}$	$1,9913 \cdot 10^{-6}$
$j = 1$	$-1,5398 \cdot 10^{-1}$	$9,8422 \cdot 10^{-4}$	$-1,5584 \cdot 10^{-6}$
$j = 2$	$2,5318 \cdot 10^{-2}$	$-1,6307 \cdot 10^{-4}$	$2,6167 \cdot 10^{-7}$

Таблица 3

Значения коэффициентов a_{ij} в уравнении (2)

–	$i = 0$	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$
$j = 0$	5,8852	$-78,7371 \cdot 10^{-3}$	$1,4508 \cdot 10^{-3}$	$-1,307 \cdot 10^{-5}$
$j = 1$	$4,75734 \cdot 10^{-3}$	0	0	$7,7695 \cdot 10^{-8}$
$j = 2$		$4,2616 \cdot 10^{-6}$	$-1,9406 \cdot 10^{-7}$	$1,2931 \cdot 10^{-9}$

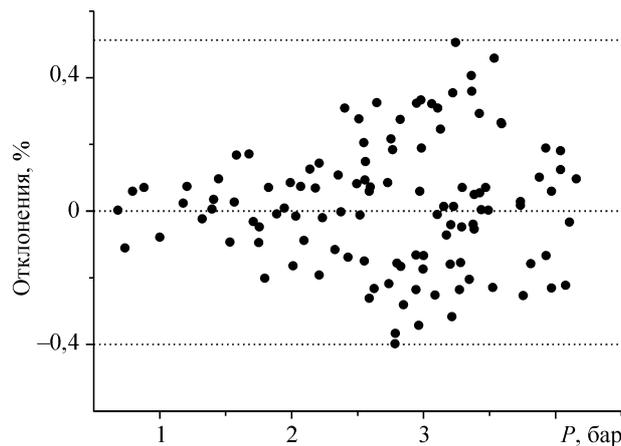


Рис. 3. Отклонение экспериментальных значений по теплопроводности фреона R134a от уравнения (1).

отклонения растут. Данные работы [4] в пределах $< 4\%$ согласуются с нашими данными во всей области исследованных в настоящей работе температур и давлений. Результаты [5, 6] (на графике не показаны) систематически завышены относительно всех остальных до 15% .

Значения теплопроводности $\lambda_s(T)$ и температуропроводности $a_s(T)$ насыщенной жидкости были рассчитаны экстраполяцией экспериментальных зависимостей $\lambda(P, T)$ и $a(P, T)$ по формулам (1), (2) на линию равновесия жидкость–пар (данные по упругости пара R134a взяты из работы [6]). В пределах погрешности температурные зависимости теплопроводности и температуропроводности насыщенной жидкости от температуры описываются уравнениями:

$$\lambda_s(T) = 0,26133 - 7,70781 \cdot 10^{-4} \cdot T + 5,52193 \cdot 10^{-7} \cdot T^2, \quad (3)$$

$$a_s(T) \cdot 10^8 = 3,92221 + 0,07544 \cdot T - 1,56516 \cdot 10^{-4} \cdot T^2. \quad (4)$$

Зависимости λ_s и a_s от давления насыщенного пара P_s показаны на рис. 1 и 2. Сопоставление данных разных работ по теплопроводности насыщенной жидкости приведено на рис. 6 в виде отклонений от уравнения (3). Видно, что данные [11] и

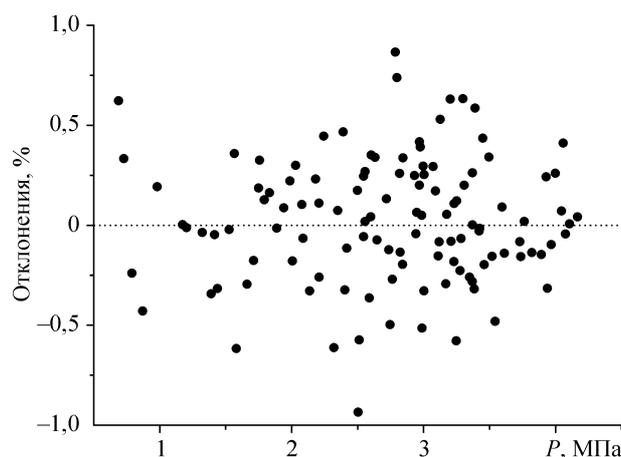


Рис. 4. Отклонение экспериментальных значений по температуропроводности фреона R134a от уравнения (2).

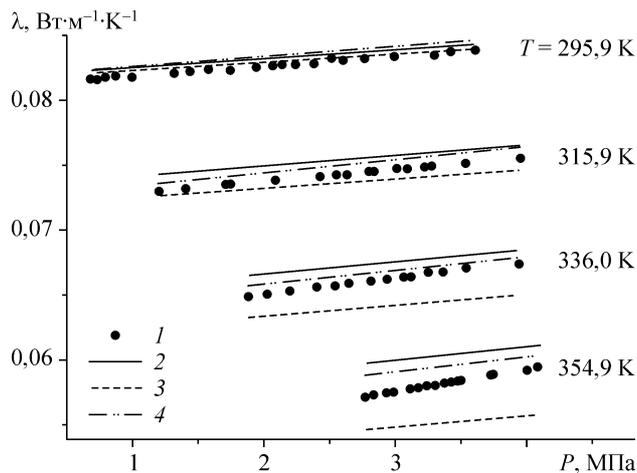


Рис. 5. Теплопроводность фреона R134a по данным разных работ.
1 — настоящая работа, [1, 2] (2), [3] (3), [4] (4).

[12] при температурах выше 300 К начинают резко расходиться (отклонения превышают 30 %). Результаты остальных работ систематически завышены относительно наших данных, однако максимальное отклонение лишь незначительно превышает 5 %. В области отрицательных температур, вплоть до 190 К, уравнение (3) удивительно хорошо описывает и усредняет все имеющиеся экспериментальные данные, несмотря на то, что это уравнение построено по результатам экспериментального исследования в ограниченном интервале температур 295–354 К.

Имеется, по-видимому, единственная работа [14], в которой экспериментально исследовалась температуропроводность R134a. Измерения в [14] были проведены в интервале температур 15–95 °С на трех изобарах (2,0, 5,0 и 7,0 МПа). Результаты этих измерений приведены на рис. 7. Общий характер зависимости $\alpha(T, P = \text{const})$ из [14] аналогичен полученному нами (рис. 7). Однако по данным [14] температуропроводность в исследованном интервале температур и давлений не зависит от давления. Это противоречит нашим данным, согласно которым $\alpha(P, T)$ меняется на 10 % при изменении давления на 1 МПа. Кроме того, в [14] получено очень сильное уменьшение температуропроводности с ростом темпера-

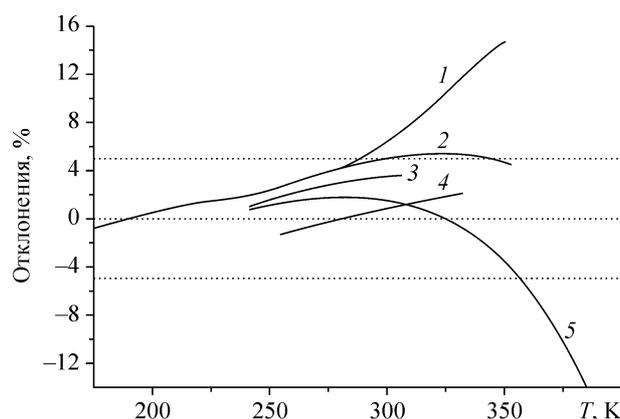


Рис. 6. Отклонения разных экспериментальных данных по теплопроводности насыщенной жидкости R134a от уравнения (3) из работ:
[11] (1), [5] (2), [13] (3), [1] (4), [3] (5).

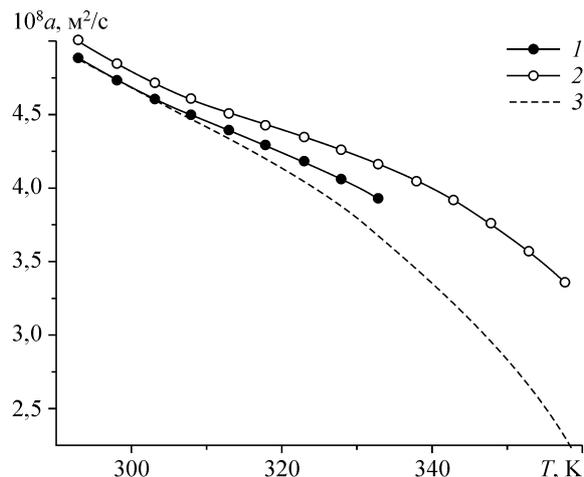


Рис. 7. Изобары температуропроводности фреона R134a.

Данные настоящих исследований а (P, T) — 2 (1), 4 (2), МПа, данные из работы [14] — 2–7 МПа.

туры. Если при комнатных температурах результаты работы [14] близки к нашим, то при $T = 360$ К расхождение между нашими данными и данными [14] превышает 50 %. К сожалению, в работе [14] экспериментальный материал представлен исключительно в графическом виде, что затрудняет проведение оценок и сопоставлений.

ВЫВОДЫ

Проведено подробное исследование переносных свойств фреона R134a в интервале температур 295,9–354,9 К и давлений от линии равновесия жидкость–пар до 4,08 МПа. Получены новые надежные экспериментальные данные по тепло- и температуропроводности. Проведен анализ экспериментальных данных и получены аналитические зависимости $\lambda(P, T)$ и $a(P, T)$, рассчитаны значения теплопроводности и температуропроводности насыщенной жидкости λ_S и a_S , получены аналитические зависимости $\lambda_S(T_S)$ и $a_S(T_S)$. Совместный анализ полученных в настоящей работе и известных литературных данных по теплопроводности показал, что в области низких температур результаты разных авторов удовлетворительно согласуются между собой и неплохо описываются зависимостью (3). Для уточнения данных по переносным свойствам фреона R134a в области высоких значений параметров состояния требуются дополнительные подробные исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Assael M.J., Karagiannidis E. Measurements of the thermal conductivity of R22, R123, and R134a in the temperature range 250–340 K at pressures up to 30 MPa // Inter. J. Thermophysics. — 1993. — Vol. 14, No. 2. — P. 183–197.
2. Jeong S.U., Kim M.S., Ro S.T. Liquid thermal conductivity of binary mixtures of pentafluoroethane (R125) and 1,1,1,2-tetrafluoroethane (R134a) // Inter. J. Thermophysics. — 1999. — Vol. 20, No. 1. — P. 55–62.
3. Laesecke A., Perkins R.A., Nieto de Castro C.A. Thermal conductivity of R134a // Fluid Phase Equilibria. — 1992. — Vol. 80. — P. 263–274.
4. Grebenkov A.J., Zhelezny V.P., Klepatsky P.M. et al. Thermodynamic and Transport Properties of Some Ozone-Safe Refrigerants for Industrial Refrigeration Equipment: Study in Belarus and Ukraine // Inter. J. of Thermophysics. — 1996. — Vol. 17, No. 3. — P. 535–549.

5. Gross U., Song Y.W., Hahne E. Thermal conductivity of the new refrigerants R134a, R152a, and R123 measured by the transient hot-wire method // Inter. J. of Thermophysics. — 1992. — Vol. 13, No. 6. — P. 957–983.
6. Рувинский Г.Я., Лавренченко Г.К., Ильюшенко С.В. Теплофизические свойства R134a // Холодильная техника. — 1991. — № 7. — С. 20–26.
7. Варгафтик Н.Б., Филиппов Л.П., Тарзиманов А.А. и др. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 352 с.
8. 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.
9. Станкус С.В., Хайруллин 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.
10. Багинский А.В., Басин А.С. Анализ методики эквивалентного импеданса и некоторые результаты измерений теплопроводности органических жидкостей // Теплофизические свойства растворов. — Новосибирск, 1983. — С. 70–86.
11. Железный В.П., Лясота Л.Д., Потанов М.Д. и др. Поверхностное натяжение, вязкость и теплопроводность хладагента R134a на линии кипения и в жидкой фазе // Холодильная техника. — 1991. — № 7. — С. 11–12.
12. Laesecke A., Perkins R.A., Nieto de Castro C.A. Thermal conductivity of R134a // Fluid Phase Equilibria. — 1992. — Vol. 80. — P. 263–274.
13. Papadaki M., Schmitt M., Seitz A. et al. Thermal conductivity of R134a and R141b within the temperature range 240–307 K at the saturation vapor pressure // Inter. J. Thermophysics. — 1993. — Vol. 14, No. 2. — P. 173–181.
14. Ibrehith M., Fiebig M., Leipertz A. et al. Thermal Diffusivity of the Refrigerants R123, R134a, R142b and R152a in the Liquid Phase // Fluid Phase Equilibria. — 1992. — Vol. 80. — P. 323–332.

Статья поступила в редакцию 22 октября 2008 г.