

УДК 534.22+536.411

ДАВЛЕНИЕ ПАРА, СКОРОСТЬ ЗВУКА И ПЛОТНОСТЬ СМЕСЕВОГО ХЛАДАГЕНТА R-134a–R227ea В ПАРОВОЙ ФАЗЕ

© 2019 г. С. Г. Комаров¹, С. В. Станкус¹, *¹ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск, Россия*E-mail: stankus@itp.nsc.ru

Поступило в редакцию 23.11.2018 г.

После доработки 25.12.2018 г.

Принято к публикации 27.03.2019 г.

С помощью ультразвукового интерферометра и пьезометра постоянного объема в интервале температур от 293 до 373 К и при давлениях от 0.06 до 0.4–3.6 МПа исследованы давление пара на линии испарения, скорость звука и плотность газообразного смеси R-134a (48.66%)–R-227ea (51.34%). Погрешности измерения температуры, давления, скорости звука и плотности составили соответственно ± 20 мК, ± 4 кПа, $\pm(0.1–0.3)\%$ и $\pm(0.2–0.4)\%$. Получены аппроксимационные зависимости плотности пара и его давления на линии испарения. Выполнено сопоставление экспериментальных данных с расчетами по программе REFPROP.

DOI: 10.1134/S0040364419040124

ВВЕДЕНИЕ

Смесевые хладагенты системы гидрофторуглеродов R-134a и R-227ea относятся к группе хладагентов с нулевым потенциалом разрушения озонового слоя (ODP = 0). Один из вариантов состава этой системы – хладон R-423a (52.5 мас. % R-134a + 47.5 мас. % R-227ea) нашел широкое применение в качестве замены R-12 в системах охлаждения жидкостей. По заявлению компании “Дюпон”, успешная замена R-12 на R-423a произведена более чем на 40 объектах в Европе в установках различных типов [1]. Однако экспериментальных исследований термодинамических свойств R-423a и других составов системы R-134a–R-227ea в паровой фазе обнаружить не удалось. Все приводимые в литературе данные получены расчетным путем, в основном с использованием широко известной программы REFPROP различных версий.

Цель данной работы состояла в экспериментальном исследовании скорости звука и p, V, T -свойств одного из составов смеси хладагентов R-134a и R-227ea в широком интервале параметров состояния паровой фазы и сопоставлении полученных значений с результатами теоретических расчетов свойств данной системы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Плотность ρ исследовалась с помощью пьезометра постоянного объема (439 см³) из нержавеющей стали 12X18H10T вдоль шести изомасс (постоянная масса вещества в пьезометре) в интерва-

ле температур 293–373 К и давлений от 0.26 до 3.6 МПа. 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, отградуированными в Сибирском НИИ метрологии, с погрешностью 0.02°C, а давление p – кварцевым манометром, который предварительно был отградуирован по грузопоршневому манометру. Использовался “горячий” мембранный нуль-индикатор из нержавеющей стали. Инструментальная погрешность измерения p составляла 4 кПа. Погрешность измерения плотности составляла 0.2–0.4%. Вводились поправки, учитывающие тепловое расширение пьезометра и его деформацию. Их величина не превышала 0.2%.

Скорость звука U измерялась методом ультразвукового интерферометра с переменной базой вдоль пяти квазиизохор в интервале температур 293–373 К и давлений 0.06–0.40 МПа. Рабочая частота интерферометра составляла около 1 МГц. Все детали установок изготовлены из нержавеющей стали. Использовался тот же термостат и датчики температуры, что и для пьезометра. Погрешность измерения скорости звука оценивается в 0.1–0.3%.

Положение линии испарения определялось по изменению характера температурной зависимости давления в пьезометре. Описание экспериментальной техники и методики проведения экспериментов приведено в [2–5].

Образцы приготавливались весовым методом (погрешность состава не более 0.05 мас. %) с ис-

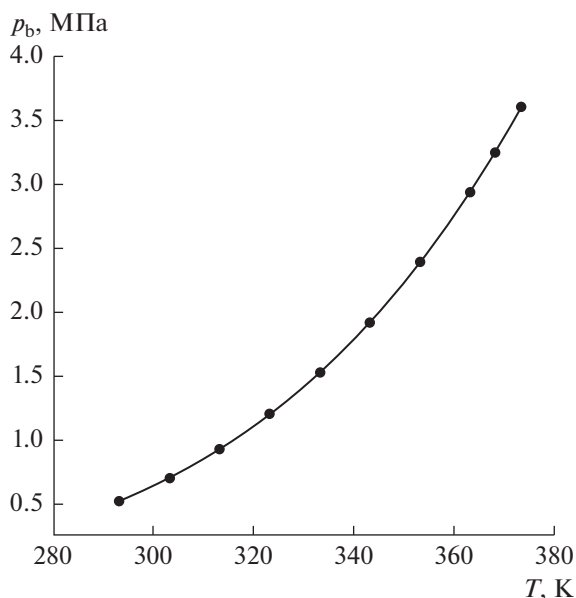


Рис. 1. Давление пара хладагента (48.66 мас. % R-134a + 51.34 мас. % R-227ea) на линии испарения: точки – результаты измерений, линия – расчет по (1).

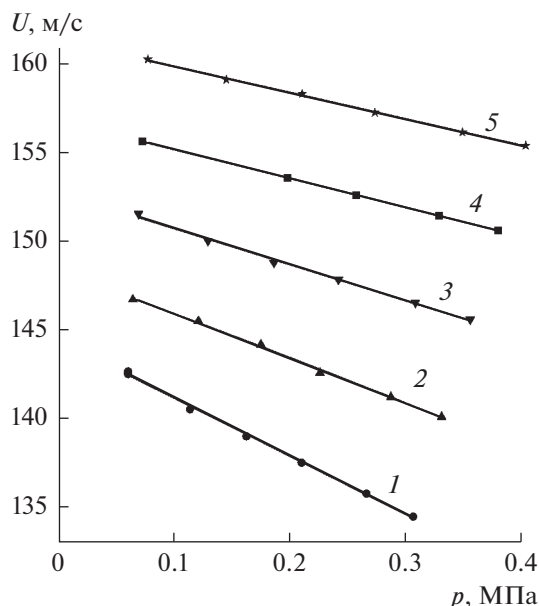


Рис. 2. Экспериментальные данные по скорости звука в паре хладагента: точки – результаты измерений, линии – аппроксимационные зависимости; 1 – 293.15 К, 2 – 313.15, 3 – 333.15, 4 – 353.15, 5 – 373.15.

пользованием хладагентов R-227ea производства РНЦ “Прикладная химия” (Санкт-Петербург) чистотой 99.99% и R-134a производства Fogane (Франция) чистотой 99.9%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 и в табл. 1 приведены результаты измерений давления пара смеси на линии испарения p_b . Первичные данные обрабатывались уравнением Риделя

$$\ln p_b = 41.354 - \frac{4020.93}{T} - 4.99221 \ln T + 9.864 \times 10^{-17} T^6, \quad (1)$$

где p_b – в МПа, T – в К. Среднее абсолютное отклонение экспериментальных точек от (1) составило 0.07%.

Таблица 1. Измеренное давление пара хладагента на линии испарения

T, K	p_b, MPa	T, K	p_b, MPa
293.15	0.518	343.15	1.920
303.15	0.697	343.15	1.921
313.15	0.920	353.15	2.389
323.15	1.195	353.15	2.389
323.15	1.195	363.15	2.940
333.15	1.525	368.15	3.252
333.15	1.524	373.15	3.607

В табл. 2 и на рис. 2 приведены первичные данные по скорости звука в смеси 48.66 мас. % R-134a + 51.34 мас. % R-227ea на пяти изотермах. Видно, что, в отличие от жидких алканов [6], U в паре хладагента возрастает с увеличением температуры.

В исследованном диапазоне параметров состояния дисперсии скорости звука не наблюда-

Таблица 2. Экспериментальные данные по скорости звука в паровой фазе хладагента

T, K	p, MPa	$U, m/s$	T, K	p, MPa	$U, m/s$
293.15	0.061	142.6	333.15	0.187	148.9
293.15	0.061	142.7	333.15	0.242	147.9
293.15	0.114	140.6	333.15	0.309	146.6
293.15	0.163	139.1	333.15	0.356	145.7
293.15	0.211	137.6	353.15	0.073	155.7
293.15	0.267	135.8	353.15	0.199	153.6
293.15	0.307	134.6	353.15	0.258	152.7
313.15	0.065	146.8	353.15	0.329	151.5
313.15	0.121	145.6	353.15	0.380	150.7
313.15	0.175	144.3	373.15	0.078	160.3
313.15	0.226	142.7	373.15	0.145	159.2
313.15	0.288	141.3	373.15	0.211	158.4
313.15	0.331	140.2	373.15	0.274	157.3
333.15	0.070	151.6	373.15	0.350	156.2
333.15	0.130	150.1	373.15	0.404	155.5

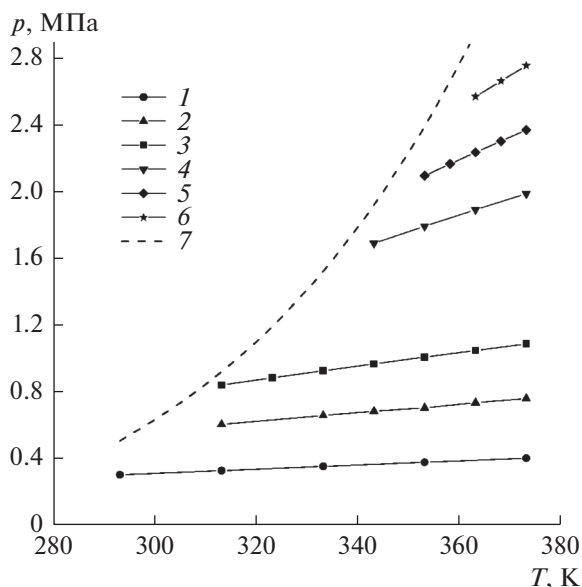


Рис. 3. Экспериментальные квазиизохоры плотности пара хладагента, масса хладагента в пьезометре: 1 – 7.872 г, 2 – 14.933, 3 – 22.165, 4 – 47.016, 5 – 61.245, 6 – 77.338, 7 – расчет по (1).

лось. Для подтверждения заявленной точности измерений U результаты для каждой изотермы аппроксимировались полиномом первой степени для нахождения идеально-газового значения скорости звука при нулевом давлении. Среднее абсолютное отклонение измеренных значений от аппроксимационных зависимостей $U(p)$ составило 0.05%.

Таблица 3. Экспериментальные данные по плотности хладагента в паровой фазе

T , К	p , МПа	ρ , кг/м ³	T , К	p , МПа	ρ , кг/м ³
293.15	0.314	17.92	353.15	2.100	138.0
313.15	0.338	17.90	358.15	2.170	138.9
313.15	0.615	33.96	363.15	0.745	33.87
313.15	0.850	50.40	363.15	1.057	50.27
323.15	0.894	50.37	363.15	1.898	106.6
333.15	0.364	17.88	363.15	2.239	138.9
333.15	0.669	33.92	363.15	2.572	175.4
333.15	0.936	50.35	368.15	2.307	138.9
343.15	0.694	33.90	368.15	2.666	175.4
343.15	0.977	50.32	373.15	0.413	17.85
343.15	1.697	106.7	373.15	0.770	33.85
353.15	0.389	17.86	373.15	1.096	50.24
353.15	0.714	33.89	373.15	1.993	106.6
353.15	1.017	50.29	373.15	2.373	138.8
353.15	1.799	106.7	373.15	2.758	175.3

С использованием найденных $U(p=0)$, молекулярной массы смеси $M = 128.394$ кг/кмоль и известного термодинамического соотношения [3, 5] рассчитана идеально-газовая теплоемкость C_p^0 . Аппроксимация этих данных дала уравнение

$$C_p^0/R = 4.418 + 0.0260T, \quad (2)$$

где R – универсальная газовая постоянная. Сопоставление (2) с расчетом C_p^0 по идеально-газовым теплоемкостям компонентов [2, 7] показало, что среднее абсолютное отклонение данных составляет 1.8%. С учетом того, что ошибка в идеально-газовой теплоемкости в 22–26 раз больше ошибки в скорости звука, хорошее согласие экспериментальных и расчетных значений указывает на корректность определения состава и оценки погрешностей измерений U в проведенных экспериментах.

Первичные данные по плотности перегретого пара (рис. 3, табл. 3) аппроксимировались восьмипараметрическим уравнением состояния Бенедикта–Вебба–Рубина (БВР) [8]

$$p = RTd + \left(a_1RT - a_2 - \frac{a_3}{T^2} \right) d^2 - (a_4RT - a_5) d^3 + a_6 d^6 + \frac{a_7 d^3}{T^2} (1 + a_8 d^2) \exp(-a_8 d^2), \quad (3)$$

где $d = \rho/M$ – плотность пара в моль/дм³. Коэффициенты уравнения (3) приведены в табл. 4. Среднее абсолютное отклонение экспериментальных точек от зависимости (3) составляет 2.3 кПа.

Сопоставление полученных данных с результатами расчетов по программе REFPROP (версия 8.0) [9] показывает, что экспериментальные значения плотности пара в среднем лежат на 1.3% выше, а данные по скорости звука и давления на

Таблица 4. Коэффициенты уравнения (3) для паровой фазы хладагента

Коэффициент	Значение
a_1 , дм ³ /моль	–0.1768
a_2 , МПа дм ⁶ /моль ²	–0.7904
a_3 , МПа К ² дм ⁶ /моль ²	135718
a_4 , дм ⁶ /моль ²	0.13159
a_5 , МПа дм ⁹ /моль ³	0.42856
a_6 , МПа дм ¹⁸ /моль ⁶	0.04301
a_7 , МПа К ² дм ⁹ /моль ³	–24237
a_8 , дм ⁶ /моль ²	0

линии испарения практически совпадают (среднее отличие – 0.012% и 2.4 кПа соответственно).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые получены экспериментальные данные по давлению пара на линии испарения, плотности и скорости звука в растворе 48.66 мас. % R-134a + 51.34 мас. % R-227ea в паровой фазе. Представлены аппроксимационные уравнения для плотности и давления, подтверждена заявляемая точность измерений скорости звука. Показано, что расхождение экспериментальных и существующих расчетных данных по плотности хладагента существенно превышает оцениваемые погрешности выполненной работы. Полученные результаты дают возможность уточнить теоретические модели для расчета свойств растворов системы гидрофторуглеродов R-134a–R-227ea.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Скоренко А.В.* Современные хладагенты // Холодильная техника. 2008. № 6. С. 40.
2. *Gruzdev V.A., Khairulin R.A., Komarov S.G., Stankus S.V.* Thermodynamic Properties of HFC-227ea // Int. J. Thermophys. 2002. V. 23. P. 809.
3. *Комаров С.Г., Станкус С.В.* Термодинамические свойства хладагента R-415A в паровой фазе и на линии конденсации // ТВТ. 2013. Т. 51. № 6. С. 837.
4. *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.
5. *Комаров С.Г., Станкус С.В.* Плотность и скорость звука хладагента R-406A в паровой фазе // ТВТ. 2016. Т. 54. № 2. С. 314.
6. *Неручев Ю.А., Радченко А.К.* Скорость звука в жидкой фазе изомеров гексана // ТВТ. 2018. Т. 56. № 1. С. 137.
7. *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. V. 23. № 5. P. 657.
8. *Benedict M., Webb G.B., Rubin L.C.* An Empirical Equation for Thermodynamic Properties of Light Hydrocarbons and Their Mixtures: I. Methane, Ethane, Propane, and *n*-Butane // J. Chem. Phys. 1940. V. 8. P. 334.
9. *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.