

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ**

УДК 534.22

**Скорость звука в паре хладагента  
R-134a (57,24 масс. %) – R-227ea (42,76 масс. %)\***

**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 и при давлениях от 0,08 до 0,97 МПа исследована скорость звука газообразного смесевых хладагента R-134a (57,24 масс. %) R-227ea (42,76 масс. %). Погрешности измерения температуры, давления и скорости звука составили соответственно  $\pm 20$  мК,  $\pm 4$  кПа и  $\pm (0,20-0,35)$  %. Получены аппроксимационные зависимости скорости звука на пяти изотермах и проведено сопоставление экспериментальных данных с расчетами по программе REFPROP.

**Ключевые слова:** смесевой хладагент, скорость звука, пар, температура, давление, ультразвуковой интерферометр.

Озонобезопасный смесевой хладагент R-423a (52,5 мас. % R-134a + 47,5 мас. % R-227ea), относящийся к 9-ой серии хладагентов, предназначен для быстрой и экономически эффективной замены R-12 в среднетемпературных системах охлаждения [1]. R-423a не является азеотропом, поэтому в процессе работы холодильного оборудования может возникать его фракционирование (глайд), когда состав паровой фазы будет отличаться от исходного состава R-423a. Для учета этого явления требуются данные по изменению свойств хладагента при изменении концентрации компонентов. Цель данной работы — проведение экспериментального исследования скорости звука в паре смеси хладагентов R-134a и R-227ea в широком интервале параметров состояния для состава с избытком R-134a относительно состава R-423a, а также сопоставление полученных значений с результатами теоретических расчетов свойств данной системы.

Скорость звука  $U$  в проводимых экспериментах измерялась методом ультразвукового интерферометра с переменной базой вдоль пяти квазиизохор в интервале температур 293–373 К и давлений 0,08–0,97 МПа [2–4]. Рабочая частота интерферометра составляла около 1 МГц. Все детали установок были изготовлены из нержавеющей стали. Ячейка погружалась в жидкостный термостат, температура в котором поддерживалась постоянной с точностью не менее 5 мК. Температура  $T$  измерялась образцовыми термометрами сопротивления первого разряда ПТС-10 с погрешностью 0,02 °С, а давление  $p$  — кварцевым манометром. Использовался «горячий» мембранный нуль-индикатор

\* Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (AAAA-A17-117022850029-9).

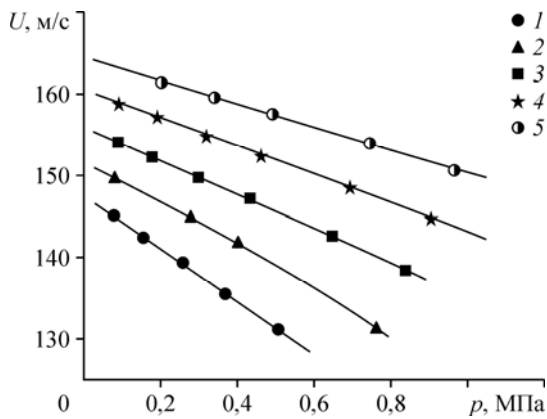


Рис. 1. Экспериментальные данные по скорости звука в паре хладагента: символы — результаты измерений, линии — аппроксимационные зависимости.

$T = 293,15$  (1),  $313,15$  (2),  $333,15$  (3),  $353,15$  (4),  $373,15$  (5) К.

из нержавеющей стали. Инструментальная погрешность измерения  $p$  составляла 4 кПа. Погрешность измерения скорости звука оценивается в 0,20–0,35%. Образцы готовились весовым методом с использованием хладагентов R-227ea производства РНЦ «Прикладная химия» (Санкт-Петербург) чистотой 99,99% и R-134a производства Fogane (Франция) чистотой 99,9%.

На рис. 1 приведены результаты измерений скорости звука в паре смеси R-134a (57,24 масс. %) – R-227ea (42,76 масс. %). Видно, что величина  $U$  увеличивается с ростом температуры и уменьшается с ростом давления. Для каждой изотермы первичные данные аппроксимировались полиномами первой или второй степени от давления:

$$U(p) = a_0 + a_1 p + a_2 p^2, \tag{1}$$

где  $p$  — давление в МПа,  $U$  — скорость звука в м/с. Значения коэффициентов уравнения (1) и интервал исследованных давлений приведены в таблице.

Коэффициенты аппроксимационных уравнений (1)

Таблица

| Изотерма, К | $p_{\min} - p_{\max}$ , МПа | $a_0$  | $-a_1$ | $-a_2$ |
|-------------|-----------------------------|--------|--------|--------|
| 293,15      | 0,08–0,51                   | 147,59 | 32,15  | 0      |
| 313,15      | 0,09–0,76                   | 151,61 | 22,29  | 5,83   |
| 333,15      | 0,09–0,84                   | 156,12 | 21,08  | 0      |
| 353,15      | 0,10–0,90                   | 160,54 | 17,48  | 0      |
| 373,15      | 0,10–0,97                   | 164,45 | 14,08  | 0      |

Среднее абсолютное отклонение экспериментальных точек от сглаживающих зависимостей (рис. 2) составило 0,08%. Сопоставление полученных данных с результатами расчетов по программе REFPROP (версия 8,0) [5] показывает, что измеренные значения скорости звука в среднем лежат на 0,25% ниже расчетных. Хотя такое отличие, в принципе, не превышает оцениваемых погрешностей измерений, тем не менее экспериментальные данные могут быть применены для уточнения теоретических моделей, используемых в программе REFPROP.

В результате выполнения работы впервые получены экспериментальные

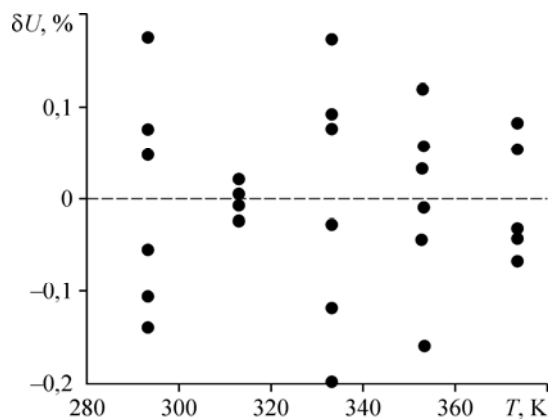


Рис. 2. Относительные отклонения экспериментальных данных от аппроксимационных уравнений (1).

данные по скорости звука в паре раствора R-134a (57,24 масс. %) – R-227ea (42,76 масс. %) и аппроксимационные уравнения. Показано незначительное отличие этих экспериментальных и существующих расчетных данных по скорости звука хладагента в паровой фазе. Полученные результаты дают возможность уточнить теоретические модели для расчета свойств растворов системы гидрофторуглеродов R-134a–R-227ea.

#### Список литературы

1. **Хладагенты 9 серий.** Информационное руководство. Швейцария: DuPont ISCEON, 2006.  
[https://www.chemours.com/Refrigerants/ru\\_RU/assets/downloads/k10785\\_ISCEON\\_9series\\_pib\\_eu\\_ru.pdf](https://www.chemours.com/Refrigerants/ru_RU/assets/downloads/k10785_ISCEON_9series_pib_eu_ru.pdf).
2. **Gruzdev V.A., Khairulin R.A., Komarov S.G., Stankus S.V.** Thermodynamic Properties of HFC-227ea // Int. J. Thermophys. 2002. Vol. 23. P. 809–824.
3. **Комаров С.Г., Станкус С.В.** Экспериментальное исследование скорости звука в жидком и газообразном хладагенте R-407C // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23, № 1. С. 141–143.
4. **Комаров С.Г., Станкус С.В.** Плотность и скорость звука хладагента R-406A в паровой фазе // Теплофизика высоких температур. 2016. Т. 54, № 2. С. 314–316.
5. **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.

*Статья поступила в редакцию 18 марта 2019 г.,  
после доработки — 18 марта 2019 г.,  
принята к публикации 26 апреля 2019 г.*