

УДК 536.423:534.2

## **Скорость звука и идеально-газовая теплоемкость хладагента R-236ea\***

**С.Г. Комаров, В.А. Груздев, С.В. Станкус**

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

E-mail: gamma@itp.nsc.ru

Методом ультразвукового интерферометра в интервале температур от 263 до 423 К и при давлениях от 17 кПа до 4,2 МПа измерена скорость звука в газообразном фреоне R-236ea чистотой 99,68 мол. %. Погрешности измерения температуры, давления и скорости звука составили  $\pm 20$  мК,  $\pm 1,5$  кПа и  $\pm(0,1\div 0,2)\%$  соответственно. На основе полученных данных рассчитана температурная зависимость идеально-газовой теплоемкости R-236ea.

Ключевые слова: R-236ea, пар, скорость звука, идеально-газовая теплоемкость, ультразвуковой интерферометр.

Новый озонобезопасный фреон R-236ea (1,1,1,2,3,3-гексафторпропан) рассматривается как возможный заменитель хлорсодержащего хладагента R-114, который широко используется в промышленности. Скорость звука в газообразном R-236ea была измерена относительным методом до 377 К и 620 кПа [1, 2]. Наше предыдущее исследование R-236ea [3] охватывало более широкий интервал параметров состояния, однако чистота исследуемых образцов (97 %) была недостаточно высокой для получения справочных данных. В этой работе мы представляем измерения скорости звука в паре R-236ea чистотой 99,68 мол. % в интервале температур 263÷426 К и давлений 0,017÷4,2 МПа, а также оценку изобарной мольной теплоемкости для идеально-газового состояния.

Эксперименты проведены методом ультразвукового интерферометра с переменной базой, который был изготовлен из нержавеющей стали и оснащался датчиками из ниобата лития [3]. Рабочая частота составляла около 1 МГц. Термостатирование образцов в ходе измерений осуществлялось жидкостным термостатом в пределах  $\pm 5$  мК. Температура измерялась образцовыми термометрами сопротивления первого разряда ПТС-10, отградуированными в Сибирском НИИ Метрологии, с погрешностью 0,02 °С. Инструментальная погрешность измерения давления ( $P$ ) составляла 0,3 кПа при  $P < 0,6$  МПа и 3 кПа при  $P = 4$  МПа. Для оценки погрешности измерения скорости звука были проведены эксперименты с аргоном.

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 05-08-01173) и СО РАН (проект № 81-06).

Они показали, что отличие наших данных от наиболее надежных справочных не превышает 0,06 %. Перед экспериментами образцы R-236еа очищались от паров воды и летучих примесей.

Скорость звука ( $U$ ) измерялась вдоль изотерм с шагом в 10 К от 263 до 423 К при давлениях от 17÷40 кПа до линии насыщения. В исследованном диапазоне параметров состояния дисперсии скорости звука не наблюдалось. Результаты экспериментов приведены в таблице.

Таблица

Экспериментальные данные по скорости звука в паре R-236еа

$T$ (К)	$P$ (кПа)	$U$ (м·с <sup>-1</sup> )	$P$ (кПа)	$U$ (м·с <sup>-1</sup> )	$P$ (кПа)	$U$ (м·с <sup>-1</sup> )	$P$ (кПа)	$U$ (м·с <sup>-1</sup> )
263,15	17,08	123,9	25,22	123,44	41,10	122,36	–	–
273,15	222,64	125,97	44,44	124,85	75,13	123,26	76,35	123,20
283,15	17,88	128,48	46,08	127,36	74,56	126,03	117,05	124,02
293,15	17,40	130,50	17,70	130,58	29,91	130,15	46,41	129,51
293,15	47,05	129,46	54,75	129,21	101,66	127,37	102,13	127,36
293,15	107,40	127,08	133,79	125,99	166,59	124,49	172,22	124,28
303,15	24,16	132,28	41,47	132,04	101,49	129,86	102,18	129,81
303,15	169,52	127,23	177,08	126,89	237,73	124,38	–	–
313,15	20,86	134,83	43,46	134,30	51,21	133,93	93,50	132,62
313,15	95,31	132,45	168,60	130,02	193,85	129,10	320,00	123,69
323,15	19,73	137,14	45,75	136,33	49,79	136,17	97,17	134,81
323,15	149,94	133,13	159,30	132,86	240,18	130,30	426,23	123,25
333,15	20,94	139,06	45,50	138,47	95,71	137,13	147,30	135,64
333,15	188,18	134,43	201,45	134,07	212,69	133,84	273,67	132,14
333,15	339,57	130,04	466,96	125,74	557,05	121,9	–	–
343,15	44,67	140,55	46,80	140,49	104,01	138,99	105,65	138,74
343,15	159,33	137,48	186,70	136,88	187,10	136,94	263,97	134,80
343,15	289,29	134,21	539,46	126,93	713,27	120,38	–	–
353,15	20,95	143,18	34,02	142,94	70,55	142,02	109,89	141,04
353,15	144,51	140,31	215,54	138,61	374,32	134,79	564,12	129,51
353,15	748,81	124,10	902,35	118,49	–	–	–	–
363,15	52,79	144,47	102,30	143,67	107,54	143,35	188,90	141,68
363,15	198,68	141,82	199,25	141,88	497,53	134,84	627,19	131,70
363,15	783,72	127,09	902,61	123,91	1146,9	114,73	1147,54	114,73
373,15	43,62	146,70	100,97	145,69	105,95	145,44	163,04	144,33
373,15	180,10	144,11	185,13	144,02	207,40	143,53	256,44	142,44
373,15	319,48	141,36	398,51	139,57	403,95	139,55	551,17	136,30
373,15	879,71	128,49	1212,9	119,23	1323,5	115,39	–	–
383,15	54,84	148,51	106,20	147,56	193,05	146,00	213,43	145,82
383,15	374,14	142,6	481,82	140,59	659,67	136,93	793,93	134,14
383,15	1079,2	127,65	1358,6	120,40	1504,3	116,03	1728,5	106,44
393,15	49,49	150,42	99,87	149,53	161,02	148,42	280,87	146,48
393,15	645,31	140,15	937,14	134,53	1223,5	128,52	1488,9	122,27
393,15	1491,4	122,09	1758,0	115,00	1962,3	108,72	–	–
403,15	17,74	152,81	45,68	152,33	100,09	151,78	209,52	150,03
403,15	324,02	148,24	514,33	145,13	723,42	141,65	939,24	137,82
403,15	1207,7	132,94	1431,3	128,48	1664,1	123,31	1928,9	116,97
403,15	2221,8	108,78	239,11	149,87	–	–	–	–
413,15	18,55	154,19	52,52	154,05	102,38	153,37	210,25	151,87
413,15	322,80	150,30	471,73	148,27	681,59	145,23	892,23	141,49
413,15	1197,96	136,76	1353,8	134,00	2032,5	120,72	2541,1	108,46
423,15	102,68	155,18	202,51	153,91	218,61	153,70	300,17	152,78
423,15	565,81	140,14	695,80	147,36	963,41	143,53	1404,2	136,90
423,15	1981,1	127,22	2392,1	119,42	2768,2	111,37	3389,8	97,12
423,15	3707,7	85,82	3916,2	79,27	4076,8	78,26	4191,7	82,31

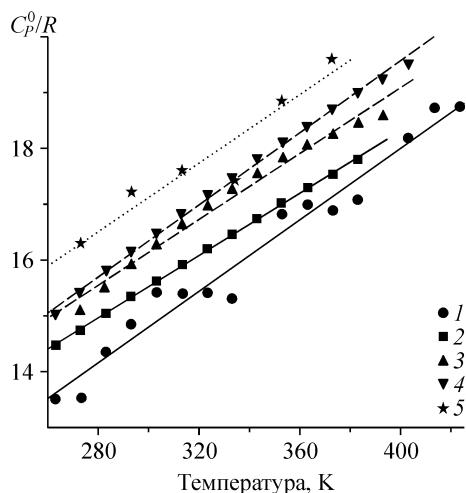


Рис. Температурная зависимость идеаль-но-газовой теплоемкости фторпроизвод-ных пропана.

R-236ea, данная работа (1), R-236ea, [1, 2] (2), R-227ea, [4] (3), R-227ea, [5] (4), C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>, [6] (5).

Погрешность данных составляет 0,05± ±0,10 % и возрастает до 0,2 % с при-ближением к линии насыщения.

Используя полученные данные по скорости звука и известное термоди-намическое соотношение

$$C_p^0(T) = \frac{R}{\left(1 - \frac{RT}{\mu U_0^2}\right)}, \quad (1)$$

легко получить идеальную-газовую теплоемкость  $C_p^0(T)$  фреона R-236ea. В уравнении (1)  $R = 8,314472$  Дж·моль<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> — универсальная газовая постоянная,  $T$  — температура в К,  $\mu$  — молекулярная масса,  $U_0(T)$  — скорость звука при давлении  $P \rightarrow 0$ . Для нахождения  $U_0(T)$  экспериментальные данные по скорости звука на изотермах аппроксимировались полиномами второй или третьей степени по давлению. Полученные таким образом данные по  $C_p^0(T)$  с погрешностью  $\pm 0,32R$  описываются зависимостью

$$C_p^0(T) / R = 5,122 + 0,0322T. \quad (2)$$

Сравнение наших данных по  $C_p^0(T)$  с результатами других авторов [1–2, 4–6] приведено на рисунке. Видно, что наши эксперименты подтверждают сделанное ранее заключение [4] о том, что идеальная-газовая теплоемкость фторпроизводных пропана увеличивается на  $(8 \pm 0,5)$  Дж·моль<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> на каждый атом фтора, а температурный коэффициент  $C_p^0(T)$  слабо зависит от состава соединения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Defibaugh D.R., Gillis K.A., Moldover M.R., Schmidt J.W., Weber L.A. Thermodynamic properties of CF<sub>3</sub>-CHF-CHF<sub>2</sub>, 1,1,1,2,3,3-hexafluoropropane // Fluid Phase Equilibria. — 1996. — Vol. 122, No. 1–2. — P. 131–155.
2. Gillis K.A. Thermodynamic properties of seven gaseous halogenated hydrocarbons from acoustic measurements: CHClFCF<sub>3</sub>, CHF<sub>2</sub>CF<sub>3</sub>, CF<sub>3</sub>CH<sub>3</sub>, CHF<sub>2</sub>CH<sub>3</sub>, CF<sub>3</sub>CHFCHF<sub>2</sub>, CF<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>CF<sub>3</sub>, and CHF<sub>2</sub>CF<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>F // Inter. J. Thermophys. — 1997. — Vol. 18, No. 1. — P. 73–135.
3. Комаров С.Г., Груздев В.А. Равновесие жидкость–пар и скорость звука в HFC–236 (CF<sub>3</sub>-CHF-CHF<sub>2</sub>) // Теплофизика и аэромеханика. — 1999. — Т. 6, № 1. — С. 105–111.
4. Gruzdev V.A, Khairulin R.A, Komarov S.G, Stankus S.V. Thermodynamic properties of HFC–227ea // Inter. J. Thermophys. — 2002. — Vol. 23, No. 3. — P. 809–824.
5. Wirbser H., Brauning G., Gurtner J., Ernst G. Flow-calorimetric specific heat capacities and Joule-Thomson coefficients of CF<sub>3</sub>CHF<sub>2</sub>CF<sub>3</sub> (R227) — a new working fluid in energy technics at pressures up to 15 MPa and temperatures between 253 K and 423 K // J. Chem. Thermodyn. — 1992. — Vol. 24. — P. 761–772.
6. Барышев В.П. Комплексное исследование теплофизических свойств фреона 218 (октафторпропана). — Одесса: ОТИХП, 1982. — 19 с.

Статья поступила в редакцию 5 марта 2008 г.