

СКОРОСТЬ ЗВУКА И НЕКОТОРЫЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКИХ *n*-ОКТАНА, *n*-ДЕКАНА И *n*-УНДЕКАНА ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

А. А. БАДАЛЯН, Н. Ф. ОТПУЩЕННИКОВ

Приносятся результаты измерения скорости звука в жидких *n*-октано, *n*-декане и *n*-ундекано от 30°C до 140°C и при давлениях до 1200 кг/см². Погрешность в измерении скорости звука составляла не более ± 2 м/сек.

Установлено, что куб скорости звука в *n*-октано, *n*-декане и *n*-ундекано линейно зависит от приложенного давления. По значениям скорости звука для исследованных веществ рассчитаны плотность, адиабатическая и изотермическая сжимаемости в указанном интервале температур и давлений. Показано, что изотермы этих параметров имеют нелинейный характер.

Исследование скорости звука в зависимости от давления и температуры позволяют изучать такие важные термодинамические свойства жидкостей как коэффициенты сжимаемости β_T и β_S , отношение теплоемкостей $\gamma = c_p/c_v$ и плотность ρ , величину внутреннего давления p_i и свободный объем v_f , теплоемкости c_p и c_v , что представляет научно-теоретический и практический интерес.

Акустический метод исследования термодинамических свойств жидкостей по сравнению с *PVT* измерениями обладает некоторыми преимуществами:

- 1) Современные импульсные ультразвуковые установки позволяют измерять скорость распространения звука с относительно высокой точностью (± 1 м/сек).
- 2) Проводить исследования в широком интервале температур и давлений, включая области жидкой и паровой фазы вещества.
- 3) По одной лишь скорости ультразвука и плотности при нормальных условиях, с необходимой точностью, рассчитываются указанные выше термодинамические параметры вещества.

В литературе имеется много работ по измерению скорости звука в жидкостях под давлением, обзор которых подробно рассмотрен нами в работе [1].

Однако число работ, использующих экспериментальные значения скорости звука для расчета термодинамических параметров жидкости при высоких давлениях, сравнительно невелико [2—11].

В данной работе приводятся результаты измерения скорости звука в *n*-октано, *n*-декане и *n*-ундекано в интервале температур 30—140°C и давлений до 1200 кг/см² и рассчитанные на их основе некоторые термодинамические свойства указанных веществ. Характеристики исследованных веществ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Вещество	$t_{\text{кип}}, ^\circ\text{C}$	$P_{\text{мм Hg}}$	n_D^{20}	ρ_v^{20}
н-октан	125,2	753	1,3977	0,7025
н-декан	172,4	733	1,4118	0,7293
н-ундекан	194,0	733	1,4173	0,7397

Измерения проводились на импульсной ультразвуковой установке [5] на частоте 2 МГц с усовершенствованной измерительной камерой. Ошибка определения скорости звука не превышала 0,2%, а температура исследуемой жидкости измерялась платиновым термометром сопротивления с погрешностью не более $\pm 0,05^\circ\text{C}$. Давление в автоклаве создавалось и измерялось образцовым грузопоршневым манометром МП-2500 класса точности 0,05.

Полученные нами экспериментальные результаты приведены в табл. 2. Результаты наших измерений в пределах погрешности экспе-

Таблица 2

Скорость звука (м/сек) в н-октане, н-декане и н-ундекане в зависимости от давления и температуры

$t, ^\circ\text{C}$	$P, \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$												
	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
н-октан													
30	1153	1222	1282	1337	1387	1434	1479	1520	1560	1596	1632	1666	1699
40	1112	1184	1246	1303	1355	1403	1448	1490	1531	1569	1606	1640	1674
60	1031	1108	1176	1236	1291	1342	1389	1437	1476	1513	1552	1588	1623
80	952	1038	1111	1175	1234	1286	1337	1382	1426	1467	1506	1542	1579
100	875	969	1048	1117	1178	1234	1285	1334	1379	1419	1459	1498	1534
120	799	904	988	1062	1125	1184	1238	1286	1333	1377	1417	1456	1494
н-декан													
30	1215	1277	1333	1384	1431	1476	1518	1558	1594	1633	1665	1698	1730
40	1176	1240	1299	1351	1400	1445	1488	1528	1567	1604	1637	1672	1703
60	1100	1168	1231	1287	1340	1387	1432	1475	1515	1550	1588	1623	1658
80	1024	1101	1168	1227	1282	1333	1380	1422	1465	1503	1541	1577	1612
100	952	1035	1107	1171	1228	1281	1330	1375	1417	1457	1496	1533	1568
120	882	973	1050	1116	1176	1231	1282	1329	1374	1414	1453	1491	1527
140	812	913	994	1066	1128	1185	1238	1286	1332	1375	1415	1453	1490
н-ундекан													
30	1241	1300	1354	1404	1450	1494	1535	1574	1612	1646	1680	1713	1744
40	1202	1263	1320	1372	1419	1464	1505	1546	1586	1620	1654	1686	1722
60	1127	1193	1253	1308	1357	1405	1449	1491	1531	1568	1604	1638	1670
80	1054	1127	1192	1250	1303	1375	1398	1441	1482	1520	1558	1592	1627
100	983	1062	1131	1193	1249	1301	1348	1392	1435	1476	1513	1549	1584
120	914	1000	1075	1140	1198	1252	1301	1347	1390	1431	1470	1508	1543
140	847	940	1019	1088	1149	1205	1256	1305	1349	1390	1431	1468	1505

римента хорошо согласуются с наиболее надежными данными как по линии насыщения [12, 13], так и под давлением (для н-октана) [14].

Как следует из табл. 2, во всех изученных жидкостях скорость звука с ростом давления возрастает по нелинейному закону. Акустический коэффициент $\left(\frac{dc}{dp}\right)$ монотонно уменьшается. В наших исследованиях наблюдается уменьшение величины акустического коэффициента $\left(\frac{dc}{dp}\right)$ с ростом номера гомолога *n*-парафинов, что связано с возрастанием интенсивности межмолекулярных сил отталкивания.

Обработка экспериментальных данных методом наименьших квадратов показала, что скорость звука в зависимости от давления по изотермам в исследованных жидкостях в указанном интервале температур и давлений удовлетворительно описывается простым уравнением [5, 9]

$$c^3 = c_0^3 + k(p - p_0), \quad (1)$$

где c_0 — скорость звука при $p = p_0$, p — приложенное давление, p_0 — атмосферное давление, k — постоянная, зависящая только от природы вещества и температуры. Численные значения постоянной k ($\text{м}^3/\text{кг} \cdot \text{сек}$) для исследованных веществ, рассчитанные из экспериментальных значений скорости звука, приведена в табл. 2а.

Таблица 2а

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$						
	30	40	60	80	100	120	140
<i>n</i> -октан	28,79	28,20	26,96	25,96	24,84	23,73	
<i>n</i> -декан	28,80	28,29	27,32	26,36	25,32	24,27	23,32
<i>n</i> -ундекан	28,92	28,49	27,46	26,56	25,61	24,58	23,56

Ранее экспериментально [3, 5, 7] было показано, что при постоянной температуре величина $\gamma = c_p/c_v$ с точностью до погрешности эксперимента не зависит от давления. Это дало возможность получить следующее изотермическое уравнение [5, 9]

$$\rho = \rho_0 + \frac{3\gamma}{k} [\gamma^3 c_0^3 + k(p - p_0) - c_0], \quad (2)$$

которое позволяет из одних акустических измерений рассчитать плотность исследуемой жидкости в зависимости от приложенного давления.

Адиабатическая сжимаемость рассчитывалась из соотношения

$$\beta_s = \frac{1}{\rho c^2},$$

а величина β_t в исследованных жидкостях по линии насыщения подсчитывалась по методу, предложенному в работе [15]. По найденным значениям β_s и β_t находилась величина $\gamma = \beta_t/\beta_s$ по линии насыщения, а затем и β_t в зависимости от давления.

При расчетах были использованы литературные данные по плотности ρ_0 при атмосферном давлении [16]. Рассчитанные значения плотности, адиабатической и изотермической сжимаемости в зависимости от приложенного давления приведены в таблицах 3, 4, 5. Ошибка в определении ρ , β_s и β_T составляет соответственно 0,2, 0,6 и 2,6%.

Таблица 3

Плотность (кг/м^3) *n*-октана, *n*-декана и *n*-ундекана в зависимости от давления и температуры

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{см}^3}$												
	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
н-октан													
30	694,2	703,2	711,1	718,3	724,8	731,0	736,9	742,3	747,5	752,2	756,9	761,4	765,7
40	686,0	695,6	704,0	711,6	718,6	725,0	731,0	736,6	742,1	747,2	752,2	756,7	761,3
60	669,4	680,0	688,3	697,7	705,3	712,3	718,8	725,4	730,8	735,9	741,3	746,3	751,1
80	652,5	664,7	675,1	684,2	692,5	699,9	707,2	713,6	719,8	725,6	731,2	736,3	741,5
100	635,1	648,8	660,4	670,4	679,7	687,5	694,8	702,1	708,7	714,5	720,4	726,0	731,3
120	616,8	632,9	645,7	657,0	666,7	675,7	684,0	691,3	698,5	705,2	711,3	717,3	723,1
н-декан													
30	722,2	730,1	737,3	743,8	749,9	755,6	761,0	766,1	770,7	775,4	779,8	784,0	788,1
40	714,5	722,8	730,4	737,1	743,4	749,2	754,7	759,9	764,9	769,7	774,0	778,5	782,5
60	698,9	707,9	716,3	723,8	730,8	737,1	743,1	748,8	754,1	758,7	763,8	768,5	773,1
80	683,0	693,5	702,6	710,6	718,1	725,0	731,4	737,1	743,0	748,1	753,3	758,2	763,0
100	666,8	678,6	688,8	697,9	706,0	713,5	720,5	726,9	732,8	738,5	744,0	749,3	754,3
120	650,3	663,7	675,0	684,7	693,5	701,6	709,1	716,0	722,6	728,5	734,2	739,8	745,1
140	633,4	648,9	661,2	672,3	681,7	690,5	698,6	705,9	713,0	719,5	725,7	731,5	737,1
н-ундекан													
30	732,8	740,3	747,2	753,5	759,3	764,9	770,1	775,1	779,9	784,2	788,5	792,7	796,7
40	725,3	733,1	740,7	747,1	753,1	758,8	764,1	769,3	774,5	778,8	783,1	787,2	791,9
60	710,2	718,9	726,8	734,1	740,6	746,9	752,7	758,2	763,5	768,4	773,2	777,6	781,1
80	694,8	704,7	713,4	721,3	728,4	735,0	741,2	747,0	752,6	757,7	762,8	767,4	772,7
100	679,2	690,2	699,8	708,4	716,2	723,4	729,9	736,0	742,0	747,7	752,9	757,9	762,6
120	663,4	675,9	686,7	696,2	704,6	712,4	719,5	726,2	732,4	738,4	744,0	749,5	754,0
140	647,3	661,3	673,1	683,5	692,6	701,0	708,7	716,0	722,6	728,8	734,9	740,4	746,0

Таблица 4

Адиабатическая сжимаемость ($\beta_s \cdot 10^6$, бар $^{-1}$) *n*-октана, *n*-декана и *n*-ундекана в зависимости от давления и температуры

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \frac{\kappa\Gamma}{\text{cm}^2}$												
	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
n-октан													
30	108,4	95,2	85,6	77,9	71,7	66,5	62,0	58,3	55,0	52,2	49,6	47,3	45,2
40	117,9	102,6	91,4	82,7	75,8	70,1	65,3	61,1	57,5	54,3	51,5	49,1	46,9
60	140,4	119,8	105,1	93,8	85,1	78,0	72,1	66,7	62,8	59,4	56,0	53,1	50,5
80	169,0	139,8	120,0	105,8	94,9	86,3	79,1	73,3	68,3	64,0	60,3	57,1	54,1
100	205,8	164,1	137,8	119,6	106,0	95,5	87,1	80,0	74,2	69,5	65,2	61,4	58,1
120	254,1	193,5	158,5	135,0	118,5	105,5	95,5	87,5	80,5	74,8	70,0	65,7	62,0

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
н-декан													
30	93,7	84,0	76,3	70,2	65,2	60,8	57,0	53,8	51,0	48,5	46,2	44,3	42,4
40	101,2	89,9	81,2	74,3	68,7	63,9	59,9	56,3	53,2	50,5	48,2	46,0	44,1
60	118,3	103,5	92,1	83,4	76,2	70,5	65,6	61,4	57,8	54,8	51,9	49,4	47,1
80	139,6	118,9	104,4	93,4	84,7	77,6	71,8	67,1	62,7	59,2	55,9	53,0	50,5
100	165,5	137,4	118,5	104,5	93,9	85,4	78,5	72,8	68,0	63,8	60,0	56,8	53,9
120	197,9	159,2	134,5	117,2	104,2	94,0	85,8	79,1	73,3	68,6	64,5	60,8	57,5
140	239,3	185,1	152,9	131,0	115,3	103,1	93,4	85,6	79,0	73,5	68,8	64,7	61,1

н-ундекан

30	88,6	79,9	73,0	67,3	62,6	58,6	55,1	52,1	49,4	47,1	44,9	43,0	41,3
40	95,4	85,5	77,5	71,1	66,0	61,5	57,7	54,4	51,4	48,9	46,7	44,7	42,6
60	111,0	97,7	87,6	79,6	73,3	67,8	63,2	59,3	55,9	52,9	50,3	48,0	45,8
80	129,6	111,8	98,7	88,8	80,9	74,4	69,1	64,5	60,5	57,1	54,0	51,4	48,9
100	152,5	128,4	111,7	99,2	89,5	81,7	75,4	70,1	65,4	61,4	58,0	55,0	52,3
120	180,5	147,9	126,0	110,6	98,9	89,6	82,1	75,9	70,6	66,1	62,2	58,7	55,6
140	215,2	171,0	143,0	123,5	109,4	98,2	89,4	82,1	76,0	71,0	66,5	62,6	59,2

Таблица 5

Изотермическая сжимаемость ($\beta_T \cdot 10^6$, бар⁻¹) н-октана, н-декана и н-ундекана в зависимости от давления и температуры

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$												
	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200

н-октан

30	136,0	119,6	107,5	97,8	90,0	83,5	77,9	73,2	69,1	65,6	62,3	59,4	56,8
40	148,0	128,7	114,7	103,8	95,1	88,0	81,9	76,7	72,1	68,1	64,6	61,6	58,8
60	174,0	148,4	130,2	116,2	105,4	96,6	89,3	82,6	77,8	73,6	69,4	65,8	62,5
80	207,0	171,2	147,0	129,6	116,2	105,7	96,9	89,8	83,6	78,4	73,8	69,9	66,3
100	249,0	198,5	166,7	144,7	128,2	115,5	105,4	96,8	89,8	84,1	78,9	74,3	70,3
120	308,0	234,5	192,1	163,6	143,6	127,8	115,7	106,0	97,5	90,6	84,8	79,6	75,1

н-декан

30	114,8	102,9	93,4	86,0	79,8	74,5	69,8	65,9	62,5	59,4	56,6	54,2	51,9
40	123,1	109,3	98,7	90,3	83,5	77,7	72,8	68,5	64,5	61,4	58,6	55,9	53,6
60	143,0	125,1	111,3	100,8	92,1	85,2	79,3	74,2	69,9	66,2	62,7	59,7	56,9
80	167,0	142,2	124,8	111,7	101,3	92,8	85,9	80,2	75,0	70,8	66,8	63,4	60,4
100	198,0	164,3	141,7	125,0	112,3	102,1	93,9	87,0	81,3	76,3	71,7	67,9	64,4
120	235,0	189,0	159,6	139,1	123,7	111,6	101,8	93,9	87,0	81,4	76,5	72,1	68,2
140	284,0	219,7	181,5	155,5	136,8	122,4	110,8	101,6	93,8	87,2	81,6	76,8	72,5

н-ундекан

30	108,2	97,5	89,1	82,2	76,4	71,5	67,3	63,6	60,3	57,5	54,8	52,5	50,4
40	115,7	103,7	94,0	86,2	80,0	74,6	70,0	66,0	62,3	59,3	56,6	54,2	51,7
60	134,0	117,9	105,7	96,1	88,5	81,8	76,3	71,6	67,5	63,8	60,7	57,9	55,3
80	155,0	133,7	118,0	106,2	96,7	89,0	82,6	77,1	72,3	68,3	64,6	61,5	58,5
100	181,0	152,4	132,6	117,7	106,2	97,0	89,5	83,2	77,6	72,9	68,8	65,3	62,1
120	214,0	175,4	149,4	131,2	117,3	106,2	97,4	90,0	83,7	78,4	73,7	69,6	65,9
140	253,0	201,1	168,1	145,2	128,6	115,5	105,1	96,5	89,4	83,5	78,2	73,6	69,6

Рассчитанные нами значения плотности по формуле (2) для *n*-октана хорошо согласуется с *PVT*-данными [17] (рис. 1), а значения β_s с данными [14] (рис. 2).

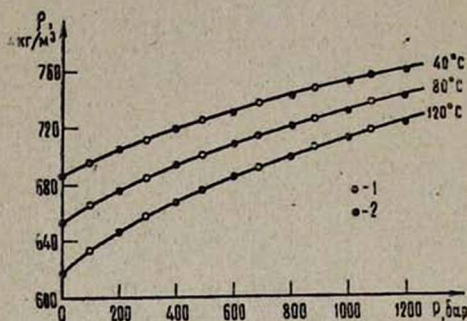


Рис. 1.

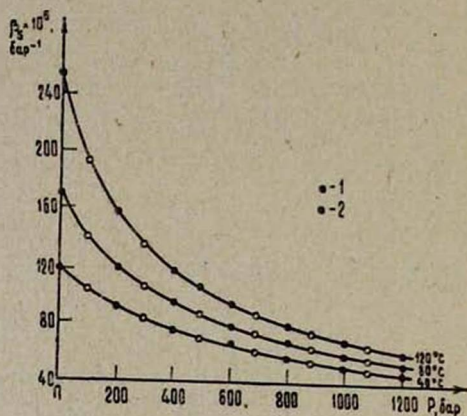


Рис. 2.

Из рис. 1 и 2 видно, что изотермы плотности и сжимаемостей имеют нелинейный характер.

Ереванский политехнический институт

Поступила 26.XII.1970

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Л. Бадалян, Н. Ф. Отпущенников, Ю. С. Шойтов, Сб. Ультразвук и физико-химические свойства вещества, вып. 4, 83, Курск, 1970.
2. H. Eden, E. Richardson, *Acustica*, 10, 309 (1960).
3. W. Wilson, D. Bradley, *JASA*, 36, 333 (1964).
4. A. Itterbeek, J. J. Thoen, A. Cops, W. Daev, *Physica*, 35, 162 (1967).
5. Ю. С. Шойтов, Г. М. Панькевич, Н. Ф. Отпущенников, *Теплоэнергетика*, 10, 76 (1968).
6. D. H. Bowman, C. C. Lim, R. A. Aziz, *Canad. J. Chem.* 46, 1175 (1968).
7. Г. М. Панькевич, Ю. С. Шойтов, Сб. Ультразвук и физико-химические свойства вещества, вып. 3, 36, М., 1969.
8. J. Thoen, E. Vangeel, W. Van Dael, *Physica*, 45, 339 (1969).
9. Н. Ф. Отпущенников, Сб. Ультразвук и физико-химические свойства вещества, вып. 4, 7, Курск, 1970.
10. Г. М. Панькевич, Сб. Ультразвук и физико-химические свойства вещества, вып. 4, 46, Курск, 1970.
11. Ю. С. Шойтов, Ж. Ф. Каримов, Ю. Ф. Мелихов, Сб. Ультразвук и физико-химические свойства вещества, вып. 4, 161, Курск, 1970.
12. Ю. А. Неручев, В. В. Зотов, Н. Ф. Отпущенников, Сб. Ультразвук и физико-химические свойства вещества, вып. 3, 25, М., 1969.
13. Ю. А. Неручев, В. В. Зотов, Н. Ф. Отпущенников, *ЖФХ*, 33, 2843 (1969).
14. J. W. M. Boelhouwer, *Physica*, 34, 484 (1967).
15. Н. Ф. Отпущенников, В. В. Зотов, Ю. А. Неручев, *Изв. вузов, Физика*, № 5, 123 (1970).
16. Н. Б. Варгафтик, *Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей*, Физматгиз, М., 1963.
17. J. W. M. Boelhouwer, *Physica*, 26, 1021 (1960).

ՁԱՅՆԻ ԱՐԱԳՈՒԹՅՈՒՆԸ ԵՎ ՀԵՂՈՒԿ n -ՕԿՏԱՆԻ, n -ԴԵԿԱՆԻ ԵՎ
 n -ՈՒՆԴԵԿԱՆԻ ՄԻ ՇԱՐՔ ԹԵՐՄՈԴԻՆԱՄԻԿ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ
 ԲԱՐՁՐ ՃՆՇՈՒՄՆԵՐԻ ԴԵՊՔՈՒՄ

Ա. Լ. ԲԱԴԱԼՅԱՆ, Ն. Ֆ. ՕՏՊՈՒՇՉԵՆՆԻԿՈՎ

Բերվում են հեղուկ n -օկտանի, n -դեկանի և n -ունդեկանի մեջ 30° -ից մինչև 140°C միջակայքում և մինչև 1200 կգ/սմ² ճնշման դեպքում ձայնի արագության չափման արդյունքները: Ձայնի արագության չափման սխալը կազմել է ± 2 մ/վրկ-ից ոչ ավելի:

Հաստատվել է, որ ձայնի արագության խորանարդը n -օկտանի, n -դեկանի և n -ունդեկանի մեջ գծային կախում ունի կիրառված ճնշումից:

Ըստ ձայնի արագության արժեքների հետազոտված նյութերի համար հաշվարկվել է խտությունը, ադիաբատ և իզոթերմ սեղմելիությունները շերմատիճանի իջեցման և ճնշման նշված միջակայքում: Ցույց է տրվել, որ այդ պարամետրերի իզոթերմները ոչ գծային բնույթ ունեն:

SOUND VELOCITY AND SOME THERMODYNAMIC
 CHARACTERISTICS OF LIQUID OCTANE, DECANE
 AND UNDECANE AT HIGH PRESSURES

A. L. BADALIAN, H. F. OTTUSHCHENNIKOV

The measurements data of sound velocity in liquid n -octane, n -decane and n -undecane at temperatures from 30°C to 140°C and at pressures up to 1200 kg/cm² are given. The error in the measurements of the sound velocity did not exceed ± 2 m/sec.

The cube of the sound velocity in octane, decane and undecane was found to depend linearly on the applied pressure.

For the values of sound velocity in these substances the density, adiabatic and isothermal compressibility in the indicated interval of temperature and pressure were calculated. The isotherms of these parameters were shown to have nonlinear character.