

УДК 534.22

Скорость звука в паровой фазе хладагента R-409A*

С.Г. Комаров, С.В. Станкус

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

E-mail: stankus@itp.nsc.ru

Методом ультразвукового интерферометра в интервале температур от 293 до 373 К при давлениях от 0,05 до 0,58 МПа измерена скорость звука в газообразном хладагенте R-409A. Погрешности измерения температуры, давления и скорости звука составили, соответственно, ± 20 мК, ± 4 кПа и $\pm(0,1-0,2)$ %. На основе полученных данных рассчитана температурная зависимость идеально-газовой теплоемкости. Проведено сопоставление полученных результатов с расчетом скорости звука по программе REFPROP.

Ключевые слова: скорость звука, идеально-газовая теплоемкость, хладагент R-409A, пар, метод ультразвукового интерферометра.

Смесевой хладагент R-409A (60 мас. % R-22, 25 мас. % R-124 и 15 мас. % R-142B) рассматривается как перспективный заменитель фреона R-12 благодаря улучшению рабочих характеристик установок и возможности работы с применением существующих синтетических или полусинтетических масел. Для оптимизации холодильных циклов необходимы достоверные данные по теплофизическим свойствам хладагентов, однако нам не удалось обнаружить в литературе результатов экспериментальных исследований R-409A в широкой области параметров состояния. Практически все данные получены расчетным путем.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное определение скорости звука (U) хладагента R-409A в паровой фазе и температурной зависимости изобарной теплоемкости в идеально-газовом состоянии.

Эксперименты проведены методом ультразвукового интерферометра с переменной базой, который был изготовлен из нержавеющей стали и оснащался датчиками из ниобата лития [1]. Рабочая частота составляла около 1 МГц. Термостатирование образцов в ходе измерений осуществлялось жидкостным термостатом в пределах ± 5 мК. Температура измерялась образцовыми термометрами сопротивления первого разряда ПТС-10, отградуированными в Сибирском НИИ Метрологии, с погрешностью $0,02$ °С, а давление p — кварцевым манометром, который предварительно был отградуирован по грузопоршневому манометру. Использовался мембранный нуль-индикатор из нержавеющей стали. Инструментальная погрешность измерения p составляла 4 кПа.

Скорость звука в R-409A измерялась вдоль пяти изотерм с шагом в 20 К от 293 К с оцениваемой погрешностью в $0,1-0,2$ % [2]. В исследованном диапазоне параметров

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 11-08-00065).

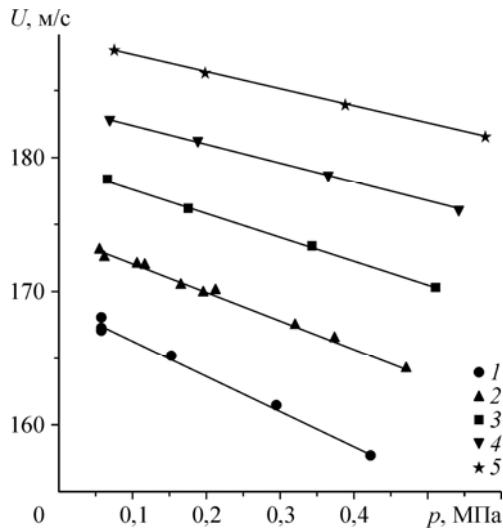


Рис. 1. Экспериментальные данные по скорости звука в паре R-409а.

Изотермы: 293,15 (1), 313,15 (2), 333,15 (3), 353,15 (4), 373,15 (5) К.

состояния дисперсии U не наблюдалось. Результаты экспериментов с R-409А приведены в таблице и на рис. 1. В среднем измеренные значения скорости звука оказались на 0,14 % ниже расчетов [3]. Такое отличие не превышает оцениваемых погрешностей экспериментов и свидетельствует о надежности определения термодинамических свойств хладагента R-409А в паровой фазе при использовании программы REFPROP [3].

Используя полученные данные по скорости звука в паре и известное термо-

динамическое соотношение:

$$C_p^0(T) = R / (1 - (RT / \mu U_0^2)), \quad (1)$$

легко получить идеально-газовую теплоемкость $C_p^0(T)$ хладагента. В уравнении (1) T — температура в К, $R = 8,314472$ Дж/(моль·К) — универсальная газовая постоянная, $U_0(T)$ — скорость звука при нулевом давлении, μ — молекулярная масса (0,097433 кг/моль). Для нахождения $U_0(T)$ экспериментальные данные по скорости звука на изотермах $U(p)$ аппроксимировались полиномами первой степени от давления. Среднеквадратичное отклонение измеренных значений от аппроксимационных зависимостей $U(p)$ составило 0,12 % (рис. 2). Экспериментальные данные по $C_p^0(T)$ хладагента R-409А описываются линейной зависимостью:

$$C_p^0 / R = 3,224 + 0,01643 T. \quad (2)$$

Среднеквадратичное отклонение точек от данной зависимости составляет 1,2 %. В отличие от скорости звука, идеально-газовая теплоемкость смесевых фреонов является строго аддитивной величиной. Температурные зависимости $C_p^0(T)$ фреонов, входящих

Таблица
Экспериментальные данные по скорости звука в паре R-409А

T , К	p , МПа	U , м/с	T , К	p , МПа	U , м/с
293,15	0,05682	167,30	313,15	0,47049	164,16
293,15	0,05682	167,10	313,15	0,47101	164,22
293,15	0,05869	167,96	333,15	0,06508	178,33
293,15	0,15316	165,14	333,15	0,17518	176,13
293,15	0,29540	161,49	333,15	0,34328	173,40
293,15	0,42155	157,70	333,15	0,51012	170,38
313,15	0,05460	173,09	353,15	0,06904	182,86
313,15	0,06072	172,61	353,15	0,18672	181,25
313,15	0,10575	172,01	353,15	0,36576	178,70
313,15	0,11602	171,94	353,15	0,54326	176,09
313,15	0,16442	170,46	373,15	0,07350	188,00
313,15	0,19572	169,92	373,15	0,07356	188,01
313,15	0,21211	170,04	373,15	0,38837	183,80
313,15	0,32079	167,46	373,15	0,58056	181,60
313,15	0,37337	166,50			

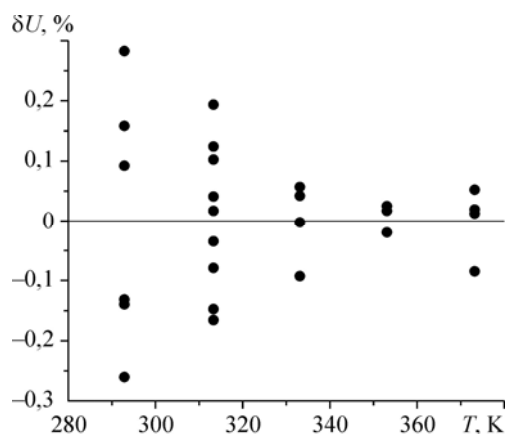


Рис. 2. Относительные отклонения экспериментальных данных по скорости звука в паре R-409a от аппроксимационных уравнений для изотерм.

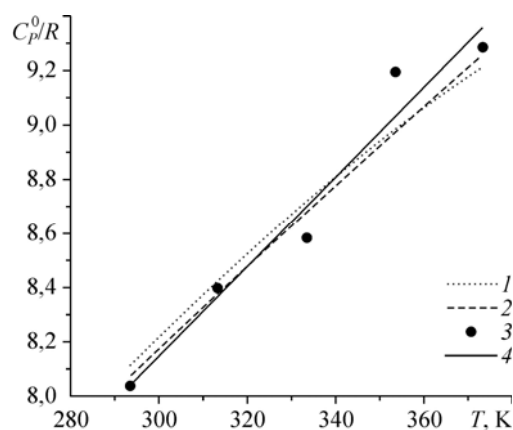


Рис. 3. Температурная зависимость идеально-газовой теплоемкости R-409a.

1 — расчет в аддитивном приближении при использовании данных [4–6], 2 — данные работы [3], 3 — результаты измерений настоящей работы, 4 — уравнение (2).

в состав хладагента R-409A, исследованы достаточно надежно [4–6]. Это дает дополнительную возможность оценить точность проведенных экспериментов по измерению скорости звука в паровой фазе путем сопоставления данных по идеально-газовой теплоемкости. Как видно из рис. 3, результаты настоящих измерений $C_p^0(T)$ хорошо согласуются с расчетом по законам идеальных растворов (среднеквадратичное отклонение 1,4 %). Учитывая, что погрешность определения $C_p^0(T)$ для R-409A при расчете по соотношению (1) приблизительно в 15 раз превышает погрешность измерения скорости звука, хорошее согласие экспериментальных и расчетных значений указывает на корректность оценки погрешностей измерений в наших экспериментах.

Список литературы

1. Gruzdev V.A., Khairulin R.A., Komarov S.G., Stankus S.V. Thermodynamic properties of HFC-227ea // Inter. J. Thermophys. 2002. Vol. 23. P. 809–824.
2. Комаров С.Г., Станкус С.В. Экспериментальное исследование скорости звука в газообразном хладагенте R-507a // Теплофизика высоких температур. 2011. Т. 49, № 1. С. 145–149.
3. Lemmon E.W., McLinden M.O., Huber M.L. NIST Standard reference database 23: reference fluid thermodynamic and transport properties-REFPROP, Version 8.0, National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program. Gaithersburg, Maryland, 2002.
4. He M.G., Liu Z.G., Yin J.M. Measurements of speed of sound with a spherical resonator: HCFC-22, HFC-152a, HFC-143a and propane // Inter. J. Thermophys. 2002. Vol. 23, No. 6. P. 1599–1615.
5. Bekermann W., Kohler F. Acoustic determination of ideal-gas heat capacity and second virial coefficients of some refrigerants between 250 and 420 K // Inter. J. Thermophys. 1995. Vol. 16, No. 2. P. 455–464.
6. Gillis K.A. Thermodynamic properties of seven gaseous halogenated hydrocarbons from acoustic measurements: CHClFCF_3 , CHF_2CF_3 , CF_3CH_3 , CHF_2CH_3 , $\text{CF}_3\text{CHFCHF}_2$, $\text{CF}_3\text{CH}_2\text{CF}_3$ and $\text{CHF}_2\text{CF}_2\text{CH}_2\text{F}$ // Inter. J. Thermophys. 1997. Vol. 18, No. 1. P. 73–135.

Статья поступила в редакцию 18 апреля 2012 г.