

УДК 536.22

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ОЗОНОБЕЗОПАСНОГО ХЛАДАГЕНТА С10М1 В ЖИДКОМ И ГАЗООБРАЗНОМ СОСТОЯНИЯХ*

А.В. БАГИНСКИЙ, О.И. ВЕРБА, С.В. СТАНКУС

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

Методами высокочастотных тепловых волн и коаксиальных цилиндров исследована теплопроводность озонобезопасного хладагента С10М1 в жидком (303,9 ÷ 342,4 К, 1,23 ÷ 4,257 МПа) и газовом (324 ÷ 398,15 К; 0,672 ÷ 2,107 МПа) состояниях. Оцениваемые величины погрешностей измерений температуры, давления и теплопроводности составляют соответственно $\pm 0,02$ К, $\pm 1,5$ кПа и $\pm 1,5 \div 2,5$ %. Получены аппроксимационные зависимости для теплопроводности во всем исследованном интервале температур и давлений, а также на линиях конденсации и испарения. Показано, что теплопроводность в жидком состоянии аддитивна относительно массовых концентраций компонент.

Традиционные фреоны, широко используемые в настоящее время во многих отраслях производства, подлежат в ближайшей перспективе замене экологически безопасными фреонами нового поколения в соответствии с положениями Монреальского протокола. В качестве альтернативных заменителей рассматриваются, в частности, смеси фторзамещенных фреонов метанового, этанового и пропанового рядов, обладающие низкими озоноразрушающим и парниковым потенциалами. В то же время, многие теплофизические свойства этих смесей исследованы недостаточно подробно, либо вообще не исследованы и это затрудняет их эффективное использование. В частности, авторам не удалось обнаружить данных по теплопроводности тройной смеси R-22 + R-21 + R-142b, предлагаемой в качестве заменителя традиционного фреона R12.

В настоящей работе представлены результаты измерений теплопроводности смесевое хладагента С10М1 (торговая марка АСТРОН – 12 Б) производства фирмы “АСТОР” в жидком и газообразном состояниях.

Содержание основных компонентов смеси составляло, согласно сертификату, R-22 (65 ± 3 мас. %), R-21 (15 ± 2 мас. %) и R-142b (20 ± 2 мас. %). Перед началом измерений исследуемые образцы подвергались дополнительной очистке от влаги и летучих примесей, а при заполнении объемов измерительных ячеек предпринимались меры, препятствующие разгонке смеси по фракциям.

Измерения в газовой фазе (324 ÷ 398,15 К; 0,672 ÷ 2,107 МПа) были выполнены стационарным методом коаксиальных цилиндров с погрешностью не более 2,5 %. Установка прошла длительную экспериментальную проверку при исследовании фреонов метанового и пропанового рядов. Подробное описание установки и методики измерений, а также анализ погрешностей приведены в работах [1–3].

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

В жидкофазной области (303,9 ÷ 342,4 К, 1,23 ÷ 4,257 МПа) измерения проведены зондовым методом высокочастотных тепловых волн. Особенностью метода является то, что он позволяет экспериментально исключить радиационную компоненту теплопереноса и обеспечивает, таким образом, непосредственное измерение молекулярной теплопроводности [4]. Погрешность измерения теплопроводности на нашей установке не превышает 1,5 %, что подтверждается результатами контрольных экспериментов с хорошо исследованными жидкостями. Отличие наших данных по теплопроводности толуола и н-гептана от наиболее надежных литературных не превышает 1,3 %. Метод измерений, конструкция экспериментальной установки и анализ погрешностей подробно описаны в работе [5].

Измерения как в жидком, так и газообразном состояниях проводились по изотермам. Давление в измерительных ячейках регулировалось и поддерживалось при помощи термокомпрессора. Для измерения давления использовались электронный преобразователь “Сапфир-22” (погрешность 0,25 %) и образцовый манометр класса 0,15.

Результаты измерений теплопроводности хладагента С10М1 представлены в табл. 1, 2 и на рис. 1, 2. Как видно из графиков, в исследованных интервалах параметров состояния зависимость теплопроводности от давления практически линейна как в жидкой, так и в паровой фазах. Поэтому экспериментальные данные аппроксимировались уравнениями:

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

с зависимостями $\lambda_0(T)$ и $\lambda_1(T)$ в виде полиномов:

$$\lambda_0(T) = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2,$$

$$\lambda_1(T) = b_0 + b_1 \cdot T + b_2 \cdot T^2.$$

Значения коэффициентов a_i , b_i , рассчитанные методом наименьших квадратов, приведены в табл. 3. Температура выражается в К, давление — в МПа, теплопроводность — в Вт/(м·К). Отклонение экспериментальных точек от зависимости (1) во всем исследованном интервале температур и давлений не превосходит погрешности измерений.

С помощью уравнений (1) были определены температурные зависимости теплопроводности жидкости (λ_b) и пара (λ_c) на линиях испарения и конденсации

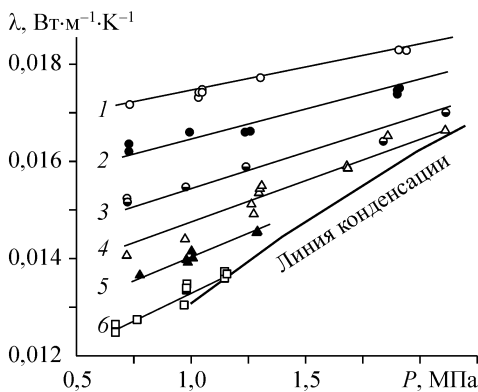


Рис. 1. Теплопроводность паров хладагента С10М1.

398,2 (1), 383,2 (2), 364,7 (3), 351,2 (4), 338,2 (5), 324,7 (6) К.

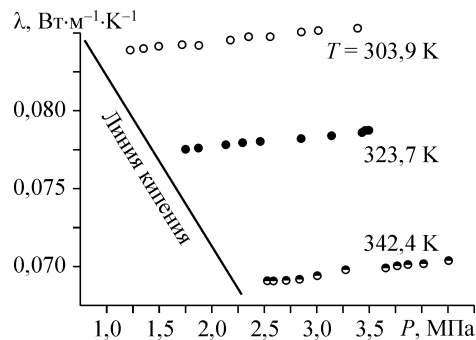


Рис. 2. Теплопроводность хладагента С10М1 в жидком состоянии.

Таблица 1

Экспериментальные значения теплопроводности паров C10M1

<i>P</i> , МПа	λ , Вт/(м·К)	<i>P</i> , МПа	λ , Вт/(м·К)	<i>P</i> , МПа	λ , Вт/(м·К)
Изотерма 324,7 К		Изотерма 351,2 К		Изотерма 383,2 К	
0,6719	0,01249	0,7215	0,01405	0,7284	0,01620
0,6719	0,01258	0,9734	0,01439	0,7284	0,01636
0,6719	0,01260	1,2658	0,01512	0,9932	0,01660
0,7627	0,01273	1,2732	0,01492	1,2417	0,01660
0,9681	0,01306	1,2989	0,01535	1,2564	0,01661
0,9756	0,01340	1,3062	0,01542	1,9000	0,01740
0,9756	0,01333	1,3129	0,01548	1,9019	0,01746
0,9756	0,01334	1,6774	0,01588	1,9019	0,01743
1,1457	0,01366	1,6822	0,01586	1,9123	0,01752
1,1463	0,01364	1,8604	0,01652	Изотерма 398,7 К	
1,1469	0,01374	2,1071	0,01665		
1,1549	0,01368				
Изотерма 338,2 К		Изотерма 364,7 К			
				0,7348	0,01718
0,7742	0,01366	0,7213	0,01523	0,7348	0,01714
0,9822	0,01391	0,7219	0,01515	1,0320	0,01730
0,9822	0,01397	0,9799	0,01546	1,0338	0,01740
0,9894	0,01392	1,2400	0,01587	1,0443	0,01746
1,0041	0,01414	1,8428	0,01641	1,0486	0,01741
1,0085	0,01402	2,1119	0,01699	1,3017	0,01772
1,2904	0,01452			1,9063	0,01828
1,2929	0,01455			1,9450	0,01830

Таблица 2

Экспериментальные значения теплопроводности C10M1 в жидком состоянии

Изотерма 303,9 К		Изотерма 323,7 К		Изотерма 342,4 К	
<i>P</i> , МПа	λ , Вт/(м·К)	<i>P</i> , МПа	λ , Вт/(м·К)	<i>P</i> , МПа	λ , Вт/(м·К)
1,495	0,0841	1,758	0,0775	4,257	0,0704
1,342	0,084	1,879	0,0776	4,020	0,0702
1,230	0,0839	2,135	0,0778	3,870	0,0701
1,719	0,0842	2,298	0,0779	3,767	0,0700
1,882	0,0843	2,462	0,078	3,652	0,0699
2,176	0,0845	2,852	0,0782	3,271	0,0698
2,356	0,0847	3,143	0,0784	3,002	0,0694
2,558	0,0847	3,441	0,0786	2,836	0,0692
2,858	0,0850	3,473	0,0787	2,698	0,0691
3,028	0,0851	3,492	0,0787	2,583	0,0690
3,392	0,0853			2,532	0,0690

(данные по P-V-T-свойствам хладагента C10M1 взяты из [6]):

$$\lambda_b = 0,194 - 3,63 \cdot 10^{-4} \cdot T_b,$$

$$\lambda_c = -0,35835 + 2,92 \cdot 10^{-3} \cdot T_c - 7,767 \cdot 10^{-6} \cdot T_c^2 + 7,09 \cdot 10^{-9} \cdot T_c^3.$$

Здесь T_b и T_c — температуры кипения и конденсации соответственно.

Систематическое изучение концентрационных зависимостей теплопроводности растворов органических жидкостей показало, что во всех случаях имеют место отрицательные отклонения этой величины от аддитивного значения, причем для компонентов, теплопроводности которых близки, это отклонение приближается

Таблица 3

Значения коэффициентов в аппроксимирующей зависимости (1)

Коэффициенты	Жидкая фаза	Паровая фаза
a_0	$0,189 \pm 0,01$	$-0,04 \pm 0,01$
a_1	$-3,5 \cdot 10^{-4} \pm 3 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-4} \pm 8 \cdot 10^{-5}$
a_2		$-1,93 \cdot 10^{-7} \pm 1 \cdot 10^{-7}$
b_0	$7 \cdot 10^{-3} \pm 3 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-2} \pm 1 \cdot 10^{-2}$
b_1	$-2 \cdot 10^{-5} \pm 6 \cdot 10^{-6}$	$-2,1 \cdot 10^{-4} \pm 7 \cdot 10^{-5}$
b_2		$2,6 \cdot 10^{-7} \pm 9 \cdot 10^{-8}$

к нулю [7]. Если допустить, что указанная закономерность справедлива и для фторорганических жидкостей, то следует ожидать, что теплопроводность исследованной смеси должна быть аддитивной величиной относительно массовых концентраций фреонов R-22, R-21 и R-142b. В табл. 4 приведено сравнение наших данных по теплопроводности C10M1 с результатами расчетов в аддитивном приближении. Видно, что во всем исследованном интервале температур и давлений отклонения не превышают погрешностей экспериментальных данных. Это дает основание предполагать, что и для других концентраций смесей фреонов R-22, R-21 и R-142b теплопроводность в жидкой фазе может быть рассчитана по аддитивному закону.

Таблица 4

Сопоставление данных настоящей работы по теплопроводности жидкого хладагента C10M1 с результатами расчета в аддитивном приближении

T, К	P, МПа	λ , Вт/(м·К)				
		R-22 [8]	R-142b [9]	R-21 [8]	C10M1	
					Расчет	Наст. работа
303,9	2	0,0832	0,0800	0,0988	0,0849	0,0844
303,9	3	0,0843	0,0805	0,0994	0,0858	0,0851
323,7	2	0,0744	0,0734	0,0916	0,0768	0,0777
323,7	3	0,0756	0,0739	0,0923	0,0778	0,0784
342,4	4	0,0680	0,0677	0,0861	0,0707	0,0702

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Груздев В.А., Шестова А.И. Экспериментальное исследование теплопроводности фреонов — 11, 12, 13, 21, 22, 23 // Использование фреонов в энергетических установках: Сб. науч. тр. — Новосибирск: Изд. ИТ СОАН СССР, 1975. — С. 145–181.
2. Верба О.И., Груздев В.А. Теплопроводность гептафторпропана HFC-227ea // Теплофизика и аэромеханика. — 2002. — Т. 9, № 3. — С. 467–476.
3. Верба О.И., Груздев В.А. Теплопроводность гексафторпропана HFC-236ea // Теплофизика и аэромеханика. — 2003. — Т. 10, № 2. — С. 237–244.
4. 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.
5. 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. 17–19.
6. Комаров С.Г., Станкус С.В. Давление паров и P-V-T-свойства озонобезопасного хладагента C10M1 // Теплофизика и аэромеханика. — 2005. — Т. 12, № 3. — С. 459–464.
7. Л.П. Филиппов. Исследование теплопроводности жидкостей. — М.: Изд-во МГУ, 1970. — 240 с.
8. Теплофизические свойства фреонов. Т.1 Фреоны метанового ряда: Справочник / В.В. Алтунин, В.З. Геллер, Е.К. Петров и др.; Под ред. С.А. Ривкина. — М.: Изд-во стандартов, 1980. — 232 с.
9. Kim S.H., Kim D.S., Kim M.S., and Ro S.T. The Thermal Conductivity of R22, R142b, R152a, and Their Mixtures in Liquid State // Intern. J. of Thermophys. — 1993. — Vol. 14, No. 4. — P. 937–950.

Статья поступила в редакцию 27 декабря 2005 г.