

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ**

УДК 534.22: 621.564

**Экспериментальное исследование скорости звука  
в жидком и газообразном хладагенте R-407C**

**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 0,5–3,7 МПа измерена скорость звука в жидком и газообразном хладагенте R-407C. Погрешности измерения температуры, давления и скорости звука составили соответственно  $\pm 20$  мК,  $\pm 4$  кПа и  $\pm(0,1-0,3)$  %. Проведено сопоставление полученных результатов с расчетом скорости звука из фундаментального уравнения состояния для свободной энергии Гельмгольца.

**Ключевые слова:** скорость звука, хладагент R-407C, пар, жидкость, метод ультразвукового интерферометра.

Хладагент R-407C (зеотропная смесь 23 мас. % R-32, 25 мас. % R-125 и 52 мас. % R-134a) рассматривается как заменитель фреона R-22 в системах кондиционирования воздуха и холодильных машинах в среднем температурном диапазоне.  $P$ ,  $V$ ,  $T$ -свойства R-407C исследованы подробно в работе [1], однако работ по измерению скорости звука  $U$  в жидкой и паровой фазах обнаружить не удалось.

Цель настоящей работы заключалась в измерениях скорости звука в хладагенте R-407C в жидком (293–323 К) и парообразном (293–373 К) состояниях, а также в жидкой фазе хорошо изученного хладагента R-134a (293–333 К; 0,6–3,6 МПа) для подтверждения оценок возможных систематических погрешностей проводимых измерений.

Эксперименты проводились с помощью ультразвукового интерферометра с переменной базой [2] на частоте около 1 МГц. Термостатирование образцов в ходе измерений осуществлялось жидкостным термостатом в пределах  $\pm 5$  мК. Температура измерялась образцовыми термометрами сопротивления 1-го разряда ПТС-10, отградуированными по МТШ-90 в Сибирском НИИ метрологии, с погрешностью 0,02 К. Инструментальная погрешность измерения давления ( $p$ ) составляла 4 кПа. Исследовались фреоны Solkane-407C производства фирмы Solvay Fluor и Fогane-134a (Arkema Inc).

Скорость звука в R-407C и R-134a измерялась вдоль изотерм с шагом в 10–20 К, начиная от 293 К, с оцениваемой погрешностью в 0,1–0,2 % — для паровой фазы и 0,2–0,3 % — для жидкой. В исследованном диапазоне параметров состояния дисперсии  $U$  не наблюдалось. Результаты экспериментов с R-407C отражены в табл. 1, 2 и на рис. 1, а на рис. 2 показаны относительные отклонения полученных данных по скорости звука в R-134a от данных, приведенных в работе [3], которая является международным стандартом термодинамических свойств этого фреона. Погрешность скорости звука

Таблица 1

Экспериментальные данные по скорости звука в паре R-407C

$T, K$	$p, MPa$	$U, m/c$	$T, K$	$p, MPa$	$U, m/c$
293,15	0,10366	177,65	333,15	0,05281	189,66
293,15	0,20051	175,44	333,15	0,02319	190,25
293,15	0,30520	172,95	353,15	0,50143	189,41
293,15	0,30571	172,94	353,15	0,37511	191,02
293,15	0,40554	170,48	353,15	0,24494	192,70
293,15	0,40575	170,28	353,15	0,12578	194,12
313,15	0,43772	177,16	353,15	0,05645	195,29
313,15	0,32884	179,33	353,15	0,02454	195,41
313,15	0,21547	181,39	373,15	0,53380	195,03
313,15	0,11108	183,34	373,15	0,39773	196,47
333,15	0,46911	183,41	373,15	0,25940	198,07
333,15	0,35212	185,29	373,15	0,13327	199,36
333,15	0,23019	187,20	373,15	0,05972	200,32
333,15	0,11854	188,84	373,15	0,02626	200,55

Таблица 2

Экспериментальные данные по скорости звука в жидком R-407C

$T, K$	$p, MPa$	$U, m/c$	$T, K$	$p, MPa$	$U, m/c$
293,15	1,02213	499,59	303,15	2,44429	463,03
293,15	1,04971	497,58	303,15	2,48960	463,52
293,15	1,07348	497,44	303,15	2,86272	468,33
293,15	1,49341	504,60	303,15	2,90856	469,58
293,15	1,53641	504,90	303,15	3,26030	475,41
293,15	1,54460	504,99	313,15	1,75824	397,27
293,15	2,00631	510,70	313,15	2,10017	401,50
293,15	2,44702	515,88	313,15	2,36888	407,26
293,15	3,05270	522,96	313,15	2,65845	412,44
293,15	3,07475	523,73	313,15	3,00066	418,80
293,15	3,55840	528,20	313,15	3,68741	429,34
303,15	1,34666	447,58	323,15	3,11514	362,04
303,15	1,54353	450,13	323,15	3,51970	371,57
303,15	1,99444	456,82			

в жидкой фазе в работе [3] оценивается в 0,3 %. Видно, что результаты, полученные авторами, несколько превышают эти рекомендации, тем не менее, они совпадают в пределах

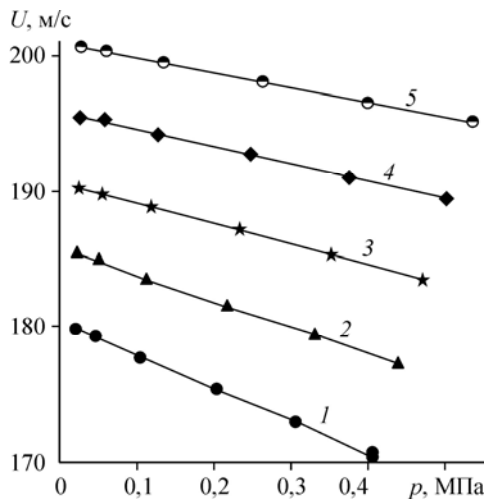


Рис. 1. Экспериментальные данные по скорости звука в паре R-407c.  $T = 293,15$  (1),  $313,15$  (2),  $333,15$  (3),  $353,15$  (4),  $373,15$  (5) К.

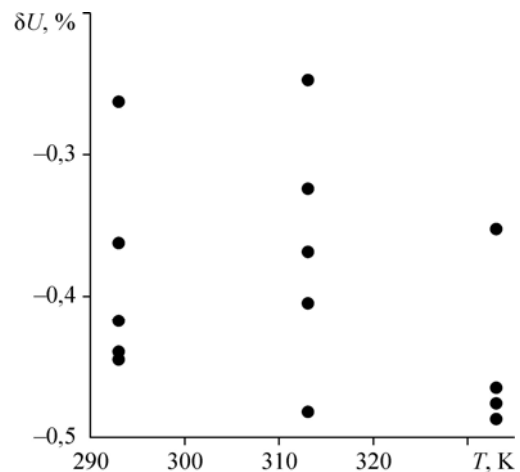
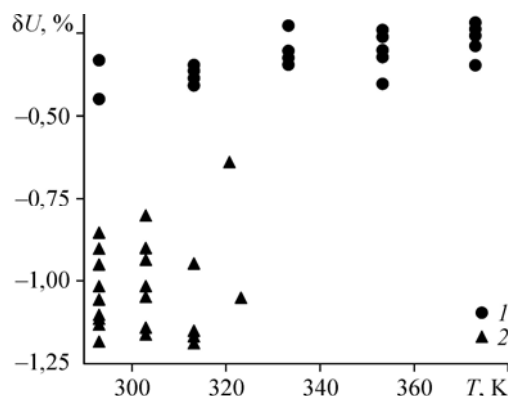


Рис. 2. Относительные отклонения данных [3] по скорости звука в жидком R-134a от измеренных значений, полученных в настоящей работе.

Рис. 3. Относительные отклонения экспериментальных данных по скорости звука в R-407C от рассчитанных из фундаментального уравнения состояния для свободной энергии Гельмгольца [4].  
1 — пар, 2 — жидкость.



суммарных погрешностей измерений. Среднеквадратичное отклонение составляет 0,4 %. Это дает основание предполагать, что погрешность полученных в ходе экспериментов данных для жидкого R-407C также не выходит за пределы 0,2–0,3 %.

На рис. 3 приведено сопоставление измеренных в настоящей работе значений скорости звука R-407C с рассчитанными  $U$  из фундаментального уравнения состояния для свободной энергии Гельмгольца [4]. Среднеквадратичные отклонения  $U$  для жидкой и паровой фаз составляют 0,83 и 0,34 % соответственно, что превосходит возможные погрешности измерений. Это указывает на необходимость уточнения уравнения, приведенного в работе [4].

**Заключение.** Получены новые экспериментальные данные по скорости звука в жидком и газообразном хладагенте R-407C. Сопоставление полученных результатов с имеющимися литературными данными подтвердило заявляемую точность измерений и показало, что фундаментальное уравнение состояния для свободной энергии Гельмгольца хладагента R-407C требует уточнения.

#### Список литературы

1. Lemmon E.W., Jacobsen R.T. Equations of State for Mixtures of R-32, R-125, R-134a, R-143a, and R-152a // J. Phys. Chem. Ref. Data. 2004. Vol. 33, No. 2. P. 593–620.
2. Комаров С.Г., Станкус С.В. Скорость звука в паровой фазе хладагента R-409A // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20, № 1. С. 127–129.
3. Tillner-Roth R., Baehr H.D. An international standard formulation for the thermodynamic properties of 1,1,1,2-tetrafluoroethane (HFC-134a) for temperatures from 170 K to 455 K and pressures up to 70 MPa // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1994. Vol. 23, No. 5. P. 657–729.
4. Lemmon E.W. Pseudo-pure fluid equation of state for the refrigerants blends R-410A, R-404A, R-507A, and R-407C // Intern. J. Thermophys. 2003. Vol. 24, No. 4. P. 991–1006.

Статья поступила в редакцию 26 февраля 2015 г.