

УДК 534.22

Скорость звука в смесях гелий-ксенон в широких интервалах параметров состояния

С.В. Станкус, С.Г. Комаров, О.С. Дутова, А.Б. Мешалкин

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

E-mail: stankus@itp.nsc.ru

В работе методом ультразвукового интерферометра в интервале температур от 293 до 393 К при давлениях от 0,13 до 1,5–2,8 МПа измерена скорость звука U в газовых смесях гелий-ксенон с содержанием гелия 60,34, 71,72 и 85,32 ат. %. Погрешности измерения температуры, давления и скорости звука составили соответственно ± 20 мК, ± 4 кПа и $\pm (0,15-0,30)$ %. С помощью аппроксимации экспериментальных данных для каждого состава получены уравнения, описывающие изменение скорости звука от давления и температуры во всем интервале измерений. Выполнен анализ существующих справочных и экспериментальных данных по скорости звука в инертных газах и He-Xe-смесях. Предложен метод расчета U смесей с содержанием гелия выше 71,7 ат. % Не до температуры 1500 К и давления до 7 МПа.

Ключевые слова: скорость звука, метод ультразвукового интерферометра, высокие давления и температуры, инертные газы, гелий-ксеноновые смеси.

Введение

Инертные газы и их бинарные смеси рассматриваются для применения в качестве рабочих тел в различных областях науки и техники. Среди последних можно выделить термоакустические холодильные установки и тепловые насосы, наземные электростанции, работающие по замкнутому циклу Брайтона, а также ядерные энергетические установки космического базирования. Так, в Российской Федерации разрабатывается проект реакторной установки для транспортно-энергетического модуля мегаваттного класса, где в качестве теплоносителя рассматривается смесь гелия и ксенона с содержанием гелия около 7 масс. % и рабочими температурами до 1500 К [1, 2]. Следует отметить, что типичное давление рабочих тел в космических энергетических установках составляет 2 МПа, а в наземных системах — до 7 МПа [3].

Для проектирования вышеуказанных установок необходимы достоверные данные по комплексу теплофизических свойств теплоносителя во всем интервале рабочих температур (T) и давлений (p). При очевидном недостатке экспериментальных данных большую роль играет разработка методов прогнозирования свойств. Такая работа для инертных газов и их смесей была проведена в исследовании [3]. Здесь были выполнены расчеты термодинамических и переносных свойств инертных газов и их смесей в широком

интервале параметров состояния с использованием теории термодинамического подобия. Однако авторы [3] не включили в рассмотрение такое важное свойство, как скорость звука (U), хотя эта величина влияет на характер течения газов.

Выполненные к настоящему времени измерения скорости звука в смесях гелия и ксенона позволили с высокой точностью (с погрешностью менее 0,01 %) определить U до 400 К и 1,5 МПа [4]. Однако, как было показано выше, для ряда практических приложений необходимо иметь данные по рассматриваемой системе до 1500 К и 7 МПа. По этой причине и в связи со сложностью проведения измерений U при высоких температурах актуальной является разработка методов оценки U для более широких интервалов параметров состояния.

Цель представленной работы состояла в измерении скорости звука в трех газовых смесях гелия и ксенона в интервале температур 293–393 К при давлениях до 2,8 МПа, анализе влияния давления на скорость звука в инертных газах и их смесях, а также расчете $U(T, p)$ до 1500 К и 7 МПа.

Образцы и экспериментальная техника

Эксперименты по определению скорости звука смесей гелий-ксенон проводились с помощью ультразвукового интерферометра с переменной базой [5–7] на частоте около 1,188 МГц. Термостатирование образцов в ходе измерений осуществлялось жидкостным термостатом в пределах 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. Давление измерялось цифровыми кварцевыми преобразователями давления ПДТК-0,6-МР и ПДТК-6,0-МР с основной приведенной погрешностью 0,06 %, которые поверялись по грузопоршневому манометру. Общая погрешность измерения давления не превышала 4 кПа. Отметим, что измерительная ячейка, пьезодатчики и нуль-индикатор давления были полностью погружены в термостат, т.е. находились при одинаковой температуре. Это исключало термодиффузию, которая для газовых смесей с большой разницей атомных масс компонентов может оказывать существенное влияние на результаты измерений.

Смеси заданного состава приготавливались весовым методом с использованием вакуумной системы, нержавеющей баллонов емкостью до 4 литров и электронных весов AND GX-6100 I класса точности с дискретностью 0,01 г. Из-за малого атомного веса гелия и большой массы баллонов определенная концентрация газов в смесях могла иметь заметную погрешность. По этой причине она впоследствии уточнялась путем экстраполяции измеренных $U(p)$ на изотермах к нулевому давлению, а также с помощью расчета идеально-газовой теплоемкости по формуле

$$\frac{C_p^0}{R} = \frac{1}{1 - (RT/MU_0^2)}, \quad (1)$$

где $C_p^0(T)$ — идеально-газовая теплоемкость смеси, $R = 8,31446262$ Дж/(моль·К) — универсальная газовая постоянная, M — молекулярная масса, $U_0(T)$ — скорость звука в смеси при нулевом давлении. Гелий и ксенон являются одноатомными газами с высоким потенциалом ионизации атомов, поэтому идеально-газовая теплоемкость смесей He-Xe в широком интервале температур остается постоянной и составляет

$$C_p^0 = 2,5R. \quad (2)$$

Таблица 1

Состав смесей и условия проведения экспериментов*

Смесь	C, масс. % He	X, ат. % He	M, г/моль	ΔT , К	Δp , МПа	N
S60	4,432	60,34	54,49	295–393	0,26–1,52	5
S72	7,177	71,72	40,00	293–393	0,13–2,82	6
S85	15,05	85,32	22,69	293–393	0,15–1,49	6
H20 [4]	0,762	20,12	105,68	210–400	0,06–1,36	5(9)
H47 [4]	2,664	47,304	71,08	210–400	0,08–1,55	5(9)
H74 [4]	8,033	74,128	36,93	210–400	0,08–1,53	4(8)

* ΔT — исследованный интервал температур, Δp — интервал давлений, N — число изотерм выше 273 К (в скобках общее число изотерм).

Это позволяет путем вариации значений M добиться наилучшего согласования расчетов по (1) со значением (2) и по исправленной молекулярной массе смеси уточнить концентрацию компонентов. Заметим, что величина поправок к составу смесей не превышала 0,04 масс. % гелия. Состав исследованных смесей, их молекулярная масса и интервалы измерений приведены в табл. 1. Также в ней представлены данные работы [4], которые будут привлечены для оценки скорости звука вне исследованных интервалов температур и давлений.

В экспериментах использовался газообразный гелий марки А по ТУ 0271-135-31323949-2005 с изменениями 1, 2 чистотой не хуже 99,995 об. % и ксенон особой чистоты по ГОСТ 10219-77 с содержанием основного компонента 99,9999 об. %. Скорость звука измерялась вдоль изотерм с шагом 20 К, начиная от 293 К и до 393 К, с оцениваемой погрешностью в 0,15–0,30 %. В исследованном диапазоне параметров состояния дисперсии U не наблюдалось.

Апробация установки и методики была проведена в экспериментах с гелием в интервалах температур 293–373 К и давлений 0,6–1,42 МПа. Среднее абсолютное отклонение (AAD) измеренных значений скорости звука от данных, приведенных в работе [8], составило 0,065 %.

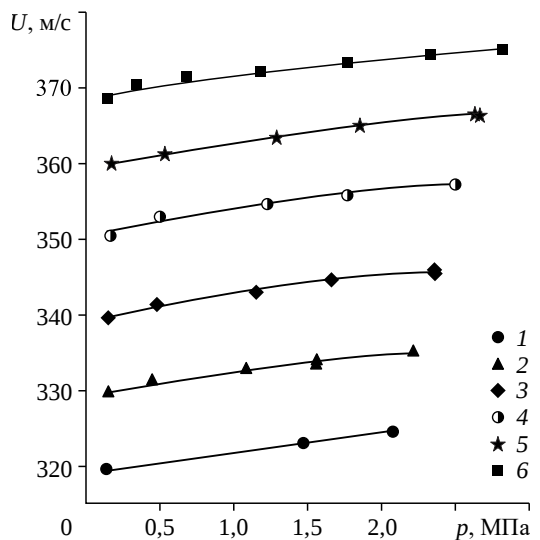
Результаты измерений

На рис. 1 приведены типичные результаты выполненных в настоящей работе измерений скорости звука в смесях системы гелий-ксенон. Для всех исследованных составов скорость звука возрастала с увеличением давления и температуры. Первичные данные аппроксимировались эмпирической зависимостью от давления и температуры:

$$U(p, T) = a_0 + a_{10} \frac{T}{100} + a_{20} \frac{100}{T} + p \left(a_{11} \frac{T}{100} + a_{21} \frac{100}{T} \right) + p^2 \left(a_{12} \frac{T}{100} + a_{22} \frac{100}{T} \right), \quad (3)$$

Рис. 1. Изотермы скорости звука в смеси S72 системы гелий-ксенон.

Символы — измеренные значения, линии — аппроксимация;
 $T = 293,15$ (1), $313,15$ (2), $333,15$ (3), $353,15$ (4), $373,15$ (5), $393,15$ К (6).



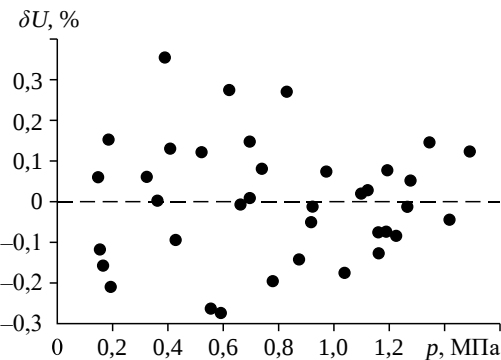


Рис. 2. Относительные отклонения экспериментальных данных по скорости звука в смеси S85 от результатов расчетов по аппроксимационному уравнению (3).

где T — температура в К, p — давление в МПа, U — скорость в м/с. На рис. 2 приведены относительные отклонения измеренных значений скорости звука от данных, полученных с помощью аппроксимационного уравнения (3), а в табл. 2 представлены размерные коэффициенты a_{ij}

для всех составов, включая данные работы [4].

Как следует из табл. 2, аппроксимационные уравнения описывают экспериментальные данные с меньшей погрешностью, чем оцениваемая погрешность экспериментов. Это дает возможность с высокой точностью определять скорость звука в смесях гелия и ксенона при произвольных давлениях и температурах в диапазоне параметров состояния экспериментальных данных, включенных в обработку по (3).

**Оценка скорости звука смесей He-Xe
при высоких температурах и давлениях**

Для инертных газов и их смесей скорость звука в идеально-газовом состоянии легко рассчитывается по формуле, которая следует из (1) и (2):

$$U_0(T) = \sqrt{\frac{RT}{0,6M}}. \tag{4}$$

Как видно на рис. 1, зависимость скорости звука от температуры является более сильной, чем от давления. Поэтому для нахождения последней будем рассматривать комплекс

$$\Psi(T, p) = \frac{U(T, p)}{U_0(T)}. \tag{5}$$

В исследованном интервале давлений зависимость Ψ и, следовательно, скорость звука от давления на каждой изотерме является практически линейной (см. рис. 1, 3). Это дает

Таблица 2
**Коэффициенты уравнения (3) и средние абсолютные отклонения
экспериментальных точек от аппроксимации***

a_{ij}	S60	S72	S85	H20	H47	H74
a_0	242,53	320,8	392,44	169,061	199,51	271,867
a_{10}	27,774	28,422	43,338	21,7386	27,4506	38,825
a_{20}	-144,62	-251,47	-284,849	-107,976	-120,332	-159,38
a_{11}	2,628	0,6274	-1,81	0,6411	0,3794	0,226
a_{21}	-27,924	5,474	38,174	-10,426	-1,405	5,22
a_{12}	-1,29	-0,091	1,26	0,0753	0,0499	-0,0079
a_{22}	15,79	-0,571	-19,1	-0,71	-0,716	-0,45
AAD, %	0,11	0,12	0,12	0,011	0,0065	0,004

*Для всех составов из работы [4] аппроксимировались данные, полученные для изотерм 300, 350, 375 и 400 К. Расчет по (3) для изотермы 325 К составов H20 и H47 показал согласование в пределах 0,02 % с экспериментальными данными [4], что практически соответствует погрешности измерений скорости звука.

Рис. 3. Барическая зависимость нормированной скорости звука в смеси Н74 на изотермах.

Символы — расчет по экспериментальным данным, линии — аппроксимация уравнением (6); $T = 300$ (1), 350 (2), 375 (3), 400 К (4).

основание аппроксимировать $\Psi(T = \text{const}, p)$ линейной зависимостью

$$\Psi(T, p) = 1 + \alpha(T) p, \quad (6)$$

где α — барический коэффициент нормированной скорости звука. Чтобы выяснить, насколько точно выполняется (6) в более широких интервалах параметров состояния, рассмотрим скорость звука в чистых инертных газах.

Воспользуемся данными [8], значения которых лежат в диапазоне до высоких давлений и температур 700–750 К (Ne, Kr, Xe) и 1500–2000 К (Ar, He). Максимальная температура для данных ксенона (750 К) существенно ниже предполагаемого температурного максимума наших оценок, поэтому предварительно был проведен расчет скорости звука до 1500 К и давлений до 7 МПа с использованием уравнения состояния [9]. Полученное в этой работе малопараметрическое уравнение состояния (в виде приведенной функции Гельмгольца) содержит 10 подгоночных коэффициентов и имеет вид:

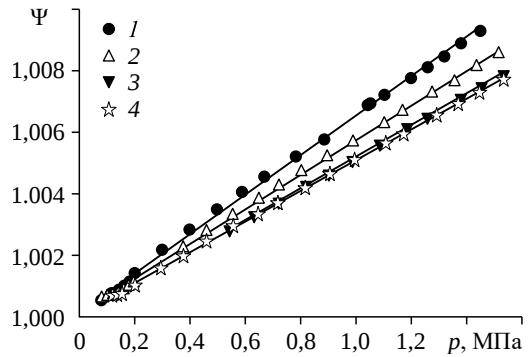
$$\begin{aligned} \alpha^r(\omega, \tau) = & a_1(e^\tau - 1 - \tau)(\omega - \omega_t)^3 \omega + a_2 \tau \omega + a_3(e^{-\tau} - 1)\omega + \\ & + a_4(e^{3\tau} - 1 - 3\tau)(\omega - \omega_t)^5 \omega + a_5(e^{6\tau} - 6\tau)(\omega - \omega_t)^4 \omega^2 + a_6(e^{-3\tau} - 1)\omega + \\ & + a_7 \ln(1 - Z_c \omega) + a_8 \omega / (1 - Z_c \omega) + a_9 \omega^2 / (1 - Z_c \omega)^2 + a_{10} \omega^3 / (1 - Z_c \omega)^3, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\alpha^r(\omega, \tau)$ — избыточная приведенная функция Гельмгольца, Z_c — фактор сжимаемости в критической точке, $\tau = T_c/T$ — приведенная обратная температура, T_c — критическая температура, $\omega = \rho/\rho_c$ — приведенная плотность, ρ_c — плотность вещества в критической точке, $\omega_t = \rho_{tr}/\rho_c$ — приведенная плотность в тройной точке, ρ_{tr} — плотность в тройной точке.

Эмпирические коэффициенты в уравнении (7) рассчитаны путем обработки табличных p - ρ - T -данных [10]. Это уравнение позволяет с удовлетворительной точностью рассчитывать термические свойства ксенона в интервале от идеально-газового состояния до плотности жидкости в тройной точке при температурах до 700 К и давлениях соответственно до 25 МПа (за исключением окрестности критической точки). Безразмерные коэффициенты уравнения (7) для ксенона представлены в табл. 3, здесь же приведены критические параметры и параметры тройной точки.

Таблица 3
Константы уравнения (7), критические параметры, параметры тройной точки для ксенона

Параметры	Значения
a_1	$0,936825 \cdot 10^{-2}$
a_2	$-1,744413$
a_3	$-2,72934 \cdot 10^{-1}$
a_4	$2,783863 \cdot 10^{-5}$
a_5	$-7,760901 \cdot 10^{-6}$
a_6	$-2,0742170 \cdot 10^{-1}$
a_7	$-1,37427$
a_8	$2,6240390 \cdot 10^{-2}$
a_9	$4,650419 \cdot 10^{-4}$
a_{10}	$-2,459894 \cdot 10^{-5}$
Z_c	0,288931
ω_t	2,689455
T_c , К	289,73
p_c , МПа	5,842
ρ_c , кг/м ³	1102,9
T_{tr} , К	161,36
p_{tr} , кПа	81,571
ρ_{tr} , кг/м ³	2966,2



Фактор сжимаемости $Z = p/(\rho RT)$, где p — давление, связан с приведенной избыточной функцией Гельмгольца α^r соотношением

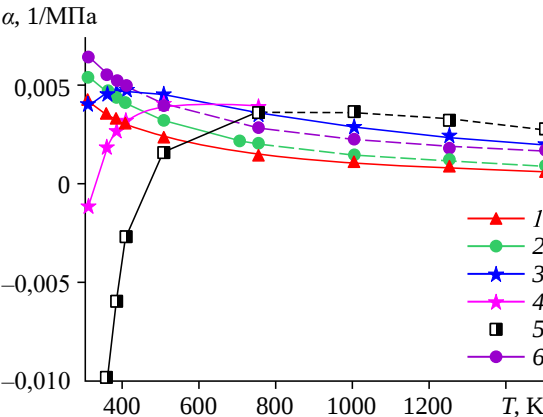
$$Z(\rho, T) = 1 + \rho \left(\frac{\partial \alpha^r(\rho, T)}{\partial \rho} \right)_T = 1 + \omega \left(\frac{\partial \alpha^r(\omega, \tau)}{\partial \omega} \right)_\tau. \quad (8)$$

Значения плотности при заданных температуре и давлении находились из уравнения (8) численным методом. Скорость звука ксенона рассчитывалась из фундаментального уравнения состояния (7) с помощью следующего соотношения термодинамики:

$$\frac{U^2}{RT} = 1 + 2\omega \left(\frac{\partial \alpha^r}{\partial \omega} \right)_\tau + \omega^2 \left(\frac{\partial^2 \alpha^r}{\partial \omega^2} \right)_\tau - \frac{\left[1 + \omega \left(\frac{\partial \alpha^r}{\partial \omega} \right)_\tau - \omega \tau \left(\frac{\partial^2 \alpha^r}{\partial \omega \partial \tau} \right) \right]^2}{\tau^2 \left[\left(\frac{\partial \alpha^0}{\partial \tau^2} \right)_\omega + \left(\frac{\partial^2 \alpha^r}{\partial \tau^2} \right)_\omega \right]}. \quad (9)$$

При расчете равновесной скорости звука в ксеноне по формулам (7) и (9) не использовались никаких экспериментальных данных по скорости звука и калорическим свойствам веществ, за исключением калорических свойств в идеально-газовом состоянии [10]. Так же, как и в случае расчета калорических характеристик, коэффициенты уравнения (7) вычислялись по термическим данным в интервале давлений до 25 МПа, а скорость звука по (7) и (9) рассчитывалась до 100 МПа. Полученные результаты показали, что вычисленные по уравнениям (7), (9) значения U согласуются с табличными данными [8] в основном в пределах оцененной погрешности табличных и экспериментальных данных, за исключением околоскритической области. В работе [9] было показано, что предложенное малопараметрическое уравнение состояния (7) для расчета термодинамических характеристик веществ позволяет выполнять надежную экстраполяцию за пределы изученного участка.

На рис. 4 приведены температурные зависимости барического коэффициента нормированной скорости звука для всех инертных газов. Для определения α справочные данные [8] и результаты расчета (9) для ксенона (выше 750 К) по зависимости $\Psi(p_i)$ при температурах 300, 350, 375, 400, 500, 750, 1000, 1250 и 1500 К и давлениях $p_i = 0,1, 1, 2, 3, 4, 5, 7$ МПа аппроксимировались уравнением (6). Обработка показала, что максимальные отклонения $\Psi(p_i)$ от линейной зависимости (6) уменьшаются с ростом температуры следующим образом: для гелия от 0,005 % при 300 К до 0,001 % при 1500 К, для неона — 0,02 (300 К)–0,01 % (750 К), для аргона — 0,2 (300 К)–0,001 % (1500 К), для криптона — 0,4 (300 К)–0,05 % (750 К), для ксенона — 1 (300 К)–0,05 % (1500 К). Характер



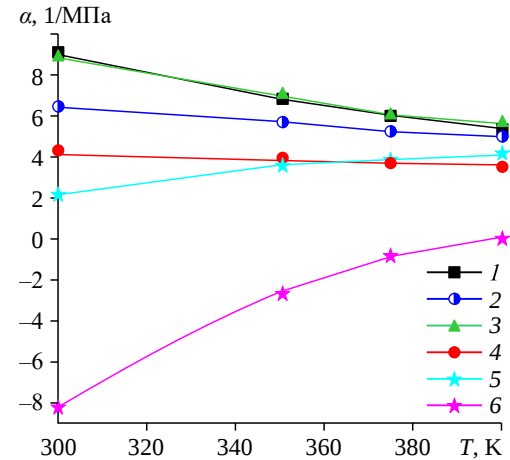
для ксенона — 0,02 (300 К)–0,01 % (750 К), для аргона — 0,2 (300 К)–0,001 % (1500 К), для криптона — 0,4 (300 К)–0,05 % (750 К), для ксенона — 1 (300 К)–0,05 % (1500 К). Характер

Рис. 4. Температурная зависимость барического коэффициента нормированной скорости звука.

Сплошные линии — расчет по справочным данным [8]; пунктирная линия — расчет α по данным, полученным по уравнению (9), штриховые линии — экстраполяция данных по аппроксимационному уравнению (10); 1 — He, 2 — Ne, 3 — Ar, 4 — Kr, 5 — Xe, 6 — H74.

Рис. 5. Температурная зависимость барического коэффициента нормированной скорости звука гелий-ксеноновых смесей, рассчитанного по сглаженным экспериментальным данным (уравнение (3)).

1 — S85, 2 — H74, 3 — S72, 4 — S60, 5 — H47, 6 — H₂O.



изменения α в области низких температур у легких и тяжелых инертных газов существенно различается (рис. 4). Если у гелия и неона барический коэффициент скорости звука является положительным и уменьшается с температурой от 300 К, то у криптона и ксенона α при низких температурах является отрицательным и возрастает, а проходя максимум начинает уменьшаться. Аргон занимает промежуточное положение: характер изменения $\alpha(T)$ совпадает с тяжелыми инертными газами, однако сама величина остается положительной.

Аналогичное поведение демонстрируют гелий-ксеноновые смеси (рис. 5). При концентрации гелия выше 60 ат. % (4,37 масс. %) барический коэффициент скорости звука является положительным и уменьшается с ростом температуры, а при более низких концентрациях зависимость $\alpha(T)$ напоминает поведение аргона и тяжелых инертных газов.

Данные для барического коэффициента скорости звука гелия, неона, а также аргона (выше 500 К) хорошо аппроксимируются простой гиперболической зависимостью:

$$\alpha(T) = b_0 + b_1/T, \quad (10)$$

константы b_0 и b_1 приведены в табл. 4. Более того, высокая точность данных по скорости звука смеси Н74 [4] позволила провести аппроксимацию результатов уравнением (10), выполнить экстраполяцию от 400 К и получить оценку α при 1500 К (рис. 4). С использованием формул (4), (6) и (10), а также значений коэффициентов b_0 и b_1 из табл. 4 был проведен расчет скорости звука для инертных газов и смеси Н74 при указанных выше температурах и давлениях, приведенных в табл. 5. Сопоставление со справочными [8] или экспериментальными [4] данными показало, что средние абсолютные отклонения составляют для гелия 0,09 %, неона — 0,07 %, аргона — 0,11 %, смеси Н74 — 0,035 %. Это подтверждает справедливость сделанных приближений, которые выражаются формулами (6) и (10). В качестве примера в табл. 5 приведены результаты расчета скорости звука смеси Н74 в широком интервале параметров состояния.

На рис. 6 приведены данные (все рассчитаны по (10), для ксенона — по (6), (9)) по барическому коэффициенту скорости звука при 1500 К в зависимости от молекулярной

Таблица 4
Коэффициенты уравнения (10) и значения α при 1500 К

Параметры Вещество	M , г/моль	b_0 , 1/МПа	b_1 , К/МПа	$\alpha(1500 \text{ К})$, 1/МПа
He	4,0026	−0,0002853	1,3424	0,000610
Ne	20,1797	−0,0002240	1,7339	0,000932
H74	36,93	0,0005246	1,7820	0,001713
Ar	39,948	0,0008717	1,9144	0,002148
Xe	131,293	-	-	0,002790

Таблица 5

Скорость звука в гелий-ксеноновой смеси 74,128 ат. % Не

p , МПа	T , К					
	400	600	800	1000	1200	1500
0,1	387,6	474,6	548,0	612,7	671,1	750,3
1	389,3	476,1	549,4	613,9	672,3	751,5
2	391,3	477,8	550,9	615,4	673,7	752,8
3	393,2	479,4	552,4	616,8	675,0	754,0
4	395,1	481,1	553,9	618,2	676,4	755,3
5	397,0	482,8	555,4	619,6	677,7	756,6
7	400,9	486,1	558,4	622,4	680,4	759,2

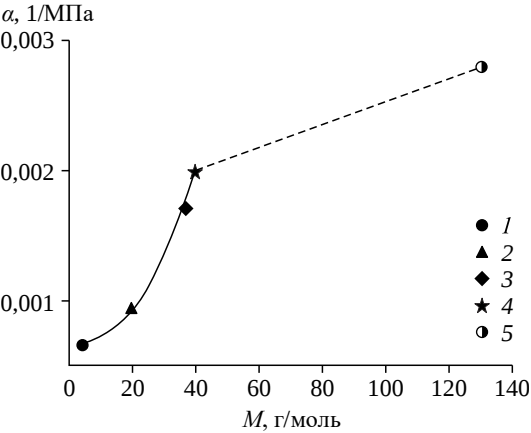


Рис. 6. Барический коэффициент нормированной скорости звука инертных газов и гелий-ксеноновой смеси Н74 при 1500 К.

Символы — данные табл. 4, сплошная линия — результаты расчета по уравнению (11), штриховая линия указывает область молекулярных масс, которая требует дополнительных исследований; 1 — He, 2 — Ne, 3 — Н74, 4 — Ag, 5 — Xe.

массы инертных газов и смеси Н74. Видно, что величина α закономерно изменяется с ростом M в интервале от 4 до 40 г/моль (для смесей гелий-ксенон это соответствует интервалу концентраций от 71,7 до 100 ат. % Не или 7,18 ÷ 100 масс. % Не) и хорошо описывается уравнением

$$\alpha(1500\text{ К}) = 6,772 \cdot 10^{-4} - 8,64 \cdot 10^{-6} M + 1,0228 \cdot 10^{-6} M^2. \quad (11)$$

Уравнение (11) позволяет рассчитать значение α при 1500 К для любого состава гелий-ксеноновой смеси из указанного выше интервала концентраций. При наличии данных по скорости звука такой смеси при низких температурах и $\alpha(1500\text{ К})$ можно определить $U(T, p)$ в широком интервале параметров состояния, проводя аппроксимацию данных уравнением (10) и используя предложенный метод оценки.

Закключение

Получены новые экспериментальные данные по скорости звука в трех газовых смесях гелия и ксенона, а также аппроксимационные уравнения, которые дают возможность для каждого состава рассчитать $U(T, p)$ при произвольных давлениях и температурах из диапазона выполненных измерений. С использованием полученного ранее малопараметрического уравнения состояния для ксенона рассчитана скорость звука для интервала температур, на 750 К превышающего температуры существующих справочных данных. Показано, что барическая зависимость безразмерной скорости звука (нормировка на U в идеально-газовом состоянии) инертных газов и He-Xe-смесей до давлений в 7 МПа хорошо описывается линейным уравнением, а характер изменения барического коэффициента скорости звука с температурой легких и тяжелых инертных газов существенно отличается. Разработана простая методика расчета скорости звука He-Xe-смесей с концентрацией гелия выше 71,7 ат. %.

Список литературы

1. Драгунов Ю.Г. Разработка реакторной установки для транспортноэнергетического модуля мегаваттного класса // Атомная энергия. 2012. Т. 113, вып. 1. С. 4–6.
2. Коротеев А.С. Использование ядерной энергии в космических системах // Вестн. РАН. 2021. Т. 91, № 11. С. 1041–1047.
3. Tournier J.-M.P., El-Genk M.S. Properties of noble gases and binary mixtures for closed Brayton cycle applications // Energy Conversion and Management. 2008. Vol. 49. P. 469–492.
4. Hurly J.J., Schmidt J.W., Boyes S.J., Moldover M.R. Helium-xenon mixtures from speed-of-sound and Burnett PpT measurements // Intern. J. Thermophys. 1997. Vol. 18, No. 3. P. 539–634.
5. Комаров С.Г., Станкус С.В. Скорость звука в паре хладагента R-134a (57,24 масс. %) – R-227ea (42,76 масс. %) // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26, № 4. С. 663–665.
6. Комаров С.Г., Станкус С.В. Давление пара, скорость звука и плотность смесового хладагента R-134a–R-227ea в паровой фазе // Теплофизика высоких температур. 2019. Т. 57, № 4. С. 634–637.
7. 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.
8. 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).
9. Каплун А.Б., Мешалкин А.Б., Дутова О.С. Простое фундаментальное уравнение состояния жидкости, газа и флюида для ксенона // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25, № 4. С. 587–597.
10. Lemmon E.W., Span R. Short fundamental equations of state for 20 industrial fluids // J. Chem. Engng Data. 2006. Vol. 51, No. 3. P. 785–850.

*Статья поступила в редакцию 4 августа 2023 г.,
после доработки — 11 августа 2023 г.,
принята к публикации 17 августа 2023 г.*